



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de la Subsistencia en el Valle de Aguascalientes
por medio de el Método de Elemento Finito (M.E.F.)

T E S I S

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias
con línea Terminal Mecánica de Suelos**

Presenta:

Ing. William Herbe Herrera León

Santiago de Querétaro, diciembre de 2005.

No. Adq. 470771
No. Título _____
Clas. JS
624.15136
H565a



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

ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA EN EL VALLE DE AGUASCALIENTES POR MEDIO DEL
MÉTODO DE ELEMENTO FINITO (M.E.F.)

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

ING. WILLIAM HERBE HERRERA LEÓN

Dirigido por:

DR. MOISÉS ARROYO CONTRERAS

SINODALES

Dr. Moisés Arroyo Contreras
Presidente

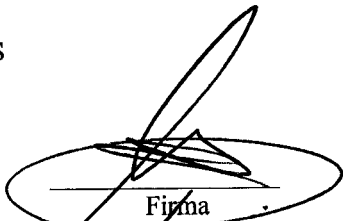
Dr. María de la Luz Pérez Rea
Secretario

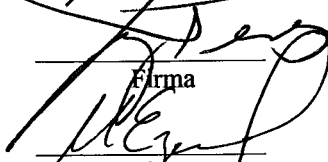
Dr. Mario Zermeño de León
Vocal

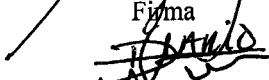
M. en C. Darío Hurtado Maldonado
Suplente

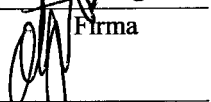
M. en I. Domingo Valencia Vallejo
Suplente


M. en I. Gerardo René Serrano Gutiérrez
Director de la Facultad
De Ingeniería

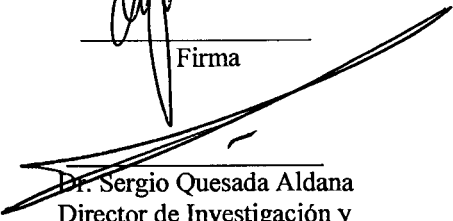

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Sergio Quesada Aldana
Director de Investigación y
Posgrado

RESUMEN

El agrietamiento de los suelos es un problema que se agrava cada vez más en México y en el mundo. Se ha observado que en muchos de los casos este fenómeno es provocado por la subsidencia la cual es generada por el aprovechamiento de los fluidos existentes en el subsuelo, la disolución de la roca caliza en algunas zonas o ambos. Se sabe que la correcta modelación y predicción de la evolución de los hundimientos en la zona urbana y en el Valle de Aguascalientes depende de la definición del basamento no compresible sobre el que están colocados los estratos compresibles o sedimentarios. En este trabajo se presentaron los resultados de nivelaciones topográficas al utilizar la técnica del GPS de precisión y las imágenes de satélite SAR para calcular los hundimientos a través del tiempo. El análisis de los perfiles del suelo con el método de elemento finito permitió identificar zonas de tensión y de desplazamientos horizontales los cuales serán útiles para la posterior generación de agrietamientos.

(Palabras clave: **Subsidencia, basamento rocoso hundimiento, sobreexplotación,**)

SUMMARY

Cracking of soils is a problem which is increasing more and more in Mexico and in the world. It has been observed that in many cases this phenomenon is caused by the subsidence which is generated by the extraction of the existent fluids in the underground, the breakup of the calcareous rock in some areas or both. The correct use of models and prediction of the evolution of settlements in the urban area and in the Valle de Aguascalientes depends on the definition of the basement non-compressed on which the compressed or sedimentary strata are placed. In this work the results of topographical levelings were presented using the technique of precision GPS and SAR satellite images to calculate the settlement through time. The analysis of soils profiles with the finite element method allowed identifying areas of tension and of horizontal displacements which will be useful for the later generation of crackings.

(Key words: **Subsidence, settlement, overexploitation, rock basement**)

**A Karina Ivett Verdín Amaro,
Por ser la razón de la
existencia del mundo.**

DR. GUADALUPE MOISÉS ARROYO CONTRERAS

GRACIAS POR TODO LO APRENDIDO

Agradezco igualmente a:

- ◆ **WILLIAM HERRERA BALAM Y ROSA MARÍA LEÓN CASTAÑEDA, mis padres, por que me ayudaron en todo lo que pudieron... y a veces más.**
- ◆ **LILIANA DE JESÚS Y SAYIL VIVIANA HERRERA LEÓN Y VICTOR Y PAOLA LEGGS HERRERA, por su presencia constante y sonante.**
- ◆ **EDUARDO MENA, ALBERTO GÓMEZ, CARLOS CHAVARÍN, ERIC ESMERALDA, FRANCISCO MAGALLANES, IVAN HERRERA, JORGE OROZCO, JOSÉ VÁZQUEZ, MARCO URIARTE, MICHELLE ZARATE, PEDRO ANDRADE, ROCIO OLVERA, TAMARA VALDEZ, VÍCTOR RAMÍREZ, por existir.**
- ◆ **PROFESORES DE LA MAESTRÍA, por sus enseñanzas.**

ÍNDICE

| | Página |
|--|----------|
| RESUMEN | I |
| SUMMARY | II |
| DEDICATORIAS | III |
| AGRADECIMIENTOS | IV |
| ÍNDICE | VI |
| LISTA DE TABLAS | VIII |
| LISTA DE FOTOGRAFÍAS | IX |
| LISTA DE FIGURAS | X |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1. Problema y justificación | 2 |
| I.2. Objetivos | 3 |
| I.3. Estructura de la investigación | 3 |
| II. ANTECEDENTES DE AGRIETAMIENTO Y SUBSIDENCIA | 5 |
| II.1. Subsistencia | 5 |
| II.2. Problemática | 6 |
| II.3. Descripción de hechos históricos a nivel mundial | 9 |
| II.4. Descripción de hechos históricos en México | 11 |
| II.5. Caso particular Valle de Aguascalientes | 13 |
| II.6. Estudios previos | 14 |
| II.7. Modelos existentes para la predicción de subsidencia | 19 |
| II.7.1. Modelos empíricos | 19 |
| II.7.2. Modelos semi-teóricos | 21 |
| II.7.3. Modelos teóricos | 22 |

| | |
|--|-----------|
| III GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA | 29 |
| III.1. Geología | 30 |
| III.1.1. La Sierra Madre Occidental | 31 |
| III.1.2. La Mesa Central | 32 |
| III.1.3. Estratigrafía | 32 |
| III.1.4. El Flanco Occidental | 33 |
| III.1.5. El Flanco Oriental | 35 |
| III.1.6. El Valle de Aguascalientes | 36 |
| III.1.7. Análisis Estructural | 37 |
| III.2. Estudios geofísicos | 38 |
| III.2.1. Ubicación de datos geofísicos | 38 |
| III.2.2. Secciones de resistividad | 39 |
| III.2.3. Mapa de anomalía de Bouguer | 44 |
| III.2.4. Mapa de campo magnético total reducido al polo | 47 |
| III.3. Estudio hidrogeoquímico e isotópico del valle | 49 |
| III.4. Niveles piezométricos | 49 |
| IV. MARCO TEÓRICO | 53 |
| IV.1. Teoría de la consolidación | 53 |
| IV.2. Método de Elementos Finitos | 55 |
| IV.2.1. Conceptos básicos en análisis de elementos finitos | 55 |
| IV.3. Teoría de la pérdida de volumen | 62 |
| IV.4. Interferometría | 67 |
| IV.4.1. Conceptos de ondas electromagnéticas | 67 |
| IV.4.2. Modelo interferométrico | 71 |
| IV.5. Relieve del basamento | 78 |

| | |
|---|------------|
| V. TÉCNICAS DE MEDICIÓN | 84 |
| V.1. Instrumentación topográfica | 84 |
| V.2. Mediciones con GPS de precisión | 85 |
| V.2.1. Técnica de levantamiento | 88 |
| V.2.2. Red geodésica nacional activa (RGNA) | 89 |
| V.3. Interferometría | 91 |
| V.3.1. Obtención de imágenes | 92 |
| V.3.2. Proceso Interferométrico, condiciones y dificultades | 94 |
| V.3.3. Descripción del software DIAPASON | 96 |
| V.3.4. Procesamiento con el software DIAPASON | 97 |
| VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS | 113 |
| VI.1. Mediciones Topográficas | 113 |
| VI.2. Mediciones con GPS de precisión | 121 |
| VI.3. Interferometría | 127 |
| VI.4. Análisis de los perfiles con Elemento Finito | 130 |
| VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 138 |
| VII.1. Conclusiones | 138 |
| VII.2. Recomendaciones | 139 |
| VIII. REFERENCIAS | 141 |

LISTA DE TABLAS

| | Página |
|--|--------|
| Tabla VI.1. Resumen de las mediciones de nivelación llevadas a cabo en monumentos colocados desde 1985. | 115 |
| Tabla VI.2 Resultados de la campaña 2003 en coordenadas UTM | 122 |
| Tabla VI.3. Resultados de la campaña del 2004 en coordenadas UTM | 123 |

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

| | Página |
|---|--------|
| Foto II.1 Daño a tubería de agua potable, Municipio de Aguascalientes, Ags., México. | 7 |
| Foto II.2. Ruptura de tubería de drenaje, Sta. María Magdalena, Querétaro. | 8 |
| Foto II.3. Hundimiento del Valle de San Joaquín en California a través del tiempo. | 10 |
| Foto II.4. Dique en el lago Okeechobee, Everglades, Florida (Galloway et al., 1999) | 11 |
| Foto V.1 Testigo utilizado | 86 |
| Foto V.2. Medición en Cd. De Aguascalientes Tercer anillo Periférico | 87 |
| Foto V.3. Medición en municipio de Rincón de Romos | 87 |
| Foto VI.1. Hundimiento del terreno al norte y oriente de la Ciudad. | 119 |
| Foto VI.2. Hundimiento al norte y oriente de la Ciudad. | 120 |
| Foto VI.3. Puertecito de la Virgen, desnivel 70 cm., abril del 2003. | 120 |
| Foto VI.4. Rincón de Romos, abril del 2003. | 121 |

LISTA DE FIGURAS

| | | Página |
|-----------------------|--|--------|
| Figura II.1. | Desplazamientos obtenidos aplicando la teoría de pérdida volumétrica. | 16 |
| Figura II.2 | Desplazamientos calculados con el método de elemento finito. | 16 |
| Figura II.3. | Deformaciones horizontales obtenidas con la Teoría de la pérdida volumétrica. | 17 |
| Figura II.4. | Deformaciones horizontales por medio de elementos finitos. | 17 |
| Figura II.5. | Grieta de abertura según la mecánica de fracturas. | 18 |
| Figura II.6. | Ajuste con curva cuadrática en Niigata Japón. | 20 |
| Figura II.7. | Ajuste de curva exponencial en Niigata, Japón. | 21 |
| Figura II.8. | Relación log-log entre subsidencia y años. | 21 |
| Figura II.9. | Mecanismo de formación de grietas en la superficie del suelo cuando desciende el nivel piezométrico. Estado inicial (a) grietas en el suelo (b) figuras tomadas de Pacheco J. (2003) | 23 |
| Figura III.1. | Aspectos geológicos generales del Estado (INEGI, 2002). | 30 |
| Figura III.2. | Columnas estratigráficas aflorantes (esquemáticas) en los flancos occidental (A) y oriental del Valle de Aguascalientes | 34 |
| Figura III.3. | Columnas estratigráficas aflorantes (esquemáticas) en los flancos occidental (A) y oriental del Valle de Aguascalientes | 35 |
| Figura III.4. | Esquema estructural en horsts y grabens, similar al Valle de Aguascalientes. | 37 |
| Figura III.5. | Estructuras en horsts y grabens en la parte centro-occidental de la República Mexicana | 38 |
| Figura III.6. | Ubicación de los perfiles gravimétricos. | 39 |
| Figura III.7. | Secciones de resistividad a 1 km. | 40 |
| Figura III.8. | Secciones de resistividad a 3 km. | 40 |
| Figura III.9 | Sección de resistividad, perfil SN-2. | 41 |
| Figura III.10 | Curvas de anomalía de Bouguer y su gradiente. | 44 |
| Figura III.11. | Anomalía de Bouguer del Valle. | 46 |
| Figura III.12. | Campo magnético total reducido al polo. | 48 |
| Figura III.13. | Niveles Piezométricos 1968 | 50 |
| Figura III.14. | Niveles Piezométricos 1984 | 51 |
| Figura III.15. | Niveles Piezométricos 1992 | 51 |
| Figura III.16. | Niveles Piezométricos 2002 | 52 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Figura IV.1. | Ejemplo de discretizaciones de elementos finitos | 56 |
| Figura IV.2. | (a) Deformaciones dentro de un medio infinito, (b) esfuerzos generados en una superficie considerada | 63 |
| Figura IV.3. | (a) Imagen negativa de la extracción simétrica a la superficie; (b) Cancelación de esfuerzos normales en la superficie | 64 |
| Figura IV.4. | Punto "P" donde se calcula el desplazamiento debido a una extracción y su imagen | 65 |
| Figura IV.5. | Series infinitas de imágenes para considerar una frontera rígida. | 66 |
| Figura IV.6 | Ondas electromagnéticas | 68 |
| Figura IV.7. | Variación del campo eléctrico en el tiempo. | 69 |
| Figura IV.8. | Efecto del tiempo y la distancia en la energía | 71 |
| Figura IV.9. | Modelo geométrico del sistema interferométrico | 72 |
| Figura IV.10 | Colección geométrica diferencial | 77 |
| Figura IV.11. | Curvas de nivel del basamento somero (Arroyo et al, 2002). | 80 |
| Figura IV.12. | Isométrico del basamento del Valle de Aguascalientes. | 81 |
| Figura V.1. | Red Geodésica Nacional Activa (RGNA). | 90 |
| Figura V.2. | Evolución del asentamiento del terreno en la estación fija "INEG". | 91 |
| Figura V.3. | Software Descw | 93 |
| Figura V.4. | Ruta de acceso al ejecutable Sar_to_disk | 99 |
| Figura V.5. | Fichero descriptor para el software TAUX | 101 |
| Figura V.6. | Fichero descriptor para el software DOPPLER | 102 |
| Figura V.7. | Fichero Orbcreate | 105 |
| Figura V.8. | Script de datos diapason | 106 |
| Figura V.9. | Fichero descriptor del SAR | 108 |
| Figura V.10. | Fichero descriptor de la geometría de la imagen. | 109 |
| Figura V.11 | Fichero descriptor del DEM | 111 |
| Figura VI.1 | Croquis de localización del primer monumento | 115 |
| Figura VI.2. | Mediciones llevadas a cabo en el primer monumento. | 116 |
| Figura VI.3. | Croquis de localización del quinto monumento. | 116 |
| Figura VI.4. | Mediciones realizadas en el quinto monumento. | 117 |
| Figura VI.5. | Croquis de localización del sexto monumento. | 117 |
| Figura VI.6. | Mediciones realizadas en el sexto monumento. | 118 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Figura VI.7. | Perfil a lo largo de la Av. Adolfo López Mateos con las mediciones en los monumentos primero y sexto, descritos en las figuras anteriores. | 119 |
| Figura VI.8. | Carta de hundimientos en el Valle de Aguascalientes | 125 |
| Figura VI.10. | Ubicación de testigos en el valle. | 126 |
| Figura VI.11. | Curvas de hundimiento en centímetros, resultados de GPS. | 127 |
| Figura VI.12. | Imagen del 26 MARZO 1996. | 128 |
| Figura VI.13. | Imagen del 27 AGOSTO 2002. | 129 |
| Figura VI.14 | Imagen 21 ABRIL 1996. | 129 |
| Figura VI.15 | Imagen 20 MAYO 2001. | 130 |
| Figura VI.16 | Perfiles en el basamento. | 132 |
| Figura VI.17 | Perfil A-A'-A'' | 133 |
| Figura VI.18 | Perfil B-B'-B'' | 134 |
| Figura VI.19. | Perfil C-C'-C'' | 134 |
| Figura VI.20. | Perfil D-D'-D'' | 135 |
| Figura VI.21. | Perfil E-É'-E'' | 136 |
| Figura VI.22. | Perfil F-F'-F'' | 137 |

I. INTRODUCCIÓN

El agrietamiento y fallamiento de los suelos es un problema que se agrava cada vez más en México y en el mundo. En muchos de los casos se ha observado que este fenómeno es provocado por la subsidencia, la cual es generada a su vez, por la extracción de los fluidos existentes en el subsuelo o por la disolución de la roca caliza o ambas, por mencionar. Estos fluidos se aprovechan en la generación de energía o bien el abastecimiento de agua en zonas urbanas o para riego de extensas zonas de cultivo.

En México se presenta este problema en ciudades asentadas sobre valles, como la Ciudad de México, Aguascalientes, Celaya, Apaseo el Grande, Irapuato, Morelia, Querétaro, entre otras. Estas ciudades que van de tamaños de medio a grande sufren este fenómeno debido a que la demanda de agua de los acuíferos ha estado en constante crecimiento, producto del rápido aumento de la población, así como al incremento de las actividades industriales y agropecuarias.

El vertiginoso abatimiento de los niveles piezométricos ha inducido la consolidación del suelo, que combinado con basamentos rocosos irregulares han producido la aparición de una gran cantidad de grietas dentro y en los alrededores de las ciudades.

Con la finalidad de analizar el fenómeno y prever comportamiento del mismo, así como los daños provocados por éste, se utiliza el método del Elemento Finito, que permite simular el comportamiento de una masa de suelo sujeta al efecto de un abatimiento de su nivel freático.

I.1.- Problema y justificación

A través de los años el estudio de la subsidencia ha evolucionado a grandes pasos y existen muchos estudios antecedentes a este trabajo como los realizados por, Manilla A. (1994), Valencia D. (1995), E. Rojas, J. Arzate y M. Arroyo (2002), en este último se utilizan ya las teorías de la pérdida de volumen y de consolidación dimensional para analizar la aparición de agrietamientos debidos a la extracción de agua en un basamento con forma sinusoidal y doble sinusoidal. En este trabajo cuando se analizaron las deformaciones del suelo se descubrieron zonas de tensión, zonas que son potencialmente propicias para la aparición de los agrietamientos.

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. Este trabajo añade nuevas experiencias en la modelación del fenómeno, que aunados a los estudios previos serán de gran utilidad para otras ciudades que sufren del mismo fenómeno y aún no han sido tratados.

Para tratar de resolver el problema esta investigación se centra en el uso de herramientas computacionales (software), la utilización de técnicas de percepción remota como son el caso de GPS y métodos SAR (*Synthetic Aperture Radar*) así como el método de elemento finito, todo esto para aterrizar en un modelo conceptual del valle que pueda satisfacer sus necesidades de predicción de agrietamientos.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo que permita analizar el comportamiento de la subsidencia, utilizando el método de elemento finito, con el fin de entender y pronosticar la aparición y desarrollo de grietas provocadas principalmente por la extracción de agua en el valle de Aguascalientes.

Con la modelación y pronóstico propuestos, se podrán prever e identificar las zonas de alto riesgo del valle.

1.3. Estructura de la investigación

Para alcanzar los objetivos mencionados la estructura de la investigación será como se explica a continuación.

En el capítulo Dos se tratarán los antecedentes del problema a nivel mundial, regional y puntual, así como la explicación de lo que es la subsidencia, la problemática que genera el agrietamiento y el hundimiento de una masa finita de suelo, se explicara también como algunos investigadores han tratado de predecir la subsidencia con los modelos empíricos, semi-teóricos y teóricos.

En el capítulo Tres se hablara sobre la Geología, la Geofísica, la Hidrogeoquímica y la Hidrología y de cómo éstas disciplinas nos permiten una mejor

comprensión del comportamiento de la subsidencia en el valle, así como información que nos es útil para poder calibrar los modelos y nos proporciona parámetros para que el análisis sea lo mas cercano a la realidad.

En el cuarto capitulo se explicaran las diferentes teorías y métodos en las cuales está basada esta investigación, tales como la teoría de consolidación y el método de elemento finito.

El quinto capitulo se tratará sobre la metodología empleada y técnicas de medición, se explicarán los principios básicos de los métodos de percepción remota, las imágenes de radar, interferometría y métodos tradicionales como estaciones totales y niveles de precisión. Por otra parte cabe mencionar que en este capitulo se describirá a detalle todas las hipótesis generadas para este trabajo de investigación.

En el capitulo sexto se discutirá detalladamente la aplicación y el análisis de los resultados de el modelo y de las técnicas de medición.

En el séptimo y último capitulo se entregaran las conclusiones y recomendaciones generales y particulares de este trabajo, así como también se presentarán las recomendaciones necesarias para los trabajos que se realicen en un futuro y otras mas para la utilización de estas técnicas en lugares donde se presenten problemas de esta índole.

II. ANTECEDENTES DE AGRIETAMIENTO Y SUBSIDENCIA

II.1. Subsistencia

Antes de entrar en materia es necesario definir el término de subsidencia en concordancia a los diferentes estudios sobre el tema.

En el Diccionario de la Real Academia Española se define Subsistencia (del latín *subsidentia*, sedimento) como el "hundimiento o asentamiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras".

Conforme a Galloway *et al.* (1999), la subsidencia "es el hundimiento o asentamiento de la superficie de la tierra debido a diferentes causas, como extracción de fluidos, de minerales y disolución de rocas, generalmente el hundimiento es a gran escala. Usualmente el término se refiere al movimiento vertical descendente, pero sin descartar que puedan presentarse pequeños movimientos horizontales. El término no incluye derrumbes que tienen grandes desplazamientos horizontales, ni asentamientos de rellenos artificiales, ni deslizamientos del terreno en laderas".

II.2. Problemática

Como ya se menciona la subsidencia es el hundimiento o asentamiento de la superficie de la tierra debido a diferentes causas, generalmente a gran escala, ya sea por extracción de fluidos del subsuelo, extracción de materiales, disolución de la roca caliza o de materiales orgánicos, etc. Sin embargo, el hundimiento no es uniforme a causa de la irregularidad del basamento, lo que causa efectos o fenómenos secundarios, como el agrietamiento o fallamiento del suelo, que puede a su vez causar daños a las obras civiles.

Cuando existen hundimientos de considerable magnitud en una zona, ésta corre el riesgo de transformarse en zona de inundación, que puede producir pérdidas materiales, impactos sociales y psicológicos en la población.

En algunos casos de poblaciones o industrias cercanas del océano, afectadas por la subsidencia, donde el nivel de la superficie está más abajo que el nivel del mar, hay que construir obras de protección contra inundaciones. En estos casos se agudiza el problema, dado que las zonas costeras están sujetas a fenómenos meteorológicos como huracanes y tifones; en caso de maremotos sería catastrófico, con pérdidas económicas y humanas.

En las zonas urbanas con alto riesgo de agrietamientos y de hundimientos se agudiza el problema socioeconómico cuando afecta asentamientos de casas de interés social. Este tipo de vivienda generalmente es el único patrimonio de la mayoría de las familias.

Estos agrietamientos afectan también la infraestructura urbana, tales como, caminos, vialidades y monumentos históricos, así como a líneas vitales como redes

subterráneas de drenaje y de agua potable, como se aprecia en la foto I.3 donde se tienen fugas de agua por la ruptura del tubo.



Foto II.1 Daño a tubería de agua potable, Municipio de Aguascalientes, Ags., México.

Es probable que cuando existen rupturas de tubería de drenaje en o cerca de agrietamientos, los mantos acuíferos pueden estar expuestos a la contaminación por infiltración de los desechos, suponiendo que el agrietamiento esté en comunicación con los depósitos subterráneos de agua, como se puede apreciar en la foto II.2.



Foto II.2. Ruptura de tubería de drenaje, Sta. Maria Magdalena, Querétaro.

Éstos son algunos de los problemas más tangibles en zonas urbanas, ya que también existen otros riesgos en la infraestructura energética, como tuberías para transportar hidrocarburos o gas que generalmente están fuera de estas zonas, pero también susceptibles de ser afectadas por los hundimientos diferenciales del suelo, provocados por la extracción de agua de uso agro-industrial.

II.3. Descripción de hechos históricos a nivel mundial.

La subsidencia como tal se ha reportado desde la década de 1920 en diferentes partes del mundo. En Shangai empezó en 1921 cuando se formó una depresión en forma de plato, que alcanzó un máximo hundimiento de 2.36 m, a una velocidad de 200 mm por año, fenómeno que disminuyó hasta que la extracción de agua se redujo en 1963 (Guy, 1991). Otro caso es el que se muestra en la Foto II.3, donde se puede apreciar el hundimiento del Valle de San Joaquín en California, EU, a través del tiempo, esta foto es una de las fotos más famosas con respecto al fenómeno de subsidencia.

La subsidencia 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, petróleo o se extrae vapor con fines energéticos. Uno de los grandes retos que impone este fenómeno es la predicción del comportamiento de los hundimientos y en su caso, la aparición y desarrollo de grietas.



Foto II.3. Hundimiento del Valle de San Joaquín en California a través del tiempo.

En algunos lugares como en el sur de Nueva Jersey, específicamente en la costa Este, donde además del hundimiento de la superficie del suelo se ha reportado una elevación del nivel del mar, por lo tanto, la subsidencia puede provocar también un incremento en la frecuencia y gravedad de las inundaciones (Sun, 1999).

En lugares donde el nivel del suelo es muy cercano al nivel del agua, existe riesgo de subsidencia debido a la probabilidad de inundaciones, como en el dique en el lago Okeechobee, Everglades, Florida (Foto II.4).

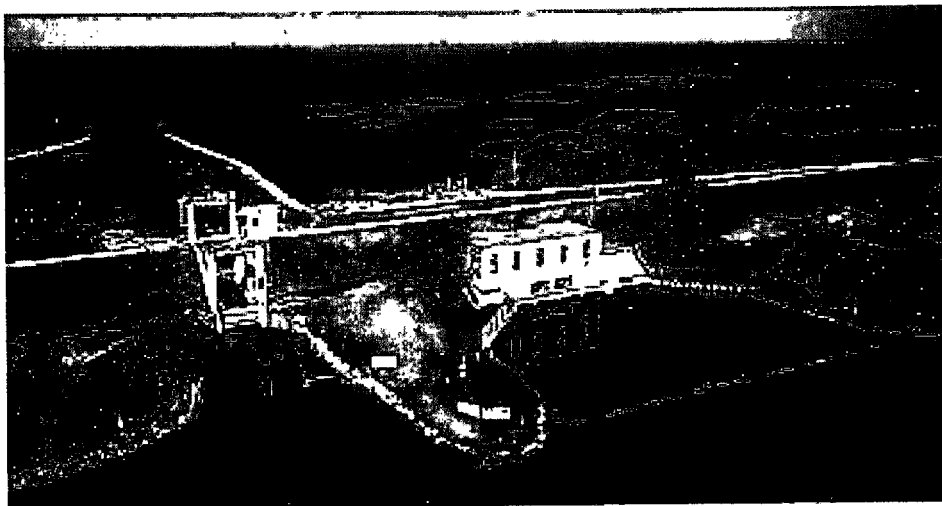


Foto II.4. Dique en el lago Okeechobee, Everglades, Florida (Galloway *et al.*, 1999)

Otro problema relacionado con la subsidencia, es la aparición de grietas en la superficie del suelo. Las grietas suelen aparecer en zonas agrícolas y urbanas causando daños en edificios, caminos, canales y otras obras civiles. De ahí que resulte de suma importancia la predicción de agrietamientos con objeto de diseñar estructuras adecuadas o bien construir en lugares donde la influencia del agrietamiento esté fuera de la posibilidad de dañarlas.

II.4. Descripción de hechos históricos en México

En México el problema se presenta en 1925 durante la construcción de las compuertas del canal principal de desagüe, en el rumbo de San Lázaro, de la Cd. de México, se estaban presentando deformaciones.

Se demuestra que el problema era el resultado de la subsidencia general del valle, pero también se creía que esta subsidencia era producto de las cargas generadas por la construcción que se llevaba a cabo (R. Gayol 1925), aunque efectivamente es un factor que puede agravar el problema no es la causa principal.

Para 1948 Nabor Carrillo demostraba que la causa principal de los hundimientos se debían a la extracción de agua del subsuelo por pozos de uso público (N. Carrillo 1948).

La subsidencia en la ciudad de México se conoce desde 1891 en la parte vieja de la ciudad, y desde 1952 para el resto, teniendo su máximo en el año de 1978 con un valor de 9 m en un área aproximada de 225 km² (*Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*, 1984). En el período de 1970-1973, el 75% de la subsidencia total de la ciudad de México se debió a la consolidación de los estratos arcillosos, mientras que el 25% restante se debió a la consolidación de los materiales del estrato profundo que constituyen el acuífero. El peso de los edificios contribuye solamente del 10 al 15% de la subsidencia total. Debido a todo lo anterior, en el año de 1972 se desarrolló un modelo digital para simular la subsidencia que se presenta en la ciudad de México (Figuroa Vega, 1973 y 1977).

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

II.5.Caso particular Valle de Aguascalientes

Territorialmente el estado de Aguascalientes es una de las entidades más pequeñas del país. Con una superficie de 5,197 kilómetros cuadrados, ocupa el 0.3% del territorio nacional (INEGI, 2002). Sin embargo, por su ubicación geográfica y sus características físicas, es una de las entidades de desarrollo más importantes de la República Mexicana. Este desarrollo se polariza a lo largo y ancho del Valle de Aguascalientes.

El estado se localiza en la provincia geológica conocida como el Cinturón Volcánico Mexicano donde se formaron estructuras geológicas tipo graben, las cuales se rellenaron con suelos granulares y produjeron valles fértiles. En estos valles crecieron centros urbanos, industriales y agrícolas, lo cual provocó la sobreexplotación de los mantos acuíferos para satisfacer las necesidades de agua para el desarrollo.

A partir de 1980 se ha venido observando la formación de grietas en la ciudad de Aguascalientes y otras poblaciones de sus alrededores (Jesús María, Puertecito de la Virgen, Paso Blanco, Ciudad de los Niños y El Chicalote) todas ellas localizadas en un relleno aluvial del cuaternario. La dirección de estas grietas coincide con la orientación general del Valle con desplazamientos verticales máximos de un metro o más. Invariablemente, salvo pocas excepciones, el bloque hundido de la grieta se localiza hacia el poniente de la ciudad, es decir, hacia el río San Pedro. En el límite este de la ciudad se localiza una falla normal con rumbo aproximado N-S, la cual se considera que dio origen al graben de Aguascalientes. A partir de esta falla, la superficie de la ciudad presenta una pendiente Este-Oeste mayor al 1%. (Aranda Gómez et. Al. 1985).

II.6. Estudios previos

Los agrietamientos de suelo generalmente aparecen en terrenos aluviales que han sufrido un abatimiento importante en su nivel freático y bajo los cuales existen basamentos rocosos irregulares, como los han observado Holtzer (1976), Larson (1984), Robinson y Peterson (1962).

Jashens y Holtzer (1980) hacen las siguientes observaciones de campo de algunos estados sureños de Estados Unidos, respecto al agrietamiento por extracción de agua:

- Generalmente coinciden con fallas geológicas sepultadas por aluviones.
- Pueden alcanzar varios kilómetros de extensión,
- Aparecen súbitamente en la superficie del terreno en donde se presentaron asentamientos diferenciales previos.
- Generalmente aparecen en la zona donde la pendiente de los asentamiento alcanza su valor máximo,
- Nuevos agrietamientos pueden aparecer en dirección paralela a los primeros,
- Algunos agrietamientos se interceptan pero nunca se cruzan.
- El ancho inicial del agrietamiento puede ser de uno a dos centímetros, sin embargo, generalmente se ensanchan debido a la erosión.
- La deformación de tensión necesaria para el desarrollo de un agrietamiento depende de las propiedades mecánicas del suelo, sin embargo generalmente varía entre 0.1 a 0.4%,
- La evolución de un agrietamiento depende de la velocidad a la que se abate el nivel freático. Si éste declina rápidamente, los agrietamientos también se desarrollan rápidamente.

De acuerdo a lo reportado por Rojas et al. (2002), el incremento de esfuerzos efectivos en la masa de suelo debido a una disminución de su presión de poro generado por el abatimiento del nivel de aguas freáticas, provoca la consolidación de la masa de suelo. Si el basamento rocoso es irregular, entonces los desplazamientos de las partículas de suelo se realizan no sólo en la dirección vertical sino también en la horizontal. Esto puede provocar la aparición de zonas de tensión dentro de la masa de suelo. Para poder determinar con precisión la localización de estas zonas es necesario conocer los desplazamientos de las partículas de suelo confinadas por un basamento irregular. Estos desplazamientos se pueden obtener por medio de la teoría de pérdida volumétrica desarrollada por Sagaseta (1987).

Valiéndose de esta teoría Rojas et al. (2002) realiza un código computacional para el análisis de la subsidencia en un basamento de forma sinusoidal.

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 (Ochoa G, 2003).

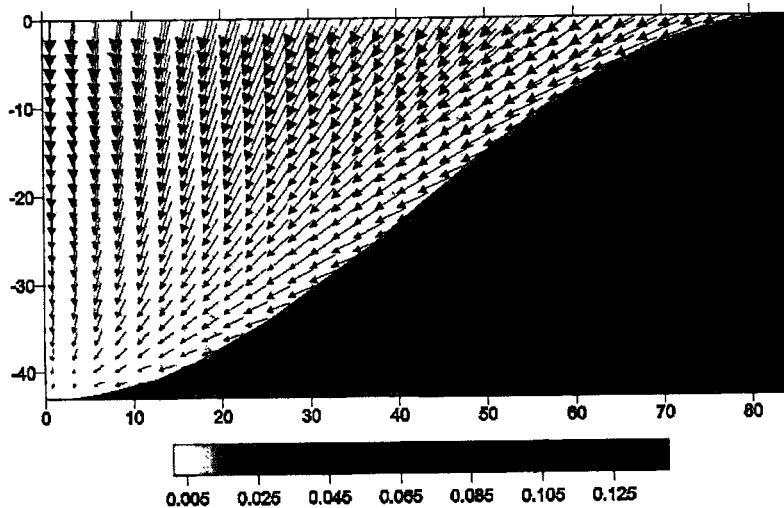


Figura II.1. Desplazamientos obtenidos aplicando la teoría de pérdida volumétrica.

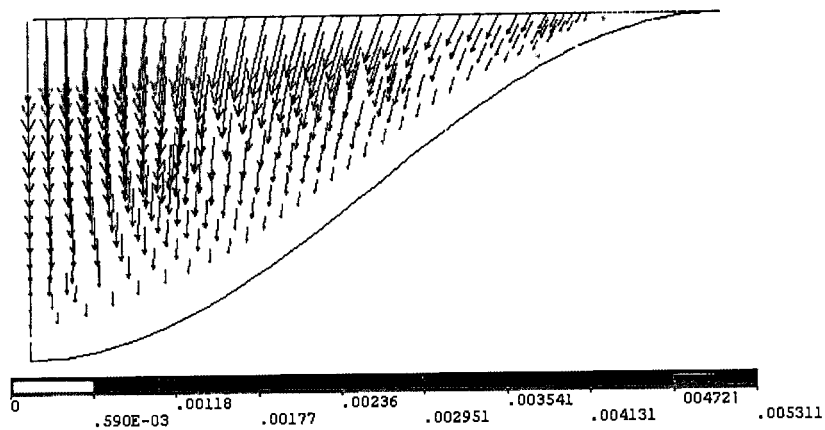


Figura II.2 Desplazamientos calculados con el método de elementos finitos.

Si se comparan estas figuras se puede observar que los máximos se ubican en la misma zona, las direcciones son similares en ambos casos y las magnitudes son aproximadamente correspondientes, más no iguales, esto por las características que se usaron en la modelación con elementos finitos. También se puede decir que aplicando 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 puede reducir los valores muy cercanos a cero, aunque no iguales a cero.

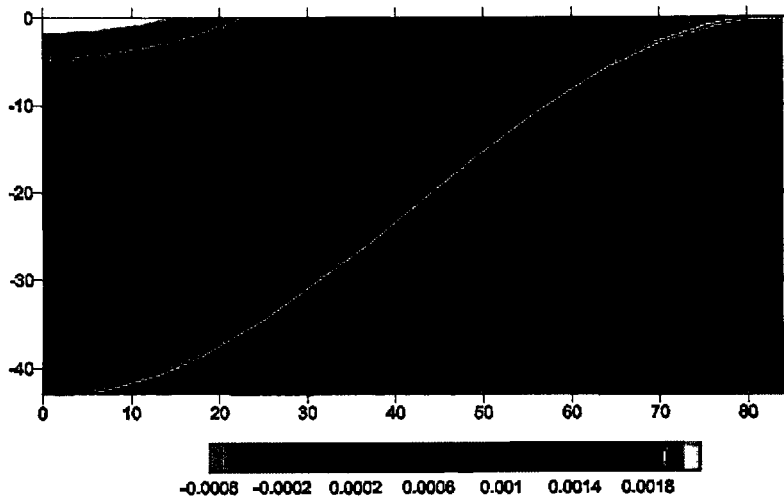


Figura II.3. Deformaciones horizontales obtenidas con la Teoría de la pérdida volumétrica.

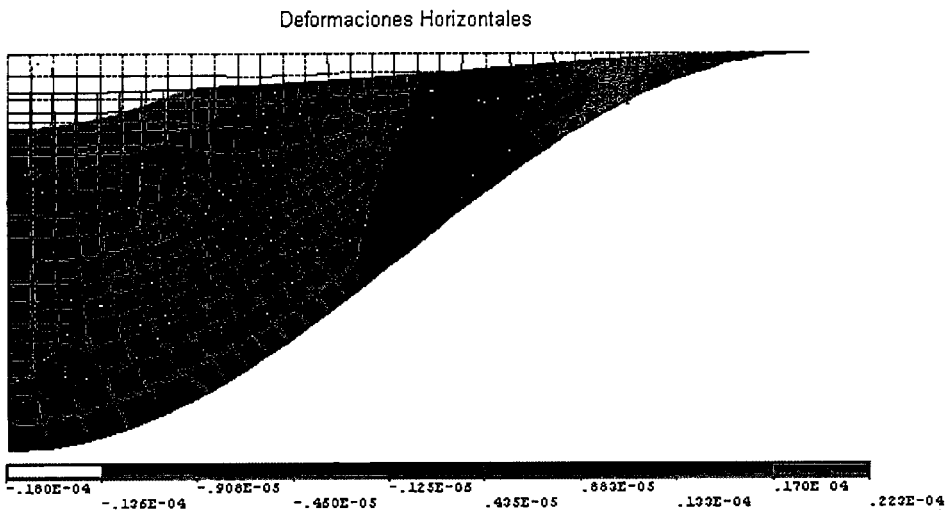


Figura II.4. Deformaciones horizontales por medio de elementos finitos.

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 II.4) 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 pueden aparecer agrietamientos como el presentado en la Figura II.5

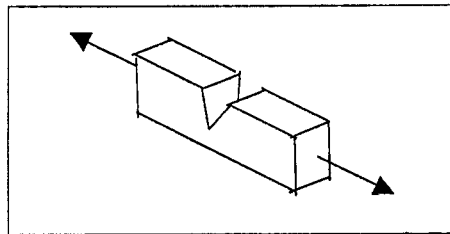


Figura II.5. Grieta de apertura según la mecánica de fracturas.

Cabe mencionar que la mayoría de los estudios e investigaciones consultadas sobre el tema, son llevados a cabo por diferentes especialistas, trabajando en forma casi independiente, con poca o nula interacción: hidrólogos, geotecnistas, geólogos, geofísicos, hidro-geo-químicos, ingenieros, entre otros.

Conociendo la complejidad del fenómeno, un grupo multidisciplinario de profesores investigadores de la UAQ y UNAM, principalmente, han estado estudiando este fenómeno desde el 2000, así como su impacto en las construcciones, en los valles de Querétaro, Celaya, Gto. y Aguascalientes, Ags. Los resultados más importantes están reportados en el libro editado por Arroyo y Zermeño (2003).

En el año 2004 se llevo a cabo una nivelación topográfica burda de la ciudad de Aguascalientes (Llamas C. 2004), el equipo utilizado fue un nivel de precisión, esto puede darnos datos muy útiles, más no deben ser tomados como valores absolutos ya que la precisión obtenida en este tipo de nivelaciones no es la mejor para poder medir la subsidencia.

Como colaborador en estos proyectos de investigación, es que se sustenta la presente propuesta de trabajo de tesis, cuyo objetivo principal, es completar los trabajos inconclusos de modelación medición topográfica o GPS (geoposicionamiento) e interferometría, entre otros temas

II.7. Modelos existentes para la predicción de la subsidencia

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

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: modelos empíricos, semi-teóricos y teóricos.

En cualquier de estos modelo es necesario tener los 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 de poca utilidad.

I.7.1. Modelos empíricos

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

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

En las figuras II.6 a II.8 se muestran ajustes de curvas cuadrática, exponencial, logarítmica, etc. para diferentes regiones que presentan hundimientos (figuras tomadas de UNESCO, 1994).

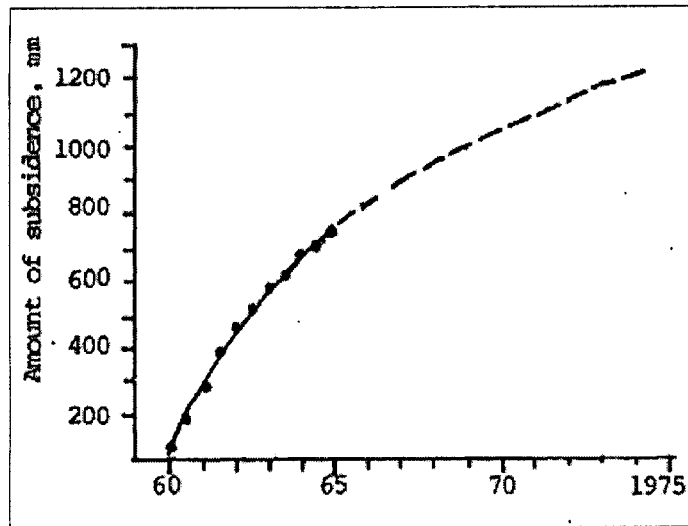


Figura II.6. Ajuste con curva cuadrática en Niigata Japón.

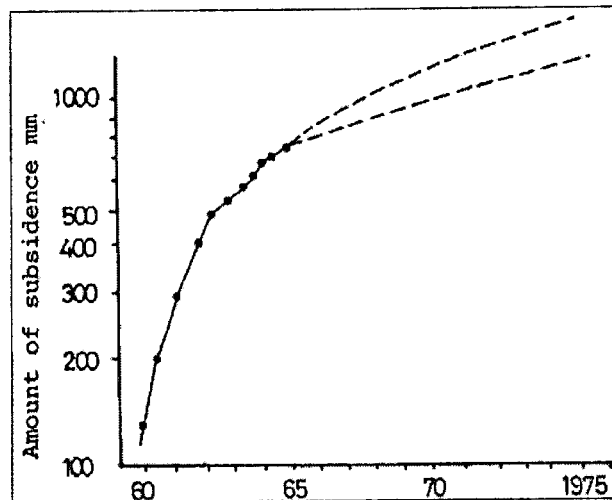


Figura II.7. Ajuste de curva exponencial en Niigata, Japón.

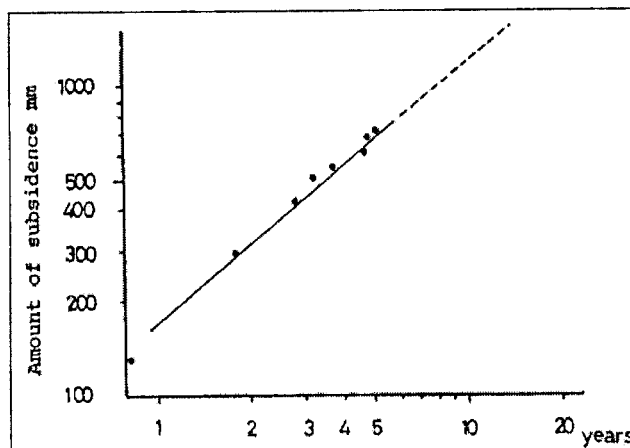


Figura II.8. Relación log-log entre subsidencia y años.

II.7.2. Modelos semi-teóricos

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

espesores de suelo compresible.

Actualmente se sabe que cuando se cumplen las siguientes condiciones, se presenta el fenómeno de hundimiento y agrietamiento del suelo (Rojas, E. et. al, 2004):

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

De acuerdo con los datos recabados hasta ahora, el Valle de Aguascalientes cumple con estas tres condiciones. El fenómeno inicia como un hundimiento del terreno en la zona donde aparecerá la grieta. Posteriormente aparecen las grietas de tensión y finalmente se presenta el fallamiento del suelo, que es cuando se genera un desplazamiento entre los labios de la grieta.

El mecanismo básico para la formación de estas grietas es el deslizamiento relativo de los materiales que conforman el acuífero, generándose tensiones que pueden propagarse a la superficie, en donde se manifiestan en forma de asentamientos y rupturas bruscas, figura II.9.

También se considera que pueden producirse agrietamientos profundos en

las zonas de bombeo intenso cuando existe una variación brusca en los abatimientos piezométricos y/o de la compresibilidad lateral de los materiales a la profundidad del bombeo.

Relacionando la subsidencia ya sea con el tiempo, con los niveles piezométricos y/o con el espesor de los estratos compresibles, se puede hacer una interpolación de datos a futuro y así tener idea del máximo hundimiento esperado del suelo y del máximo desplazamiento esperado entre los labios de la grieta (falla).

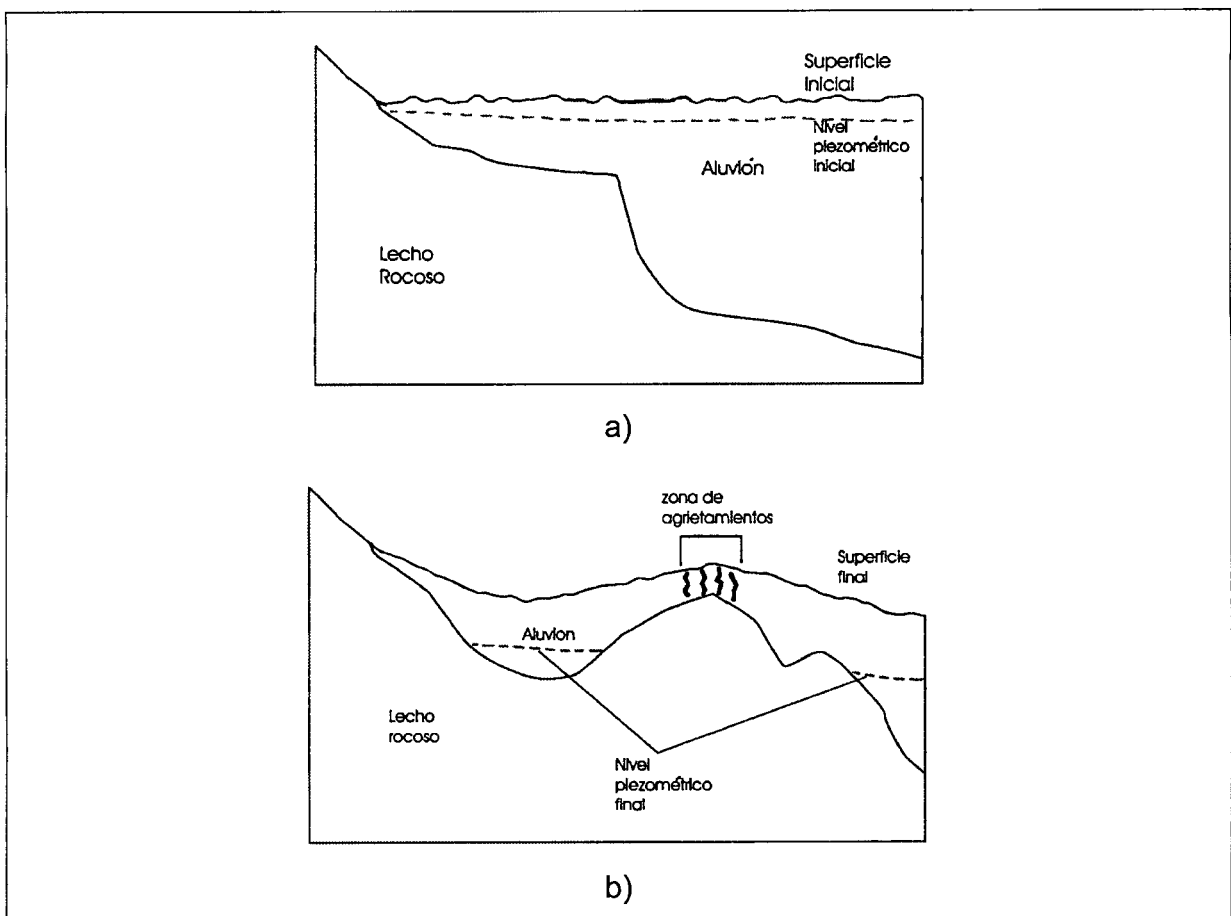


Figura II.9. Mecanismo de formación de grietas en la superficie del suelo cuando desciende el nivel piezométrico. Estado inicial (a), Grietas en el suelo (b), figuras tomadas de Jesús P. (2003).

I.7.3. Modelos teóricos

Los modelos teóricos son modelos que incluyen propiedades mecánicas de los suelos para predecir su comportamiento, como se menciona anteriormente, estas propiedades son muy difíciles de obtener y analizar de manera que sean representativas de toda una zona, además, el incluir todas las variables en un solo modelo analítico puede resultar muy complicado. Por lo que generalmente, los modelos teóricos hacen una serie de hipótesis simplificadoras, con la finalidad de facilitar el análisis, la idea es que estas hipótesis hagan que el proceso sea práctico intentando afectar lo menos posible a los resultados; nunca hay que perder de vista cual es el nivel de precisión necesario. Así se pueden considerar algunas o todas las suposiciones siguientes (UNESCO 1994):

- 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 mecánico 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, entre otras.

Existen principalmente dos tipos de modelos teóricos que se han encontrado para analizar la subsidencia: - los que relacionan la compresibilidad de los materiales con el potencial de subsidencia; y - los que usan ecuaciones diferenciales para modelar el flujo de agua subterránea en sistemas permeables-poco permeables.

Relación entre la compresibilidad con la subsidencia potencial. Con la prueba de consolidación desarrollada por 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 con 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 (Ochoa, G., 2003).

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, (UNESCO

1994). Estas leyes están representadas a través de las expresiones II.1 y II.2, siguientes:

$$\operatorname{div}(\gamma \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Donde: div es el operador de divergencia,
 γ la densidad del agua, y
 \mathbf{v} el vector de velocidad de flujo.

$$\mathbf{v} = -k \cdot i \quad (\text{II.2})$$

Donde: k es la conductividad hidráulica,
 i el gradiente hidráulico (gradiente de la carga hidráulica h).

La fórmula II.1 significa que la masa de agua dentro de la porción de un suelo saturado permanece constante.

Al combinar estas dos leyes y al despreciar la variabilidad de γ y k se obtiene la Ecuación de Laplace, ec. II.3, siguiente:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{II.3})$$

Pero cuando se tiene un flujo no establecido, la ecuación II.1. ya no es válida, por que cierta cantidad de agua es almacenada o extraída de un volumen específico de suelo y la ecuación II.3. de Laplace tiene que ser modificada, lo que da como resultado la ecuación de flujo no establecido, ec. II.4, siguiente:

$$k\nabla^2 h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11.4)$$

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 11.4. se reduce a la ecuación 11.5, que representa un acuífero horizontal, homogéneo, de espesor "b" y flujo horizontal:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\nu} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11.5)$$

Donde: $S = b S_s$ es un coeficiente de almacenamiento,
 $T = b k$ la Trasmisibilidad,
 $\nu = T / S$ la Difusividad hidráulica.

En un estrato compresible de baja permeabilidad, donde el flujo se supone vertical, la ecuación 11.5 se puede reducir a la ecuación de flujo vertical, siguiente:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\nu} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11.6)$$

Las ecuaciones de 1.1 a 1.6 se pueden consultar en el MANUAL de la UNESCO (1994).

La ecuación de flujo vertical puede ser escrita en términos de abatimiento en vez de carga hidráulica h . La Ecuación II.5. es la ecuación diferencial clásica para acuíferos de Theis (1935), y la Ecuación II.6. es la ecuación clásica de consolidación de 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 II.5. para cada estrato permeable donde el flujo es horizontal y para cada estrato poco permeable una ecuación del tipo II.6. donde el flujo es vertical. La resolución de los sistemas con este tipo de ecuaciones conectadas entre sí implica avanzados sistemas matemáticos que den solución simultánea para cada estrato por cada incremento de tiempo.

III. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA

El estado de Aguascalientes es uno de los estados que mas estudios han financiado para resolver este problema de la subsidencia y agrietamiento en el país. Un estudio integral de varias disciplinas de las ciencias de la tierra es el primer paso para conocer las variables que afectan en un sitio en particular, en este capitulo se hace énfasis en un estudio realizado en el 2003 por varias instituciones educativas como son la Universidad Autónoma de Querétaro, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma de Aguascalientes y de gobierno del estado de Aguascalientes.

Como parte del proyecto integral realizado para el INAGUA (2003), se llevo acabo el estudio geológico del Valle de Aguascalientes, a cargo de J. Martínez (U.N.A.M. Campus Juriquilla), los estudios de geofísica complementarios bajo la responsabilidad de J. Arzate (U.N.A.M. Campus Juriquilla), los estudios de hidrogeoquímica estuvieron a cargo de A. Cortes, los de hidrología fueron realizados por E. Álvares, (U.A.Q) gracias a los resultados de dichos trabajos se tiene un mejor conocimiento de la geología superficial y profunda del estado de Aguascalientes.

Las referencias geológicas del estado de Aguascalientes son relativamente numerosas. No obstante, el conocimiento geológico de la entidad en general y del Valle de Aguascalientes en particular, es escaso. Los estudios que al respecto existen son de carácter local o puntual, la gran mayoría enfocando la minería o la

geo-hidrología. Esos estudios, y la cartografía geológica generada por diversas dependencias (INEGI, CRM, entre otros), han sido insuficientes y/o carecen del rigor científico para alcanzar el conocimiento geológico necesario que permita enfrentar la problemática del “Valle de Aguascalientes” que se plantea para este proyecto (figura III.1).

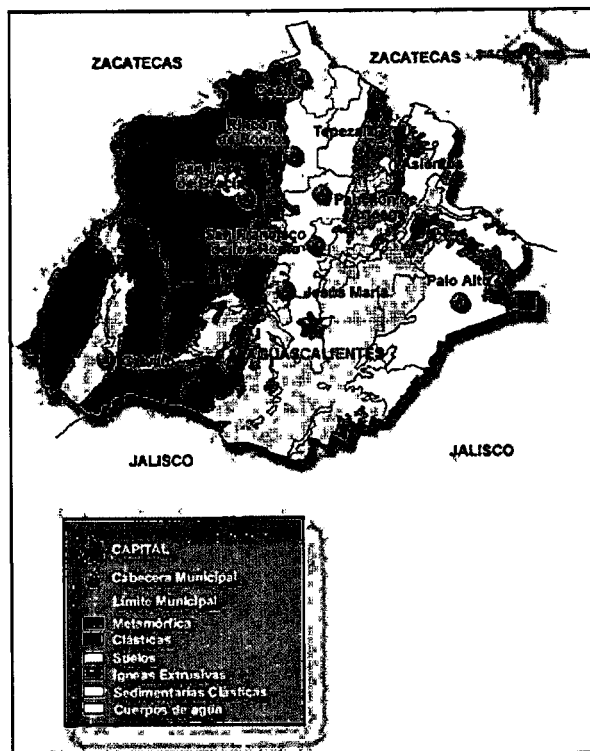


Figura III.1. Aspectos geológicos generales del Estado (INEGI, 2002).

III.1. Geología

El relieve terrestre es un conjunto de formas debidas a la interacción de procesos endógenos y exógenos. Geomorfología y Geología están íntimamente ligadas: las formas del relieve terrestre o geoformas, son simplemente la expresión de los fenómenos geológicos. Las formas del relieve terrestre se expresan a través

del paisaje natural. El estudio geológico se inicia entonces con la ubicación del área de estudio en el contexto geomorfológico, en el marco de las grandes provincias fisiográficas mexicanas que confluyen en la región del Valle de Aguascalientes.

En la región estudiada el paisaje natural muestra una serie de elementos individuales que, agrupados, definen dominios particulares, con expresión morfológica distintiva. Las geoformas que allí aparecen son el resultado de la combinación de procesos naturales (geológicos) complejos.

A nivel estatal se reconocen como elementos importantes del paisaje tres grandes unidades fisiográficas: las correspondientes a la Sierra Madre Occidental, a la Mesa Central y al Eje Neovolcánico; esta última sólo ocupa una escasa extensión en el Sur de la entidad. El área que enmarca el Valle de Aguascalientes participa solamente de las dos primeras: su parte occidental de la Sierra Madre Occidental; su parte centro-oriental, el Valle y las elevaciones y altiplanicies orientales, de la Mesa Central; el Valle de Aguascalientes es considerado como el límite entre estas dos provincias.

III.1.1. La Sierra Madre Occidental

Esta unidad corresponde al flanco occidental del Valle; es de mayor relieve en relación al flanco oriental. El relieve por lo general es abrupto con fuertes pendientes, aunque existen también extensas zonas planas, características de mesetas volcánicas.

Las diferentes formaciones geológicas y sus estructuras son los elementos que de manera directa controlan el paisaje de esta unidad. Sobre ella se instala una compleja red de drenaje natural asociada, por una parte a la naturaleza de las

diferentes formaciones, y por otra a un evidente y marcado control de las estructuras tectónicas.

III.1.2. La Mesa Central

El Valle de Aguascalientes ocupa la parte central del área. Es una subunidad morfológica que atraviesa la parte centro-oriental del estado, con una orientación sensiblemente N-S. Consiste en una depresión alargada de entre 10 y 20 Km. de anchura, que se extiende más allá de los límites estatales: desde el estado de Zacatecas al Norte hasta el estado de Jalisco, en el Sur.

La depresión está conformada por una planicie aluvial más o menos regular que alcanza una altitud entre las cotas 1850 y 1900 metros sobre el nivel medio del mar. Sobre su parte central el Río San Pedro, también conocido como Río Aguascalientes, fluye de Norte a Sur. Este río representa el caudal más importante del estado.

El Río San Pedro y algunos de sus afluentes laterales, cavan un pequeño cause en el relleno del valle, cuyas terrazas aluvionares pueden alcanzar 10 metros de elevación. Estos son los rasgos morfológicos más destacados del Valle de Aguascalientes.

III.1.3. Estratigrafía

El Valle de Aguascalientes corresponde a un graben, estructura tectónica limitada por fallas de orientación casi meridiana (Norte-Sur). Está flanqueado al oriente y al poniente por horsts o pilares tectónicos. El valle en sí mismo es una planicie muy regular, donde no afloran las formaciones rocosas. Donde sí afloran es en los flancos que enmarcan dicho valle, por lo que analizaremos esos flancos para

caracterizar la estratigrafía de la región. Para los propósitos geo-hidrologicos y de subsidencia es más práctico, ya que cada flanco posee características estratigráficas diferentes (Figura III.2.).

III.1.4. El Flanco Occidental

En este flanco afloran diversas formaciones rocosas que por su edad y naturaleza pueden agruparse en dos conjuntos lito-estratigráficos claramente definidos: uno inferior, mesozoico, de origen marino que representa el basamento; otro, superior, cenozoico, de origen continental que representa la cubierta. La figura II.3. representa de manera esquematizada la columna lito-estratigráfica de este flanco.

El Mesozoico está representado por un conjunto de rocas que incluyen facies plutono-volcánicas, volcano-sedimentarias y sedimentarias de origen marino, que afloran aquí y allá a la base del flanco.

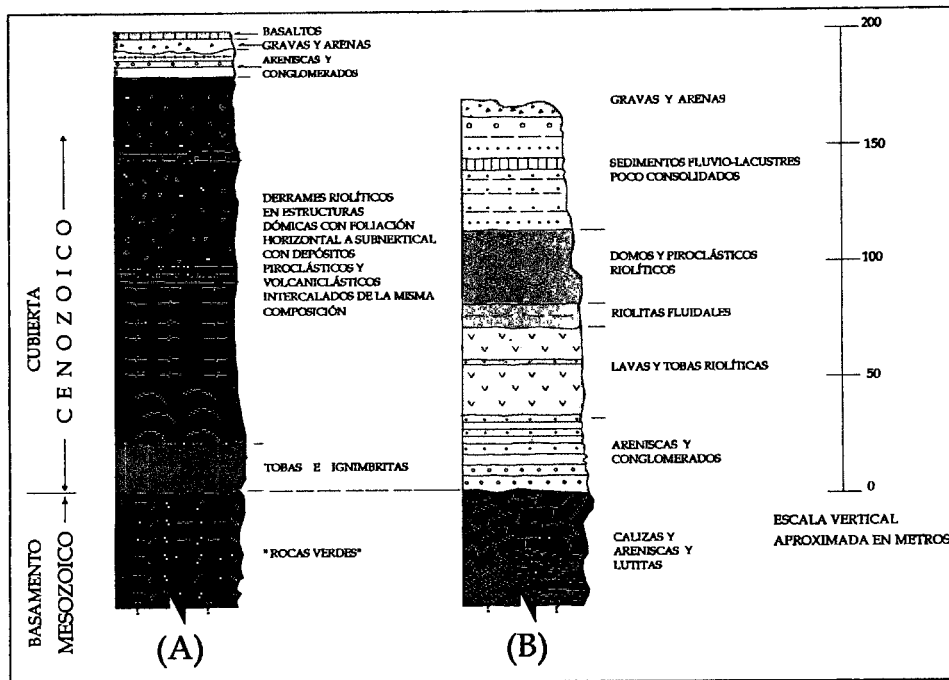


Figura III.2. Columnas estratigráficas aflorantes (esquematisadas) en los flancos occidental (A) y oriental (B) del valle de Aguascalientes.

El Cenozoico. La secuencia cenozoica del flanco occidental se caracteriza por ser de origen mayormente volcánico, de composición eminentemente riolítica. Su mineralogía incluye de manera sistemática cuarzo + sanidino + plagioclasa + biotita + minerales opacos (generalmente magnetita). Sus texturas son invariablemente porfídicas, a veces fuertemente desvitrificadas.

Por su propia naturaleza las formaciones volcánicas en general tienen poco alcance horizontal; son unidades de carácter local. En el caso del área de estudio no podemos correlacionar a nivel regional las diversas unidades volcánicas que allí afloran, lo que impide establecer una columna estratigráfica única para toda el área.

La estratigrafía cenozoica de este flanco es abordada por áreas o sectores (Figura III.3.). En algunos casos esas áreas están separadas por estructuras tectónicas importantes, o poseen pequeñas diferencias estratigráficas que les

imparten características ligeramente diferentes.

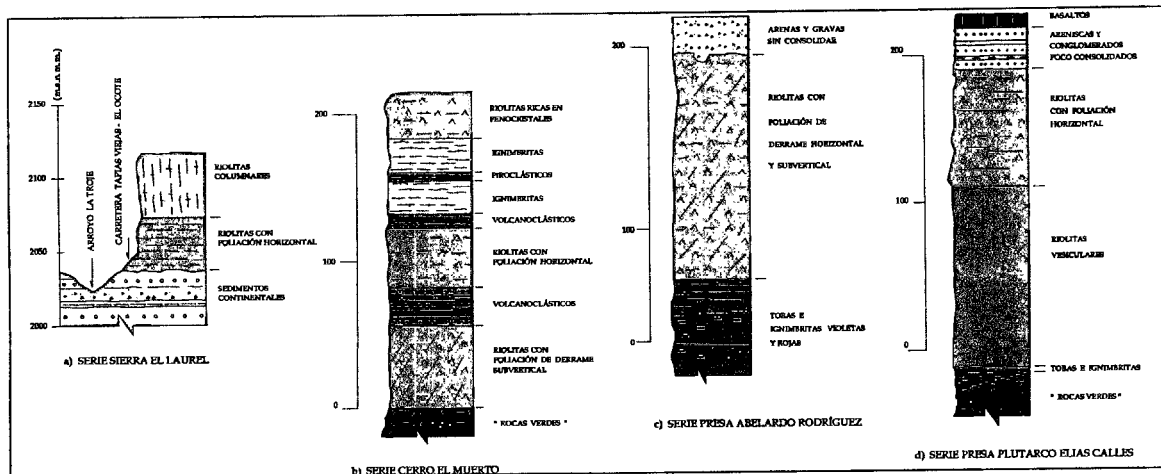


Figura III.3. Columnas estratigráficas aflorantes (esquemáticas) en los flancos occidental (A) y oriental (B) del valle de Aguascalientes.

En la literatura geológica esta unidad no había sido reportada y, consecuentemente, su edad es desconocida. Sin embargo si consideramos que contiene abundantes elementos riolíticos en sus niveles conglomeráticos, podemos establecer que se trata de un depósito contemporáneo a las diversas fases del volcanismo riolítico terciario de la región.

En cuanto a los derrames volcánicos, se trata de dos formaciones riolíticas: la inferior, cuya principal característica es una importante foliación de derrame horizontal; la superior afectada por un intenso fracturamiento vertical que le confieren una estructura marcadamente columnar y un aspecto ignimbrítico.

III.1.5. El Flanco Oriental

Como en el flanco occidental, sobre el flanco oriental del Valle de Aguascalientes, la columna estratigráfica está representada por un basamento

mesozoico en su parte inferior, al que se sobrepone a través de una discordancia angular, una cubierta cenozoica en su parte superior (Figuras III.2. y III.3.).

El Mesozoico. Sobre el flanco oriental del Valle de Aguascalientes el Mesozoico está representado por dos formaciones sedimentarias de naturaleza marina, sobrepuestas: la inferior, compuesta de lutitas y areniscas; la superior compuesta predominantemente de calizas. Al afloramiento estas formaciones alcanzan un espesor del orden de los 400 metros.

Estas formaciones afloran mayormente en la región de Tepezalá, a favor de un alto estructural. Sobre este mismo flanco, en otros puntos, estas unidades fueron alcanzadas en el subsuelo al menos en dos pozos de agua, entre los 200 y 300 m de profundidad.

El Cenozoico. Sobre este flanco el Cenozoico está representado por diversas formaciones volcánicas y sedimentarias terciarias de origen continental.

III.1.6 El Valle de Aguascalientes

En el interior del Valle de Aguascalientes, como es de suponerse, no aflora ninguna de las formaciones descritas anteriormente. Los cortes de los arroyos, de las carreteras y de los bancos de material, muestran que el valle está relleno de materiales aluviales sin consolidar y suelos en la parte más superficial (unos cuantos metros de espesor), descansando sobre materiales arenosos, arcillo-arenosos y conglomeráticos, burdamente estratificados.

La descripción de los cortes litológicos de algunos pozos de agua en el Valle de Aguascalientes, permite interpretar la existencia en el subsuelo de una gruesa secuencia de sedimentos sin consolidar, cuyo espesor puede alcanzar más de 600

metros en las partes más profundas, y no menos de 200 metros en las partes más someras. Estos depósitos que rellenan el valle corresponden a los depósitos lacustres y fluviolacustres mio-pleistocénicos de la región.

III.1.7 Análisis Estructural

El Valle de Aguascalientes corresponde a una estructura tectónica de graben (Figura III.4.), conocida en la literatura geológica como el “Gaben de Aguascalientes”. Está limitado al Este y al Oeste por dos grandes fallas de orientación casi meridiana (Norte-Sur), y flanqueado por horsts o pilares tectónicos de la misma orientación.

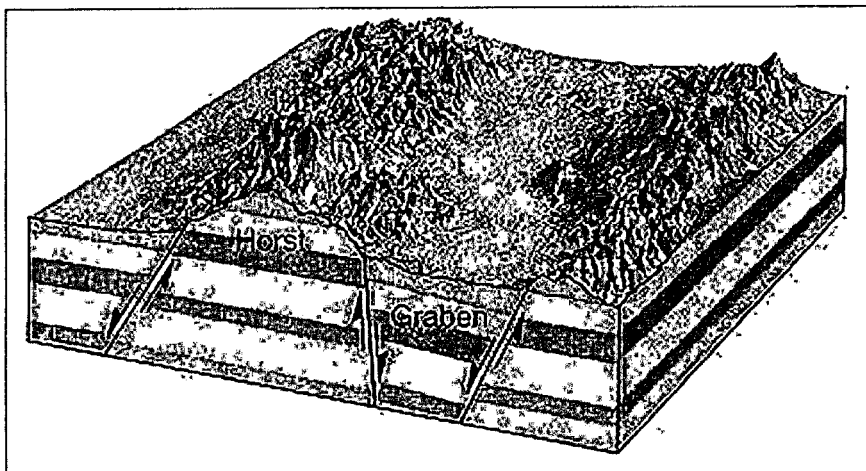


Figura III.4. Esquema estructural en horsts y grabens, similar al Valle de Aguascalientes.

La disposición del Graben de Aguascalientes es coherente con el estilo estructural de horsts y grabens que caracteriza a la región, pues es solo una de las varias estructuras tectónicas que aparecen en la parte centro-occidental del país (Figura III.5.).

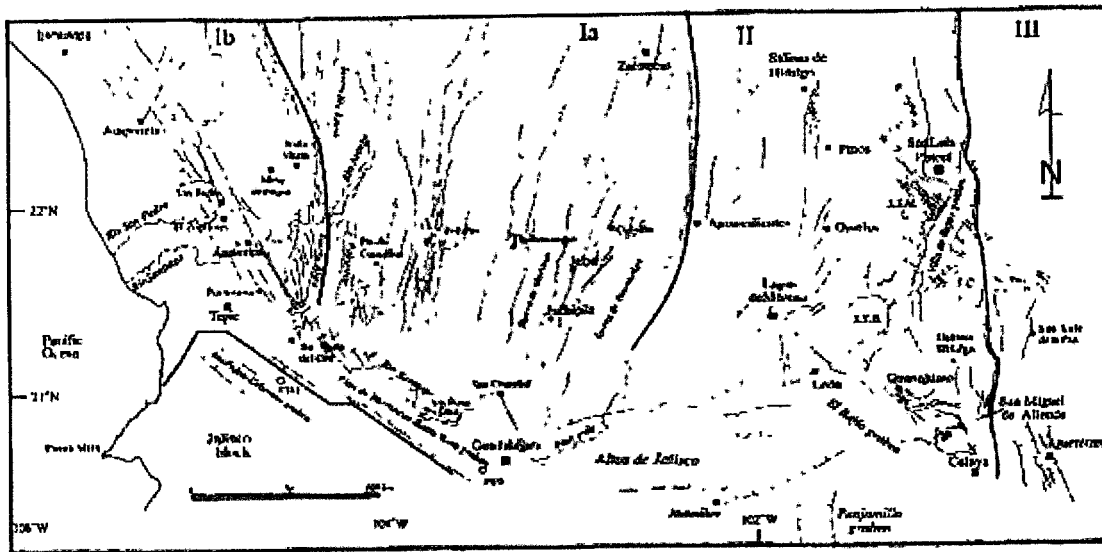


Figura III.5. Estructuras en horsts y grabens en la parte centro-occidental de la República Mexicana.

III: Sierra Madre Oriental; II: Mesa Central; Ia: Sierra Madre Occidental oriental; Ib: Sierra Madre Occidental (Tomado de Nieto-Samaniego et al., 1999).

III.2. Estudios geofísicos

Existe un trabajo reciente sobre la problemática de los agrietamientos en el Valle de Aguascalientes (Arroyo et al., 2001) que comprende un levantamiento gravimétrico en la parte sur del valle principalmente. Así mismo, la existencia de cartas aero-magnéticas a escala 1:50,000 de la zona del valle fueron incorporadas para correlacionar las estructuras regionales más importantes y proporcionar un mejor modelo del valle.

III.2.1. Ubicación de datos geofísicos

En total, se llevaron a cabo 23 sondeos de baja frecuencia (MT) y 17 de alta frecuencia (AMT), éstos últimos coincidentes con las ubicaciones de un número igual de sondeos MT. En la Carta III.6. se muestra la ubicación de las estaciones MT y

MT-AMT. Los sondeos se distribuyen en un total de cuatro perfiles. Tres de ellos corren de Oeste a Este en tanto que el cuarto tiene orientación Norte-Sur.

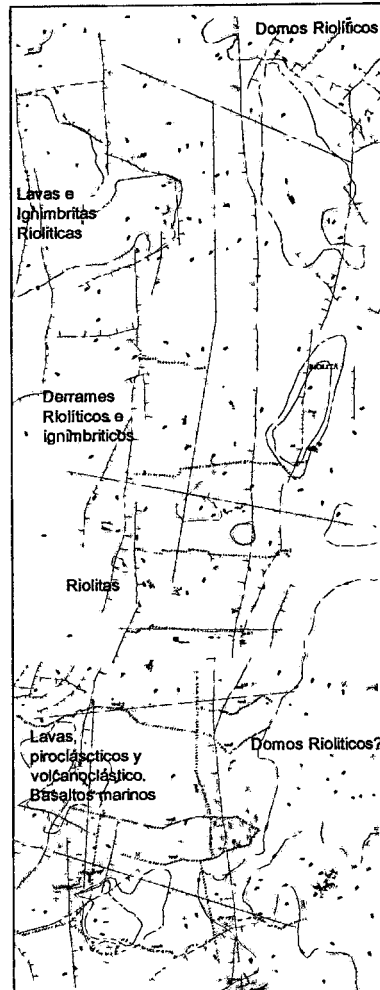


Figura III.6. Ubicación de los perfiles gravimétricos.

II.2.2. Secciones de resistividad

Las secciones de resistividad que se muestran en las figuras III.7., III.8. y III.9. fueron obtenidas a partir de la inversión unidimensional (1D) de las resistividades y fases a 80 frecuencias diferentes utilizando un algoritmo Occam.

En la figura III.7 se muestran las secciones de resistividad a lo largo de los perfiles EW-3, EW-4 y EW-5 en donde se observa la distribución de resistividades aparentes a profundidades de 1km, que se asocian principalmente a las unidades que rellenan el valle. Básicamente, los diferentes tonos observados corresponden a diferencias litológicas tales como capas con alto contenido de arcillas (tonos rojos y naranjas) o capas de origen ígneo (tonos verdes y azules).

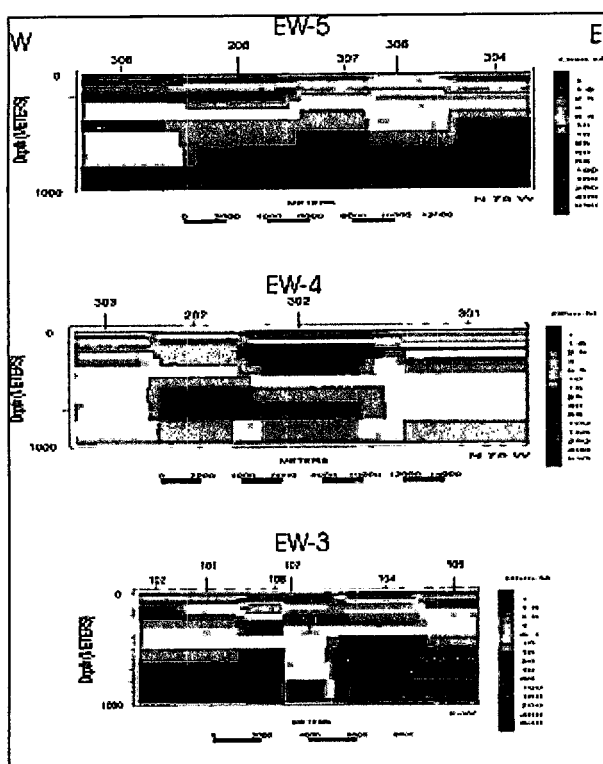


Figura III.7. Secciones de resistividad a 1 Km.

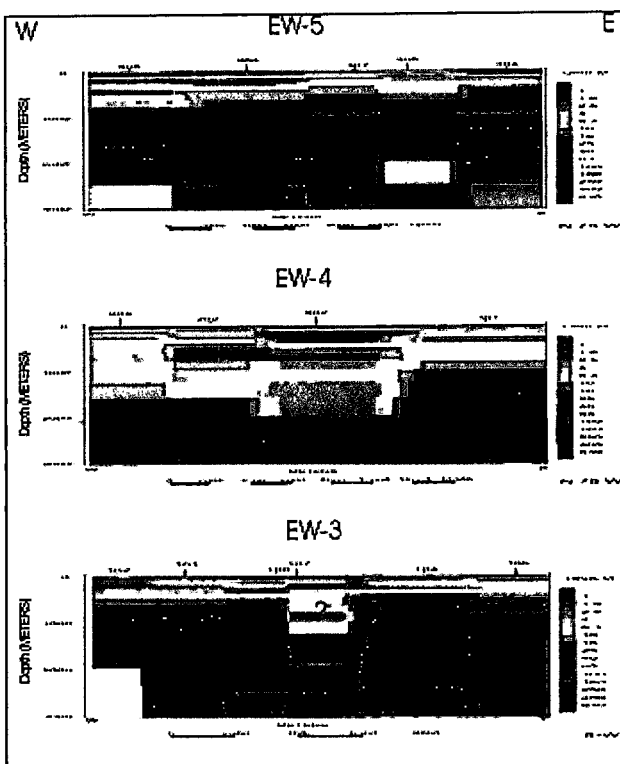


Figura III.8. Secciones de resistividad a 3 Km.

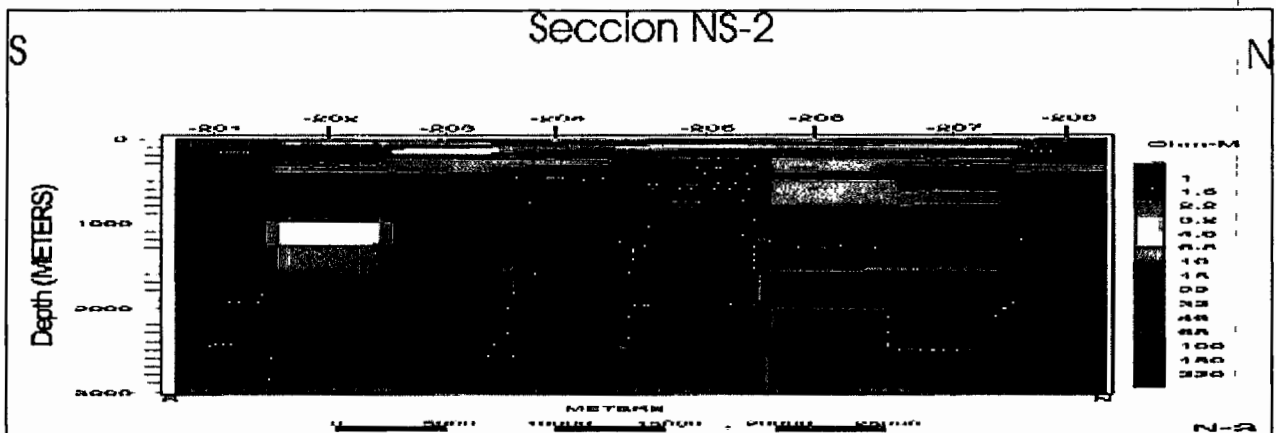


Figura III.9 Sección de resistividad, perfil SN-2.

En la figura III.8 se muestran las secciones a lo largo de los mismos perfiles en donde se observa la estructura eléctrica hasta profundidades de 3 Km. En estas secciones, las zonas más conductivas (naranjas y verdes) se asocian con el relleno del valle, en tanto que las más resistivas (azules) se relacionan con la presencia del complejo basal que aflora en diversos puntos del valle.

En la figura III.9 se muestra la sección de resistividad SN-2, que va de San Francisco de los Romo al sur hasta las cercanías de Luis Moya, cerca del límite estatal.

Uno de los rasgos principales de las secciones superficiales (figura III.7), cuya orientación es de Oeste a Este, es que el relleno del valle no muestra un contraste importante de resistividades lo cual dificulta la interpretación. Sin embargo, con la asistencia de registros eléctricos es posible establecer la profundidad de un horizonte de riolita que se encuentra distribuido a lo ancho y largo del valle y que constituye un horizonte índice desde el punto de vista hidrológico. En la siguiente sección esto se discute con más detalle.

Las secciones más profundas (figura III.8), orientadas también de Oeste a Este, muestran una profundidad variable del basamento resistivo. Así por ejemplo, a lo largo del perfil EW-3, el basamento se localiza a una profundidad no mayor a los 700 metros y, según se observa en la sección de resistividad, no muestra grandes irregularidades. Existe sin embargo una zona de conductividad anómala que es producida por un sondeo muy ruidoso que requiere ser repetido.

Por otro lado, el perfil EW-4 muestra tanto mayores variaciones en la profundidad de la capa resistiva asociada al basamento, como una mayor profundidad promedio. Un rasgo notable es que la unidad resistiva es más superficial hacia el Este no solo para esta sección sino también para la EW-3. La profundidad del basamento en la zona central del valle a la altura del perfil EW-4 parece ser mayor a los 1,500 metros.

La sección EW-5, al norte del valle, el basamento se hace de nuevo más somero y muestra también una tendencia a ser más somero hacia el Este.

En la sección NS-2 se puede observar como varía la profundidad de la capa resistiva. Por ejemplo, en la porción sur se observan las mayores profundidades, de más de 2 Km., que se asocian al basamento. En la parte central del perfil, a la altura de los sondeos 204 y 206 la unidad resistiva parece mucho más cercana a la superficie en un aparente alto estructural, para luego aumentar su profundidad hacia la parte norte a aproximadamente 1 Km. Esta variabilidad es compatible con la complejidad geológica observada en la superficie. Los modelos conceptuales interpretados se discuten en la siguiente sección.

Perfiles gravimétricos. En la figura III.10 se muestran las curvas de anomalía de Bouguer para cada uno de los tres perfiles gravimétricos completos:

El Perfil 1, se ubica al sur y va del oeste de Valladolid a La Escondida, el Perfil 2 de la ex-hacienda El Garabato al Mezquite y el Perfil 3 del Milagro a López Mateos.

Estos datos fueron colectados durante tres campañas separadas realizadas como parte del presente estudio. Como se puede apreciar, la anomalía del Perfil 1 sugiere que el valle se angosta en esta sección y que además tiene una forma simétrica. A la altura de los perfiles 2 y 3 se observa que el valle se ensancha además de que la forma del graben se vuelve menos simétrica.

En la figura III.10 se observan los mismos tres perfiles pero con su respectivo gradiente horizontal de la anomalía de Bouguer. La curva del gradiente horizontal se utiliza para ubicar las zonas en donde ocurren los mayores cambios laterales de la anomalía. En cuencas sedimentarias de origen tectónico, los máximos del gradiente horizontal se asocian a la presencia de fallas geológicas sepultadas, por lo cual esta información es útil para la localización de dichas estructuras en el valle. En principio, los máximos del gradiente indican posición de las mayores estructuras en el subsuelo. Es decir señalan las zonas en donde ocurre el mayor desplazamiento entre bloques del basamento fallado. Así pues, esta información puede ser de gran utilidad para definir las fallas geológicas que no tienen expresión superficial y adicionalmente contribuyen en la definición de la geometría del sistema acuífero principal.

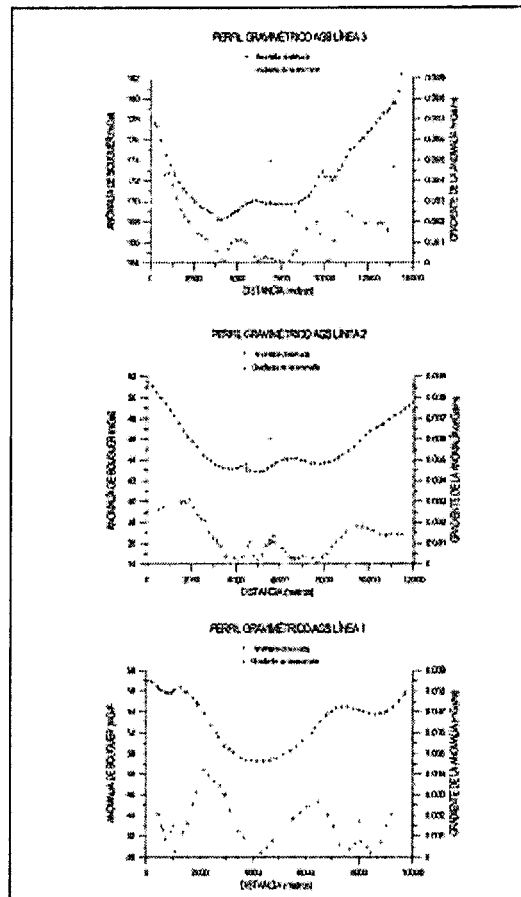


Figura III.10 Curvas de anomalía de Bouguer y su gradiente.

III.2.3. Mapa de anomalía de Bouguer

A partir de los datos adquiridos (Perfiles 1,2 y 3 en la figura III.10.) combinados con datos disponibles de un estudio anterior (Arroyo et al., 2001) se elaboró la carta de anomalía de Bouguer del Valle de Aguascalientes, la cual se muestra en la Figura III.11. La máxima amplitud de la anomalía relativa observada es de 35 mGales, en donde los colores naranjas corresponden a altos gravimétricos

en tanto que los tonos de amarillo a blanco corresponden a bajos relativos que se asocian directamente a mayores espesores de relleno sedimentario.

Entre los rasgos principales que refleja la carta de la anomalía de Bouguer están los siguientes: a) El graben se cierra hacia la parte sur de la Cd. de Aguascalientes, b) existe una discontinuidad estructural al norte de la ciudad que se manifiesta como una deformación de las líneas de campo, c) al norte de la ciudad la forma del graben es mas simétrica y parece angostarse en la parte central del valle a la altura de la población Pabellón de Arteaga.



Figura III.11. Anomalia de Bouguer del Valle.

III.2.4 Mapa de campo magnético total reducido al polo

En esta carta, los tonos rojos corresponden a valores altos de magnetización en tanto que los tonos azules corresponden a valores bajos. Como se observó anteriormente, los valores altos de anomalía magnética se asocian a rocas básicas de origen ígneo, mientras que los bajos se relacionan más directamente a zonas en donde se concentran principalmente rocas de origen sedimentario con poco o nulo contenido en minerales magnéticos.

En la Figura II.12. se muestra el mapa de anomalía magnética en donde se han enfatizado con contornos las zonas anómalas, es decir aquellas con altas magnetizaciones relativas.

En esta figura se han señalado las diferentes regiones anómalas. En general, estas zonas tienden a distribuirse alrededor del relleno del valle, sin embargo hay una región en el sector centro occidental del valle en donde no existe anomalía magnética, a pesar de que en la superficie afloran rocas de origen ígneo. Esto se explica en términos de la composición de estas rocas, que se espera que sean predominantemente ácidas. Otra observación que se puede hacer a partir de la carta magnética, es que el contacto litológico al Este del valle es más continuo que hacia el Oeste.

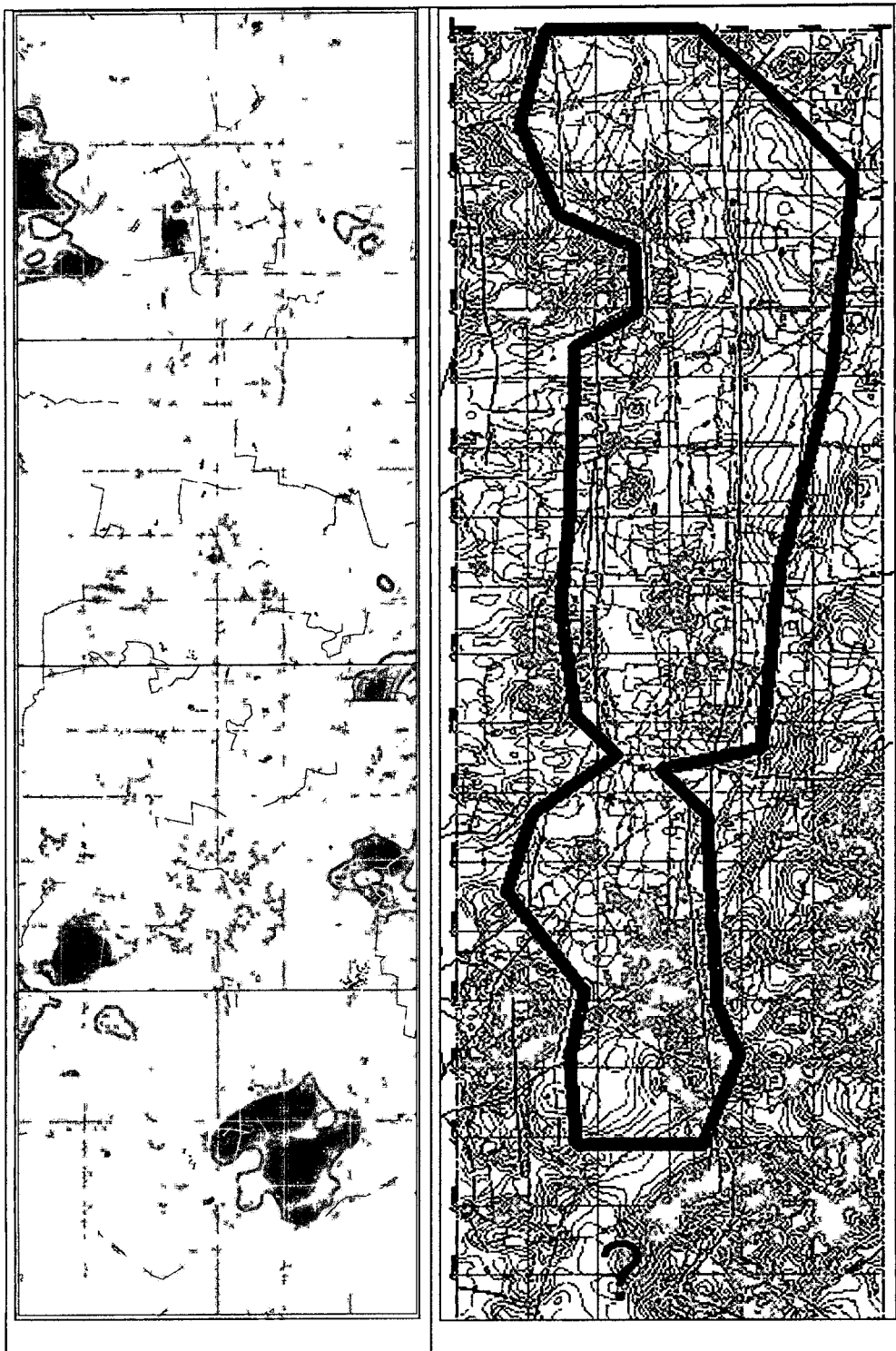


Figura II.12. Campo magnético total reducido al polo.

III.3. Estudio Hidrogeoquímico e Isotópico del valle

Dada la necesidad de contar con información actualizada de la cantidad y calidad del agua subterránea con que cuenta la entidad, se tiene como principal objetivo en este estudio el generar información que ayude de manera determinante a complementar y/o generar las bases de datos existentes, con las cuales se puedan realizar los balances hidrológicos del agua subterránea en el estado. Esta información debe actualizarse constantemente a fin de conocer la evolución en la calidad físico-química del agua subterránea.

Las aguas subterráneas adquieren su composición química mediante procesos en los que intervienen factores geológicos, hidrogeológicos, climáticos, bacteriológicos antropogénicos, químicos y físicos, entre otros.

III.4. Niveles piezométricos

La Comisión Nacional del Agua ha llevado a cabo importantes campañas de medición de niveles en los distintos acuíferos del estado de Aguascalientes. Según los datos estadísticos de la información proporcionada por la CNA, en 160 pozos se logró medir el nivel estático, lo que equivale al 82 % del total; y 36 fueron no sondeables, esto equivale al 18 %.

De acuerdo con las observaciones efectuadas, destacan los resultados siguientes para el valle de Aguascalientes: La profundidad del agua subterránea varía entre 20 y 150 m.

Así pues, por lo que se refiere al monitoreo de niveles piezométricos, se tiene información que data del año 1968; sin embargo, existe un registro más o menos continuo a partir del año 1990. En el caso del valle de Aguascalientes hay

datos sistemáticos de 106 pozos de observación, la mayoría operados por la propia Comisión Nacional del Agua y para uso agrícola.

A continuación se de la Figura II.13. a II.15. se muestran algunas de las curvas de los niveles piezométricos a diferentes años, que posteriormente se emplearon para los cálculos de la subsidencia en esta tesis.

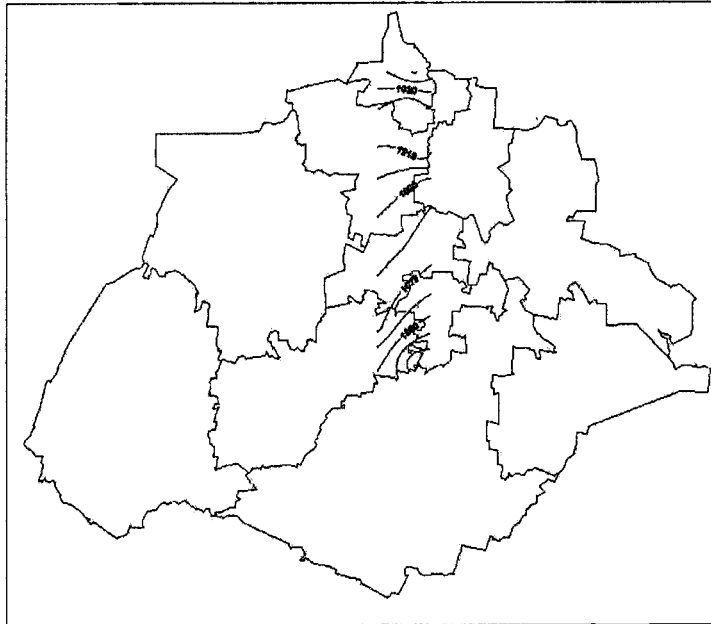


Figura III.13. Niveles Piezométricos 1968

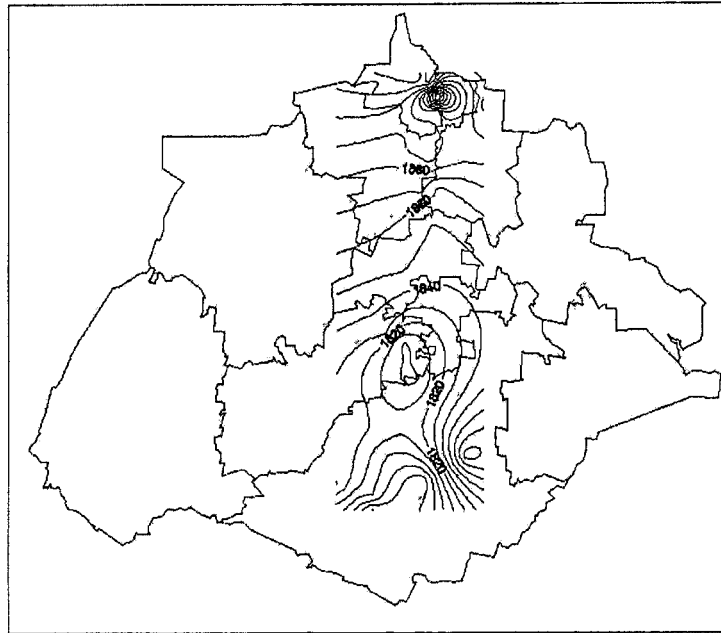


Figura III.14. Niveles Piezométricos 1984

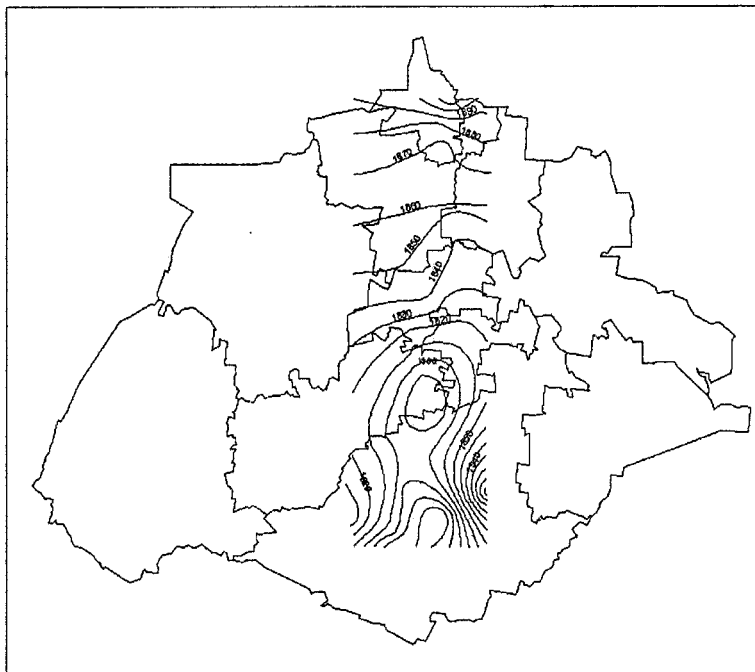


Figura III.15. Niveles Piezométricos 1992

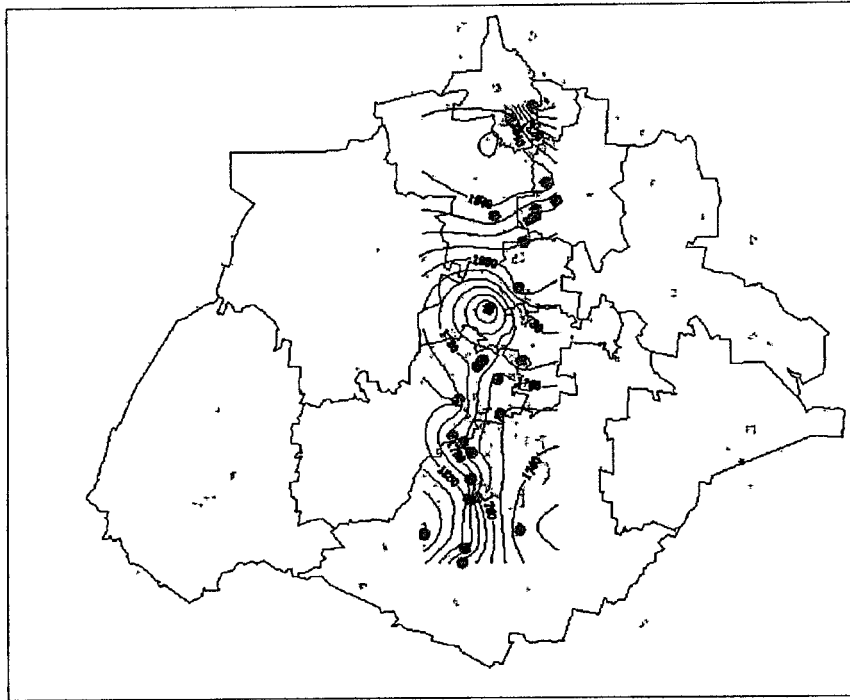


Figura III.16 Niveles estáticos al año 2002.

Es importante señalar que éstos son solamente algunos de los datos de los niveles piezométricos a diferentes años ya que se cuenta con más datos al respecto.

IV. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se explica con más detalle el marco teórico en el cual se basa éste trabajo, como bases se puede nombrar varias teorías y métodos que como ejemplos se pueden mencionar la teoría de la consolidación y el método de elemento finito a partir de los cuales es posible calcular desplazamientos y deformaciones generados por una pérdida de volumen, además de las hipótesis.

IV.1. Teoría de la consolidación

Dada la complejidad del análisis de consolidación para el problema que nos atañe en este trabajo es que surge la necesidad de hacer análisis simplificados, tomando en cuenta que el abatimiento del nivel freático es total y el acuífero es confinado, por otro lado los materiales son idealizados, lineales homogéneos y totalmente saturados. Para el comportamiento volumétrico se toma básicamente que éste está regido por el “esfuerzo efectivo” explicado por Terzaghi (1923) como el esfuerzo que actúa sobre el esqueleto sólido del suelo, este esfuerzo es afectado por la presión del agua que se encuentra los poros del material.

Ecuación IV.1. Esfuerzo efectivo

$$\sigma' = \sigma - U_w$$

Donde:

σ' = esfuerzo efectivo

σ = esfuerzo total

U_w = presión del agua en los poros del suelo

La presión del agua en los poros cambia cuando se abate el nivel freático, principalmente por que se reduce la presión hidrostática (se tiene una columna de agua menor).

Si se trata el fenómeno como una consolidación unidimensional generada por la pérdida de presión de poro y consecuente aumento en la presión efectiva. La deformación vertical que se dará al final del abatimiento total de un acuífero será (Rojas, Arzate y Arroyo, 2002):

Ecuación IV.2. Deformación vertical.

$$v = C_f h$$

Donde:

v = Deformación vertical,

C_f = factor de compresión,

h = espesor de la columna de suelo.

El factor de compresión C_f está definido como la ecuación:

Ecuación IV.3. Factor de compresión

$$C_f = \varepsilon_v = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}$$

Donde:

C_c = Índice de compresibilidad,

e_0 = relación de vacíos inicial,

σ'_2 = presión efectiva final,

σ'_1 = presión efectiva inicial,

ε_v = deformación volumétrica.

IV.2. Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales por medio de "aproximaciones discretas". En el cual la zona de solución es un conjunto de puntos discretos, el método de elementos finitos supone que la zona de solución está compuesta de muchas subzonas interconectadas, las que se denominan "elementos finitos". Estos elementos, los que pueden tomar formas simples (por ejemplo, líneas, triángulos, rectángulos, paralelepípedos) se ensamblan de diferentes maneras para representar la solución sobre una región cualquiera.

IV.2.1. Conceptos básicos en análisis de elementos finitos

El análisis de elementos finitos para un problema físico puede ser descrito de la siguiente forma:

- 1) El sistema físico se divide en series de elementos que están conectados por un número discreto de puntos nodales; este proceso se denomina "discretización". Discretizaciones típicas de un sistema de tuberías y de un sistema continuo bidimensional se muestran en la Figura IV.1. En estos casos se identifican los elementos por medio de números. El problema

de tuberías contiene 8 elementos y 6 nudos, mientras que el problema continuo posee 20 elementos y 52 nudos.

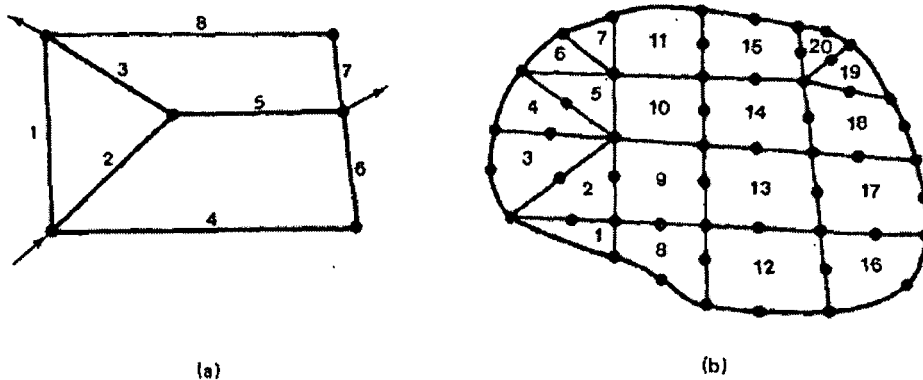


Figura IV.1. Ejemplo de discretizaciones de elementos finitos

2) Una expresión matricial se desarrolla para relacionar las variables nodales de cada elemento. La matriz resultante se conoce comúnmente como "matriz elemental". Para un problema discreto, la matriz elemental puede ser generada a partir de un análisis físico simple. Para problemas continuos, la matriz elemental se obtiene mediante un proceso matemático que utiliza técnicas variacionales o métodos de residuos ponderados.

3) Las matrices elementales se combinan o "ensamblan" para formar un conjunto de ecuaciones algebraicas que describen el sistema global. La matriz de coeficientes del problema global se conoce como la matriz global. El procedimiento de ensamble se realiza para cumplir condiciones de compatibilidad en la unión de elementos.

4) Condiciones de borde son incorporadas dentro de la matriz global.

5) El conjunto de ecuaciones algebraicas se resuelve mediante algún método matricial adecuado.

Solución a un problema discreto.

Paso 1. Discretizar Medio Poroso.

Paso 2. Determinar Características de los Elementos

Paso 3. Ensamblar Ecuaciones Elementales.

Paso 4. Resolver Sistema de Ecuaciones Algebraicas.

Problema de subsidencia.

Para el propósito del modelo de subsidencia que nos interesa se consideró el material del sistema acuífero como lineal y homogéneo. Para la construcción de la malla que representa el medio finito se eligieron elementos finitos planos con 8 y 4 nodos en algunos casos y 2 grados de libertad que permite desplazamientos nodales en las direcciones "x" y "y". Se impusieron solamente cargas gravitacionales sobre el sistema.

Para efectos del análisis por cargas gravitacionales, se impone un espesor al elemento finito para que este tenga volumen. A cada nodo le corresponde un volumen unitario que multiplicado por el peso específico del material proporciona el peso actuante en cada nodo.

El peso específico del material empleado resulta de un análisis de cargas considerando el peso que actúa sobre la fase sólida del suelo. En la condición de acuífero confinado con una presión en exceso de la presión hidrostática, la fase sólida del suelo soporta su peso propio W_s .

Para realizar el análisis de elemento finito se requirió de un software o código computacional, para este caso se utilizó un programa comercial llamado GEOSLOPE.

Se selecciono el modelo del suelo mas sencillo que opera éste software que es el modelo linear-elástico, para el cual los esfuerzos son directamente proporcionales a las tensiones. Las constantes a utilizar son E = Modulo de Young y ν = numero de poisson.

Ecuación constitutiva para la estructura del suelo.

La relación del incremento de esfuerzo-deformación para un suelo no saturado para un espacio bidimensional (Biot 1941) se puede escribir como sigue:

Ecuación IV.4. Ecuación constitutiva del suelo de espacio bidimensional.

$$\begin{Bmatrix} \Delta(\sigma_x - u_a) \\ \Delta(\sigma_y - u_a) \\ \Delta(\sigma_z - u_a) \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\left(\varepsilon_x - \frac{u_a - u_w}{H}\right) \\ \Delta\left(\varepsilon_y - \frac{u_a - u_w}{H}\right) \\ \Delta\left(\varepsilon_z - \frac{u_a - u_w}{H}\right) \\ \Delta\gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Donde:

ε = Deformación normal.

γ = Esfuerzo normal.

u_a = Presión de poro del aire.

u_w = Presión de poro del agua.

E = Modulo de Young.

H = Modulo del suelo no saturado con respecto a la matriz de succión ($u_a - u_w$).

ν = Numero de poisson.

τ = Esfuerzo cortante.

Alternativamente esta relación de incremento de esfuerzos puede escribirse como sigue:

Ecuación IV.5. Relación de incremento de esfuerzos

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} - [D]\{m_H\}(u_a - u_w) + \{\Delta u_a\}$$

Donde:

$[D]$ = Matriz drenada

$$\{m_H\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ H & H & H \end{bmatrix} \cdot 0$$

Por otra parte para un suelo totalmente saturado el esfuerzo total en la estructura del suelo esta dada por:

Ecuación IV.6. Relación de incremento de esfuerzos para suelos saturados

$$\{\Delta\sigma\} = \{D\}\{\Delta\varepsilon\} + \{m\}\Delta u_w$$

Donde:

$\{m\}$ = Tensor unitario isotrópico $\langle 1 \ 1 \ 1 \ 0 \rangle$

Comparando las ecuaciones IV.5. y IV.6. podemos apreciar que cuando el suelo es totalmente saturado:

$$[D]\{m_H\} = \{m\}$$

Para un material lineal elástico estas condiciones se satisfacen cuando:

$$H = \left(\frac{E}{1 - 2\nu} \right)$$

Ecuación de flujo para la fase líquida

El flujo bidimensional de agua a través de un suelo esta dada por la ecuación de Darcy:

$$\frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} + \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = 0$$

Donde:

K_x, K_y = Conductividad hidráulica en las direcciones "x" y "y"

u_w = Velocidad de flujo

γ_w = Peso volumétrico del agua

θ_w = Contenido volumétrico del agua

t = tiempo

El contenido volumétrico de agua para un material elástico esta dado por la siguiente ecuación:

$$\theta_w = \beta \varepsilon_v - \omega u_w$$

y

$$\beta = \frac{E}{H} \frac{1}{(1-2\nu)} = \frac{3K_B}{H}$$

$$\omega = \frac{1}{R} - \frac{3\beta}{H}$$

Donde:

K_B = Modulo de volumen

R = Modulo relacionado del cambio volumétrico de agua con el cambio de la succión mátrica.

Análisis en conjunto

En el análisis en conjunto las ecuaciones de equilibrio y de flujo son resueltas simultáneamente.

El conjunto de las ecuaciones son las que siguen:

Ecuación IV.7. Ecuación de equilibrio

$$[K]\{\Delta\delta\} + [L_d]\{\Delta u_w\} = \{\Delta F\}$$

Ecuación IV.8 Ecuación de Flujo

$$\beta[L_f]\{\Delta\delta\} - \left(\frac{\Delta}{\gamma_v}[K_f] + \omega[M_N]\right)\{\Delta u_w\} = \Delta \left(\{Q\}|_{t+\Delta t} + \frac{1}{\gamma_v}[K_f]\{u_w\}|_t \right)$$

Donde:

$$[K] = \sum [B]^T [D] [B]$$

$$[L_d] = \sum [B]^T [D] \{m_H\} \langle N \rangle$$

$$\{m_H\} = \left\langle \frac{1}{H} \quad \frac{1}{H} \quad \frac{1}{H} \quad 0 \right\rangle$$

$$[K_f] = \sum [B]^T [K_w] [B]$$

$$[M_N] = \sum \langle N \rangle^T \langle N \rangle$$

$$[L_f] = \sum \langle N \rangle^T \{m\} [B]$$

[K] = Matriz de rigidez

[L_d] = Matriz acoplada

[K_f] = Matriz de rigidez por elemento

[M_N] = Matriz de masa

[L_f] = Matriz acoplada por elemento

Como se había mostrado anteriormente:

$$\beta = \frac{E}{H} \frac{1}{(1-2\nu)} = \frac{3K_B}{H}$$

$$\omega = \frac{1}{R} - \frac{3\beta}{H}$$

Para que estas ecuaciones modelen de forma satisfactoria el caso totalmente saturado se deben satisfacer las condiciones siguientes:

$$\beta = 1$$

$$\omega = 0, \text{ and}$$

$$[L_f] = [L_d]^T$$

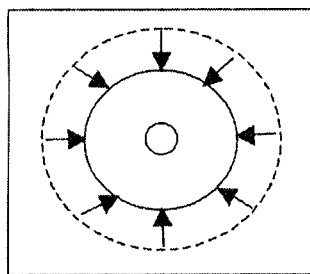
Así se tienen las ecuaciones acopladas, el detalle de y el análisis de las formulas se pueden consultar en el manual de usuario del software geoslope (GEOSLOPE 1999).

IV.3. Teoría de la pérdida de volumen

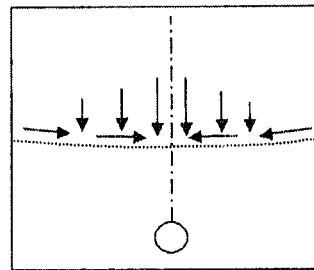
En este trabajo se utiliza el desarrollo teórico realizado por Sagasetta (1987) sobre la pérdida volumétrica, a partir del cual es posible calcular los desplazamientos y deformaciones generados por una pérdida de volumen. Él propone considerar las partículas sólidas del suelo como incompresibles para así poder analizar las deformaciones superficiales provocadas 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.2. (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.3. (b)).



Medio infinito



Esfuerzos en la superficie

Figura IV.2. (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.

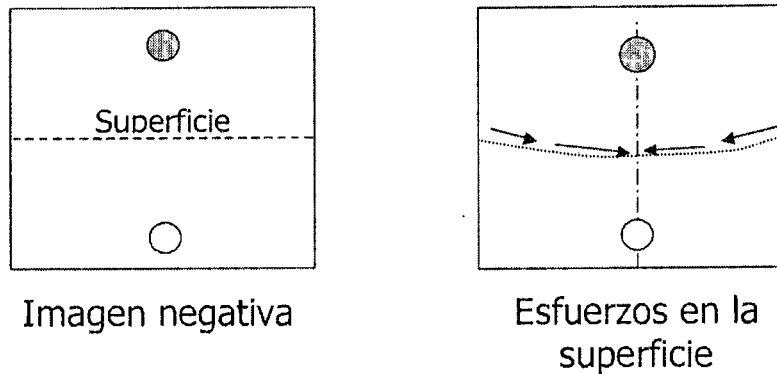


Figura IV.3. (a) Imagen negativa de la extracción simétrica a la superficie; (b) Cancelación de esfuerzos normales en la superficie.

Tomando en cuenta lo anterior presenta las siguientes formulas:

Ecuación IV.9. 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.10. 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):

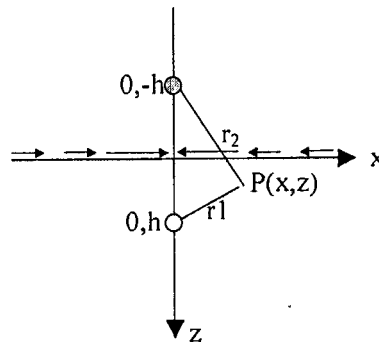


Figura IV.4. Punto "P" donde se calcula el desplazamiento debido a una extracción y su imagen.

- 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.11. Deformación en la dirección x debida a la liberación de esfuerzos en la superficie

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

Ecuación IV.12. Deformación en la dirección z debida a la liberación de esfuerzos en la superficie

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

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).

Sagaseta 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.5.).

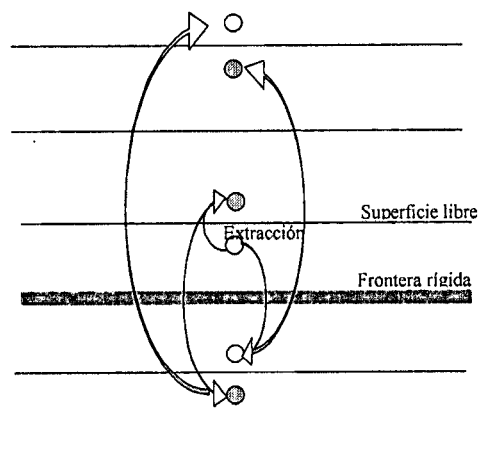


Figura IV.5. Series infinitas de imágenes para considerar una frontera rígida.

IV.4. Interferometría

En este capítulo se describe el marco teórico de la interferometría sin embargo para entender los procesos de interferometría SAR, se debe tener un conocimiento general de las ondas electromagnéticas y de cómo se propagan.

Una onda electromagnética es un cambio de un campo eléctrico que produce un cambio en un campo magnético, que produce un cambio en el campo eléctrico, y así sucesivamente. Como este proceso se repite, la energía es propagada a través del espacio vacío a la velocidad de la luz.

IV.4.1. Conceptos de ondas electromagnéticas

La Figura IV.6 da una descripción del tipo de onda electromagnética que nos interesa. En este diagrama, E indica el campo eléctrico y H representa el campo magnético. Las direcciones de E y H son perpendiculares entre sí. En un plano uniforme, las ondas E y H reposan en el plano y tienen el mismo valor en todas partes en ese plano.

Una onda de este tipo, con E y H transversales a la dirección de propagación, es llamada una onda electromagnética transversal (TEM). Si el campo eléctrico E tiene un solo componente en la dirección y el campo magnético H tiene un solo componente en la dirección Z , entonces la onda se polariza en la dirección (verticalmente polarizado). La polarización es definida generalmente como la dirección de la componente del campo eléctrico teniendo en cuenta que la componente del campo magnético es perpendicular a él.

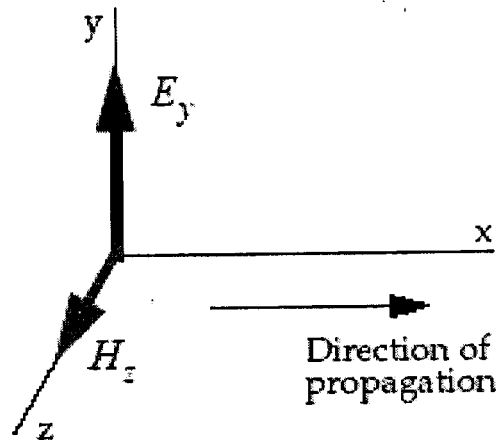


Figura IV.6 Ondas electromagnéticas

La onda electromagnética descrita arriba es del tipo de ondas que son enviadas y recibidas por un SAR. El SAR, como la mayoría de los equipos que usan ondas electromagnéticas, es sensible solo a las componentes del campo eléctrico de la onda. El campo eléctrico de una onda tiene dos propiedades principales que debemos entender para comprender SAR y la interferometría. Estas son la magnitud y la fase de la onda. La Figura IV.7 muestra que el campo eléctrico varía con el tiempo.

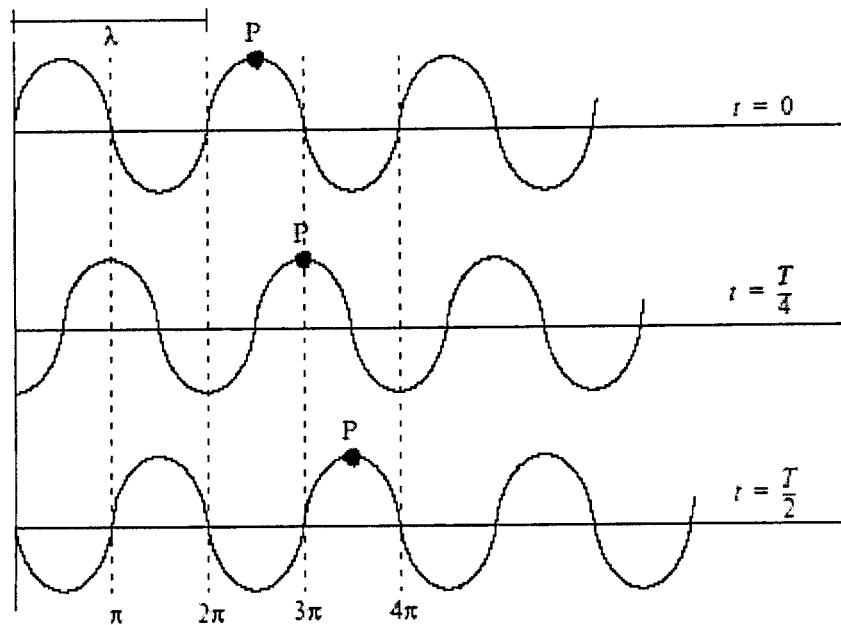


Figura IV.7. Variación del campo eléctrico en el tiempo.

La Figura IV.7. muestra como la fase de onda varía con el tiempo en tres diferentes momentos. En la misma figura, λ es la longitud de onda y T es el tiempo requerido por la onda para viajar una longitud de onda completa. P es el punto de fase constante y se mueve a la derecha a medida que el tiempo progresa. La onda tiene un valor de fase específico en un momento dado de tiempo y en un punto específico a lo largo de su dirección de viaje. La onda se puede expresar en la forma:

Ecuación IV.13. Expresión de la onda

$$E_y = \cos(\omega t + \beta x)$$

Donde:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad y$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

La ecuación IV.13. es expresada en coordenadas cartesianas y asume que la magnitud máxima de E_y es la unidad. Es mas usada la expresión de esta ecuación en forma exponencial e incluye un término máximo.

Ecuación IV.14. Forma exponencial

$$E_y = E_0 \cdot e^{j(\omega t \pm \beta x)}$$

Hasta aquí tenemos una descripción de la definición y el comportamiento de la fase de la onda electromagnética en función del tiempo y la distancia. También es importante entender como se comporta la magnitud o la fuerza con el tiempo y la distancia al transmisor. A medida que la onda se mueve lejos del transmisor, su energía total permanece igual pero es propagada sobre una distancia más larga. Esto significa que la energía en cualquier punto (o su densidad de energía) decrece con el tiempo y la distancia, como se muestra en la Figura IV.8.

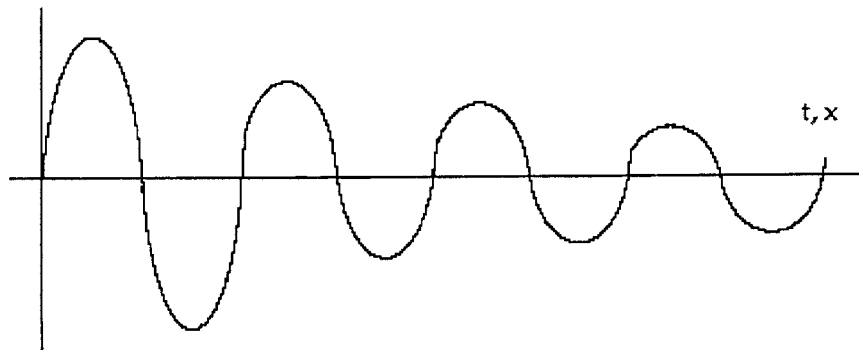


Figura IV.8. Efecto del tiempo y la distancia en la energía

La magnitud de la onda decrece exponencialmente a medida que la distancia del transmisor aumenta. La ecuación IV.14. representa la forma general de la onda electromagnética que nos interesa para aplicaciones SAR e IFSAR.

IV.4.2. Modelo interferométrico

La mayoría de los usos de las imágenes SAR implican un despliegue de la magnitud de la imagen reflectiva y descartan la fase cuando la imagen compleja tiene la magnitud detectada. La fase de un píxel de imagen que representa un único difusor es determinística; sin embargo, la fase de un píxel de imagen representa múltiples difusores (en la misma celda de resolución), y está compuesta tanto de la parte determinística, como de la no determinística o estadística. Por esta razón, la fase de píxel en una sola imagen SAR no es generalmente útil. Sin embargo, con la selección apropiada de una geometría de imagen, se pueden adquirir dos imágenes SAR que tengan casi idénticos componentes de fase no determinísticos. Estas imágenes SAR pueden ser restadas, dejando solamente la diferencia de fase determinística de dos imágenes que es muy útil.

La Figura IV.9. muestra el modelo geométrico básico para un sistema de interferometría SAR.

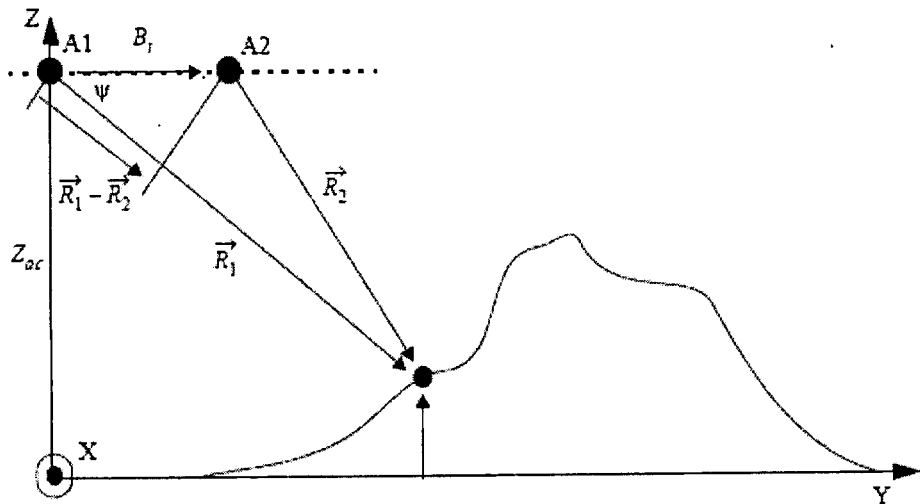


Figura IV.9. Modelo geométrico del sistema interferométrico

Donde:

A1 = Antena 1

A2 = Antena 2

B_i = Línea Base

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

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

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

Z_{ac} = Altura de la antena 1

Una línea de base rígida B_i separa dos antenas, A1 y A2. Esta separación causa que las dos antenas iluminen la escena en ángulos ligeramente diferentes de depresión, con relación a la línea de base. Aquí, Ψ es el ángulo nominal de depresión desde A1 al difusor con relación a la línea de base. El modelo asume que la plataforma viaja a una velocidad constante en la dirección X mientras la línea de base permanece paralela al eje Y a una altura constante Z_{ac} por encima del plano XY.

La ecuación IV.9. de la onda electromagnética describe los datos de señales captados por cada antena. Los dos grupos de datos de señales difieren especialmente en pequeñas diferencias en la geometría de la colección de datos. Las imágenes complejas son generadas desde los datos de señales recibidos por cada antena.

Como se indicó antes, la fase de un píxel de imagen representa la fase de múltiples difusores en la misma celda de resolución y consiste tanto de componentes determinísticos como de componentes aleatorios desconocidos. Una colección de datos para interferometría SAR se adhiere a condiciones especiales para asegurar que el componente aleatorio de la fase, sea casi idéntico en las dos imágenes. La fase determinística en una imagen única es debida a la ruta de propagación en dos sentidos entre la antena asociada y el objetivo.

De nuestra ecuación derivada anteriormente para una onda electromagnética, y asumiendo la configuración estándar SAR en la cual la distancia perpendicular desde el SAR al objetivo no cambia, podemos escribir las cantidades complejas que representan un par correspondiente de píxeles de imagen, P_1 y P_2 , de la imagen 1 y la imagen 2, como:

Ecuación IV.15.

$$P_1 = a_1 \cdot e^{j(\theta_1 + \phi_1)}$$

Y

Ecuación IV.16.

$$P_2 = a_2 \cdot e^{j(\theta_2 + \phi_2)}$$

Las cantidades a_1 y a_2 representan las magnitudes de cada píxel de imagen. Generalmente, estas magnitudes son aproximadamente iguales. Las cantidades θ_1 y θ_2 son los componentes aleatorios de la fase de píxel. Representan la sumatoria vectorial de los retornos de todos los difusores no resueltos dentro de la celda de resolución e incluyen contribuciones del receptor de ruido. Con un diseño del sistema y una geometría de colección apropiados, ellos son casi iguales. Las cantidades θ_1 y θ_2 son la contribución determinística a la fase del píxel de imagen. La función deseada de la interferometría es proveer una medida de la diferencia de fase, $\theta_1 - \theta_2$.

Después, debemos relacionar el valor de fase con el vector distancia de cada antena al punto de interés. Esto se hace reconociendo que la fase y la longitud de onda de la onda electromagnética representan la distancia en número de longitudes de onda.

Ecuación IV.17 relaciona la fase con la distancia y la longitud de onda

$$\theta = \frac{4\pi R_1}{\lambda}$$

La multiplicación de una imagen y el conjugado complejo de la segunda imagen, píxel a píxel, produce la diferencia de fase entre los píxeles correspondientes de las dos imágenes. Este producto complejo produce el interferograma I con:

Ecuación IV.18.

$$I = P_1 \cdot P_2'$$

Donde el apóstrofe ' denota la operación del conjugado complejo. Con θ_1 y θ_2 casi iguales y a_1 y a_2 casi iguales, las dos imágenes difieren principalmente en cómo afecta ϕ_1 y ϕ_2 , la diferencia pequeña en los ángulos de depresión de recolección. Idealmente, cada píxel en el interferograma tiene la forma:

Ecuación IV.19.

$$I = a^2 \cdot e^{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2)\right)} = a^2 \cdot e^{j\phi_{12}}$$

usando $a_1 = a_2 = a$. La amplitud a^2 del interferograma corresponde a la intensidad de la imagen. La fase del interferograma viene a ser:

Ecuación IV.20.

$$\phi_{12} = \frac{4\pi(R_2 - R_1)}{\lambda}$$

La cual es la cantidad usada para derivar el ángulo de depresión al punto de interés relativo a la línea de base y, eventualmente, información sobre la altura del difusor con relación al plano XY. Usando la siguiente aproximación se puede llegar a la ecuación que relaciona la fase del interferograma con el ángulo de depresión nominal.

Ecuación IV.21.

$$R_2 - R_1 \approx B_i \cos(\psi)$$

Ecuación IV.22.

$$\phi_{12} \approx \frac{4\pi B_i \cos(\psi)}{\lambda}$$

En la ecuación IV.21 y la ecuación IV.22, ψ es el ángulo de depresión nominal desde el centro de la línea de base al difusor con relación a la línea de base. La no diferencia de fase indica que $\psi = 90$ grados y que el difusor está en el plano a través del centro y es ortogonal a la línea de base. La fase interferométrica involucra varios radianes de fase para difusores y otros ángulos de depresión dada la diferencia de rango $R_2 - R_1$ en muchas longitudes de onda. En la práctica, sin embargo, un sistema de interferometría no mide la diferencia total de fase de píxel. Más bien, mide sólo la diferencia de fase que queda después de restar completamente los intervalos 2π presentes (módulo 2π).

Para estimar el ángulo actual de depresión a un difusor en particular, el interferómetro debe medir la diferencia de fase total de píxel de muchos ciclos. Esta información está disponible, por ejemplo, por desenvolvimiento de las medidas de fase interferométricas crudas comenzando en una posición de escena conocida.

Debido a la ambigüedad impuesta por el problema de fase envuelta, es necesario buscar el ángulo de depresión relativa y la altura relativa entre difusores dentro de una escena antes que el ángulo de depresión y la altura absoluta. El diferencial de la ecuación 15 con respecto a ψ suministra esta medida relativa. Este diferencial es:

Ecuación IV.23

$$\Delta\phi_T = -\left(\frac{4\pi B_i}{\lambda}\right)\text{sen}(\psi)\Delta\psi$$

o

Ecuación IV.24.

$$\Delta\psi = -\left[\frac{\lambda}{4\pi B_i \text{sen}(\psi)}\right]\Delta\phi_{12}$$

Este resultado indica que dos píxeles en el interferograma que difieren en la fase por θ_{12} representan difusores que difieren en el ángulo de depresión por $\Delta\psi$. La Figura IV.10 muestra la geometría de colección diferencial.

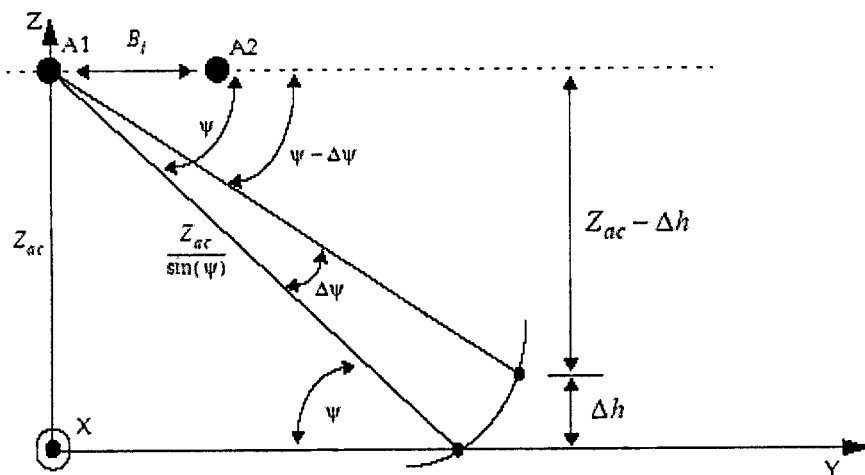


Figura IV.10 Colección geométrica diferencial

Con esta geometría, un cambio $\Delta\psi$ en el ángulo de depresión está relacionado con un cambio Δh en la altura (en un rango igual desde la mitad de la línea de base) por la ecuación IV.25.

Ecuación IV.25

$$Z_{ac} - \Delta h = \frac{Z_{ac} \operatorname{sen}(\psi - \Delta\psi)}{\operatorname{sen}(\psi)}$$

Utilizando una aproximación útil de ángulo pequeño en la ecuación IV.25. y reemplazando la ecuación IV.24. en la ecuación IV.25, se obtiene el resultado de la ecuación IV.19. para Δh .

Ecuación IV.26.

$$\Delta h \approx Z_{ac} \cot(\psi) \Delta\psi$$

$$\Delta h = - \left[\frac{\lambda Z_{ac} \cot(\psi)}{4\pi B_1 \operatorname{sen}(\psi)} \right] \Delta\phi_{12}$$

Observe que, debido a que estamos calculando el diferencial de altura, necesitamos por lo menos un valor de altura conocido para calcular la altura absoluta. Esto significa que hay necesidad de por lo menos un DEM con el fin de calcular alturas absolutas a partir de los procesos interferométricos.

IV.5. Relieve del basamento

Para el análisis de subsidencia del Valle de Aguascalientes y la predicción del agrietamiento del suelo, se toma en cuenta el relieve del basamento somero, con el que se pueden trazar una serie de perfiles que pueden ser fácilmente modelados con el programa de análisis computacional o sistematizado.

La forma del basamento rocoso, o no compresible, tiene un efecto primario

en la formación de grietas en la superficie del suelo; si a esto se añade que un suelo no soporta esfuerzos de tensión mayores de 0.1 a 0.4 por ciento (Jashens y Holtzer 1980), entonces se puede concluir que por lo menos algunas de las grietas que se observan actualmente en la superficie de la Ciudad se deben a esta causa.

De la información de la litología de los pozos se ha podido obtener el relieve del basamento somero para el Valle de Aguascalientes el cual está ilustrado en la figura IV.11, en donde se dibujan las curvas de nivel del estrato no compresible, o basamento somero. En la figura IV.12. se presenta una perspectiva del basamento.

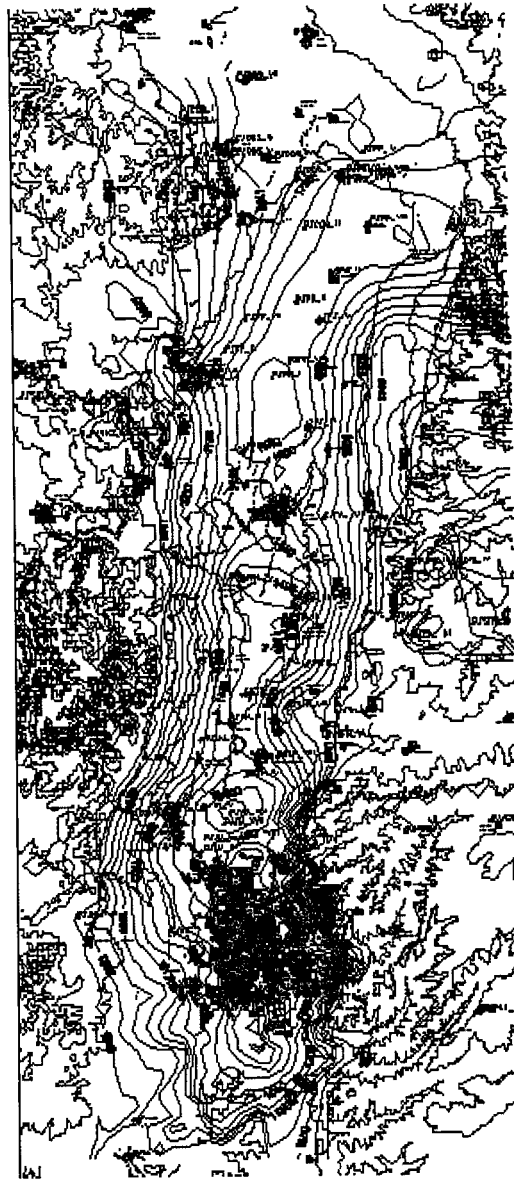


Figura IV.11. Curvas de nivel del basamento somero (Arroyo et al, 2002).

De acuerdo con esta topografía, el subsuelo del Valle presenta una forma de fosa tectónica tipo graben, bastante bien definida que corre de norte a sur con su parte más profunda ubicada prácticamente al centro del valle. Salta a la vista la correspondencia que existe entre la dirección de los agrietamientos superficiales y

las curvas de nivel del basamento somero. Los agrietamientos extremos al poniente y al oriente de hecho delimitan el ancho del valle y corresponden con las fallas geológicas que delimitan la fosa tectónica de Aguascalientes.

En general, cabe esperar que los agrietamientos sigan las curvas de nivel del basamento incompresible y que las zonas de agrietamiento sean más densas en donde las curvas de nivel del basamento están más próximas, es decir en donde el basamento presenta pendientes más fuertes. En algunas zonas, sin embargo, los agrietamientos cruzan las curvas de nivel lo cual se debe fundamentalmente a la escasez de datos en esa zona, ya que a pesar de que allí existan pozos, no todos alcanzan el basamento.

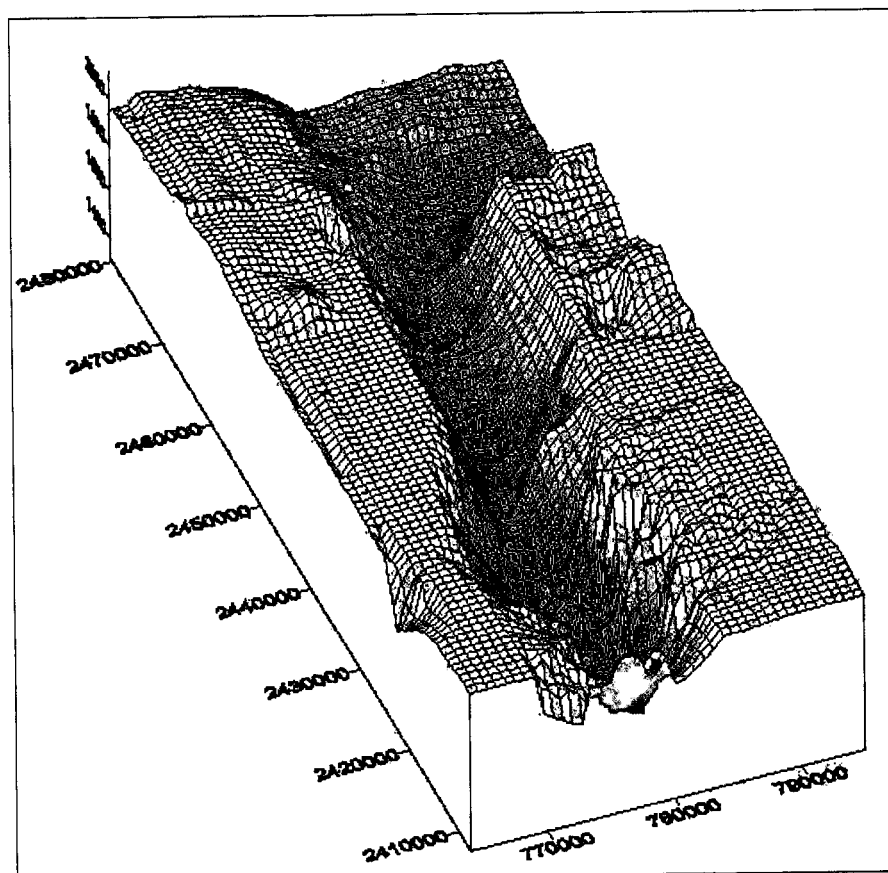


Figura IV.12. Isométrico del basamento del Valle de Aguascalientes.

La profundidad máxima del material compresible se ubica alrededor de los 650 m. Bajo este material pueden existir estratos de grava y boleos con algo de material fino, sin embargo, se considera que debido a que esos materiales son muy poco compresibles, no influyen apreciablemente en el fenómeno de consolidación.

La profundidad del basamento somero es irregular. En algunas zonas la presencia de las irregularidades pueden actuar como barreras al flujo del agua en la dirección norte-sur. Por ejemplo, en la parte norte de la zona metropolitana de la ciudad de Aguascalientes, se observa una barrera que corre en dirección NE-SW la cual se manifiesta también en la dirección de los agrietamientos de esa zona. Otra barrera se ubica a la altura del poblado de Jesús María y otra cercana a Pabellón de Arteaga.

Todo el flanco poniente de la fosa, a la altura de la zona metropolitana de Aguascalientes y hasta el poblado de Jesús María, se observa un talud muy pronunciado del basamento incompresible lo cual lo identifica como una de las zonas de más alto riesgo de agrietamiento.

Otra zona con riesgo de agrietamiento se identifica cerca del límite sur de la fosa, aunque en este caso sería necesario conocer la información de los pozos que se ubican fuera de la fosa para tener mayor certeza sobre el perfil del basamento. Para poder identificar otras zonas de riesgo, es necesario proceder a campañas intensivas de micro-gravimetría y otras técnicas geofísicas que permitan definir con mayor precisión la topografía del basamento incompresible.

Cabe mencionar que algunos de los pozos consultados no penetraban hasta el basamento volcánico, por lo que no en todos los casos fue posible conocer con exactitud la profundidad de dicho basamento. Principalmente en la parte central del Valle los pozos no dan dicha información, más bien en las partes extremas, al oriente

y poniente se encuentran varios casos donde la profundidad del basamento se conoce.

Las curvas de nivel del basamento se graficaron mediante el Programa SURFER, para observar con más detalle los desniveles que se presentan, dicho programa mediante un proceso de digitalización permitió obtener el relieve del basamento somero y su isométrico, como en algunos pozos no se contaba con suficiente información se tomaron en cuenta datos aproximados para alimentar el programa.

V. TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Las técnicas que permiten medir y dar seguimiento al fenómeno de hundimiento en el Valle de Aguascalientes, pueden ser muy variadas, desde la simple utilización de equipos topográficos hasta técnicas más finas, con equipos de posicionamiento GPS de precisión e Interferometría con imágenes satelitales.

V.1 Instrumentación Topográfica

En un estudio realizado en 1985 por la Universidad Autónoma de Aguascalientes se detectó la necesidad de medir los desplazamientos diferenciales entre los lados este y oeste de las grietas, razón por la cual se construyeron siete estaciones de control con cuatro monumentos alineados, perpendiculares a la traza de las grietas. Durante el año de 1985 no se detectaron movimientos apreciables, Aranda Gomez y Aranda Gomez (1985).

Cada estación consta de cuatro placas con anclas soldadas de varilla corrugada en la parte inferior. Las placas se colaron en un hueco de 0.5 x 0.5m. La profundidad de anclaje es variable pues se procuró alcanzar la capa de arena limosa cementada. Cada placa está grabada con la fecha de su colocación. Las distancias entre las placas son variables debido a que éstas se colocaron acomodándose a las circunstancias físicas del lugar de su ubicación.

Ya que la nivelación topográfica se hizo de forma convencional y hasta la fecha muy documentada en este capítulo no se hace mucho énfasis en ella, en el capítulo VI Análisis y resultados se presentan las derivaciones de ésta técnica de medición

V.2. Mediciones con GPS de precisión

La tecnología GPS (*Global Positioning System*) fue desarrollada por el departamento de defensa de EEUU como un recurso global para navegación y posicionamiento de uso militar y civil. El sistema se basa en una constelación de 24 satélites en órbita a una distancia de más de veinte mil kilómetros.

Estos satélites funcionan como puntos de referencia, con los cuales un receptor en tierra puede "triangular" su propia posición. Los satélites funcionan como puntos de referencia ya que sus órbitas son monitoreadas con gran precisión desde estaciones en tierra. Al medir el tiempo de viaje de las señales transmitidas desde los satélites, un receptor GPS en tierra puede determinar la distancia entre éste y cada satélite. Al utilizar las mediciones de distancia de cuatro satélites distintos, y algunos cálculos matemáticos, el receptor reconocerá la latitud, longitud y altura en que se encuentra, la dirección que presenta y la velocidad de movimiento.

De hecho, los receptores más avanzados pueden calcular su posición en cualquier lugar del orbe con una diferencia de error menor a cien metros, en tan sólo un segundo. Hay receptores más sofisticados que pueden determinar la posición con una precisión de unos pocos milímetros.

Una gran ventaja es que las señales GPS son accesibles para el uso del público en general, no hay cuotas, licencias o restricciones para su empleo. El GPS se ha convertido en un estándar internacional para navegación y posicionamiento, por sus resultados precisos y su disponibilidad.

Por medio del convenio realizado por la U.A.Q. la U.N.A.M. y el Instituto del Agua de Aguascalientes se realizaron varias campañas de medición a lo largo del valle de Aguascalientes de Diciembre del 2003 a Enero del 2004 y posteriormente

también se realizó otra campaña en Diciembre de 2004 donde se aplicó la técnica de medición con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Estos puntos fueron estratégicamente localizados con el fin de obtener datos suficientes para poder inferir con estos, datos históricos y futuros el comportamiento del hundimiento del valle de Aguascalientes.

El tipo de testigo utilizado para los puntos de medición es una estaca metálica de 30 cm, como se muestra en la Foto. V.1.

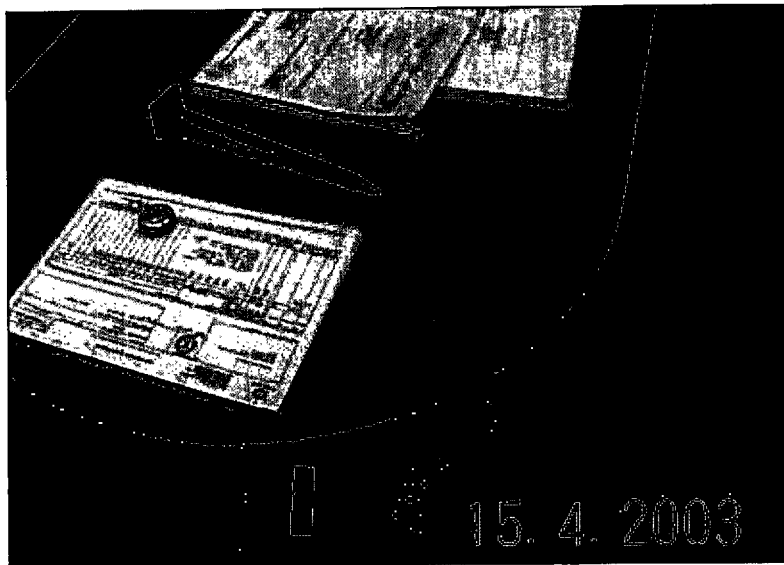


Foto V.1. Testigo utilizado

En las Fotos V.2. y V.3. se puede apreciar algunos puntos medidos dentro y fuera de la ciudad de Aguascalientes, el equipo que se utiliza es un GPS Trimble modelo 5700 y el tipo de antena es Choke Ring.

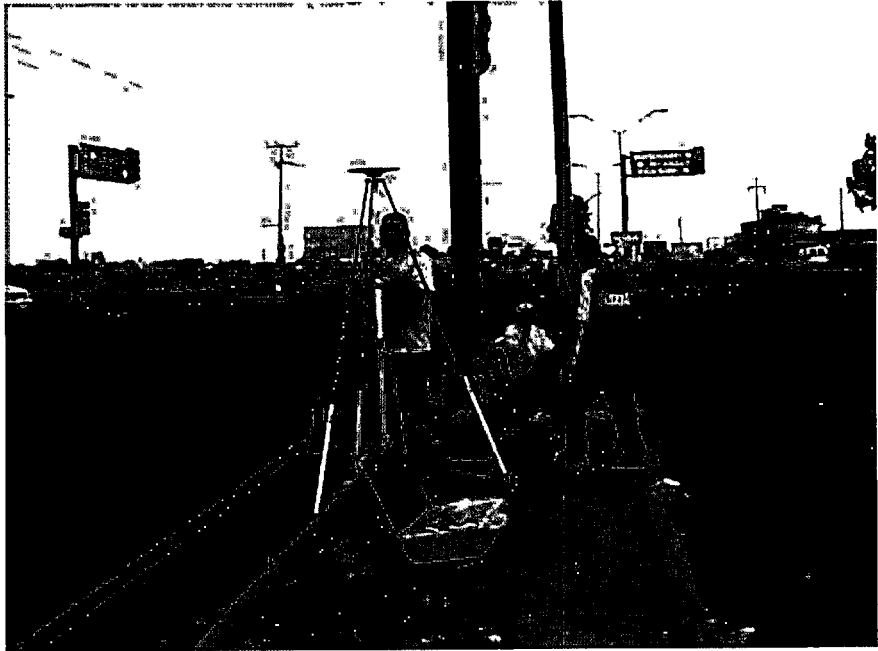


Foto V.2. Medición en Cd. De Aguascalientes Tercer anillo Periférico



Foto V.3. Medición en municipio de Rincón de Romos

V.2.1. Técnica de levantamiento

El levantamiento estático es la técnica de mayor precisión, pero este requiere demasiado tiempo de ocupación en cada base. Como todo levantamiento estático GPS requiere de por lo menos dos receptores (un receptor para cada punto definiendo la línea base), y cada receptor debe estar cargando simultáneamente observaciones de por lo menos cuatro satélites en común. Las observaciones deben ser almacenadas por un amplio periodo de tiempo (usualmente alrededor de 45 a 60 minutos).

Aunque una gran cantidad de datos es almacenada durante este periodo, esto permite que el software de procesamiento resuelva más problemas en los datos colocados que podría en otras palabras ser resueltos en periodos de observación cortos.

La información asociada con la ocupación es almacenada en un archivo por separado único. Hay únicamente un archivo por ocupación. Si el receptor es apagado a la mitad de la ocupación, el segundo archivo puede ser abierto y el levantamiento puede continuar. En este caso hay más de un archivo por ocupación.

El levantamiento realizado con un receptor de una o doble frecuencia. El receptor 5700 es un receptor de doble frecuencia.

El tiempo de ocupación que requerido para un levantamiento estático depende de muchos factores. Se recomienda un tiempo de ocupación de por lo menos 45 minutos. Cuando 5 o mas satélites están disponibles, o 60 minutos cuando sólo cuatro satélites están disponibles

La técnica de levantamiento estático es generalmente usada cuando el proyecto requiere de demasiada precisión. Esto requiere de por lo menos dos receptores pero múltiples receptores pueden aumentar la productividad.

Por otra parte como resultado de un Convenio entre la UAA y el INEGI se realizó un programa de trabajo para el monitoreo geodésico de la superficie de la zona urbana, el proyecto consistió en realizar series de mediciones con receptores GPS sobre 29 pares de puntos, establecidos estratégicamente en sitios donde se desarrollan las fallas más visibles y con asentamientos diferenciales importantes.

En los sitios elegidos de manera conjunta por la UAA y el INEGI, se establecieron placas a una distancia aproximada de 15 metros de forma perpendicular a la línea que describe la fractura del terreno. Las placas se colocaron del 20 al 28 de marzo de 2003.

V.2.2. Red Geodésica Nacional Activa (RGNA)

La RGNA es una red nacional de estaciones fijas de operación continua, distribuidas geoméricamente para asegurar el cubrimiento nacional, integrada por 15 puntos establecidos físicamente mediante monumentos permanentes con coordenadas precisas. El objetivo de las estaciones de la RGNA es obtener y registrar permanentemente la información que emite en su señal el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), estas estaciones constituyen el marco de referencia geodésica básico para el país, figura V.1.

Derivado de un convenio de colaboración entre la Universidad de Guadalajara y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) se concluyó un estudio del que se obtuvieron las velocidades de desplazamiento de las 15 estaciones fijas de RGNA.

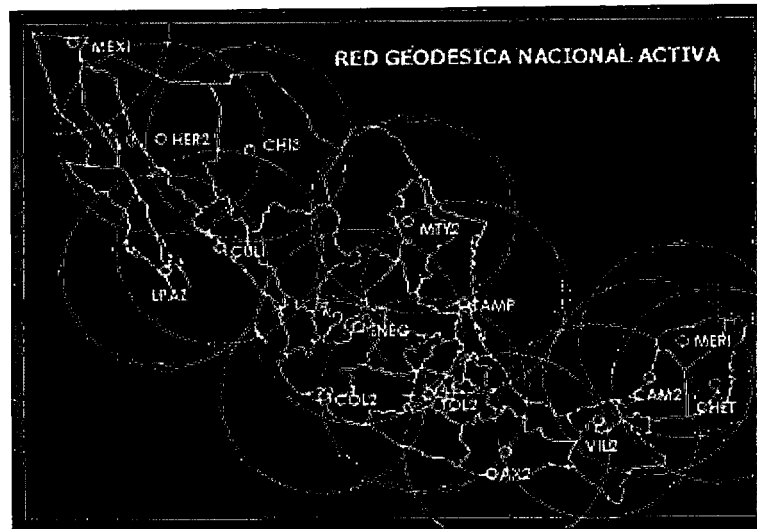


Figura V.1. Red Geodésica Nacional Activa (RGNA).

De los resultados se observa el caso especial de la estación fija "INEG" que está instalada en el edificio sede del INEGI en la ciudad de Aguascalientes, resultados que muestran el hundimiento que ha sufrido la estación con respecto al Marco de Referencia Terrestre Internacional 2000 (ITRF2000) desde 1993 hasta el primer trimestre de 2002. En la Figura V.2. se muestra la evolución en el tiempo de dicho hundimiento.

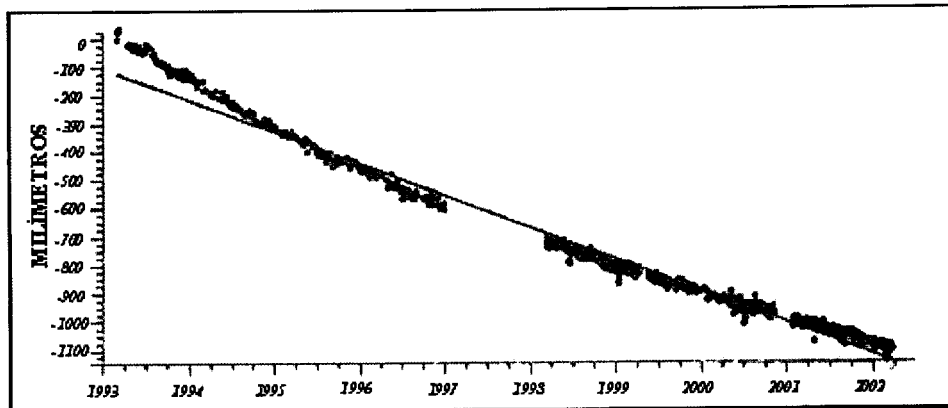


Figura V.2. Evolución del asentamiento del terreno en la estación fija "INEG".

La velocidad de hundimiento calculada es de 11.18 ± 0.96 centímetros por año, sin embargo, se observa claramente que durante los últimos tres años que abarca el estudio la velocidad presenta una tendencia a disminuir ligeramente.

V.3. Interferometría

La obtención de la altura del terreno es una de las más importantes aplicaciones para imágenes SAR. Existen dos técnicas básicas para obtener la altura de imágenes SAR. La estereoscopia y la interferometría.

La obtención de la altura a través de IFSAR aprovecha una de las cualidades únicas de las imágenes SAR: la información de la distancia desde el sensor hasta el terreno es grabada para cada píxel en las imágenes SAR. Las imágenes SAR contienen la información de la distancia en forma de fase. Esta distancia es simplemente el número de longitudes de onda de la fuente de radiación desde el sensor hasta un punto dado sobre el terreno. Los sensores SAR pueden grabar esta información porque, su origen de radiación es activo y coherente.

Desafortunadamente, esta información de fase de distancia en una sola imagen SAR es mezclada con la fase de ruido del terreno y otros efectos. Por esta razón, es imposible extraer sólo la fase de distancia de las fases totales en una sola imagen SAR. Sin embargo, si existen dos imágenes SAR que cubren la misma área desde puntos de vista ligeramente diferentes, la fase de una puede ser sustraída de la fase de la otra para producir la diferencia de distancia de las dos imágenes SAR (de aquí viene el término interferometría). Esto se debe a que otros efectos de la fase para las dos imágenes son aproximadamente iguales y se cancelan cuando son restadas. Lo que queda es una medida de diferencia de distancia de una imagen a la otra. De esta diferencia y de la información orbital, puede calcularse la altura de cada píxel.

Este capítulo cubre conceptos básicos y pasos de procesamiento requeridos para deducir la altura del terreno a partir de un par de imágenes SAR.

V.3.1 Obtención de imágenes

Para la obtención de imágenes es necesario ponerse en contacto con los administradores de los satélites que existen en órbita, como ejemplos podemos mencionar:

- ERS-1,2 (Europeo)
- Radarsat (Canadiense)
- Envisat (C-band)
- ALOS (L-band, Japones)

Cuando más reciente sea el lanzamiento de un satélite mejores resultados se obtendrán de estos, entre los nuevos satélites de radar puestos en órbita son: el Envisat lanzado en la primavera del 2003 y el Alos que fue lanzado en el verano de 2004. El costo de estas imágenes de radar oscilan entre los 100 y 500 Euros.

En el caso de éste trabajo se realizó un convenio con la Agencia Espacial Europea (<http://www.esa.int/esaCP/index.html>) con el fin de obtener las escenas o imágenes del satélite ERS-2 a un costo menor ya que fueron destinadas a investigación científica.

Se deben solicitar las imágenes o escenas por track, frame y órbita, esta información la podemos obtener de el catalogo fuera de línea llamado DESCW (Fig. V.3), sólo es necesario bajar e instalar el software (<http://earth.esa.int/descw/>), además como valor agregado con este programa se puede calcular líneas base, la línea base entre las escenas se procura que no sean mayores a 500 Pts, E. Cabral (comunicación Personal).

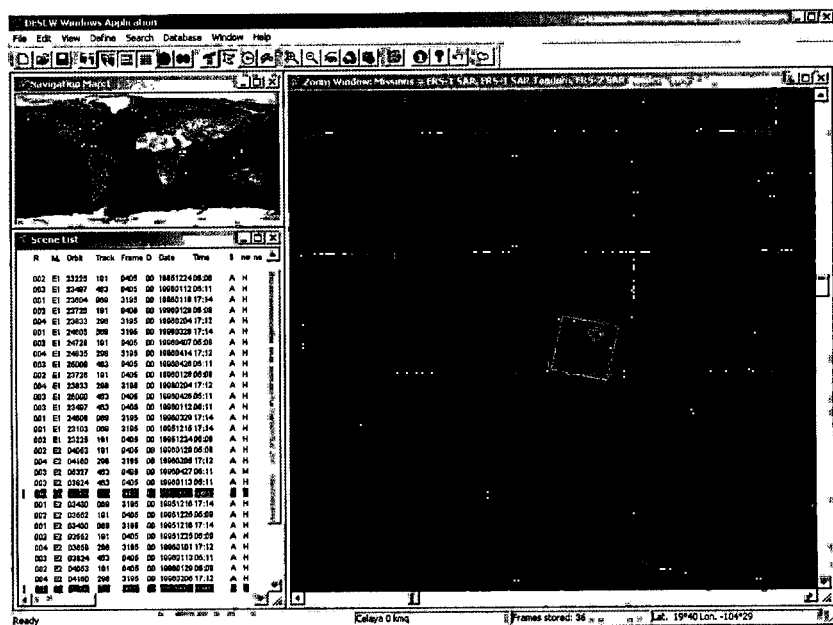


Figura V.3. Software Descw

V.3.2 Proceso Interferométrico, condiciones y dificultades

A grandes rasgos se describe el proceso interferométrico a realizar en varios pasos R. Mellors (2004), posteriormente se describe con mas detalle el proceso con el software Diapasón.

Procesamiento

- El proceso interferométrico comienza con la obtención de las imágenes de tipo raw de la misma área pero de diferente fecha (días o meses de diferencia)
- Co-registro de imágenes en resolución de píxeles.
- Medidas de las diferencias de Fases entre imágenes por cada pixel.
- Corrección por Geometría de Satélite y topografía.
- Convertir la diferencia de fases a desplazamiento de la superficie del suelo.
- Espectativa de exactitud: mm a cm de movimiento por año.
- Errores pueden ser debidos a variaciones en la orbita, al modelo topográfico y a efectos atmosféricos.

Condiciones

Las condiciones que debe reunir una imagen para poder ser procesada correctamente (R. Mellors 2004) son:

- Requiere que las señales de Retorno sean coherentes para la medición de la fase
- Áreas secas sin mucha vegetación son mejores.
- Áreas urbanas (ciudades) son buenas también.
- Es bueno también en rocas expuestas.

- La coherencia disminuye con el tiempo y si la línea base es muy larga.
- Áreas desérticas son coherentes por años; otras áreas son coherentes por días o meses.
- Cuerpos de Agua no son coherentes a las lecturas del equipo.

Dificultades del método

Las dificultades que se presentan son las siguientes (R. Mellors 2004):

- Crecimiento de Vegetación, ranchos, y cuerpos de agua causan falta de correlación.
- Vapor de agua atmosférico (Nubes) pueden causar errores.
- Requiere apoyo de un modelo topográfico (DEM).
- Las medidas son hechas a lo largo de la línea de observación del satélite, normalmente aproximadamente a 20 grados de la vertical.
- No es posible distinguir los movimientos entre la línea vertical y la horizontal con solamente un ángulo de observación.

Es necesario el uso de códigos computacionales para procesar imágenes de tipo raw, los programas tienen una relación directa entre el costo y la facilidad para poder usarlos.

Entre los softwares encontrados se puede mencionar los siguientes:

RIO-PAC. Es un software que se puede encontrar gratuito en la red (http://www.openchannelfoundation.org/projects/ROI_PAC/) pero tiene algunas desventajas ya que es más difícil de usar, requiere más conocimiento y capacitación y no tiene ayuda en línea

DIAPASÓN. Es un programa de bajo costo (\$ 3000 Euros aproximadamente) es un poco mas fácil de usar requiere de conocimiento y capacitación, este software si cuenta con ayuda en línea (<http://www.altamira-information.com/>).

ATLANTIS, GAMMA, ERDAS. Softwares comerciales de fácil uso, requiere menos capacitación y menos conocimiento (<http://www.atlantis-scientific.com> <http://www.gamma-rs.ch> <http://gis.leica-geosystems.com/> respectivamente) su costo es muy alto.

Para este trabajo se tomo la decisión de utilizar el software Diapasón de Altamira Information.

V.3.3 Descripción del software DIAPASON

El software de procesamiento interferométrico automatizado DIAPASON (*Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature*) está formado por diferentes módulos desarrollados por el CNES (Agencia Espacial Francesa), en la división de *Qualité et Traitement d'Images Spatiales (departamento de Performance de Systèmes Radar)*. Actualmente *Altamira Information* actualiza y distribuye este software (Altamira Information 2002).

DIAPASON es una cadena interferométrica completa, que contiene el software de síntesis radar PRISME (de *Processeur pour Radars Imageurs Spatiaux, Multi-Etagé*) y un utilitario de copia de ficheros, COPIER, útil para convertir las imágenes complejas de alta resolución (en inglés, *single look complex*, SLC) en imágenes multilook. Gracias a su capacidad de procesar la información geográfica, DIAPASON convierte dos imágenes radar de tipo SLC en un producto interferométrico utilizando directamente los ficheros orbitales de los satélites y los ficheros descriptores de los dos sensores.

Este método es mucho más eficaz y resistente que los procedimientos basados en la simple correlación de imágenes. El producto interferométrico final está

formado por una imagen de amplitud, una imagen de consistencia de fase (coherencia) y una imagen de diferencia de fase, llamada interferograma. Utilizando un modelo de elevación digital (*Digital Elevation Model*, DEM), estas imágenes pueden proyectarse en geometría « ortho », de forma que se pueden superponer al DEM. Tanto para el procesamiento simple como para el procesamiento « ortho », DIAPASON genera un interferograma diferencial obtenido sustrayendo al interferograma topográfico un interferograma simulado realizado a partir del DEM. Si se utiliza un DEM ficticio, o *dummy*, (o sea, que equivale a un terreno llano), el interferograma diferencial equivale a un interferograma simple al cual se han extraído las franjas de terreno llano.

El post procesamiento ayuda a eliminar las franjas orbitales residuales de los interferogramas mediante el cálculo de los gradientes de fase en líneas y columnas. Después del procesamiento y del post procesamiento, el interferograma resultante puede desarrollarse con la herramienta de desarrollo UNWRAP para obtener un valor absoluto de la diferencia de distancia entre el satélite y el punto en el suelo, en el caso de un interferograma diferencial, o una estimación de la elevación, en el caso de un interferograma directo.

DIAPASON incluye también un conjunto de herramientas complementarias para calcular el valor del índice de compresión en acimut (TAUX), el valor medio del doppler en acimut (DOPPLER) y los valores de altitud de ambigüedad entre diferentes órbitas (ALT AMBIGUITE), así como para convertir las imágenes SLC o de intensidad multilook en imágenes « ortho » (proyectadas en DEM).

V.3.4. Procesamiento con el software DIAPASON

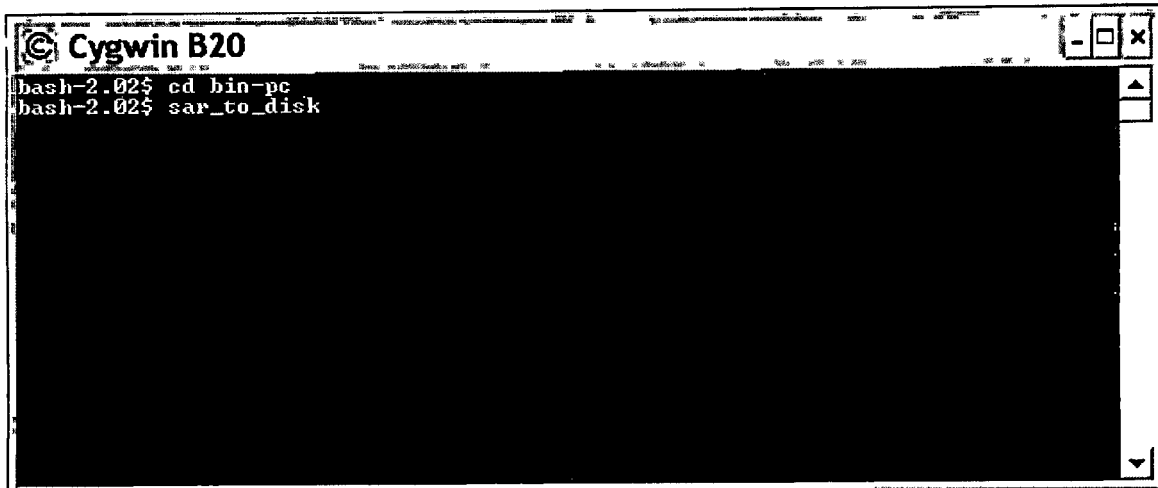
Para el funcionamiento de DIAPASÓN es necesario tener un sistema operativo UNIX o bien se puede instalar el emulador de éste sistema operativo

llamado CYGWIN32 que viene incluido en el disco de instalación del software diapasón, o bien, se puede encontrar en forma gratuita en la Internet.

El procesamiento realizado por la cadena DIAPASON empieza con los datos RAW concatenados y acaba con los interferogramas. En este capítulo, presentamos los pre-procesamientos que permiten, a todas las imágenes (masters o esclavas), pasar de un formato de tipo RAW, suministrado por la ESA (Agencia Espacial Europea), a un formato llamado concatenado utilizado como entrada en el software PRISME. Estos pre-procesamientos afectan también a dos otros softwares: TAUX y DOPPLER.

Ya instalado el software DIAPASON (manual de instalación Diapason Altamira Information 2002) el siguiente paso es conocer las características de órbita, velocidad, posición, efemérides, rango cercano, etc de las imágenes adquiridas.

En el disco suministrado por la ESA, además de el archivo de la escena, se proporcionan otros archivos que contienen la información antes mencionada ésta se puede extraer con el ejecutable que viene en la carpeta bin-pc de el programa DIAPASON llamado SAR_TO_DISK, en la figura V.4. muestra la ruta a seguir en el emulador CYGWIN32.



```

Cygwin B20
bash-2.02$ cd bin-pc
bash-2.02$ sar_to_disk

```

Figura V.4. Ruta de acceso al ejecutable Sar_to_disk

Concatenación

Este software CONCAT permite extraer de los encabezados de los datos la información necesaria antes del procesamiento interferométrico DIAPASON y reunir todos los ficheros de datos brutos en un sólo fichero. Para ello, el script EXTRACT_CONCAT utiliza un fichero que describe el formato de los datos. Este fichero, llamado PAF_<product_origin>.form (el origen del producto está escrito en el CD-ROM suministrado por la ESA), informa sobre la posición de la línea CONTADOR, sobre la posición del SWST, sobre la posición del NPRI (ver detalles más abajo), sobre la posición del inicio de los datos, sobre el número de puntos de datos brutos por línea (número de columnas) y sobre el número de los ficheros. En el directorio FORM se encuentran ejemplos de ficheros de formato.

La información extraída es la siguiente:

CONTADOR: el número del registro. Se indica en cada línea.

SWST (Sampling Window Start Time). En general, la posición del primer valor importante se encuentra entre 600 y 1100.

NPRI: Número entero vinculado a la frecuencia de repetición de pulsos (en inglés, *Pulse Repetition Frequency*, PRF). En general es 2820 o 2822.

El número de puntos complejos por registro: a menudo es 5616.

El número de registros: su valor varía entre 23000 y 32000.

A continuación se presenta un ejemplo de utilización se presenta la ruta a utilizar c: es el disco local (para ver más detalles ver el manual de utilización)

```
Sh extract_concat.sh -d1 c:/diapason/bin-pc/21abr96/scene1/dat.001 -f
c:/diapason/bin-pc /FORM/paf_italy3.form -c 21abr96.c5b
```

Para verificar que el programa de concatenación funciona bien, se crean dos ficheros *log* en el directorio actual (*extract_concat.log* y *extract_concat.log2*).

TAUX

Este software permite calcular el índice de compresión en acimut al rango cercano (*near range*, NR) y al rango lejano (*far range*, FR), los ángulos de incidencia y el tamaño de los pixels de todos los sensores radar. El índice de compresión en acimut y su variación por pixel son necesarios, como entrada, para el software PRISME.

Para utilizar el software TAUX Primero hay que copiar el modelo que se encuentra en el directorio TEMPLATE/ES en el directorio local y, luego, cambiar sus atributos:

```
mv tauxES.sh taux.sh para cambiarle el nombre.
```

```
chmod u+w taux.sh para modificarlo.
```

A continuación, hay que editar el fichero para completar las líneas que se encuentran entre los dos EOF figura V.5.

```

exit 1
}

if [ $TARGET_ARCH != pc ] ; then ulimit -c 0 ;fi

PRG='basename $0'
[ "$#" -gt 1 ] && usage $PRG

while [ $# -gt 0 ] ; do
  case $1 in
    -\?)          usage $PRG ;;
    -h)           usage $PRG ;;
    -help)       usage $PRG ;;
    *)           echo "argument inconnu '$1' ; exit 1 ;;
  esac
  shift
done

LANGUE=ESPAÑOL
export LANGUE

#-----
#                               PARTE 2
#   PARÁMETROS a introducir entre los 2 EOF...
#-----

echo "Ejecución de taux..."
taux >> tauxES.log << EOF
18962460      ! frecuencia de muestreo
846608.98    ! rango cercano
5616         ! número de columnas
7161631.28  ! altitud del satélite
45.56       ! latitud del punto en grados decimales
0.0566485   ! longitud de onda
1679.90239363 ! PRF
99.52       ! inclinación de la órbita
-1          ! dirección del ángulo de visión (der.=-1, izq.=1)
-1          ! dirección de la órbita (asc.=1, desc.=-1)
EOF

```

Figura V.5. Fichero descriptor para el software TAUX

DOPPLER

El software DOPPLER calcula el doppler medio en acimut a partir de un extracto de la imagen de los datos brutos concatenados. El cálculo de la coherencia del doppler también da una medida de validez de esta estimación.

Para utilizar el software DOPPLER Primero hay que copiar el modelo que se encuentra en el directorio TEMPLATE/ES en el directorio local y, luego, cambiar sus atributos:

`mv dopplerES.sh doppler.sh` para cambiarle el nombre.

`chmod u+w doppler.sh` para modificarlo.

A continuación, hay que editar el fichero para completar las líneas que se encuentran entre los dos EOF figura V.6.

```

#'/bin/sh
#-----
#
#           COMPUTATION OF MEAN AZIMUTH DOPPLER
#-----
LANGUE=ENGLISH
export LANGUE

#-----
#
#   PARAMETERS TO INPUT ARE BETWEEN THE TWO "EOF"
#-----

echo "Execution of doppler..."
doppler >> dopplerGB.log << EOF
f=c:/DIAPASON/bin-pc/27ags02/27ags02.c5b,n1=28000,nc=5616,type=c5b ' input raw data file
extract,line1=200,nc=5616,n1=28000 ! transformation
EOF
  
```

Figura V.6. Fichero descriptor para el software DOPPLER

Para ver mas detalles sobre las gestiones de entradas y salidas ver el capitulo de anexos en el manual de Altamira Information (2002)

PRISME

El software PRISME es un procesador radar universal que permite la transformación de datos brutos de tipo RAW en una imagen compleja focalizada de mejor resolución.

En rango, el tratamiento utiliza una modulación lineal en PRF llamada *chirp*. La función de modulación utilizada se caracteriza por un pico de autocorrelación muy estrecho que va a permitir la obtención de una resolución excelente en rango. En acimut, se sintetiza un diagrama de antena más estrecho, comprimiendo asimismo la frecuencia modulada. En este caso, la modulación está causada por un efecto doppler.

Para Utilizar el software PRISME Primero hay que copiar el modelo que se encuentra en el directorio TEMPLATE/ES en el directorio local y, luego, cambiar sus atributos:

```
mv prismeES.sh prisme.sh para cambiarle el nombre.
chmod u+w prisme.sh para modificarlo.
```

A continuación, hay que editar el fichero para completar las líneas que se encuentran entre los dos EOF.

- índice de compresión en rango,
- número de puntos del *chirp*,
- longitud de onda,
- frecuencia de muestreo,
- doppler medio en acimut (suministrado por el software DOPPLER),
- doppler medio en rango (igual a cero),

- índice de compresión en acimut en el primer punto de los datos brutos (suministrado por el software TAUX),
- variación del índice de compresión en acimut por pixel (suministrado por el software TAUX),
- factor de presuma,
- posición de la primera línea procesada,
- posición del primer punto procesado,
- número de líneas procesadas,
- número de puntos procesados.

Fichero orbital.

Para poder procesar las imágenes en el software DIAPASON es necesario crear un fichero orbital, para el cual hay que editar otro fichero que contiene la información de la órbita de la imagen en proceso.

Para Utilizar el software orbcreate Primero hay que copiar el modelo que se encuentra en el directorio TEMPLATE/ES en el directorio local y, luego, cambiar sus atributos:

```
mv orbcreateES.sh prisme.sh para cambiarle el nombre.  
chmod u+w orbcreate.sh para modificarlo.
```

A continuación, hay que editar el fichero para completar las líneas que se encuentran entre los dos EOF figura V.7.

```

orbcreate >> orbcreateGB.log << EOF
c:/diapason/bin-pc/ERS1_20may01.ord      ! Name of the orbital file to be created
0.01                                     ! Coefficient to apply to the position
0.00001                                  ! Coefficient to apply to the velocity
140                                       ! Julian day of the first state vector
5                                         ! Number of orbital state vectors
62555                                     ! Time (in seconds) for the first state vector
-1.119604040000000E+06
-6.543728120000000E+06
2.686088560000000E+06
-2.121489270000000E+03
-2.449530950000000E+03
-6.824985710000000E+03
62563                                     ! Times (in seconds) for the second state vector
-1.128436650000000E+06
-6.553870960000000E+06
2.657824150000000E+06
-2.117908840000000E+03
-2.418743880000000E+03
-6.837103300000000E+03
! Seconds are automatically computed for other state vectors
-1.137254220000000E+06
-6.563885490000000E+06
2.629109520000000E+06
-2.114269950000000E+03
-2.387953410000000E+03
-6.849091690000000E+03

-1.146056510000000E+06
-6.573771560000000E+06
2.600545200000000E+06
-2.110572670000000E+03
-2.357100430000000E+03
-6.860950670000000E+03

-1.154843260000000E+06
-6.583528970000000E+06
2.571931740000000E+06
-2.106617030000000E+03
-2.326205460000000E+03
-6.872680010000000E+03

EOF

```

Figura V.7. Fichero Orbcreate

La información de los vectores de velocidad y posición se pueden extraer de los archivos que creamos con el programa `sar_to_disk` (al principio de este capítulo).

Cadena Interferométrica DIAPASÓN

La cadena interferométrica DIAPASON está compuesta por dos ficheros de comandos, llamados scripts:

- El script de datos: `diapasonES.sh`,
- El script de ejecutables: `automaticES.sh`.

A continuación, se presenta brevemente estos dos scripts.

El script de datos diapasones.sh es un fichero de comandos que contiene toda la información necesaria para el procesamiento. Es el interfaz estándar para el usuario y deberá completarlo adecuadamente para ejecutar cadena interferométrica Fig. V.8.

El objetivo del script es asignar las variables que posteriormente se suministran al script de ejecutables, que se lanza al final del fichero script de datos.

El script de ejecutables automaticES.sh es el fichero de comandos que gestiona la ejecución de diferentes etapas de la cadena interferométrica. En este manual no se describe detalladamente porque, en principio, el usuario no debe modificarlo. La única tarea que se pide al usuario es inicializar el script de datos.

```

-----
#
#           PARTE 2
#   LOS PARÁMETROS A ASIGNAR SE ENCUENTRAN AQUÍ DEBAJO...
#   LA LÍNEAS QUE CONTIENEN ## SON IMPRESCINDIBLES
#
-----
LANGUE=ESPAÑOL

-----
#
#           INICIO Y FIN DEL PROCESAMIENTO
#
-----

START=SIMU_SAR
END=CLEAN_DEM

# Definición de los valores posibles para los parámetros START y END :
#
# SIMU_SAR   ----> simulación
# CORREL_SIH ----> correlación entre imagen master y simulación
# CORRECTION ----> corrección del rango cercano y adquisición del tiempo de inicio
# CORREL_IRA -- --> correlación entre imagen master e imagen esclava
# GRID       ----> cómputo de rejillas de deformación
# CHANGE0    ----> cambio de geometría de la imagen esclava
# INTERF_SAR ----> cálculo del interferograma en geometría SAR
# INTERF_DEM ----> cálculo del interferograma en geometría DEM
# GRADIENT_SAR ----> medición del gradiente del interferograma en geometría SAR
# CLEAN_SAR  ----> limpieza lineal del interferograma en geometría SAR
# GRADIENT_DEM ----> medición del gradiente del interferograma en geometría DEM
# CLEAN_DEM ----> limpieza lineal del interferograma en geometría DEM

# START es la primera etapa
# END   es la última etapa

-----
#
#           ASIGNACIÓN DE DISCOS DE PRODUCTOS DE SALIDA
#
-----

WDIR=C:/DIAPASON/BIN-PC ## directorio de trabajo
DK=$WDIR                # directorio para los ficheros de simulación

```

Figura V.8. Script de datos diapason

Ficheros descriptores

Se necesitan cuatro ficheros descriptores para el funcionamiento de la cadena ineterferométrica, estos ficheros podemos crearlos en wordpad o bien pueden ser creados en notepad, a continuación se describen los cuatro ficheros por crear.

Descripción del sar

Es muy fácil utilizar estos ficheros ya que sólo hay que completar la información que nos piden, información que ya hemos trabajado antes en otros programas, así que debemos ya estar familiarizados con ella.

El usuario debe intentar seguir una regla de nomenclatura al nombrar los ficheros descriptores. Aquí, por convención, vamos a nombrar este fichero sar_<nombre_del_SAR>.dat, donde <nombre_del_SAR> representa el nombre del radar que ha adquirido las imágenes que hay que procesar Fig. V.9.

Así, poniendo todos estos ficheros en un directorio previsto para ello (\$DIAPASON_HOME/DAT), acabaremos teniendo una biblioteca completa de ficheros descriptores de SAR y supondrá un trabajo menos. La mayoría de los descriptores de los radares actuales ya se encuentra en este directorio (c:/Diapasón/dat.)

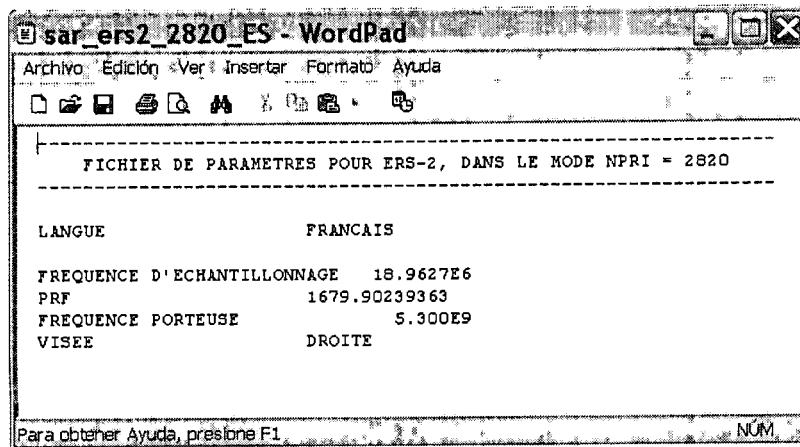


Figura V.9. Fichero descriptor del SAR

Descriptor de la geometría las imágenes radar

El fichero descriptor de la geometría de una imagen radar es la siguiente fig.

V.10.

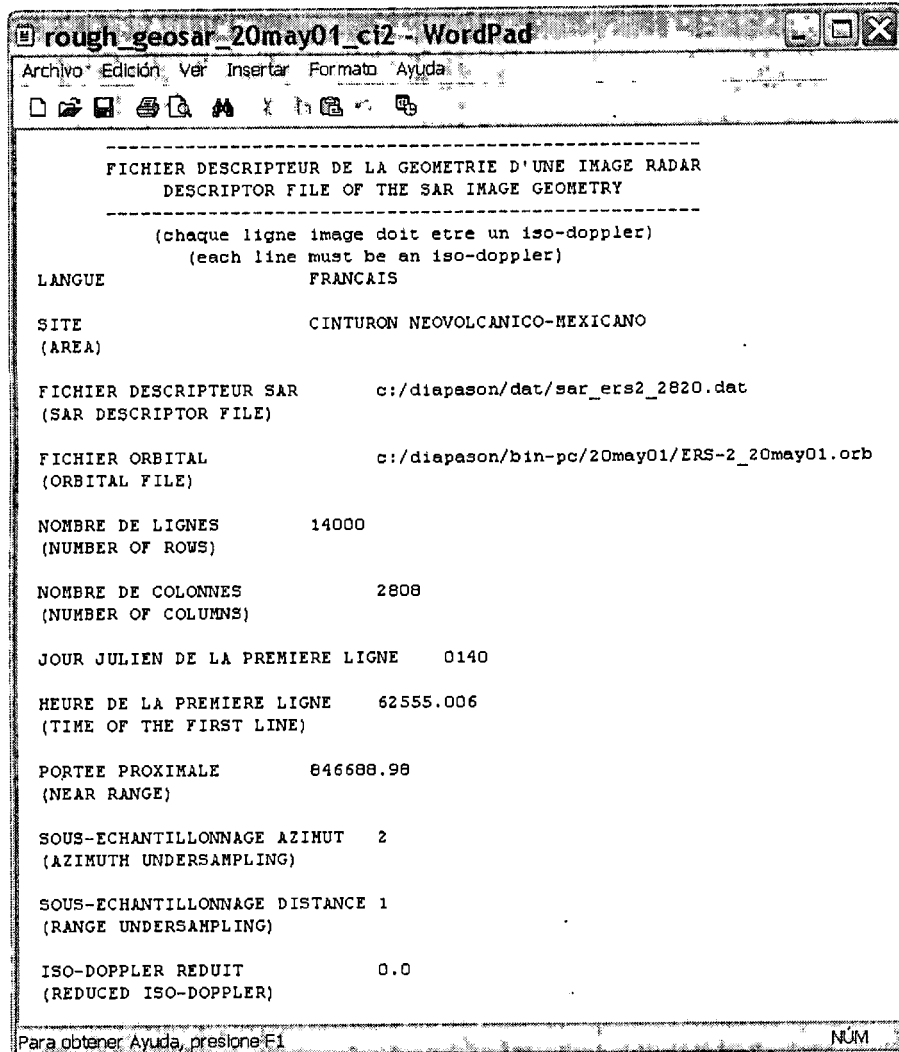


Figura V.10. Fichero descriptor de la geometría de la imagen.

Como en el caso de la nomenclatura de los ficheros descriptores de SAR, vamos a dar a los ficheros descriptores de geometría el nombre rough_geosar_<nombre_genérico>.dat, que significa geosar grueso. Aquí se utiliza el inglés para permitir una mayor compatibilidad entre las diferentes lenguas.

Se deben crear dos ficheros de este tipo, o sea, uno para la imagen esclava y uno para la imagen master, que se llaman rough porque aún no están fijados sobre

el DEM. Después de haber ajustado la geometría (a través del programa cormoy), el fichero descriptor de geometría de la imagen master perderá su calificativo de « rough » (grueso) para convertirse en precise (mas detalle en el manual de Altamira Information 2002).

Fichero descriptor del DEM

A continuación se describe brevemente el último de los ficheros descriptores que se utilizan para poder correr la cadena interferométrica DIAPASON Fig. V.11.

La primera parte del fichero descriptor está destinada a la definición del fichero binario del DEM, o sea, su nombre, sus dimensiones y el tipo de datos que contiene. Al lado de la palabra clave FICHERO BINARIO también es posible introducir el término NINGUNO (obligatoriamente en mayúscula). En este caso, el DEM será ficticio y poseerá la altitud introducida al lado de la palabra clave ALTITUD CONSTANTE.

La segunda parte del fichero descriptor permite limitar el procesamiento a una parte del DEM. A veces la superficie que el DEM cubre del suelo es mucho mayor que la de la imagen radar. Escribiendo SI al lado de la palabra clave EXTRACCION y completando los parámetros posteriores, el procesamiento sólo se encargará de una parte del DEM.

Cada DEM tiene sus propios parámetros OFFSET DE ALTITUD, FACTOR DE ESCALA EN ALTITUD y ELIPSOIDE ASOCIADO, que hay que completar adecuadamente. Al lado de la palabra clave TIPO DE COORDENADAS hay que introducir el tipo de coordenadas, después se completa la sección correspondiente. No describiremos con más detalle estas secciones ya que las explicaciones sobre los

parámetros que hay que introducir en el fichero descriptor se encuentran normalmente en el mismo.

```

-----
FICHER DESCRIPTIF D'UN MNT
DESCRIPTOR FILE OF THE DEM
-----

LANGUE                                FRANCAIS
-----

FICHER BINAIRE                        AUCUN
(BINARY FILE name or AUCUN:none for dummy file)

NOMBRE DE LIGNES                       20000
(NUMBER OF ROWS)

NOMBRE DE COLONNES                     20000
(NUMBER OF COLUMNS)

(si fichier mnt effectif/if DEM file exists :)
CODAGE                                 I2
(I2, I4 ou R4)

(si aucun fichier/if
not binary file:)
ALTITUDE CONSTANTE                     0
(CONSTANT ELEVATION)
-----

EXTRACTION                             OUI
(OUI ou NON)
(si oui :)
PREMIERE LIGNE EXTRAITE                1
(FIRST EXTRACTED ROW)

PREMIERE COLONNE EXTRAITE              1
(FIRST EXTRACTED COLUMN)

LIGNES EXTRAITES                       20000
(EXTRACTED ROWS)

COLONNES EXTRAITES                     20000
(EXTRACTED COLUMN)

PAS D'EXTRACTION DES LIGNES            1
(NO EXTRACTED ROW)

PAS D'EXTRACTION DES COLONNES         1
(NO EXTRACTED COLUMNS)
-----

```

Para obtener Ayuda, presione F1

Figura V.11 Fichero descriptor del DEM

Cabe señalar que existen más técnicas de medición pero en este trabajo sólo se utilizan éstas que se han descrito en este capítulo.

VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las diferentes técnicas de medición obtenidas en este trabajo. Además de los análisis que se realizaron con el software GEOSLOP para análisis de elemento finito y se exhiben comparaciones con los resultados obtenidos con un código computacional basado en la teoría de la pérdida volumétrica (Ochoa G. 2003).

VI.1. Mediciones Topográficas

Con el objetivo de observar la evolución del movimiento diferencial entre las fallas se llevaron a cabo mediciones durante los años 1993, 1998 y el 2002, (Zermeño et al, 2004). El resultado de las mediciones y los croquis indicativos en tres estaciones se muestran en las Figuras VI.1 a VI.6.

Para el primer monumento, Figuras VI.1 y VI.2, colocado en el Frac. Del Valle, se observa que desde 1985 y hasta el año 2002, existe un asentamiento diferencial de 55cm aproximadamente. A partir de las mediciones llevadas a cabo el movimiento ha sido de manera regular y constante, no existen evidencias de que se produzca un asentamiento repentino.

Para el segundo monumento, colocado en el Fraccionamiento Jardines de la Asunción, se observa un asentamiento diferencial menos acentuado, de apenas 25 cm., aproximadamente, desde el año 1985.

Para el tercer monumento colocado en el Centro de la zona urbana el asentamiento diferencial a ambos lados de la grieta es relativamente inexistente, los resultados reflejan un movimiento ascendente en la placa colocada en el extremo poniente.

Para el cuarto monumento colocado en el extremo noreste del Frac. Santa Anita, cercano a la Zona Militar, no se registran movimientos apreciables, parece estar sin actividad la Falla que la cruza.

En el quinto monumento, figuras VI.3 y VI.4, colocado en el Fraccionamiento San Cayetano, el movimiento diferencial medido es de aproximadamente 25 cm. desde el año 1985 hasta el año 2002.

En el sexto monumento, figuras VI.5 y VI.6 colocado en el Fraccionamiento Bona Gens a la altura de la Alberca Olímpica, se midieron los mayores asentamientos diferenciales correspondientes a los siete monumentos, 75cm, durante el intervalo de tiempo del año 1985 hasta el año 2002.

El séptimo y último monumento se colocó al Oriente de la Ciudad Universitaria de la UAA no se observan movimientos diferenciales importantes.

Las mediciones reportadas anteriormente proporcionan una idea de la magnitud del hundimiento de algunas zonas de la ciudad en los últimos 18 años y de la velocidad con que se ha venido dando, en la Tabla VI.1 se presenta un resumen.

En la figura VI.7. se presenta un perfil de los asentamientos medidos en los monumentos primero y sexto, es decir a lo largo de la Av. Adolfo López Mateos; si no se toma en consideración la grieta que existe en la proximidad del Río San Pedro,

entonces se puede decir que existe un hundimiento total para la zona urbana de Aguascalientes mayor a 1.31 m, en un período de 18 años.

Tabla VI.1. Resumen de las mediciones de nivelación llevadas a cabo en monumentos colocados desde 1985.

| ESTACIÓN | 1985 | 1993 | 1998 | 2003 | DESNIVEL | VELOCIDAD |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------|
| 1 Grieta Del Valle | 99.35 | 99.12 | 99.11 | 98.80 | 0.55 | 0.031 |
| 2 Jardines de la Asunción (IMSS) | 98.91 | 98.82 | 98.79 | 98.76 | 0.15 | 0.008 |
| 3 Grieta Centro | 99.71 | 99.62 | 99.61 | 99.58 | 0.13 | 0.007 |
| 4 Grieta Zona Militar | 97.90 | 97.78 | 97.64 | 97.56 | 0.34 | 0.019 |
| 5 Grieta San Cayetano | 99.19 | 99.03 | 98.85 | 98.81 | 0.38 | 0.021 |
| 6 Grieta IV Centenario | 98.36 | 98.10 | 97.80 | 97.60 | 0.76 | 0.042 |
| 7 Grieta Universidad | 98.83 | 98.82 | 98.79 | 98.76 | 0.07 | 0.004 |

Observaciones y desnivel en metros, velocidad en metros/año.

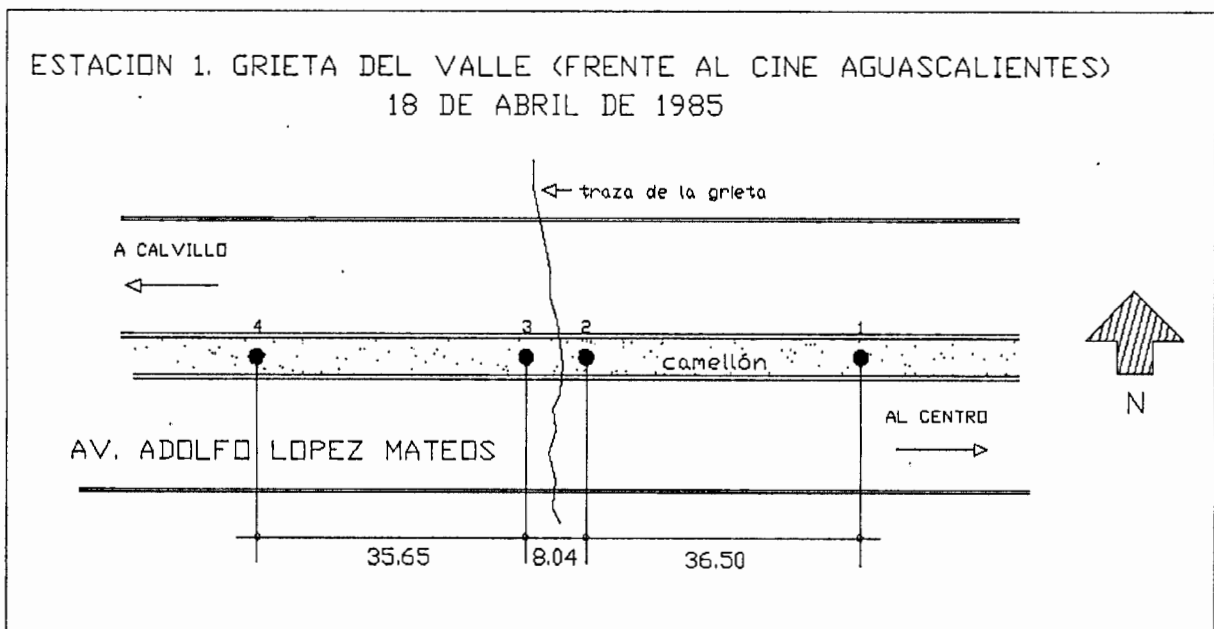


Figura VI.1 Croquis de localización del primer monumento

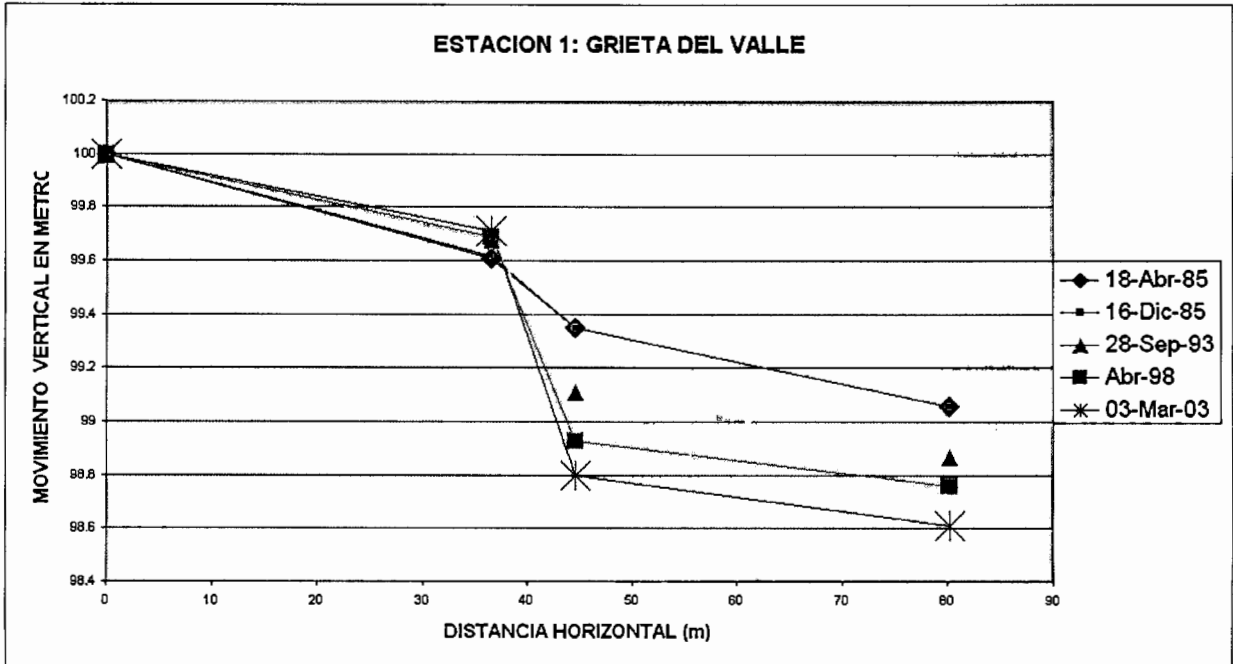


Figura VI.2. Mediciones llevadas a cabo en el primer monumento.

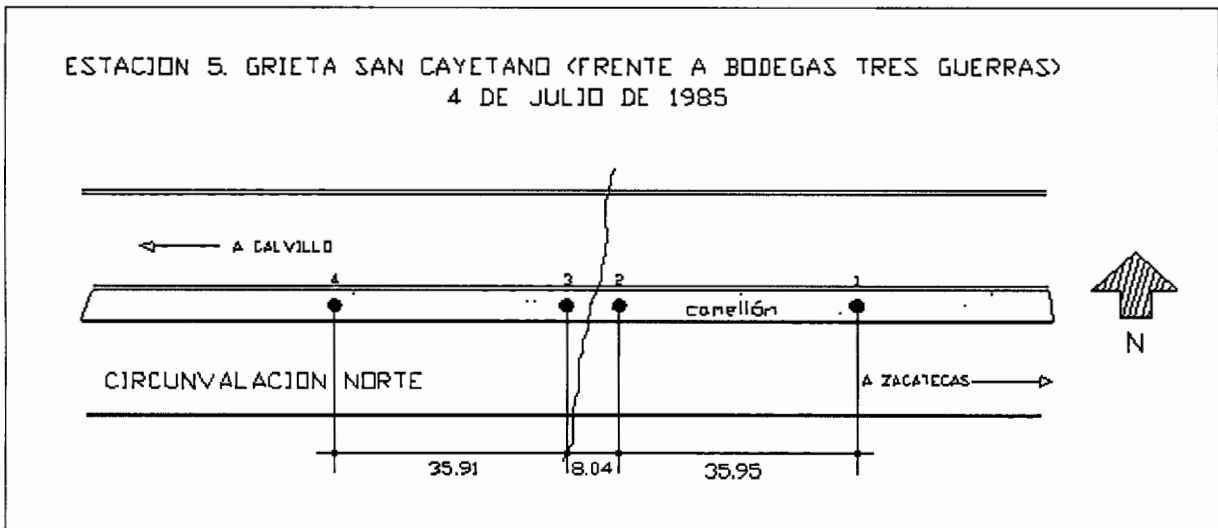


Figura VI.3. Croquis de localización del quinto monumento.

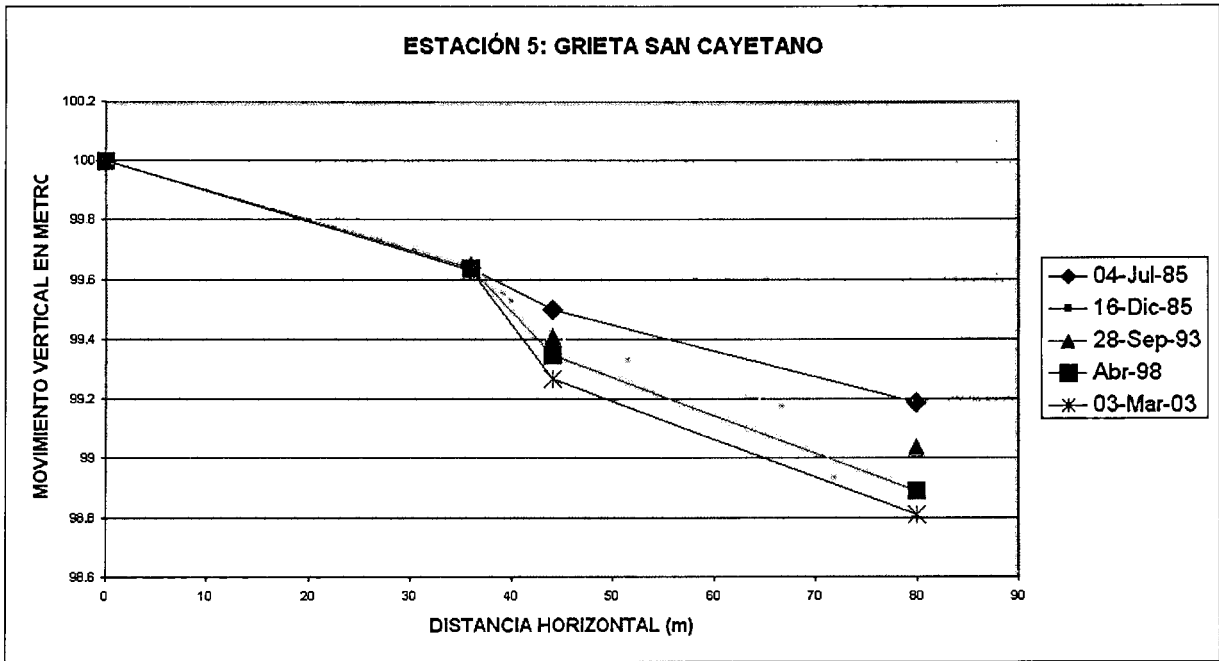


Figura VI.4. Mediciones realizadas en el quinto monumento.

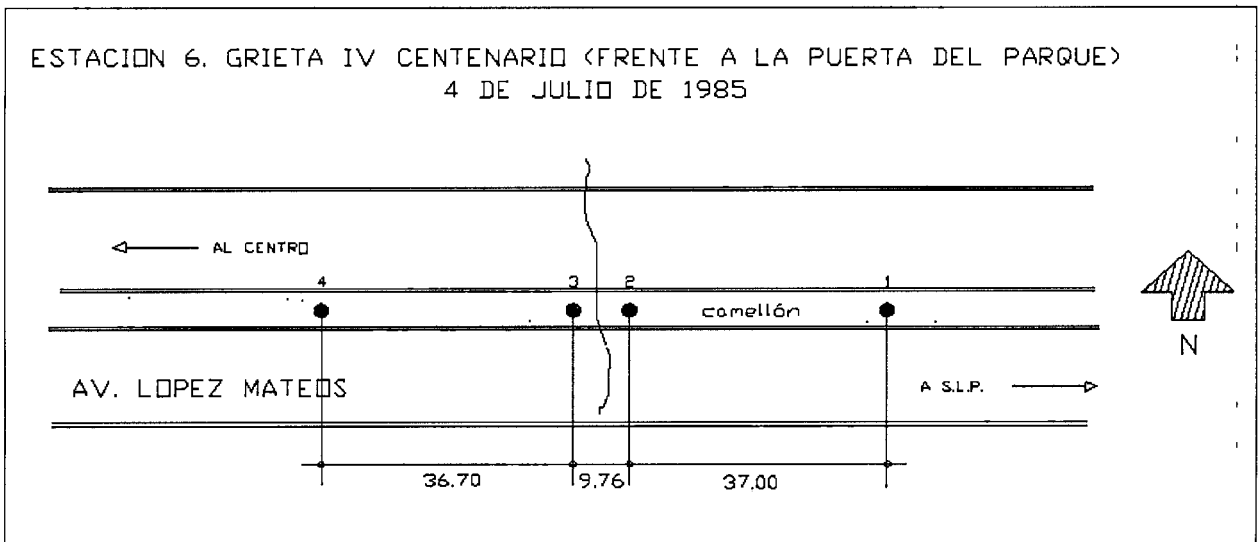


Figura VI.5. Croquis de localización del sexto monumento.

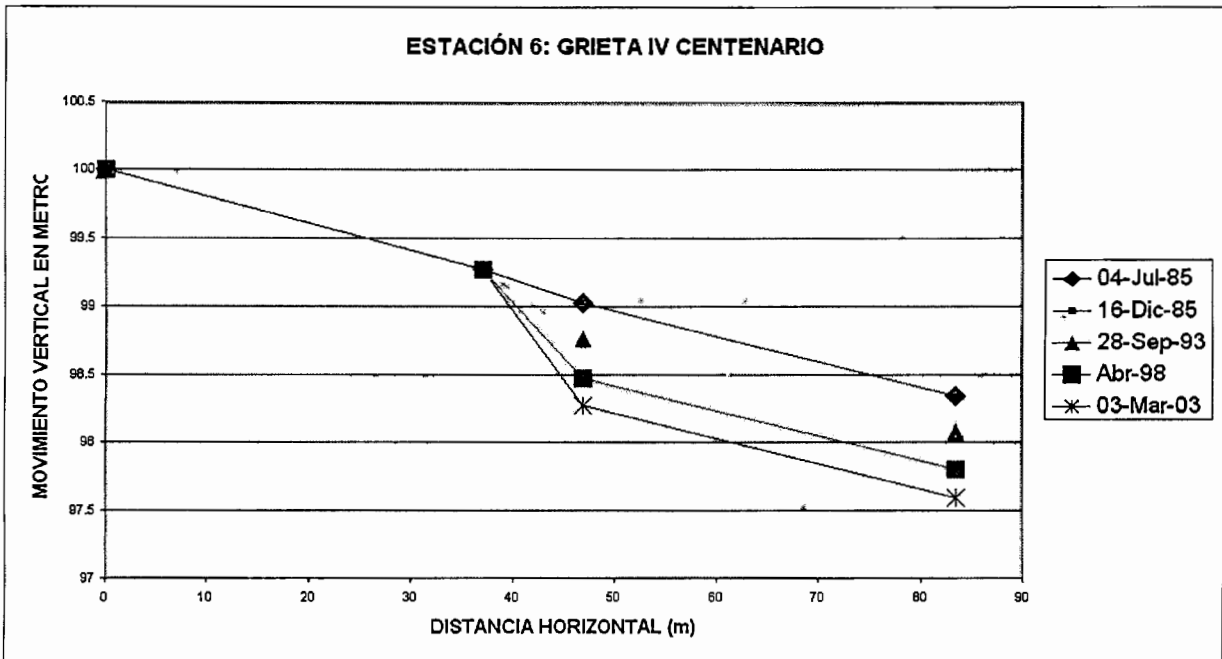


Figura VI.6. Mediciones realizadas en el sexto monumento.

Sin embargo, estas mediciones pueden ser conservadoras, ya que si se observan los desniveles existentes más al norte y oriente de la Ciudad, dentro del perímetro del Tercer Anillo de Circunvalación, se podrían medir hundimientos aún mayores a los reportados anteriormente, tal como se presentan en las fotos VI.1 y VI.2. También al interior del Estado se pueden observar desniveles mayores, fotos VI.3 y VI.4.

En algunos de los lugares en donde se colocaron monumentos debería investigarse también la historia de la extracción del agua en sus cercanías, es decir, si existen, o existieron pozos cercanos y si dejaron de funcionar en el tiempo en que llevaron a cabo las mediciones. Esto podría realizarse en un estudio posterior, para observar la influencia del cono de abatimiento de los pozos en la aparición y desarrollo de las grietas geológicas.

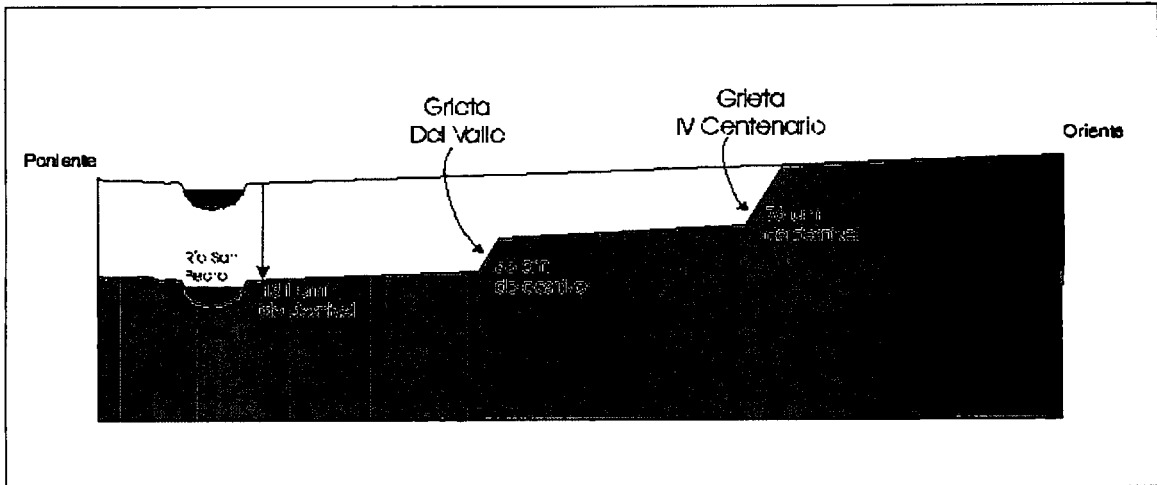


Figura VI.7. Perfil a lo largo de la Av. Adolfo López Mateos con las mediciones en los monumentos primero y sexto, descritos en las figuras anteriores.



Foto VI.1. Hundimiento del terreno al norte y oriente de la Ciudad.



Foto VI.2. Hundimiento al norte y oriente de la Ciudad.

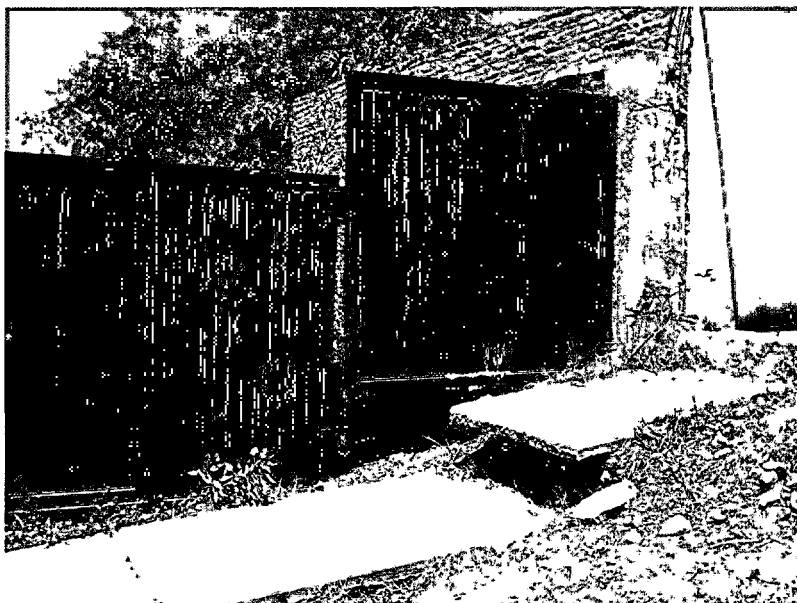


Foto VI.3. Puertecito de la Virgen, desnivel 70 cm., abril del 2003.



Foto VI.4. Rincón de Romos, abril del 2003.

VI.2. Mediciones con GPS de precisión

En la sección anterior se explico en que consiste el método del GPS aquí en este capitulo se resumirán los resultados mas importantes encontrados en las campañas geodésicas que se realizaron.

En total se colocaron 28 testigos a lo largo del valle de Aguascalientes entre los periodos de octubre a diciembre de 2003 y noviembre a diciembre de 2004.

Cabe mencionar que uno de los problemas principales encontrados durante los levantamientos fueron los obstáculos que representan las edificaciones que existen cerca de algunos de los sitios en donde se lleva a cabo el primer monitoreo, además del deterioro de algunos testigos.

En las tablas siguientes se muestran los resultados de las campañas que se

realizaron en el año 2003 y en el año 2004 respectivamente Tablas VI.2. y VI.3.

Tabla VI.2 Resultados de la campaña 2003 en coordenadas UTM

| Nombre punto | Norte | Este | Elevación | Fijo |
|--------------|--------------|-------------|-----------|---------|
| INEG | 2419383.113m | 780685.342m | 1902.200m | N E a e |
| C-1 | 2422867.078m | 769395.159m | 1928.880m | |
| C-2 | 2421024.799m | 776370.508m | 1845.339m | |
| C-3 | 2421258.955m | 777653.541m | 1853.465m | |
| C-4 | 2421805.500m | 782299.611m | 1895.226m | |
| C-5 | 2420484.996m | 785450.824m | 1954.162m | |
| C-6 | 2419071.968m | 782666.438m | 1922.819m | |
| C-7 | 2417228.268m | 771232.006m | 1880.570m | |
| C-8 | 2417875.304m | 776662.243m | 1847.133m | |
| C-9 | 2431012.081m | 774161.660m | 1876.325m | |
| C-10 | 2431069.543m | 770124.066m | 2013.594m | |
| C-11 | 2430978.541m | 774237.800m | 1875.092m | |
| C-12 | 2430298.642m | 774819.073m | 1863.308m | |
| C-13 | 2430892.121m | 783255.885m | 1997.232m | |
| C-20 | 2452123.385m | 783899.615m | 1918.224m | |
| C-21 | 2450707.635m | 787913.992m | 1978.225m | |
| C-22 | 2460232.898m | 775305.305m | 1954.068m | |
| C-23 | 2460256.547m | 780297.153m | 1925.560m | |
| C-25 | 2459922.181m | 792168.531m | 2122.370m | |
| C-26 | 2471035.368m | 779060.602m | 1949.816m | |
| C-27 | 2469939.870m | 788460.873m | 1952.062m | |
| C-29 | 2474060.303m | 784827.830m | 1948.668m | |
| C-30 | 2475280.214m | 778367.001m | 1997.483m | |
| C-31 | 2480014.716m | 779310.958m | 1977.301m | |
| C-24 | 2460471.532m | 786312.089m | 1948.811m | |
| C-28 | 2470580.723m | 786721.394m | 1938.719m | |

Tabla VI.3. Resultados de la campaña del 2004 en coordenadas UTM

| Nombre punto | Norte | Este | Elevación | Fijo |
|--------------|--------------|-------------|-----------|---------|
| INEG | 2419383.113m | 780685.342m | 1901.974m | N E a e |
| 87623360 | 2429200.224m | 779845.429m | 1897.029m | |
| C-10 | 2431069.536m | 770124.069m | 2013.414m | |
| C-9 | 2431012.111m | 774161.659m | 1876.112m | |
| C-12 | 2430298.614m | 774819.065m | 1863.140m | |
| C-13 | 2430892.134m | 783255.862m | 1997.050m | |
| C-1 | 2422867.077m | 769395.160m | 1928.702m | |
| C-3 | 2421258.957m | 777653.515m | 1853.263m | |
| C-5 | 2420485.001m | 785450.843m | 1954.000m | |
| C-7 | 2417228.269m | 771231.959m | 1880.409m | |
| C-8 | 2417875.310m | 776662.221m | 1846.925m | |
| C-6 | 2419071.944m | 782666.403m | 1922.649m | |
| C-4 | 2421805.488m | 782299.623m | 1895.058m | |
| 87623341 | 2451154.047m | 774067.193m | 1936.806m | |
| C-21 | 2450707.666m | 787914.340m | 1978.085m | |
| C-25 | 2459922.265m | 792168.753m | 2122.155m | |
| C-24 | 2460466.993m | 786317.559m | 1948.748m | |
| 87623345 | 2451512.457m | 778862.357m | 1920.951m | |
| C-20 | 2452127.127m | 783900.093m | 1917.813m | |
| C-23 | 2460256.553m | 780297.161m | 1925.273m | |
| C-22 | 2460232.726m | 775304.444m | 1953.824m | |
| C-26 | 2471035.343m | 779060.612m | 1949.563m | |
| C-27 | 2469940.125m | 788460.016m | 1951.803m | |
| C-28 | 2470580.712m | 786721.611m | 1938.270m | |
| C-29 | 2474060.216m | 784827.781m | 1948.449m | |

Las coordenadas están proporcionadas en UTM y la elevación es en metros

sobre el nivel medio del mar.

En la figura VI.8. se presenta la carta de hundimientos obtenida con los datos de las campañas realizadas, comparada con los niveles freáticos, se pueden observar algunas correspondencias con los abatimientos y los hundimientos, la magnitud de los hundimientos están alrededor de los 18cm en la ciudad y alrededor de los 38cm al norte del valle.

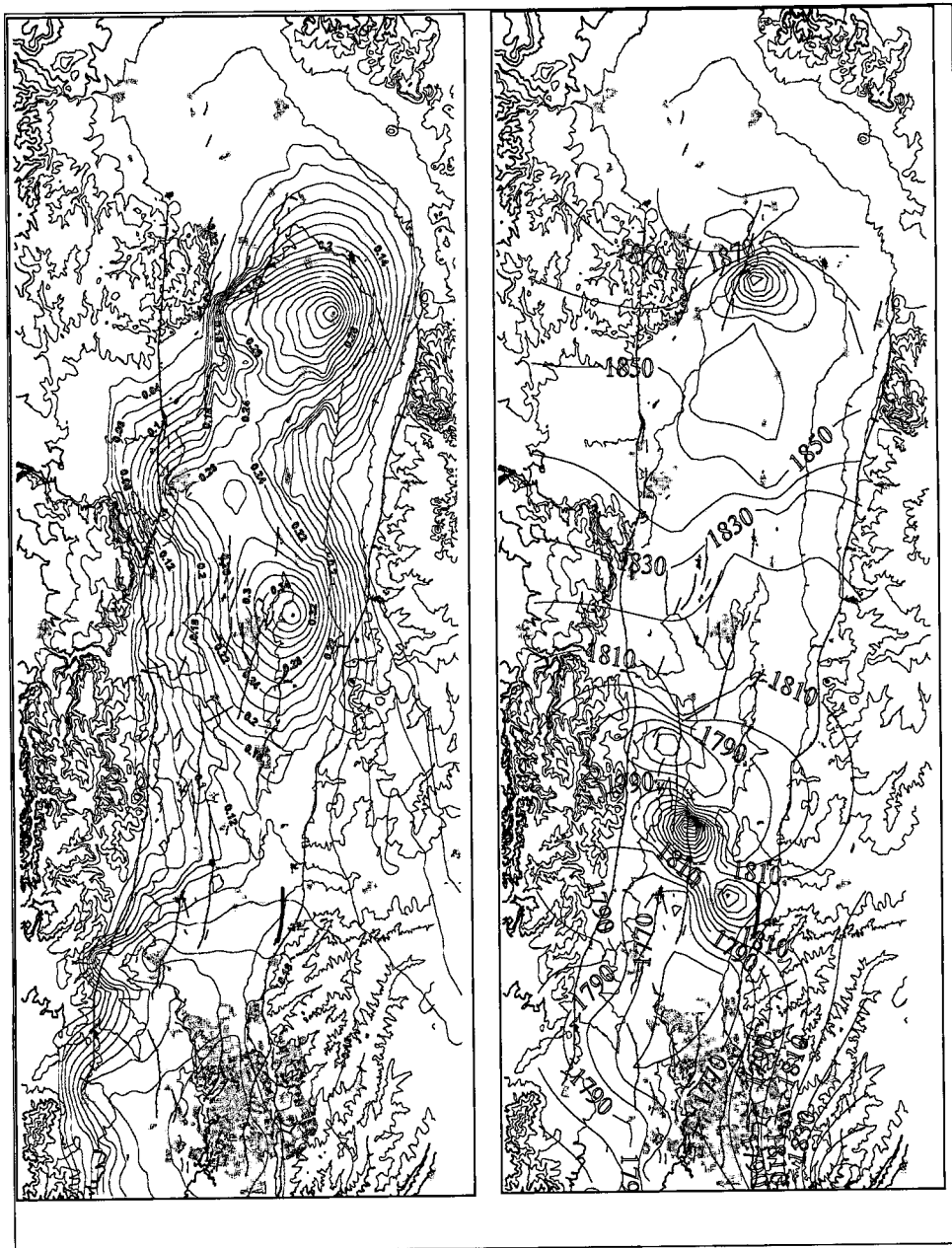


Figura VI.8. Carta de hundimientos en el Valle de Aguascalientes

En la figura VI.10. se tiene la ubicación de los testigos en el valle.

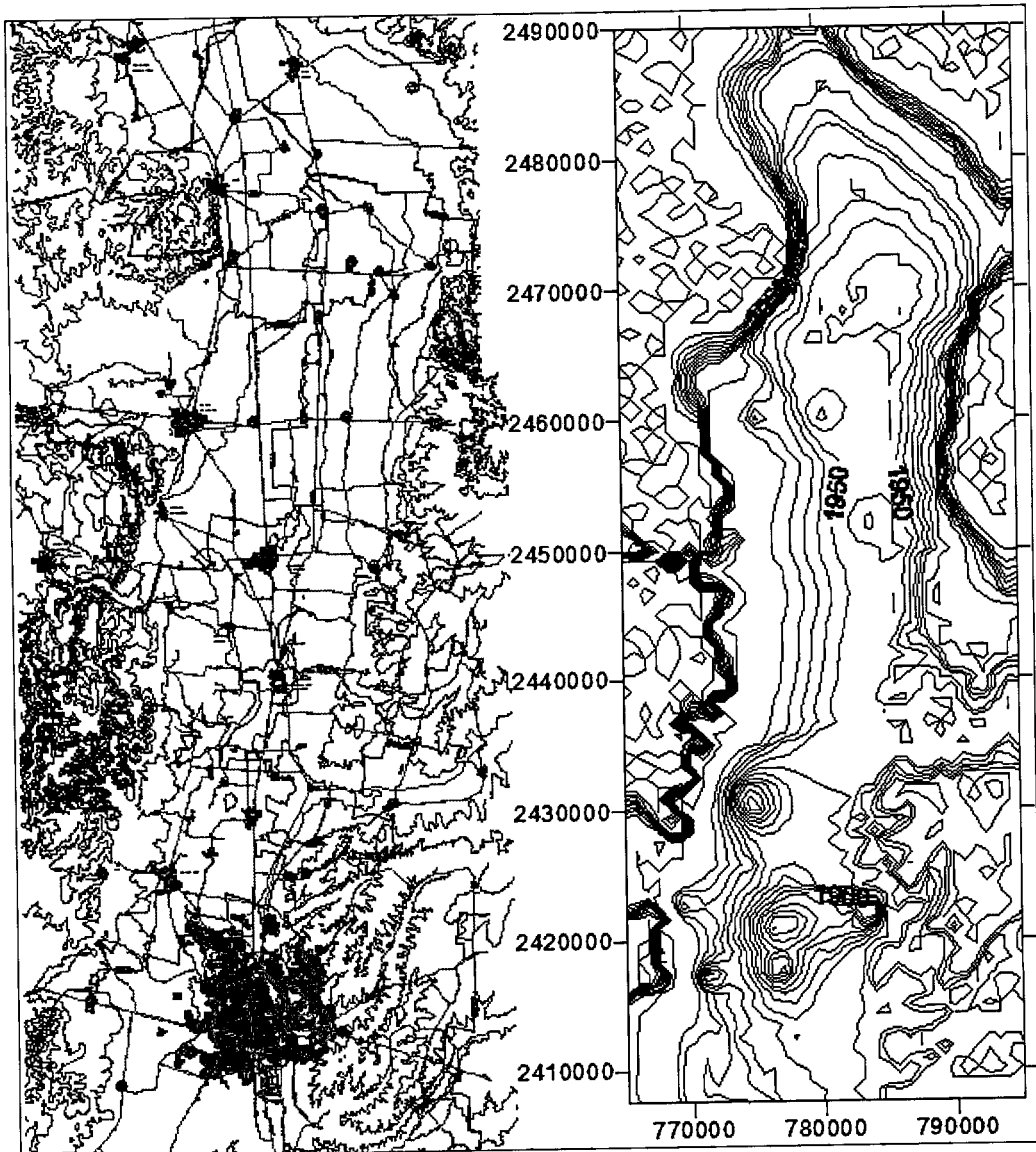


Figura VI.10. Ubicación de testigos en el valle.

Resultado del monitoreo a la ciudad.

En la figura VI.11. se presentan los resultados obtenidos en la campaña de medición con GPS iniciada en abril del 2003 y terminada en febrero del 2004. Se observa que los máximos hundimientos que se presentan son del orden de 15 centímetros.

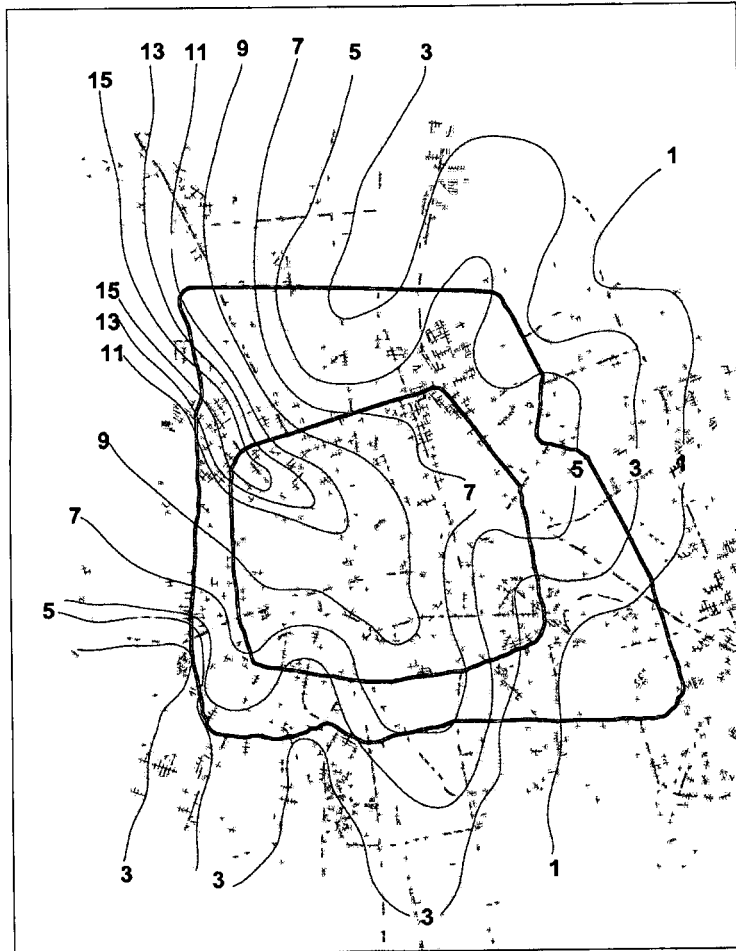


Figura VI.11. Curvas de hundimiento en centímetros, resultados de GPS.

VI.3. Interferometría

En años recientes, las técnicas de interferometría, aplicadas sobre imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR), se han utilizado para la detección de movimientos terrestres (terremotos, subsidencia, etc.). Lo anterior ha permitido derivar en técnicas de interferometría diferenciales.

Con las técnicas interferométricas diferenciales se pueden crear mapas de hundimientos o de subsidencia. El proceso se basa en la obtención de dos imágenes SAR de la zona bajo estudio, por ejemplo de los satélites ERS-1/2 de la ESA (Agencia Espacial Europea), en instantes diferentes de tiempo. Una vez registradas dichas imágenes, se puede generar el interferograma, que es el resultado de multiplicar una de las imágenes por el conjugado de la otra. La fase resultante de este proceso contiene información de la topografía de la zona iluminada por los satélites, y si se ha producido algún tipo de movimiento entre las adquisiciones, también tendrá una componente asociada al desplazamiento.

En el estado de aplicación de estas técnicas al problema de hundimiento del Valle de Aguascalientes, se muestran dos pares de imágenes procesadas del Valle en las figuras VI.12 a VI.15, obtenidas a partir de los datos de radar de satélite, para un misma pasada o track, de fechas 26 de marzo del 1996, 27 de agosto del 2002, 21 abril de 1996 y 20 de mayo del 2001, respectivamente. Estas imágenes muestran el relieve del Valle, quedando pendiente la obtención de las imágenes de hundimientos obtenidas con las diferencias de los relieves.

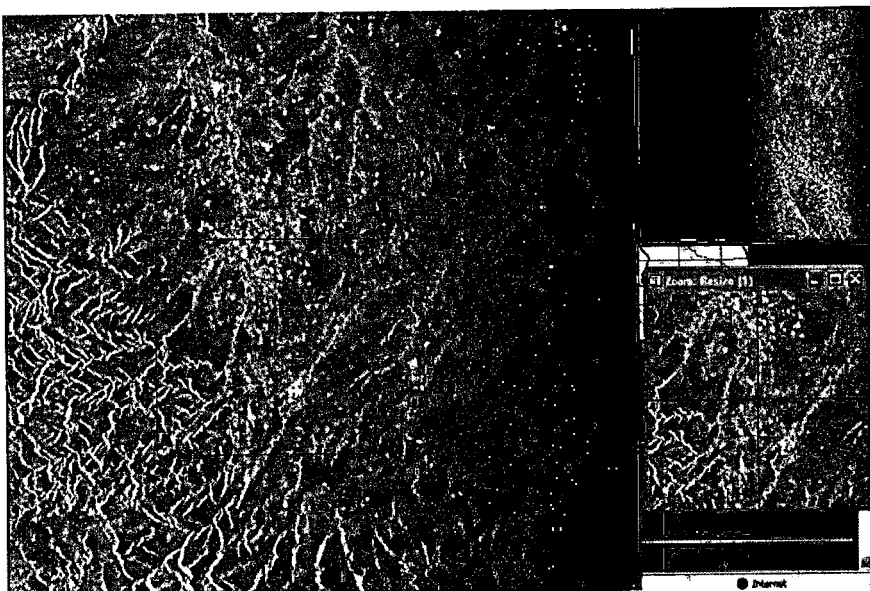


Figura VI.12. Imagen del 26 MARZO 1996.

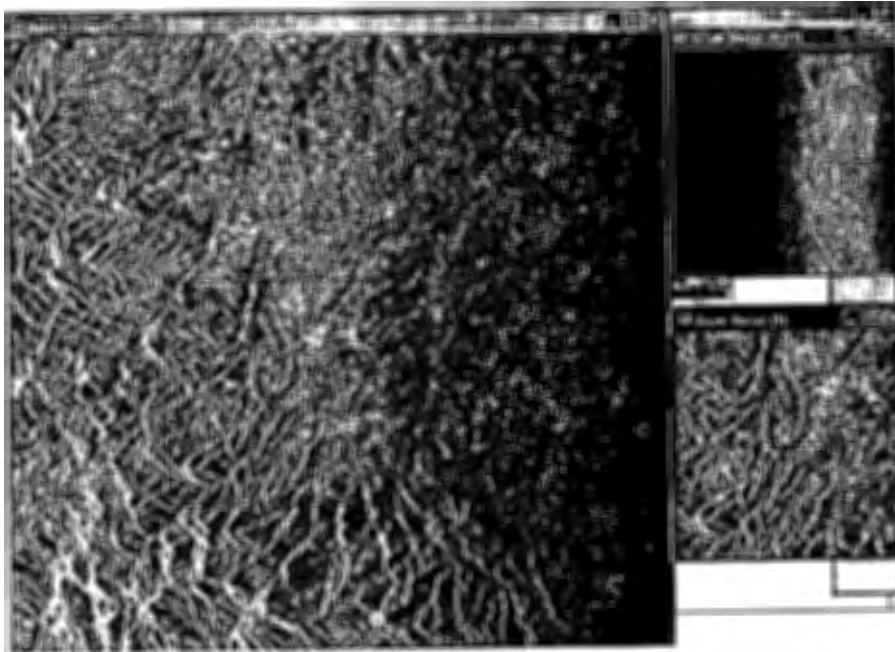


Figura VI.13. Imagen del 27 AGOSTO 2002.

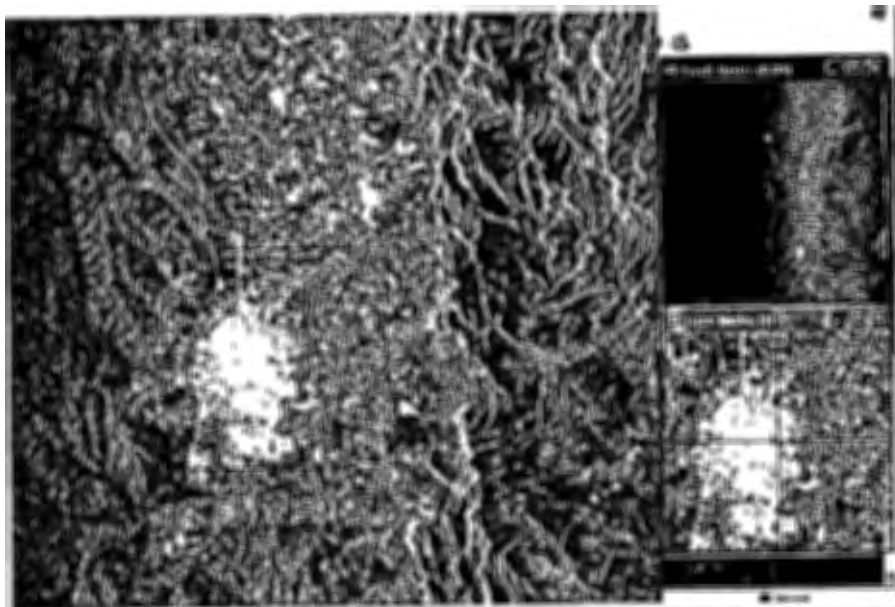


Figura VI.14 Imagen 21 ABRIL 1996.

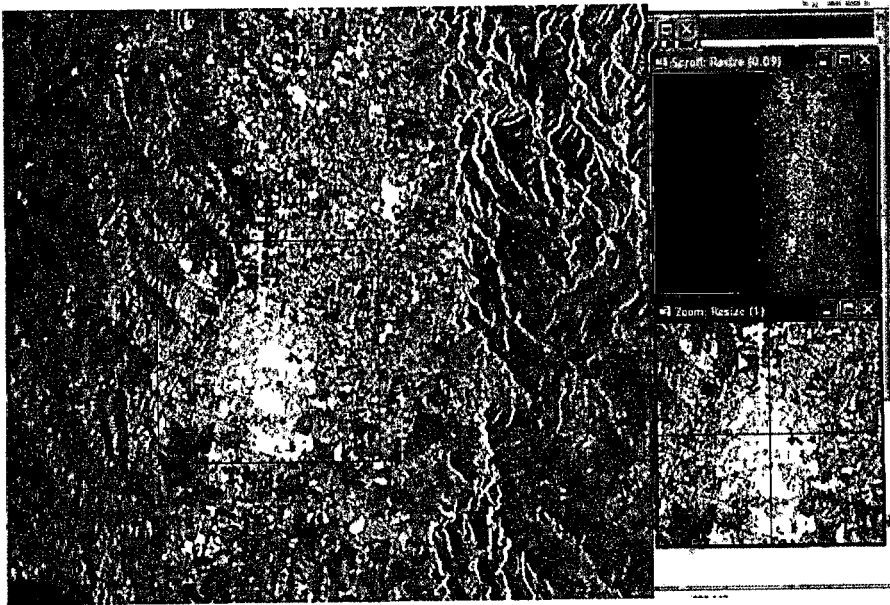


Figura VI.15 Imagen 20 MAYO 2001.

Estas imágenes están procesadas con el software PRISME y georreferenciadas con el software DIAPASÓN, sin embargo no se obtuvo ningún interferograma ya que las imágenes escogidas no tienen coherencia entre si, esto es debido a el tiempo entre imágenes que resulto ser muy largo.

El problema de las imágenes se puede resolver con escenas en las que el tiempo y las líneas base sean las adecuadas para obtener una imagen de coherencia.

VI.4. Análisis de los perfiles con Elemento Finito

La modelación por medio de elementos finitos también puede aplicarse en el análisis de la subsidencia. El método del elemento finito es una técnica numérica que resuelve las ecuaciones esfuerzo-deformación considerando diferentes leyes de comportamiento de los materiales. El medio que se analiza se subdivide en

elementos que pueden tomar diversas formas geométricas y al conjunto de elementos se le denomina malla.

Para comprender el efecto de irregularidades en el fondo del basamento sobre el desarrollo de esfuerzos de tensión en la superficie de un estrato deformable, tal como el que se encuentra en el Graben del Valle de Aguascalientes; en una primera aproximación se hicieron diferentes modelos con elemento finito, los modelos son bastante simples y constan de un solo estrato deformable. Con el fin de provocar la subsidencia, se sometió el estrato deformable únicamente a la acción de su peso propio.

El modelo teórico inicial utilizado para simular el comportamiento del suelo se consideró con un módulo elástico de $E = 40\,000\text{t/m}^2$, se fijaron de acuerdo con los valores medios reportados por Lermo J. (1994). El valor de la relación de Poisson se consideró de 0.35 y el peso volumétrico de 1.46t/m^3 .

De la información de la litología de los pozos se ha podido obtener el relieve del basamento somero para el Valle de Aguascalientes el cual sirve entre otras cosas para poder realizar fácilmente perfiles a lo ancho del valle y estos poder ser modelados en el software GEOSLOP para análisis de elemento finito.

No hay que olvidar que las curvas de nivel del basamento somero presentadas fueron obtenidas a partir de las profundidades observadas en los pozos, en los cuales algunos no llegan a la profundidad del basamento en el centro del valle, por lo tanto los datos obtenidos en estos lugares son muy limitados.

La ubicación de estos perfiles se pueden observar en la figura VI.16.

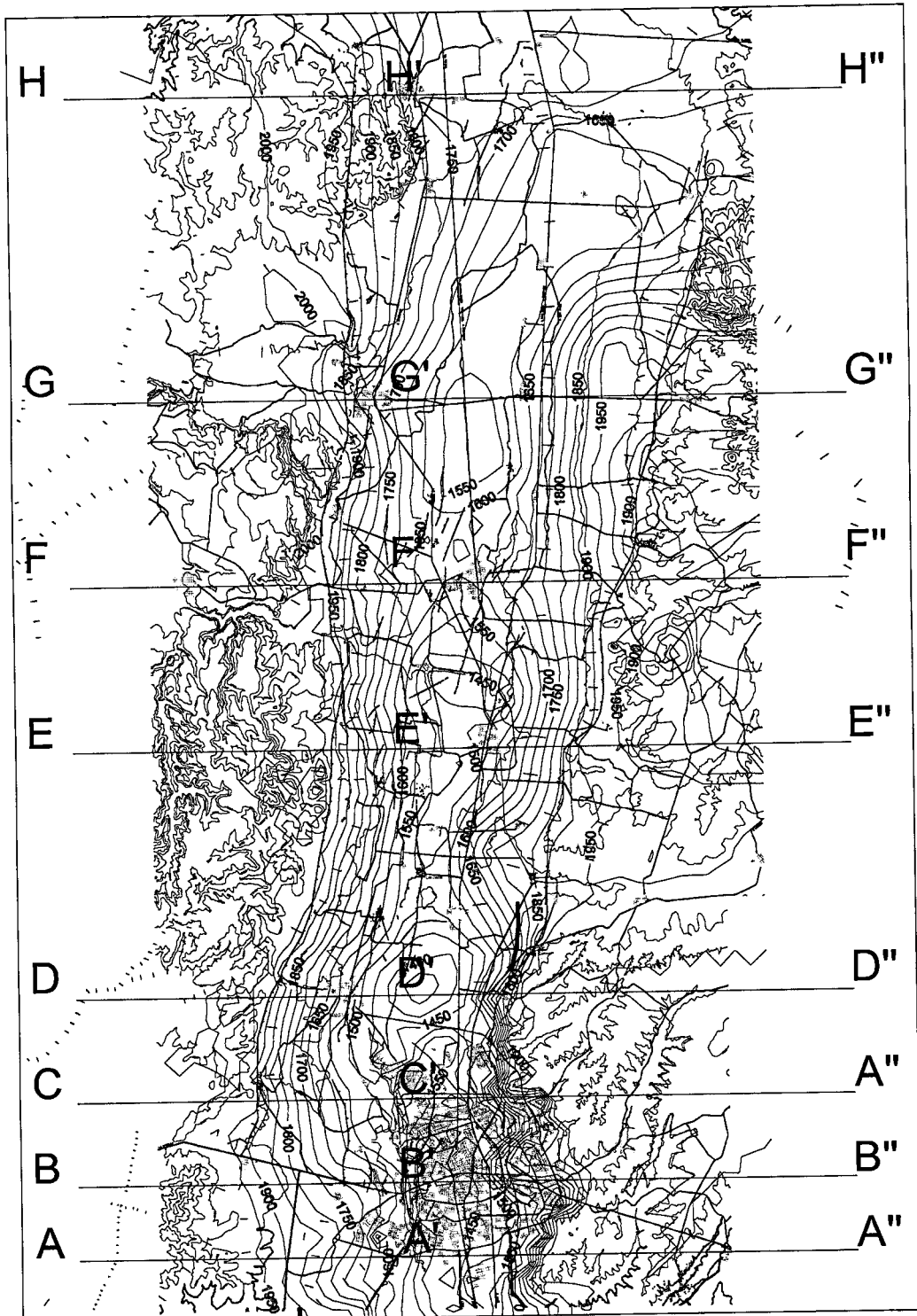
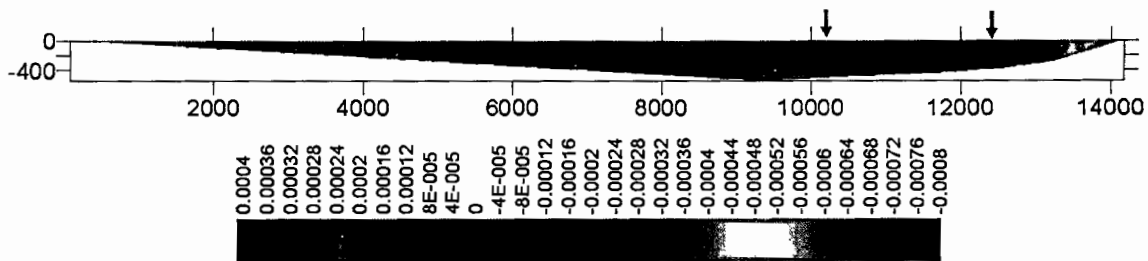


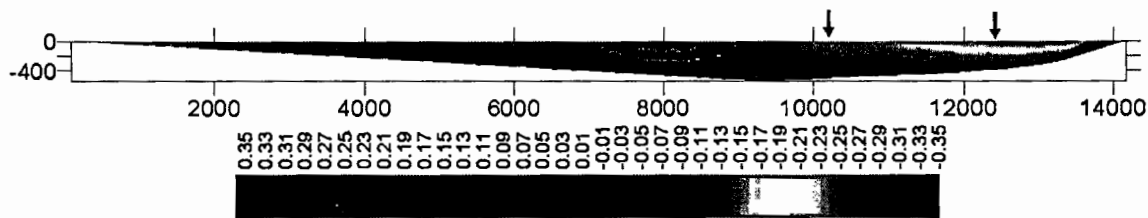
Figura VI.16 Perfiles en el basamento.

Los perfiles y el análisis de los perfiles se presentan en las siguientes figuras, las flechas indican agrietamientos, los valores de esfuerzo están en Kpa y los desplazamientos en metros.



Es

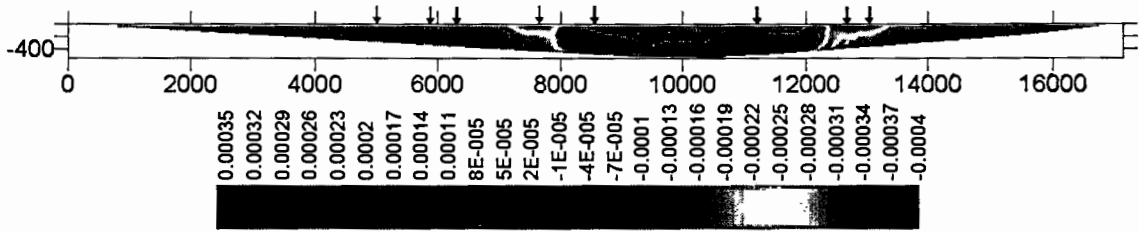
fuerzas horizontales.



Desplazamientos horizontales.

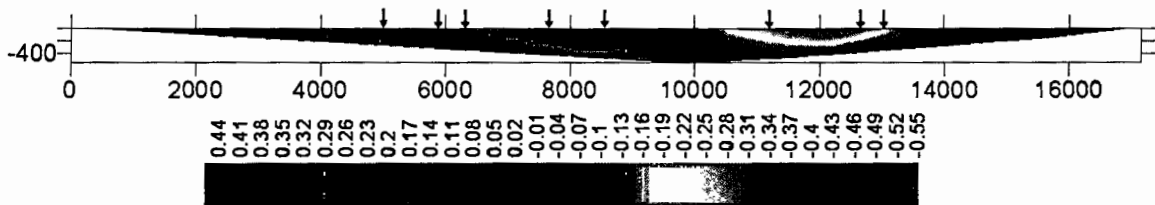
Figura VI.17 Perfil A-A'-A''

En el perfil A-A'-A'' se observa como el agrietamiento (de la derecha) presentado en el gráfico de los esfuerzos horizontales se aleja mucho a la zona de tensión señalada en color rojo sin embargo el agrietamiento de la izquierda corresponde a las pequeñas zonas en verde que sin llegar a ser tensiones son compresiones mas pequeñas que las que representa el color azul mas oscuro. En el gráfico de desplazamientos horizontales se puede observar que el agrietamiento que esta a la derecha corresponde a la frontera de los desplazamientos con signo negativo (en rojo) esto quiere decir que se desplazan hacia la izquierda.



Es

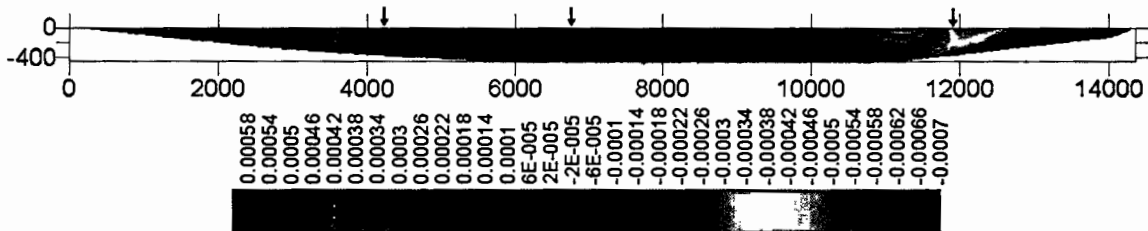
fuerzas horizontales.



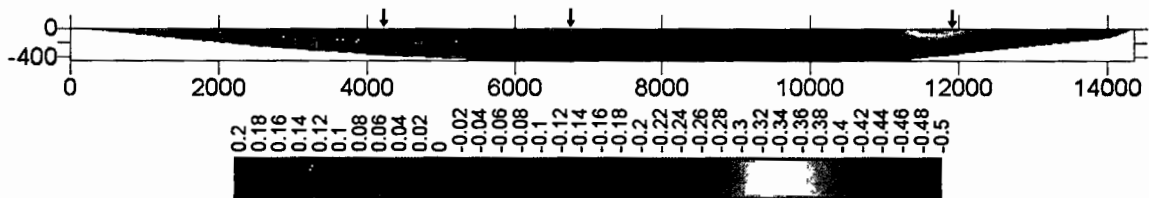
Desplazamientos horizontales

Figura VI.18 Perfil B-B'-B''

En este perfil aparecen claramente zonas de tensión horizontal y aparecen agrietamientos justamente en las zonas de mayor magnitud, también se aprecia que algunos agrietamientos están fuera de estas zonas estos debidos a los desplazamientos horizontales.



Esfuerzos horizontales



Desplazamientos horizontales

Figura VI.19. Perfil C-C'-C''

En el perfil C-C'-C'' aparece claramente a la derecha la zona de tensión en los esfuerzos acompañada por el agrietamiento, en el grafico de los desplazamientos se aprecia que el agrietamiento coincide con los la transición entre los mayores desplazamientos y los menores, por otro lado en los agrietamientos del centro y el de la izquierda no se encuentra correspondencia visible de esto se hablara mas adelante.

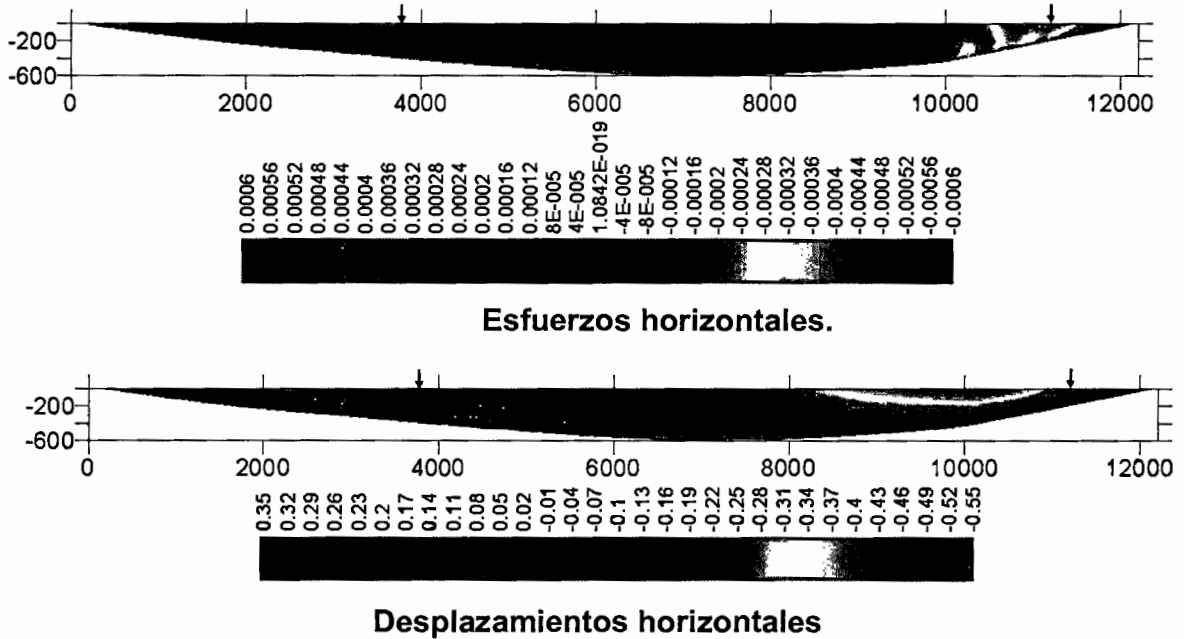


Figura VI.20. Perfil D-D'-D''

En este perfil se puede observar que el agrietamiento de la izquierda coincide bien con las zonas de tensión y con las zonas de desplazamiento mínimo, pero el del lado derecho igual que el perfil anterior no tiene correspondencia ni con los esfuerzos horizontales ni con los desplazamientos.

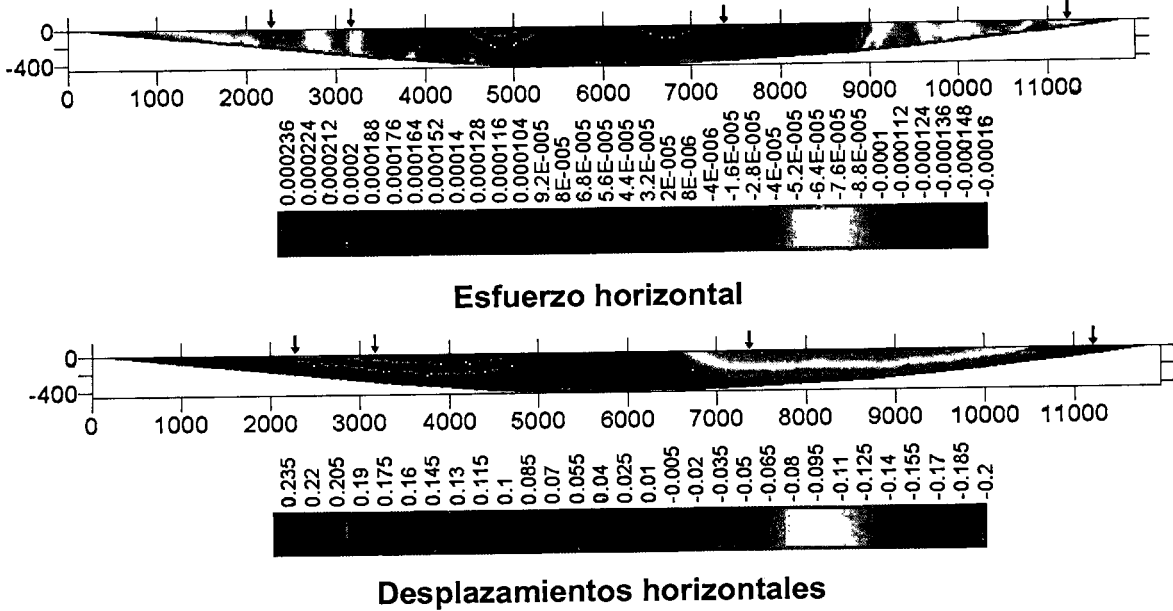


Figura VI.21. Perfil E-E'-E''

En el perfil anterior se puede apreciar que las zonas de esfuerzo negativo (tensión) coinciden con los agrietamientos, solo el agrietamiento que esta en el centro no concuerda con ninguna zona de tensión pero se encuentra cerca del final de los desplazamientos máximos.

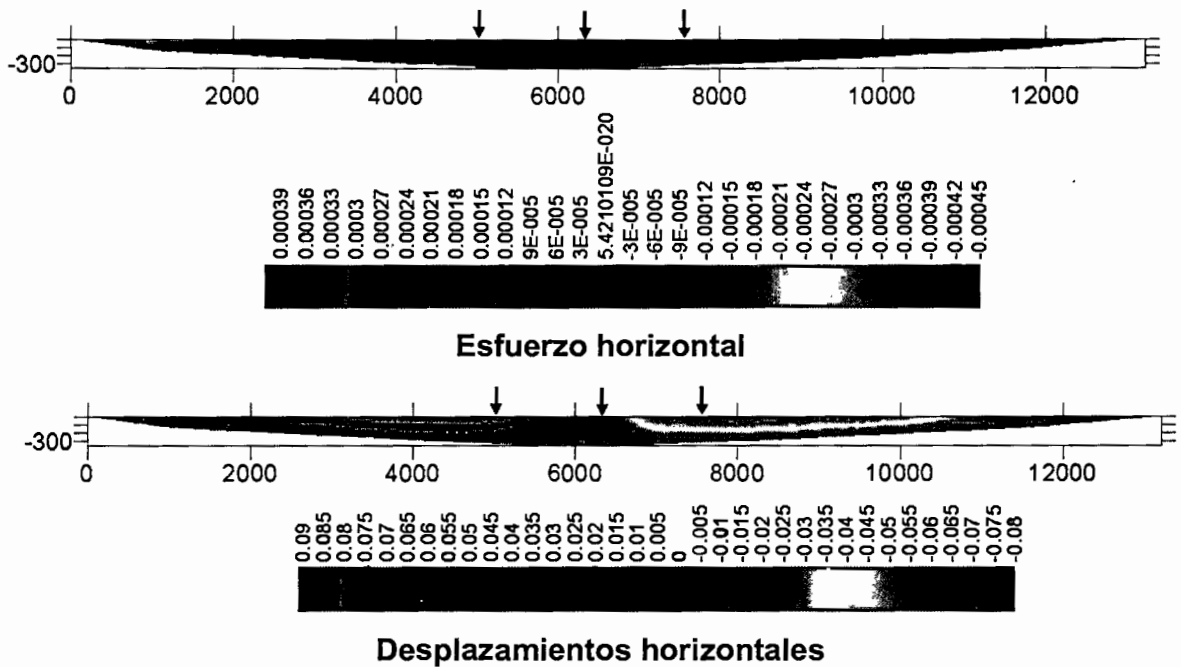


Figura VI.22. Perfil F-F'-F''

En este perfil se ve que ningún agrietamiento concuerda con las zonas de tensión máxima; sin embargo los colores en verde del grafico de esfuerzo horizontal son valores negativos o bien son valores cercanos a cero.

En suma, todos los perfiles presentan una buena correspondencia en los agrietamientos con los esfuerzos y desplazamientos horizontales, sin embargo hay otros agrietamientos que no están dentro de la zona de tensión, esto es debido a que el basamento somero incompresible se realizo con la información de pozos de extracción de agua y si bien la información es bastante buena no es suficiente por ejemplo en las zonas del centro donde los pozos no alcanzan a llegar hasta el basamento somero.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

VII.1 Conclusiones

El Valle de Aguascalientes cumple con las tres condiciones necesarias para que exista agrietamiento: a) Un basamento indeformable con irregularidades importantes, b) Un abatimiento importante del nivel freático y c) Un relleno compresible con plasticidad de media a baja.

De las mediciones de hundimientos en la zona urbana y en el Valle, se observan valores de hundimiento total en ciertas zonas de más de 1.30 metros, en un período de 18 años. Las mediciones con GPS son las más adecuadas para estudiar el movimiento de la superficie de suelo empleando puntos permanentes de referencia.

La correcta modelación y predicción de la evolución de los hundimientos en la zona urbana y en el Valle de Aguascalientes depende de la definición del basamento no compresible sobre el que están colocados los estratos compresibles, o sedimentarios, como en el caso del Graben de Aguascalientes.

La topografía del basamento somero del Valle de Aguascalientes concuerda con bastante precisión con la densidad y la dirección general de los agrietamientos, aunque en algunas zonas hace falta más información para mejorar los resultados.

Aunque es necesario refinar aún la topografía del basamento incompresible

del valle, sobretodo en la zona central en donde los pozos no alcanzan el basamento, también se requiere de un mayor conocimiento de las propiedades mecánicas de los diferentes estratos que componen el material compresible del Graben del Valle.

La zona de mayor riesgo de agrietamiento parece ser los flancos, oriente y poniente, de la fosa, a la altura de la zona metropolitana y hasta el poblado de Jesús María del lado poniente. Para delimitar correctamente esta zona es conveniente recabar mayor información de los pozos y realizar campañas intensivas de micro-gravimetría y otras técnicas geofísicas en la zona, así como realizar perforaciones profundas conjuntamente con extracción de muestras inalteradas.

Aunque existe información sobre las propiedades mecánicas del suelo estos datos se profundizan solamente hasta los primeros 30 metros del relleno del valle de Aguascalientes.

Tampoco debe descartarse que otros fenómenos pueden relacionarse con los agrietamientos, un ejemplo de los fenómenos puede ser la actividad tectónica en el valle. Esto es que si las fallas a los flancos del valle son activas tectónicamente entonces la actividad puede también ser una fuente de esfuerzos que influyen en la masa de suelo.

VII.2 Recomendaciones

Aunque el análisis con el software de elemento finito (Geoslop) presento en muchos casos coincidencias con los agrietamientos también presento algunas incoherencias esto debido a que no se contaba con la información suficiente de la topografía del basamento, en este caso es recomendable recabar mayor información

sobre pozos de extracción de agua así como la realización de perforaciones profundas.

Es recomendable también la recaudación de información sobre las propiedades del suelo aunque esto puede ser un poco complicado por la profundidad de los estratos a analizar y por el costo que puede resultar.

Los estudios de geofísica como micro-gravimetría y magnetometría nos pueden ofrecer gran cantidad de datos acerca de los agrietamientos que se pudieran estar formando en el subsuelo.

Es de imaginar que con el paso del tiempo el problema de la subsidencia y agrietamientos se agudizara en el estado de Aguascalientes y en muchos otros lugares, conforme esto ocurra de igual forma la información también aumentará luego entonces será posible analizar perfiles del suelo con mayor precisión como por ejemplo con estratos mas cercanos a la realidad y no tomarla en cuenta como una sola masa homogénea.

Solamente con el estudio detallado del conjunto de resultados de exploración del subsuelo, presentes y futuros, dará como resultado una mejor visión de la problemática actual del agrietamiento del suelo en Aguascalientes.

VIII. REFERENCIAS

- Aranda Gómez y Aranda Gómez, (1985), Análisis del agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes, Reporte anual, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro Tecnológico, Departamento de Geotécnica.
- Arroyo M. Et. Al., (2001), "Causas y Efectos de las Grietas y Fallas del Valle de Aguascalientes", Reporte del Proyecto No.: 1998.02.04.012 (FIN98090), Fondo del Sistema de Investigación Miguel Hidalgo, FOSIHGO, SEP-CONACYT.
- Biot M.A, (1941) General Theory of three-dimensional consolidation. Journal of applied physics, volume 12 February, pp 155-164.
- Carrillo, N. (1948) Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City. Proc 2nd internat. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., v.7, p. 912-918.
- Figuroa Vega, G. E. (1973). El Hundimiento de la Ciudad de México. Breve Descripción; Recursos Hidráulicos. Vol. II, num. 4; pp. 525-534.
- 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.
- Gayol, R. (1925). Estudio de las perturbaciones que en el fondo, de la Ciudad de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras del desagüe y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta

interpretación de los efectos producidos. *Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura*, Vol. III, Num. 2. pp. 96-132.

Guy, X. Y., Tsien, S. I., Huang, H. C., Liu, Y. (1991). "Analysis of 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

Holtzer T.L. (1976), "Ground failure in areas of subsidence due to ground water decline in the United States", *Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence*, Anaheim, California, IAHS-AISH pub. No 121: 423-433.

Jachens R.C. and Holzer T.L. (1980), "Geophysical investigations of ground failure related to ground water withdrawal, Picacho basin, Arizona", *Ground Water*, 17: 574-585.

Larson M.K., (1984), "Potential for subsidence fissuring in the Phoenix, Arizona, USA, area", *Third Int. Symp. on Land Subsidence*, Venice, Italy, IAHS pub No 151:291-299.

Lermo J. y Chávez F, (1994), "Are microtremors useful in site response evaluation", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84.

Llamas C. (2004) Comportamiento de los distintos agrietamientos que afectan a la ciudad de Aguascalientes. Facultad de Ingeniería U.A.Q. Tesis de maestría.

- Manilla A. (1994) Modelo del Mecanismo de Agrietamientos en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro. Facultad de Ingeniería U.A.Q. Tesis de Maestría.
- Ochoa Gil. (2003) Análisis de la subsidencia en valles lacustres por medio de la teoría de pérdida volumétrica. Facultad de Ingeniería U.A.Q. Tesis de maestría.
- Robinson G.M. and Peterson D.E. (1962), "Notes on earth fissures in southern Arizona", U.S. Geol. Survey Circular 466.
- 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.
- 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 Geophysical Union, v. 16, p. 519-524.
- Valencia D. (1995) Fallamiento de los Suelos en la Ciudad de Querétaro. Facultad de Ingeniería U.A.Q. Tesis de Maestría.

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.