Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres, Transporte y Logística

Evaluación y proyección de daños por el fenómeno de subsidencia en la Avenida 5 de Febrero y propuesta de solución.

Tesis
Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres, Transporte y Logística.

Presenta:
Ing. Gerardo Medellín Aguilar

Dirigido por:
Dr. Omar Chávez Alegría

Dr. Omar Chávez Alegría
Presidente — Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Secretario — Firma

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Vocal — Firma

M. en I. Domingo Gerardo Valencia Vallejo
Suplente — Firma

M. en C. Ramiro Guillermo Paz Cruz
Suplente — Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2015

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

El presente trabajo muestra un análisis completo del fenómeno de subsidencia en el valle de Querétaro, enfocándose específicamente en la falla de Avenida 5 de Febrero. A lo largo de la investigación se contemplaron los aspectos que intervienen en la aparición del fenómeno y por ende en los asentamientos diferenciales que ocasionan daños a las estructuras habitacionales, industriales y viales, los cuales han sido medidos mediante la utilización de un GPS de alta precisión (3mm – 1cm de error); conjuntamente se realizó un análisis hidrológico mediante la creación de isobatas de niveles estáticos, a partir de un amplio historial de monitoreo de los pozos de extracción de agua para abastecimiento de la zona conurbada y con la implementación de un análisis estadístico mediante la aplicación del software STATGRAPHICS Centurion XV; se creó un mapa del crecimiento de la mancha urbana para interpretar la relación que tiene el crecimiento de la ciudad con el incremento excesivo de sobreexplotación del vital recurso. Para realizar un trabajo más completo, se determinaron las características geológicas de la zona de estudio, la obtención de espesores de los estratos deformables en diferentes puntos de monitoreo o de control instalados, creación de perfiles estratigráficos a partir de información obtenida mediante la aplicación de geofísica (velocidad de onda cortante), construcción de curvas de cambio de presión de poro y de fallas geológicas y por subsidencia. Los valores encontrados de los asentamientos en la zona de estudio van en un intervalo promedio de tres a 12 cm por año, lo cual muestra porqué existe la problemática de inundaciones en algunas zonas aledañas a la vialidad 5 de Febrero en época de lluvias.

(**Palabras clave**: subsidencia, asentamientos diferenciales, extracción, sobreexplotación)

SUMMARY

The research shows a complete analysis of the phenomenon of subsidence in the Queretaro valley, focusing specifically on the fault of avenue February 5. Throughout the investigation contemplated the aspects involved in the occurrence of the phenomenon and therefore in differential settlement causing damage to housing, industrial and road structures, which have been measured using a high-precision GPS (3mm - 1cm error); at the same time a hydrological analysis has been realized by creating depth contours of static levels, from a long history of monitoring wells to supply water to the metropolitan area and the implementation of a statistical analysis using software STATGRAPHICS Centurion XV; a map of the growth of the urban area to interpret the relationship of the city growth with the excessive increase of overexploitation of the vital resource was created. For a more complete work, the geological characteristics of the study area, obtaining thicknesses of the layers deformable at different points of monitoring and control systems installed, creation of stratigraphic profiles from information obtained through the application of geophysics (shear wave velocity), construction of curves of pore pressure change and geological faults and the subsidence. The values of the settlements in the study area are at an average interval of three to 12 cm per year, which shows why there is the problem of flooding in some areas surrounding the road February 5 during the rainy season.

(**Key words**: subsidence, differential settlement, extraction, Overexploitation)

"Los seres queridos nunca se van, solo se vuelven angeles"

Adela Aguilar Moreno (†)

Ser tía es amar a alguien que no es tuyo,
pero a quien tú corazón de madre le pertenece

José Aguilar Salazar (†)

Aparte de ser mi abuelo y padre,
fuiste mi consejero y mi mejor amigo.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios que me dio fortaleza para lograr concluir con mis objetivos y metas.

Le doy gracias a mis padres que han sido el motor de mi vida y quienes han estado conmigo incondicionlmente en momentos difíciles y dándome su apoyo para lograr culminar con esta estapa de mi vida

A mi hermano Rafael quien ha sido siempre mi ejemplo a seguir.

Al Dr. Omar Chávez por su apoyo incondicional a lo largo de estos años, ademas de inculcarme y compartir conmigo sus conocimientos y en especial su amistad.

A mis sinodales la Dra. María de Luz Pérez Rea, el Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos, el M.I. Domingo Valencia Vallejo y al M.C. Ramiro Guillermo Paz Cruz por sus aportaciones para lograr culminar con la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por depositar su confianza en mí, permitiéndome estudiar de tiempo completo en un programa de Maestría que tiene como resultado final la entrega de este documento de tesis.

A la Unversidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por contar con excelentes investigadores, académicos, personal administrativo e infraestructura que hace posible adquirir conocimiento y lograr realizar investigaciones de calidad.

Al Instituto Nacional de Estadistica y Geografía (INEGI) por la disponibilidad de trabajo con la UAQ y en especial al ingeniero Crescenciano Villareal por ser la parte técnica en la realización del procesamiento de los datos de GPS.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN 2

SUMMARY 3

AGRADECIMIENTOS 5

ÍNDICE GENERAL 6

ÍNDICE DE FIGURAS 9

ÍNDICE DE TABLAS 11

CAPITULO I. 12

INTRODUCCIÓN 12

1.1. ANTECEDENTES 13

1.2. Aspectos generales del fenómeno de subsidencia en México y el mundo..... 14

1.3. JUSTIFICACIÓN 21

1.4. HIPÓTESIS. 22

1.5. OBJETIVO GENERAL 22

1.6. OBJETIVOS PARTICULARES. 22

CAPITULO II. 23

MARCO TEÓRICO 23

2.1. PROBLEMÁTICA EN AVENIDA 5 DE FEBRERO 23

2.2. MODELO DE ESFUERZO EFECTIVO PARA CÁLCULO DE HUNDIMIENTOS 27

2.3. TÉCNICAS DE MONITOREO DE HUNDIMIENTOS 28

2.4. MODELOS MATEMÁTICOS PARA ANÁLISIS ESTADÍSTICO 29

2.4.1. Modelo ARIMA (p, d, q) (P, D, Q)s 29

2.4.2. Modelo de caminata aleatoria 30

2.4.3. Modelos lineales 31

2.5. MODELOS DE INTERPOLACIÓN PARA CREACIÓN DE ISOBATAS 32

CAPITULO III. 34

METODOLOGÍA 34
3.1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 34
3.2. ANÁLISIS HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO 35
3.2.1. Base de datos de extracción de agua (pozos) 35
3.2.2. Análisis estadístico y pronóstico de la variación del nivel estático 36
3.2.3. Creación de mapas de evolución de los niveles estáticos en la zona conurbada. 37
3.3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y DE SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO. 37
3.3.1. Geología del valle de Querétaro y de la zona de estudio 38
3.4. MEDICIÓN DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN QUERÉTARO 44
3.4.1. Testigos de medición 44
3.4.2. Levantamiento con GPS de alta precisión los hundimientos de la zona de estudio ……46
3.5. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INVESTIGACIÓN 47

CAPITULO IV. 48

RESULTADOS 48
4.1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 48
4.2. ANÁLISIS HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO 50
4.2.1. Base de datos de pozos 50
4.2.2. Análisis estadístico y pronóstico de la variación del nivel estático 51
4.2.3. Creación de mapas de evolución de los niveles estáticos en la zona conurbada 56
4.3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y DE SUELO, EN LA ZONA DE ESTUDIO. 62
4.3.1. Geología del valle de Querétaro y de la zona de estudio. 62
4.3.2. Caracterización de las propiedades geológicas, geomecánicas y velocidades de propagación de onda en los puntos de control. 63
4.3.3. Cambio de la presión de poro en los puntos de control. 66
4.3.4. Carta de fallas geológicas y por subsidencia del valle de Querétaro. 68
4.4. MEDICIÓN DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN EL VALLE DE QUERÉTARO 69
4.5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN 77

CAPITULO V. 79

CONCLUSIONES. 79

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 83

ANEXOS 92

ANEXO I. ECUACIONES DEL KRIGING ORDINARIO 93

ANEXO II. PERFILES ESTRATIGRAFICOS DEL VALLE DE QUERÉTARO, UTILIZADOS Y REALIZADOS POR PACHECO-MARTÍNEZ, 2007. 96

ANEXO III. PERFILES ESTRATIGRAFICOS APARTIR DE VELOCIDADES DE CORTANTE 101

ANEXO IV. ASENTAMIENTOS EN LOS PUNTOS DE CONTROL 106

ANEXO V. VELOCIDADES DE ASENTAMIENTO DE LOS PUNTOS DE CONTROL 112

ANEXO VI. NIVELES ESTÁTICOS DE LOS POZOS DEL VALLE DE QUERÉTARO (2009 – 2014) 118

ANEXO VII. PERFILES LONGITUDINALES DONDE SE UBICARAN LOS DRENES PROPUESTOS (POSIBLE LINEA DE INVESTIGACIÓN) 119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Nombre	Página
1.1	Diferencias verticales en la falla de Av. 5 de Febrero.	17
1.2	Ubicación de testigos sobre el fallamiento 5 de Febrero que se usaron para monitorear el desplazamiento vertical relativo en los bordes de fallamiento.	18
2.1	a) Asentamentos diferenciales, donde se tiene fracturamiento de la capa de rodadura, b) destrucción de banquetas, c) grietas en casas de colonia el Ensueño.	25
2.2	a) Vados en Av. 5 de Febrero, b) Falla por subsidencia en colonia la Sierrita, c) Aparicion de grietas por extracción de agua.	26
3.1	Mapa de la localización de la zona conurbada de Querétaro, con respecto al estado y el país.	34
3.2	Ubicación de los pozos de extracción de agua, localizados dentro de la zona conurbada.	35
3.3	Columna estratigráfica reportada para el valle de Querétaro.	39
3.4	Fallas en la zona urbana de Querétaro.	40
3.5	Mapa de tipos de suelo en el Valle de Querétaro y ZMQ.	41
3.6	Ubicación de los puntos de control en el Valle de Querétaro.	42
3.7	Puntos de control GPS.	45
3.8	a) GPS STONEX S9. b) GPS SOKKIA GRX2.	46
3.9	Diagrama de flujo.	47
4.1	Crecimiento urbano de la zona conurbada de la ciudad de Querétaro.	48
4.2	Modelo digital de elevaciones de la zona de estudio.	49
4.3	Ejemplo de gráfica donde se presenta el modelo individual para cada uno de los pozos, la gráfica anterior pertenece al pozo 2427.	52
4.4	Isobatas de niveles estáticos para los años 1970, 1975, 1980, 1985, 1990 y 1994.	57
4.5	Isobatas de niveles estáticos para los años 1996, 1997, 1998, 1999, 2000 y 2001.	58
4.6	Isobatas de niveles estáticos para los años 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007.	59
4.7	Isobatas de niveles estáticos para los años 2008, 2009, 2010, 2011 y la diferencia entre el año 2007 y 2011.	60
4.8	Isobatas de niveles estáticos extrapolados para los años 2015, 2016 y 2017.	61
4.9	Geología presente en la zona de estudio.	62
4.1	Perfil estratigráfico con los valores de Vs menores.	65
4.11	Perfil estratigráfico con los valores de Vs mayores.	66
4.12	Variación de la presion de poro en puntos de control de la zona de estudio.	67

4.13 Carta de fallas geológicas y de subsidencia, en valle de Querétaro. 69
4.14 Localización de cortes de asentamientos. 70
4.15 Asentamientos del corte A-A’. 71
4.16 Asentamientos del corte B-B’. 72
4.17 Asentamientos del corte C-C’. 73
4.18 Asentamientos del corte D-D’. 74
4.19 Velocidades de asentamientos del corte A-A’. 75
4.2 Velocidades de asentamientos del corte B-B’. 75
4.21 Velocidades de asentamientos del corte C-C'. 76
4.22 Velocidades de asentamientos del corte D-D’. 77
4.23 Propuesta de solución (red de drenes propuesta). 78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Nombre	Página
3.1	Obtención de información del valle de Querétaro.	43
3.2	Coordenadas de los puntos de control GPS, monitoreados en la investigación.	45
4.1	Pozos dentro de la zona conurbada de la ciudad de Querétaro.	51
4.2	Modelos estadísticos para la extrapolación de niveles estáticos de los pozos.	53
4.3	Extrapolaciones de niveles estáticos de los pozos de la zona conurbada de Querétaro.	55
4.4	Características geológicas y espesores de sedimentos en el valle de Querétaro.	63
4.5	Propiedades geomecánicas y velocidades de propagación de onda sísmica, adaptado de Pacheco (2007).	65
4.6	Asentamientos en el valle de Querétaro, corte A-A’.	70
4.7	Asentamientos en el valle de Querétaro, corte B-B’.	71
4.8	Asentamientos en el valle de Querétaro, corte C-C’.	72
4.9	Asentamientos en el valle de Querétaro, corte D-D'.	73
4.1	Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte A-A’.	74
4.11	Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte B-B’.	75
4.12	Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte C-C’.	76
4.13	Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte D-D’.	76

CAPITULO I.

INTRODUCCIÓN

En los ultimos años se ha presentado un crecimiento exponencial de la población en la ciudad de Querétaro, y se ha producido una disminución considerable de zonas de agricultura, las cuales son cubiertas por la nueva mancha urbana, ocasionando considerables cambios en el paisaje y un cambio en el flujo vehicular que provocan embotellamientos viales en horas pico.

Por otro lado se está dando una problemática mas grande con hundimientos regionales y diferenciales, los cuales se dan por el fenómeno de subsidencia y el cual aparece por las excesivas extracciones de gas, petróleo, minería y agua, además de las características geológicas de la zona y de los espesores de sedimentos en los suelos superficiales deformables de origen aluvial y coluvial.

La subsidencia es un tema ampliamente estudiado en México y el mundo, por su compleja evaluación en función del comportamiento mecánico de los suelos y la relación costo-beneficio, lo cual ocasiona un complejo mecanismo de análisis integral.

Es importante mencionar que este fenómeno se presenta con gran frecuencia en las extensas áreas metropolitanas, y la region central del país, donde las ciudades de México, Querétaro, Celaya, San Luis Potosi, Aguascalientes y Zacatecas, son de las más afectadas a nivel nacional por este fenómeno. Todo esto es justificado por las grandes velocidades de asentamiento encontradas en diversas investigaciones realizadas por distintas universidades, las cuales reportan que las consecuencias que ocasiona la subsidencia son altos costos económicos para los

activos del pais en cuanto a daños en la infraestructura habitacional, industrial y vial, provocados por la aparición de fallas o grietas de tensión y donde es necesaria la creación de mapas de subsidencia por cada región y realizar una localización de las zonas mas propensas a esta afectación para poder realizar planes o atlas de riesgos.

1.1. Antecedentes

Las grandes ciudades del país, que tienen suelos de origen lacustre y aluvial, como la Ciudad de México, San Luis Potosí, Celaya, Aguascalientes, Irapuato, Salamanca, Abasolo y Querétaro, presentan graves problemas de asentamientos, principalmente provocados por la extracción de agua subterránea, la cual se asocia con un fenómeno conocido como subsidencia (Pacheco-Martínez et al., 2012).

La excesiva extracción de agua es ocasionada por el crecimiento exponencial de los asentamientos urbanos (ciudades) y por una mala planificación de la urbanización. Además, con las condiciones geológicas y geomorfológicas de las ciudades antes citadas, se presentan problemas de agrietamiento de las estructuras, pavimentos fallados, asentamientos diferenciales, cambio del drenaje natural del suelo, etcétera, que afectan el comportamiento de las estructuras de las casas habitación y en las vías terrestres, con lo cual se provoca una reducción de la comodidad de los usuarios que las utilizan y un deterioro de la infraestructura que repercute en el aspecto económico del país.

Esta investigación se centra en un análisis detallado de una zona de estudio, la cual se localiza en el Estado de Querétaro, especficamente entre los limites de la zona conurbada de la ciudad y la cual corresponde a los municipios de Querétaro y Corregidora, dicha zona se centra en el análisis de la falla geológica de Avenida 5 de Febrero, sin embargo se ha encontrado que esta falla no es geológica

sino una falla de subsidencia, la cual ocasiona severos daños a la carretera federal No 57 (carretera federal San Luis Potosí – Querétaro), siendo esta vialidad es una de las más importante del país, dado que por esta vialidad se mueve una gran cantidad de personas y mercancías, en el trabajo se dará a conocer cómo es el movimiento de los asentamientos diferenciales, para así tomarlos en cuenta en la problemática de las obras hidráulicas y el crecimiento del flujo vial, a corto mediano y largo plazo.

1.2. Aspectos generales del fenómeno de subsidencia en México y el mundo

Los primeros reportes que relacionan los hundimientos del terreno causados por la extracción del agua (subsidencia) fueron realizados en 1908 por R. Fuller; sin embargo Terzaghi, en 1925, fue el primero en explicar científicamente el fenómeno ocasionado mediante una ecuación unidimensional de consolidación. Posteriormente, los resultados de Terzaghi fueron retomados por Meinzer, en 1928, quien reconoció que la extracción del agua del almacenamiento de un acuífero impacta diretamente en la compresión del mismo, según información recopilada por Rodríguez-Castillo *et al.*, (2006).

El California Water Science Center (2004) ha dado a conocer en sus investigaciones que los métodos de mapas detallados de radar de apertura interferogramétrica sintética (InSAR), se han utilizado para caracterizar el hundimiento regional del suelo, el cual es asociado a la disminución del nivel de agua subterránea en el rio Mojave, a partir de 1992; y la cuenca de aguas subterráneas de Morongo, los cuales tienen en común su formación a partir de sedimentos de grano fino (suelo aluvial y coluvial).

Inducida por la captación de aguas subterráneas, la subsidencia ha continuado en las Vegas Valley desde alrededor de 1935 y en la actualidad se tienen

hundimientos de hasta 2m en el centro del valle, la subsidencia se centra preferentemente en las fallas preexistentes, las cuales son los sitios preferidos para fisuras y lo que ha afectado a varios desarrollos residenciales, tal como menciona Bell (1997), el fenómeno de subsidencia fue reconocido por primera vez mediante la comparación de los estudios de nivelación (1915 – 1935), aunque el hundimiento se continúa valorando para la recolección y la continuidad de los datos mediante la aplicación de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), como lo da a conocer la U.S. Geological Survey (2006).

Aguilar-Perez *et al.,* (2006) mencionan que existen análisis numéricos para evaluar deformaciones del terreno asociadas directamente a la extracción de agua subterránea en acuíferos libres y confinados, donde se acoplan ecuaciones de flujo de agua subterránea y la geomecánica, los cuales engloban los parámetros más sensibles a la deformación vertical como el coeficiente de consolidación, módulo de rigidez al corte y conductividad hidráulica.

Más de 200 ocurrencias de hundimiento de la tierra, se han documentado en todo el mundo durante los últimos años (Londres, Venecia, México, Yakarta, Tokio, etcétera), y que son provocados por la subsidencia del terreno, asociados con la disminución del nivel freático (Sahu y Sikdar, 2011, Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez, 2006).

Por otro lado, el Atlas Nacional de Riesgos (CENAPRED, 2001) indica que la mayor susceptibilidad a hundimientos en México, se presenta en los estados de: Aguascalientes, Zacatecas, Tlaxcala, Querétaro, Michoacán, México, Jalisco, Hidalgo, Guanajuato, Durango y Distrito Federal.

Además es importante conocer que el abastecimiento nacional de agua para uso urbano, agrícola e industrial principalmente se produce por agua

subterránea. Se estima que en México existen 101 acuiferos sobreexplotados y que el 49% del agua para consumo humano provienen de éstos (CONAGUA, 2012). La mayor actividad económica consumidora de agua en México es la agricultura, con cerca de 80 % tal y como lo mencionan Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez, 2006..

Sin embargo, como la subsidencia no está considerada como un desastre natural en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), los protocolos de emergencia y ayuda no la incluyen en los programas urgentes de ayuda social, lo que trae como consecuencia que los afectados por fenómenos de subsidencia no cuenten con elementos legales para ampararse o reclamar por los daños a edificios y casas habitación, dado que los daños generados se observan a largo plazo (Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez, 2006).

Pacheco-Martínez (2007) da a conocer que el valle de Querétaro, al igual que otras regiones del territorio nacional y del mundo con condiciones hidrogeológicas similares, ha desarrollado un fenómeno procedente de la sobreexplotación del agua subterránea de acuíferos granulares compuestos por depósitos aluviales y lacustres del cuaternario; y a este fenómeno se le ha llamado subsidencia y que se caracteriza por la generación de hundimientos y fracturamientos superficiales. Además en la actualidad no existe una metodología para poder predecir las zonas de fracturamiento asociados a la subsidencia, que sea económicamente factible y que arroje elementos para la toma de decisiones en cuestiones de planificación urbana.

Estrella (2012) muestra valores que han sido recolectados por ingenieros de la ciudad de Querétaro desde 1998 al 2012 , donde se han monitoreados los hundimientos en la falla de Avenida 5 de Febrero (Figura 1.1), la figura 1.2 muestra

dónde han sido colocados los testigos para las mediciones y así poder generar un archivo historico; sin embargo, los puntos se han perdido por cuestiones de mantenimiento y rehabilitación de las vialidades y estructuras.

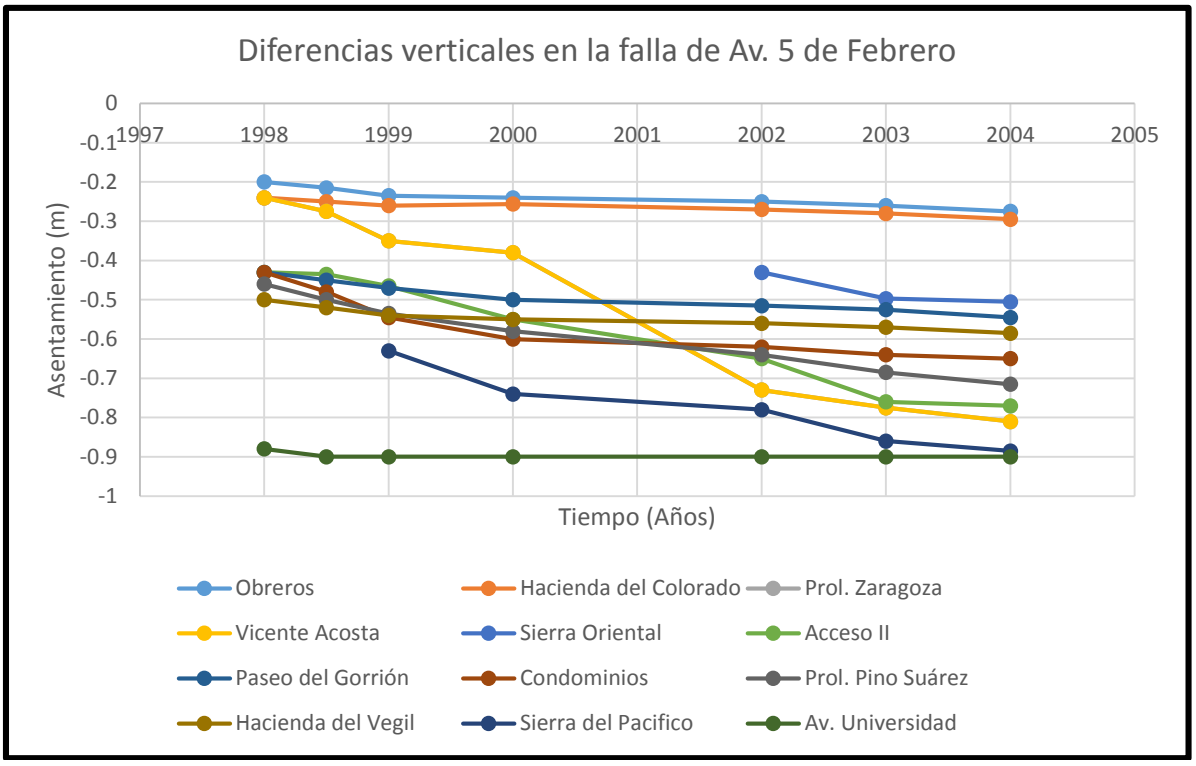

Figura 1.1. Diferencias verticales en la falla de Av. 5 de Febrero.
Fuente: Estrella 2012.

Para la monitorización y medición de los desplazamientos que se presentan en formaciones naturales y artificiales, existen instrumentos instalados *in situ* como los extensómetros e inclinómetros, redes de observación geodésica y nivelación de alta precisión o sistemas de posicionamiento global (GPS), Fernández (2009).

La subsidencia es un fenómeno que provoca daños materiales cuantiosos (Tomás *et al.,* 2010), e incluso pueden ocasionar pérdidas fatales. Este fenómeno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación como las actividades extractivas de mineral, la

construcción de túneles, la extracción de fluidos (agua, petróleo o gas), el descenso de nivel freático, la disolución natural del terreno y lavado de materiales por efecto del agua, los procesos morfotectónicos y de sedimentación o los procesos de consolidación de suelos blandos u orgánicos.

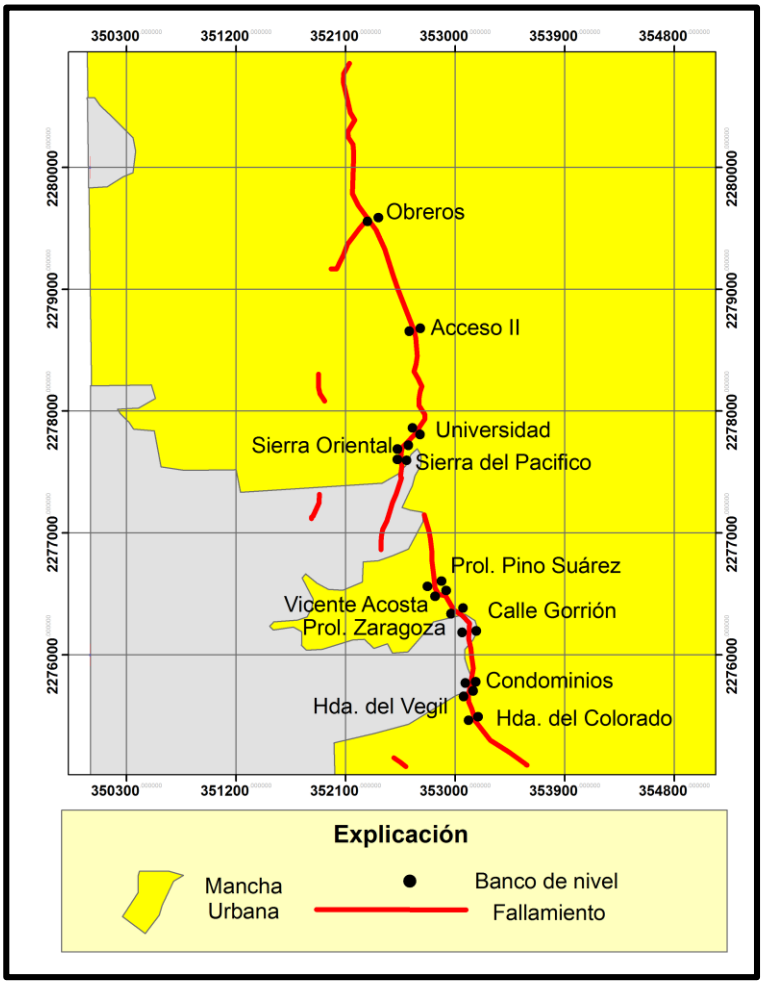

Figura 1.2. Ubicación de testigos sobre el fallamiento 5 de Febrero que se usaron para monitorear el desplazamiento vertical relativo en los bordes de fallamiento. Fuente: Estrella, 2012.

Tomás *et al.,* (2005), dan a conocer que "*la diferencia interferométrica es una técnica de teledetección para la medición de deformaciones del terreno, el cual aplica una proceso avanzado DInSAr para estudiar los fenómenos de subsidencia*".

Sin embargo Herrera *et al.,* (2009), mencionan que existen distintos métodos de medidas de las deformaciones que sirven para cuantificar aspectos del movimiento del suelo, dichos métodos se pueden clasificar en cinco grupos: topográficos, geodésicos, fotogramétricos, de teledetección e instrumentales.

El fenómeno que ocasiona hundimientos regionales ha sido un tema investigado arduamente en México, como lo dan a conocer Cabral-Cano *et al.,* (2011), donde estudiaron la magnitud y la variabilidad espacial del proceso de subsidencia, mediante la implementación de la Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial (DInSAR) en la Ciudad de México, y lo cuál trajo consigo la conclusión de que esta técnica es una excelente herramienta para medir asentamientos.

La geología del territorio mexicano es susceptible a presentar el fenómeno de subsidencia, lo que conlleva a prevenir un accidente ambiental cuando se conocen los riesgos, la SEMARNAT es la dependencia de gobierno responsable de las explotaciones subterráneas del suelo y la cual no tiene ninguna ley que diga quién es responsable por los daños que se generan en cuanto a subsidencia (Carreón-Freyre *et al.,* 2010).

En la actualidad, se puede constatar una tendencia al crecimiento de las grandes ciudades según datos obtenidos por INEGI, ocasionando que las necesidades por infraestructura sean mayores, así como también el incremento del suministro de los recursos como el agua (sobreexplotación) y la energía, lo cual ha ocasionado la problemática de la calles fracturadas, grietas en casas, huecos bajo las calles y edificios, inestabilidad de taludes y caídos, tal y como lo menciona Escalona-Alcazar *et al.,* (2012).

La subsidencia del terreno provoca movimientos descendentes y diferenciales del suelo, debido a la compactación gradual y la reducción de la

presión del agua en los poros, con tasas variables de entre algunos milímetros a metros por año, según Herrera (2012).

Carreón-Freyre (2011) dio a conocer que la compactación de los materiales del subsuelo debida a la extracción excesiva de agua subterránea en zonas de alto crecimiento poblacional, ha ocasionado hundimientos regionales importantes o subsidencia en las ciudades de México, Querétaro, Morelia, Guadalajara, Aguascalientes, Toluca, Celaya y Salamanca.

La subsidencia es un problema mundial, en Estados Unidos más de 17,000 km cuadrados en 45 estados han sido afectados directamente por el hundimiento, los principales motivos son la sobre extracción de los acuíferos, compactación, drenaje de suelos orgánicos, la minería subterránea, hidroconsolidación, compactación natural, sumideros y el deshielo. Por otro lado el Consejo Nacional de Investigación (1991), estimó que los costos anuales en Estados Unidos por las inundaciones y el daño estructural causado por hundimiento de la tierra supera 125 millones de dólares, según datos publicados en el libro *Land Subsidence in the United States* (U. S. Geological Survey, 2000).

Con toda la información recopilada por distintos autores, se puede ver la importancia que tiene el fenómeno de subsidencia y el impacto de éste en las construcciones tanto habitacionales, industriales y viales; para estudiarlo constantemente y poder mitigar problemas futuros y no caer en problemas como los que se ha tenido en la Ciudad de México, el Río Mojave y las Vegas Nevada. Lugares que han sido medidos mediante técnicas de Radar de Apertura Sintética (SAR), radar interferométrico de apertura sintética (InSAR, (Gumilar *et al.,* 2015)), interferometría diferencial SAR (D-InSAR, (XunChun *et al.,* 2011)), interferometría avanzada diferencial SAR (A-DInSAR), red de puntos estables (SPN, (*Herrera et al.,* 2009)) y dispersores persistentes de interferometría (PSI, (Zhantayev *et al.,* 2014)), u obtenidos mediante simulación numérica (Yuanfeng *et al.,* 2011) o medidos con distintas tecnologías de monitoreo (Yanlin *et al.,* 2011), mediante los

Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), tal y como lo realizó Sneed *et al.,* (2001) en el valle de Coachella; e Imakiire y Koarai, (2012) en la costa del Pacífico de Tohuko.

1.3. Justificación

La revisión del fenómeno de subsidencia es fundamental, ya que las afectaciones a las vías terrestres son importantes en el valle de Querétaro y no se tiene evidencia de que estos problemas vayan a disminuir en el futuro.

El presente trabajo se enfocará directamente en el análisis de la falla por subsidencia registrada en avenida 5 de Febrero, dado que a la hora de transitar por dicha avenida saltan a la vista los grandes daños o deterioros que sufre la infraestructura vial y las edificaciones cercanas a ésta, lo que impacta directamente en la economía de los usuarios por la reducción de la comodidad y el incremento en los gastos de operación, por otro lado es indispensable realizar planteamientos técnicos a las condiciones de las obras hidráulicas dado que no tienen la capacidad de desague adecuado en épocas de lluvia, esto ha sido ocasionado por asentamientos diferenciales, donde se acumula el agua, y se forman zona inundables o zonas de riesgo porque las obras o estructuras hidráulicas se han fracturado o han cambiado de pendientes.

Se realizará una solución de esta problemática considerando los aspectos geológicos, geotécnicos e hidrológicos, para así poder plantear una solución práctica e integral a los problemas que se presentan en la vialidad de esta zona de estudio, los cuales son principalmente la acumulación de agua, cambios en los niveles de los puentes, deformaciones diferenciales en donde se involucran una gran diversidad de obras civil y que afectan a la vialidad en cuanto a cambios de drenaje, fractura de tuberías de agua y drenaje, entre otros.

Cabe mencionar que esta falla ya ha sido estudiada con anterioridad, sin embargo es necesario que siga en estudio, ya que el fenómeno de subsidencia trae condiciones cambiantes con respecto al tiempo y por lo tanto es necesario que se siga monitoreando la evolución de los asentamientos a lo largo del valle de Querétaro y principalmente en la falla de Avenida 5 de Febrero, dado que esta es la que más daños presenta y por lo tanto debe de analizarse desde una perspectiva general.

1.4. Hipótesis.

Mediante la aplicación de modelos matemáticos y con la medición topográfica de alta precisión a diferentes tiempos, análisis geológicos, evaluación hidrológica, análisis geofísicos y geotécnicos se permitirá plantear una solución integral a la vialidad de Av. 5 de Febrero en la ciudad de Querétaro.

1.5. Objetivo General.

Monitorear la falla por subsidencia de la vialidad Av. 5 de Febrero, realizar un análisis completo de ella y plantear una solución integral.

1.6. Objetivos Particulares.

- Realizar el análisis geológico en la zona de estudio.
- Hacer una evaluación hidrológica en la zona de estudio.
- Realizar análisis geotécnicos y geofísicos.
- Realizar análisis topográfico de alta precisión.
- Plantear una solución integral en Av. 5 de Febrero.

CAPITULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Problemática en Avenida 5 de Febrero

Existe una problemática en distintos lugares del país, sin embargo enfocándose directamente en el caso del valle de Querétaro, que posee suelos de origen aluvial y lacustre, se ha observado una de las zonas con mayor índice de problemas, siendo esta una de las principales vialidades del pais, la cuál es la avenida 5 de Febrero y sus estructuras cercanas o aledañas.

Es importante dar a conocer que a lo largo de dicha falla se presentan graves problemas en la infraestructura existente, a simple vista los daños más notables son asentamientos diferenciales (vados, puentes inclinados y estructuras inclinadas) a lo largo del tramo carretero, grietas tanto longitudinales como verticales, ocasionando problemas en las cimentaciones de los edificios que se encuentren en contacto con la falla. Se puede observar que los hundimientos que está teniendo esta vialidad están modificando las condiciones de drenaje, trae consigo partes donde se estanca el agua de lluvia y provoca que ésta se infiltre directamente al cuerpo de la carretera, ocasionando que el pavimento se deteriore rápidamente, y que se reduzca el nivel de servicio y la vida útil de la vialidad (Figuras 2.1 y 2.2), provocando problemas tanto económicos como sociales para el Estado, dado que aparecen cuellos de botella del tráfico en las zonas afectadas por la influencia de la falla.

La falla de Avenida 5 de Febrero se dio a conocer en 1990 (Jaramillo L. 1990, 4 de Septiembre), y la cual incicialmente solo tenia una longitud de cuatro kilómetros y en la cual se estimaban 10 mil millones en daños, esta zona de estudio ha sido estudiada anteriormente por diversos investigadores como Valencia-Vallejo

(1995), Alvarez-Manilla *et al.,* (2002), Carreón-Freyre *et al.,* (2005), Pacheco *et al.,* (2006), Avila-Olivera *et al.,* (2009), Arroyo-Contreras *et al.,* (2010), Chávez *et al.,* (2010), Cortés *et al.,* (2012), Ochoa-González *et al.,* (2013), etcétera, y se ha podido concluir que la afectación que se determina por el fenómeno de subsidencia debe de seguir en constante monitoreo y observación, dado que se tienen indicios de que los daños que se presentan son cada vez con mayor frecuencia y por ende los problemas estructurales en la infraestructura son más costosos, cabe mencionar que el fenómeno no puede ser controlado o mitigado, sino sólo se pueden hacer políticas de control y prevención para evitar problemas y determinar zonas donde no es adecuada la construcción de estructuras, por ello se encuentra la necesidad de que se siga monitoreando constantemente, para así poder conocer cómo es el comportamiento a través del tiempo, y tener un registro periódico de los niveles de asentamientos y la ubicación de los puntos mas vulnerables a afectaciones. Algunas de las investigaciónes realizadas han arrojado valores generales del asentamiento del valle de Queretaro, en un intervalo de 5 a 10 cm/año (Chaussard *et al.,* 2014 y Pacheco-Martínez, 2007), sin embargo no es suficiente un valor general, sino es necesario tener valores mas puntuales en distintas regiones del valle de Querétaro, dado que las condiciones geológicas y geomorfológicas del suelo son cambiantes a lo largo del valle, y lo que arroja la principal variante que tiene dicha investigación con las anteriores, porque se enfoca a un monitoreo de puntos de control ditribuidos estratégicamente en el valle de Querétaro y en las principales vialidades de la ciudad, para asi determinar y conocer los gradientes de velocidad de asentamiento.

Figura 2.1. a) Asentamentos diferenciales, donde se tiene fracturamiento de la capa de rodadura, b) destrucción de banquetas, c) grietas en casas de colonia el Ensueño.

Figura 2.2. a) Vados en Av. 5 de Febrero, b) Falla por subsidencia en colonia la Sierrita, c) Aparicion de grietas por extracción de agua

2.2. Modelo de esfuerzo efectivo para cálculo de hundimientos

Tal y como lo da a conocer Pacheco-Martínez (2007) la teorías clásicas para la determinación de asentamientos o hundimientos parten de la teoría de consolidación propuesta por Terzaghi, donde consideró el esfuerzo efectivo planteado por Boussinesq, dicho esfuerzo se determina a partir de la diferencia entre el esfuerzo total del suelo y la presión de poro (ecuación 1), lo cual es obtenido mediante la determinación de la presión total de la masa de suelo (en condiciones parcialmente saturadas y sumergidas respectivamente, ecuación 2 y 3).

Si embargo Terzaghi planteo la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional (ecuación 4), apartir del concepto de esferzo efectivo, para calcular la distribución de presiones en cualquier punto de la masa de suelo y en cualquier proceso de consolidación.

Por otro lado además se ha planteado a siguiente ecuación para la medición de asentamientos (ecuación 5) y la cual ha sido ampliamente utilizada en la aplicación de los hundimientos diferenciales por extracción de agua.

$$\sigma_e = \sigma^T - u \tag{1}$$

$$\sigma^T = \gamma_m z \tag{2}$$

$$\sigma^T = \gamma'_m z \tag{3}$$

$$\frac{k(1+e)}{a_v \gamma_m} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \tag{4}$$

$$\Delta H = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H \qquad (5)$$

Donde σ_e es el esfuerzo efectivo, σ^T es el esfuerzo tota de la masa de suelo, u *presión de poro,* γ_m y γ'_m son pesos volumétricos (condición parcialmente saturada y sumerfida, respectivamente), *z* es la profundidad de los sedimentos deformables, *k* es el coeficiente de permeabilidad, *av* es el coeficiente de compresibilidad del suelo, γ_w es el peso específico del agua, *H* espesor ante un incremento de carga e_0 es la relación de vacios inicial, e_f la relación de vacíos final, y ΔH es el asentamiento del estrato deformable.

2.3. Técnicas de monitoreo de hundimientos

Tal y como la da a conocer Pacheco-Martínez (2007), existen distintas técnicas para monitoreo del fenómeno de subsidencia o de los asentamientos diferenciales, los cuales pueden ser medidos o colocados "in situ" o mediante técnicas de teledetección, sin embargo el objetivo es medir los asentamientos verticales de la superficie terrestre.

La técnica más común y frecuente implementada es la colocación de testigos de monitoreo, en los cuales debe de tenerse mucho cuidado en el momento de su colocación para asegurar la confiabilidad de que se mide el hundimiento regional de la zona y no de cambios o movimientos de la superficie por causas independientes al fenómeno de subsidencia. Las mediciones en estos testigos se pueden realizar mediante equipos topográficos como estaciones totales o mediante la utilización de un GPS (Global Positioning System) de alta precisión.

Otra técnica común y utilizada es la colocación instrumental de pozos extensómetros, los cuales miden movimientos relativos entre la boca del sondeo y uno o varios puntos situados en el interior.

En los últimos años han ido apareciendo técnicas más sofisticadas para la medición del fenómeno de subsidencia, las cuales son las monitorizaciones mediante la implementación de técnicas de teledetección o medidas mediante radares y satélites, donde se mandan ondas o barridos que miden la distancia del punto de control o de la superficie terrestre con respecto a la fuente emisora de estas ondas, para crear de mapas de hundimientos regionales.

2.4. Modelos matemáticos para análisis estadístico

2.4.1. Modelo ARIMA (p, d, q) (P, D, Q)s

Tal y como lo menciona De la Fuente (2014), los modelos conocidos como **ARIMA** (***AR*** *(Autoregresivo),* ***I*** *(Integrado) y* ***MA*** *(Medias móviles)),* parten de las modelaciones estadísticas para series temporales que realizaron Box y Jenkins, donde se tomaba en cuenta la dependencia existente entre los datos observados, lo cual significa que cada observación de un valor encontrado puede ser modelado en función lineal de los valores anteriores y con la implementación de los errores debidos al azar, todo esto incorporando una componente cíclica o estacional, sin embargo es necesario que se cuente con todos los elementos que describan al fenómeno a analizar (lo minimo recomendado por Box y Jenkins son 50 observaciones).

La metodología de la obtención de los modelos ARIMA fue determinada en cuatro sencillos partes, los cuales son los siguientes:

Parte 1. Determinación del modelo ARIMA a implementar, de acuerdo con los valores a analizar, lo cual se realiza mediente la selección de la tranformación que se debe aplicar a los datos para lograr convertir el fenómeno observado en una serie estacionaria. Esto es determinando los ordenes p y q de su estructura autorregresiva y de media móvil.

Parte 2. La segunda fase del análisis parte de la estimación del modelo de serie estacionaria, para si poder estimar los parámetros AR y MA, lo cual se obtiene mediente la máxima verosimilitud, asi como también los errores estándar y los residuos de la función.

Parte 3. Se debe realizar la comprobación de que los residuos no siguen una estructura de dependencia y se comportan por un proceso de ruido blanco, sin embargo si los residuos muestran un comportamiento de estructura, se debe modificar el modelo y se realiza un proceso iterativo, con respecto a las etapas anteriores y se cicla hasta obtener un modelo adecuado.

Parte 4. En esta etapa se realiza la predicción de los valores, en función del modelo adecuado, obtenido en las etapas anteriores.

2.4.2. Modelo de caminata aleatoria

Los modelos de caminata aleatoria contituyen una serie de tiempo estocástica (Torres, 2007), en donde se obtiene un cambio sucesivo en la función, expresado esto como u_t (ecuación 6), el cual es extraido de una manera independiente de una distribución de probabilidad con media igual a cero y varianza (σ^2, (Pindyck y Rubinfeld, 2001)), por lo tanto dicho proceso puede verse de una manera mas clara al lanzar una moneda y darle el valor +1 si cae una cara y un valor de -1 si cae una cruz.

$$y_t = Y_{t-1} + u_t \tag{6}$$

Tal como lo menciona (Macia y Oleaga, 2007), para el entendimento de los modelos de caminata aleatoria, se planterá el siguiente problema elemental de probabilidades para su interpretación:

"Una partícula puede moverse sobre la recta real dando saltos de longitud 1 hacia la derecha o a la izquierda de modo aleatorio. La probabilidad de desplazarse hacia otro lado es ½. Después de N movimientos puede ocupar alguna de las posiciones:

$$X_N = -N, -N+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N-1, N \tag{7}$$

Si su posición inicial es $X_0 = 0$, se desea calcular la probabilidad $w(m, N) = P\ (X_N = m)$ de encontrarla en la posición $X_N = m$ al dar un número de pasos N.

2.4.3. Modelos lineales

La implementación de los modelos lineales forman parte de las metodologías estadísticas (Carmona, 2005), mas simples y fáciles de implementar en cualquier practica o análisis de datos, este tipo de metodologías se encuentra dentro de las técnicas tan populares como la regresión y el analisis de la varianza, es indispensable mencionar que estas técnicas tienen la desventaja de que casi siempre se cuenta con una gran cantidad de variables independientes y lo que incrementa su complejidad, ademas de que es necesario que los datos sigan un comportamiento normal y de que la relación de los parámetros sigan una tendencia lineal.

Un modelo lineal puede considerarse como un esquema de relación entre una variable (Y) y otra(s) variable(s) dependientes X (X_1, X_2,X_3 …., X_k). Por lo tanto puede definirse como:

$$Y = Función\ lineal\ (X) + perturbación\ aleatoria \tag{8}$$

2.5. Modelos de interpolación para creación de Isobatas

En la creación de los modelos digitales de elevaciones (Paredes Hernández *et al.,* 2013), existen dos distintos modelos de interpolación:

1. *Modelos de interpolación determinísticos:* Estos modelos están basados en formulas matemaáticas que realizan la suavización de la superficie modelada, algunos métodos que son obtenidos mediante estas técnicas son interpolación tipo IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline.
2. *Modelos de interpolación geoestadísticos:* Estos modelos estan basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación (las relaciones estadísticas entre los puntos medidos), la interpolación tipo kriging es la mas común dentro de estas modelaciones.

Los métodos kriging consisten en realizar una función de ajuste entre los puntos de muestra con respecto a un radio especificado, para asi poder realizar la obtención de los valores de salida de la superficie modelada y para cada una de las ubicaciones de los puntos, lo cual es realizado mediante la supocision de que la distancia entre los puntos de la muestra (dentro de un radio especifico), puede ser utilizada para obtener la variación de la superficie modelada.

Por otro lado puede decirse que los métodos Kriging están formados por una serie de pasos, los cuales son a) Realización de un análisis estadístico de los datos, b) Modelación de variogramas, c) Creación de la superficie y d)Exploración de la superficie de varianza.

Tal y como lo menciona la ArcGIS Resource Center (2012) *"Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z"*, en la sección de **anexos I** se muetran las ecuaciones del kriging ordinario que plantea Viera y González (2002).

CAPITULO III.

METODOLOGÍA

3.1. Delimitación de la zona de estudio

En la delimitación de la zona de estudio fue necesaria la recopilación de información georreferenciada, tanto de las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) así como de la Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO). Esta información comprende curvas de nivel, límites municipales y estatales, crecimiento urbano, uso de suelo y geología; en formato shapes (*.shp), para realizar y facilitar el análisis de la delimitación de la zona, con la ayuda de la herramienta computacional ArcView versión 10, (figura 3.1). La zona de estudio comprende los municipios de Querétaro y Corregidora, donde se encuentra gran parte de la zona conurbada de la ciudad de Querétaro y donde se presenta el fenómeno de subsidencia. Se creó un modelo digital de elevaciones y un análisis de la evolución del crecimiento de la mancha urbana, con el objeto de conocer cómo ha sido la tendencia del comportamiento de la expansión de la ciudad y cómo impacta en el fenómeno estudiado.

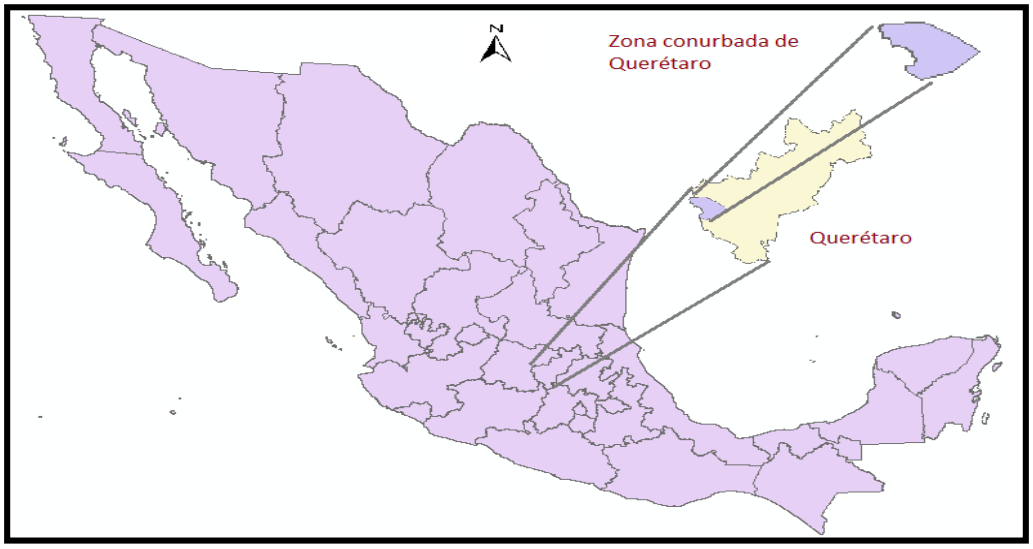

Figura 3.1. Mapa de la localización de la zona conurbada de Querétaro, con respecto al estado y el país.

3.2. Análisis hidráulico e hidrológico

Se realizó una recopilación de la información existente sobre la variación del Nivel de Aguas Freáticas (NAF) de los pozos de extracción de agua cercanos a la zona de estudio y se procedió al análisis de los datos. Para su modelación se hizo un análisis hidrológico y se determinió hacia dónde confluyen las lluvias y para conocer el impacto que tienen en Av. 5 de Febrero.

3.2.1. <u>Base de datos de extracción de agua (pozos)</u>

Es indispensable contar con los registros del número total de pozos de extracción de agua que se encuentran en la zona conurbada de la ciudad de Querétaro, lo cual es indispensable que sean solicitados a las dependencias gubernamentales de la extracción, regularización y distribución del agua en el estado, siendo ellos la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Estatal del Agua (CEA), figura 3.2.

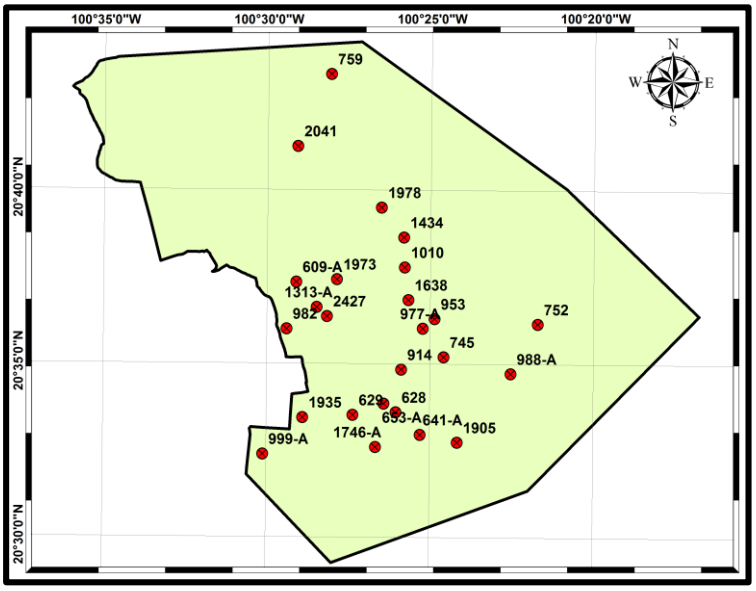

Figura 3.2. Ubicación de los pozos de extracción de agua, localizados dentro de la zona conurbada.

3.2.2. Análisis estadístico y pronóstico de la variación del nivel estático

Con la información recopilada de los organismos gubernamentales se realizó un análisis estadístico de los niveles estáticos de los pozos monitoreados por la CEA y la CONAGUA, dicho análisis se trabajo en función del paquete computacional STATGRAPHICS Centurion XV.

Para el análisis estático de cada pozo es necesario conocer algunas medidas de tendencia central como la media aritmética, desviación estándar, varianza, curtosis, entre otras; para así conocer el comportamiento estadístico de las muestras. Una característica primordial de la herramienta computacional usada, es que utiliza varios modelos estadísticos para lograr la selección de la función de mejor ajuste a los datos analizados y con la mejor correlación de los niveles de significancia de los diferentes modelos.

Este procedimiento ha sido realizado para la estimación de los niveles estáticos de los pozos en los años futuros, donde los años extrapolados de interés son 2015, 2016 y 2017.

Los distintos modelos internos y comparados entre sí, donde el software, son el de caminata aleatoria con *drift*, *media constante, tendencia lineal, suavización exponencial* en sus tres variantes (simple con alfa, De Brown con alfa y De Holt con alfa y beta) y la modelación *ARIMA* en sus diferentes variantes, la selección del modelo se obtiene con el cumplimiento de los indicadores para la cuantificación de la bondad de ajuste (Ritter *et al.*, 2015), los cuales son la raíz del cuadrado medio del error, corridas excesivas hacia arriba y hacia abajo de la media, BOX-Pierce para autocorrelación excesiva, diferencia en medias entre la 1ra mitad y la 2da mitad, diferencia en varianza entre la 1ra mitad y la 2da mitad, asi como también las medidas de tendencia central, de disperción y de apuntalamiento.

Tomando en cuenta lo anterior no hay que dejar a un lado una de las características que rigen la selección del modelo estadístico, la cual es el 95% de confiabilidad de la función obtenida del comportamiento de los datos para cada uno de los modelos, es indispensable mencionar que no es posible realizar un análisis de incertidumbre, dado que falta mucha información sobre el proceso de recolección de los datos proporcinados por la CONAGUA y la CEA, por lo tanto no se pueden obtener los errores de la medición, sistemáticos y aleatorios, para los niveles estáticos, no es posible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de una magnitud y por lo tanto nos quedamos con la incertidumbre de la cuantificación exacta, pero tomando los datos como aceptables por la fuente de donde provienen.

3.2.3. Creación de mapas de evolución de los niveles estáticos en la zona conurbada.

Con la ayuda del programa ArcView versión 10 y tomando en cuenta el historial de la variación de nivel estático de agua y la georreferenciación de los pozos de extracción localizados en la zona conurbada de la ciudad de Querétaro se procedió a la creación de curvas o isóbatas de descenso de nivel estático, las cuales parten de una interpolación kriging simple.

Las isóbatas construidas son para los años de 1970 a 2011, 2015, 2016 y 2017. Los datos reales y confiables de los años 1970 a 2011 son medidos y recolectados por los organismos operadores (CONAGUA y CAE), mientras que los datos de 2015 a 2017 son datos extrapolados estadísticamente.

3.3. Caracterización geológica y de suelo en la zona de estudio.

La presente caracterización de suelo se realiza principalmente con la recopilación de varias fuentes de investigaciones y estudios realizadas con

anterioridad por distintos investigadores de las universidades de Querétaro, y los cuales serán utilizados para conocer propiedades mecánicas del suelo, esto será basado directamente con análisis geológicos, análisis geofísicos (coeficientes espectrales H/V) y geotécnicos.

3.3.1. Geología del valle de Querétaro y de la zona de estudio

La geología del valle de Querétaro, parte de la simplificación realizada por Aguirre-Diaz *et al.,* (2000) y Aguirre-Diaz *et al.,* (2005), donde dan a conocer que el asentamiento urbano de la ciudad se encuentra dentro de la formación conocida como graben de Querétaro, el cual esta formado mediante la intersección de lo sistemas de fallamiento regional Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) y el Chapal-Tula, los limites bien definidos se encuentran al Este (E) por las fallas de Querétaro Norte, Queretaro Sur y Huimilpan Norte, al Oeste (W) la falla de San Bartolomé, mientras que para los limites al Norte (N) no están claramente definidos y los cuales han sido nombrados como el fin del sistema Taxco-San Miguel de Allende (volcán la Joya, Valdéz-Moreno *et al, 1998) y* al Sur (S) por una serie de fallas normales con rumbo (ENE-WSW) y echados[1] hacia el norte.

Es importante recalcar que dentro del graben de Querétaro, existe una segunda formación tectónica, la cual es un subgraben, donde los limites al Este (E) son la falla de 5 de Febrero, al Oeste (W) la falla de Tlacote, al Norte (N) la falla de Jurica y al Sur (S) la falla de Lourdes, donde la fosa esta compuesta principalmente de sedimentos granulares de origen aluvial y lacustre no consolidados con

[1] Ángulo de echado: Valor estimado del ángulo de la máxima inclinación en las capas de roca (Definido por INEGI).

intercalaciones de derrames de lava de espesores variables. Es importente resaltar que sobre la fosa se han registrado hundimientos regionales y diferenciales, lo cual ha ocacionado el fenómeno de subsidencia y la aparición de grietas en la superficie, tal y como lo da a conocer Pacheco-Martínez (2007).

La figura 3.3 muestra la columna estratigráfica reportada por Carreón-Freyre *et al.,* (2005), y adaptada por Alaniz-Álvarez *et al.,* (2001) , la cual servirá en la interpretación de los valores de asentamientos.

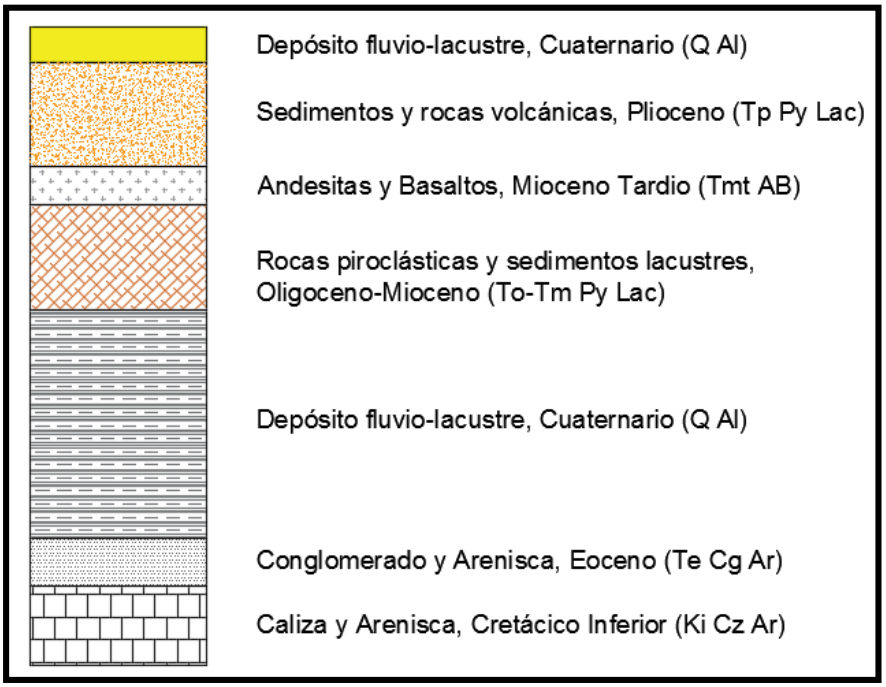

Figura 3.3. Columna estratigráfica reportada para el valle de Querétaro
Fuente: Carreón-Freyre *et al.,* (2005)

Pacheco-Martínez (2007) da a conocer una serie de distintos pozos gravimétricos, los cuales contienen una gran variedad de información para realizar modelación del suelo del valle de Querétaro, asi como también una carta de las fallas dentro de la zona urbana de Querétaro (figuras 3.4) y donde creó perfiles

estratigráficos (sección de **Anexos II**) mediante gravimetría y calibrados con información de pozos de extracción de agua.

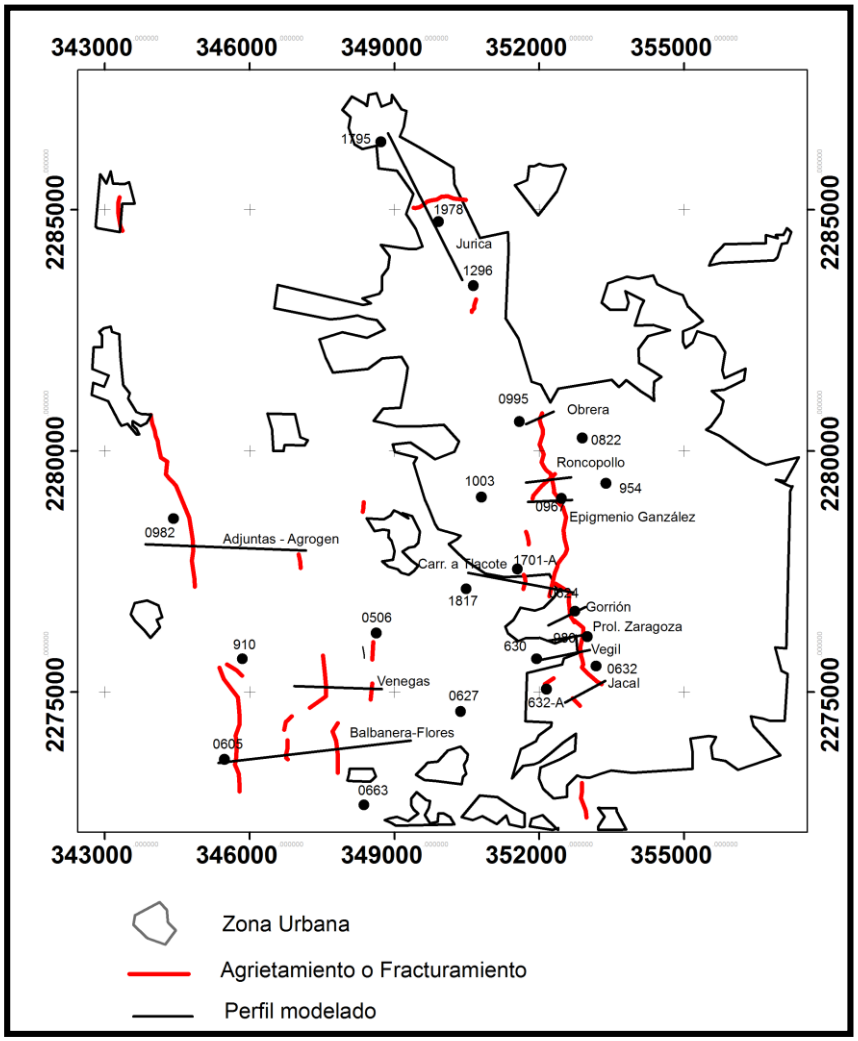

Figura 3.4. Fallas en la zona urbana de Querétaro.
Fuente: Pacheco-Martínez (2007).

Alvarez-Manilla *et al.,* (2002) realizaron una clasificación del tipo de suelo, mediante la utilización de técnicas de muestreo, la obtención de sus características mecánicas (granulometría y las propiedades índice) y la implementación de geofísica. Para asi poder diferenciar los suelos transportados y los suelos antropogénicos, asi obteniendo la carta de la figura (3.5).

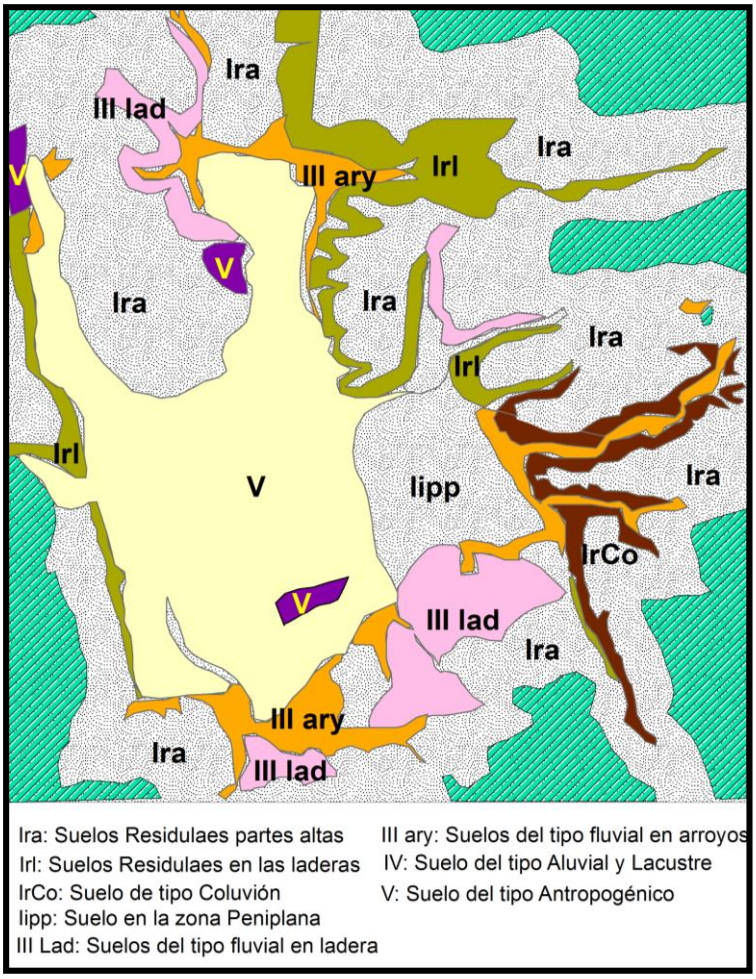

Figura 3.5. Mapa de tipos de suelo en el Valle de Querétaro y ZMQ.
Fuente: Álvarez-Manilla *et al.* (2002).

Por otro lado analisando información geofísica, González-Martínez, (2014), realizó una cotejación y comparación de información de cartas geológicas, de isoperiodos y de espesores de sedimentos deformables del valle de Querétaro, para asi determinar la ubicación de puntos a monitorear en su investigación (figura 3.6) y determinó la tabla 3.1 y donde se muestra una concentración de información del valle de Querétaro.

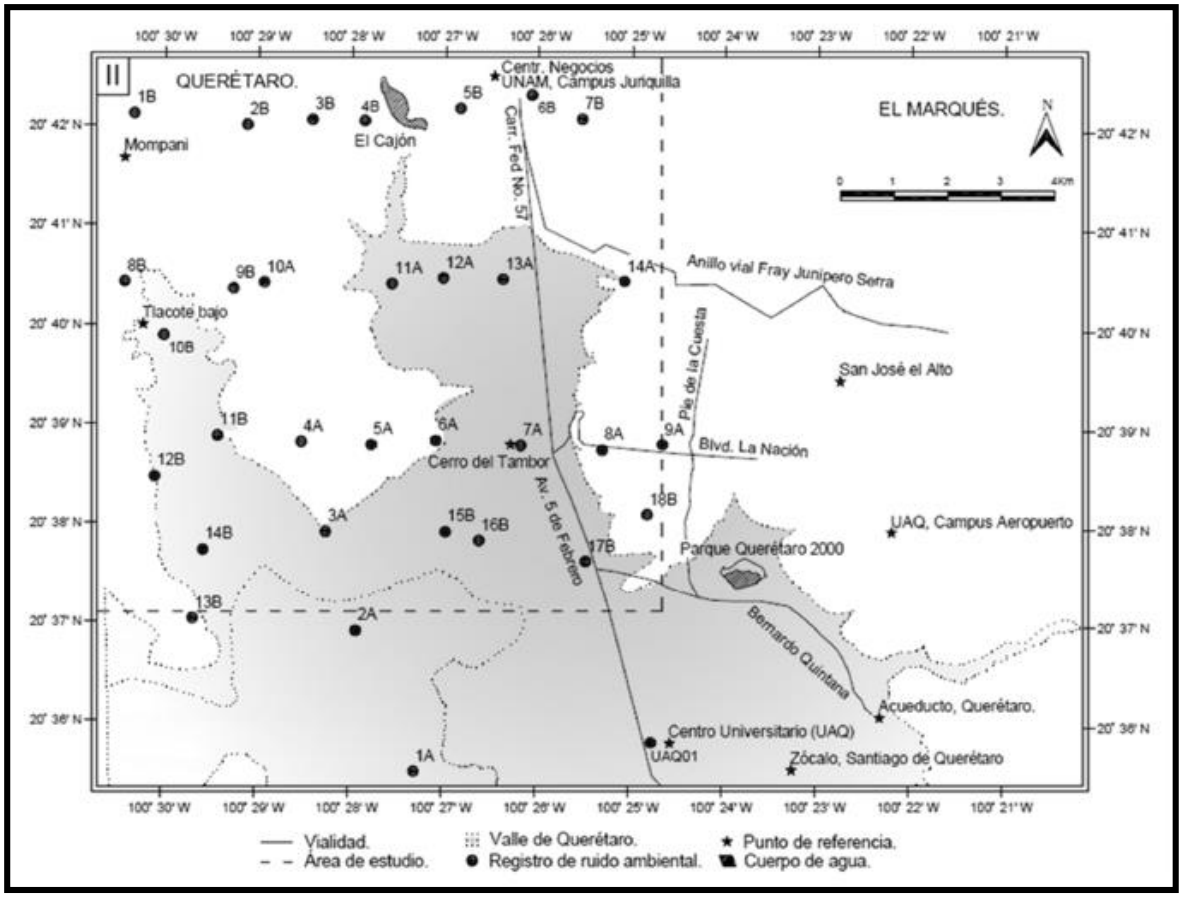

Figura 3.6. Ubicación de los puntos de control en el Valle de Querétaro.
Fuente: González-Martínez. (2014).

Tabla 3.1. Obtención de información del valle de Querétaro.
Fuente: González-Martínez. (2014).

Punto	X (m)	Y (m)	Carta geológica simplificada (Pacheco, 2007).	Carta geológica (Álvarez-Manilla et al., 2002).	Carta de espesores de sedimentos (Pacheco, 2007).	F0 (Bustillos, 2005).
1A	348370	2276941	Q Al	IV	110 m	1.42 Hz
2A	347296	2279565	Q Al	IV	45 m	1.66 Hz
3A	346742	2281434	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	1.90 Hz
4A	346293	2283110	Tmt AB	Ira	0 m	2.50 Hz
5A	347397	2283050	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	2.50 Hz
6A	348797	2283124	To-Tm Py Lac	V/Ira	40 m	2.00 Hz
7A	350376	2283033	Tmt AB	IV/III ary	120 m	2.15 Hz
8A	351890	2282947	Tmt AB	Ira	0 m	3.33 Hz
9A	353009	2283044	Tmt AB	Ira	0 m	_-Hz
10A	345614	2286076	To-Tm Py Lac	III lad/Ira	0 m	_-Hz
11A	347984	2286044	Q Al	IV	55 m	2.00 Hz
12A	348942	2286148	Q Al	IV	120 m	1.60 Hz
13A	350048	2286123	Q Al	IV/III ary	55 m	1.60 Hz
14A	352309	2286082	To-Tm AB	Irl/III ary	0 m	3.33 Hz
1B	343200	2289216	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	_-Hz
2B	345301	2288997	Tmt AB	Ira	0 m	_-Hz
3B	346515	2289086	Tmt AB	Ira	0 m	_-Hz
4B	347486	2289064	Tmt AB	II lad/III ary	0 m	_-Hz
5B	349266	2289290	Tmt AB	Ira	0 m	_-Hz
6B	350593	2289538	To-Tm AB	Irl/Ira	0 m	_-Hz
7B	351528	2289087	Tmt AB	Ira	0 m	_-Hz
8B	343015	2286098	Tmt AB	IV/V	0 m	_-Hz
9B	345041	2285963	To-Tm Py Lac	Ira	0 m	_-Hz
10B	343740	2285099	Q Al	IV/Ira	70 m	2.50 Hz
11B	344735	2283228	To-Tm AB	Ira	0 m	2.50 Hz
12B	343565	2282473	Q Al	IV	40 m	2.50 Hz
13B	344261	2279804	To-Tm AB	IV	0 m	2.50 Hz
14B	344459	2281104	Q Al	IV/Ira	0 m	2.25 Hz
15B	348971	2281427	Tmt AB	IV	55 m	1.66 Hz
16B	349596	2281264	Q Al	IV	80 m	1.66 Hz
17B	351578	2280975	Q Al	Irl	55 m	2.25 Hz
18B	352725	2281742	Tmt AB	Ira	0 m	3.33 Hz
UAQ01	352785	2277467	Tmt AB	Ilpp	25 m	3.33 Hz

Una vez recopilada y analizada la información anterior se realizan perfiles estratigráficos en las zonas de interés en la investigación y mediante la herramienta computacional de ArcView, se hizo un análisis de la información de la geología y de las fallas geológicas determinadas y reportadas por los distintos investigadores que fueron mencionados anteriormente, para así tener la geología regional de la zona de estudio y una carta de fallas geológicas y de subsidencia.

3.4. Medición del fenómeno de subsidencia en Querétaro

3.4.1. Testigos de medición

Estos testigos de medición ya habían sido colocados con anterioridad por Vega-Moreno (2014), y fueron ubicados estratégicamente, siendo el principal criterio de colocación, las zonas donde se tenian indicios de asentamientos diferenciales considerables en el valle de Querétaro y primordialmente donde se vieron las mayores afectaciones a las vías terrestres, algunos de estos puntos de control son placas de INEGI (puntos donde aparece la letra I) y en otros casos solo son clavos y rondanas de acero (puntos con la letra U).

A lo largo de esta investigación se realizaron mediciones en estos puntos para tener una periodicidad de los hundimientos o deformaciones en la ciudad de Querétaro, mediante la aplicación de instrumentos topográficos de alta precisión a distintos tiempos; la figura 3.7 muestra 32 puntos colocados y georreferenciados, mientras que la tabla 3.2 muestra las coordenadas de 18 puntos monitoreados dentro de esta investigación.

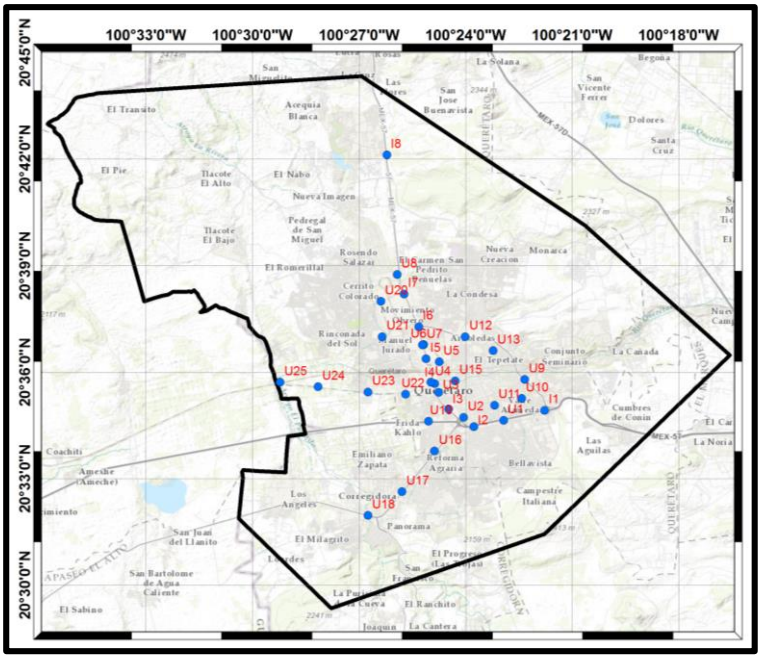

Figura 3.7. Puntos de control GPS.

Tabla 3.2. Coordenadas de los puntos de control GPS, monitoreados en la investigación. Fuente: Vega-Moreno (2014).

PUNTO	X_UTM	Y_UTM
I1	357950.6384	2276482.7365
I3	353251.8404	2276603.6855
I4	352587.0188	2277918.8076
U1	355946.1286	2275972.4009
U10	356832.1134	2277112.7540
U11	355503.5875	2276766.8274
U15	353587.5392	2278048.2906
U16	352550.3175	2274407.0154
U17	350942.0195	2272318.0087
U18	349254.4602	2271095.4003
U19	352262.5388	2275960.7694
U2	353987.0062	2276146.2770
U24	346879.0115	2277806.8524
U25	345024.4978	2278053.7105
U3	352778.7846	2277466.1888
U4	352404.0856	2277995.1818
U6	352056.8754	2279951.1905
U7	352005.2297	2279936.2460

3.4.2. ***Levantamiento con GPS de alta precisión los hundimientos de la zona de estudio***

Este proceso se realiza en función de un equipo de medición con GPS de alta precisión, el cual tiene tres modos de funcionamiento, los cuales son método estático, dinámico y RTK, la principal variante y diferencia entre cada uno de ellos es la precisión que maneja cada uno.

De los tres métodos, el más confiable es el modo de trabajo estático por su precisión (entre 3 mm y 1 cm de error), por lo que éste será el utilizado. La realización y obtención de datos se realiza en trabajo de oficina, dado que en modo estático el GPS sólo graba información y ésta tiene que ser procesada mediante un software, se relaciona la información grabada por el GPS, una estación de nivelación activa (en este caso la estación ubicada en la UAQ) y la información de los satélites que estuvieron ubicados al alcance del GPS el día de la medición (información de INEGI). La figura 3.8 muestra el equipo que se va a utilizar. El tiempo de grabación de información para tener una buena precisión y minimización del error de medición se realizó mediante dos horas de grabado por punto de medición y el pos-proceso fué realizado por personal de INEGI, para minimizar la incertidumbre de los resultados.

Figura 3.8. a) GPS STONEX S9. b) GPS SOKKIA GRX2.

3.5. Diagrama de flujo de la investigación

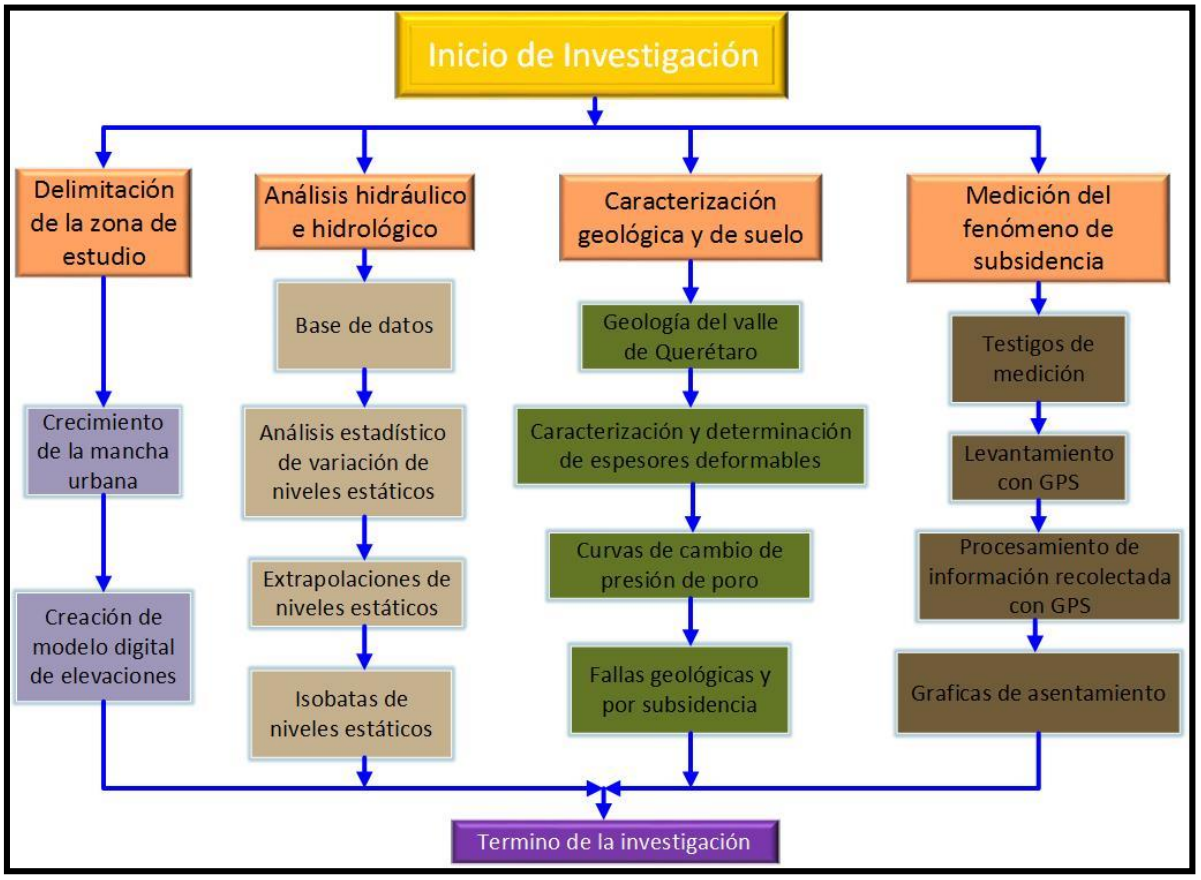

Figura 3.9. Diagrama de flujo.

CAPITULO IV.

RESULTADOS

4.1. Delimitación de la zona de estudio

La figura 4.1 muestra cómo ha ido evolucionando el crecimiento de la mancha urbana en la ciudad de Querétaro, se cuenta con un historial del periodo de 1917 a 2010, además se presentan la ubicación de los pozos de extracción de agua en la zona de estudio, lo cual da como origen el fenómeno de subsidencia, y el motivo de la presente investigación.

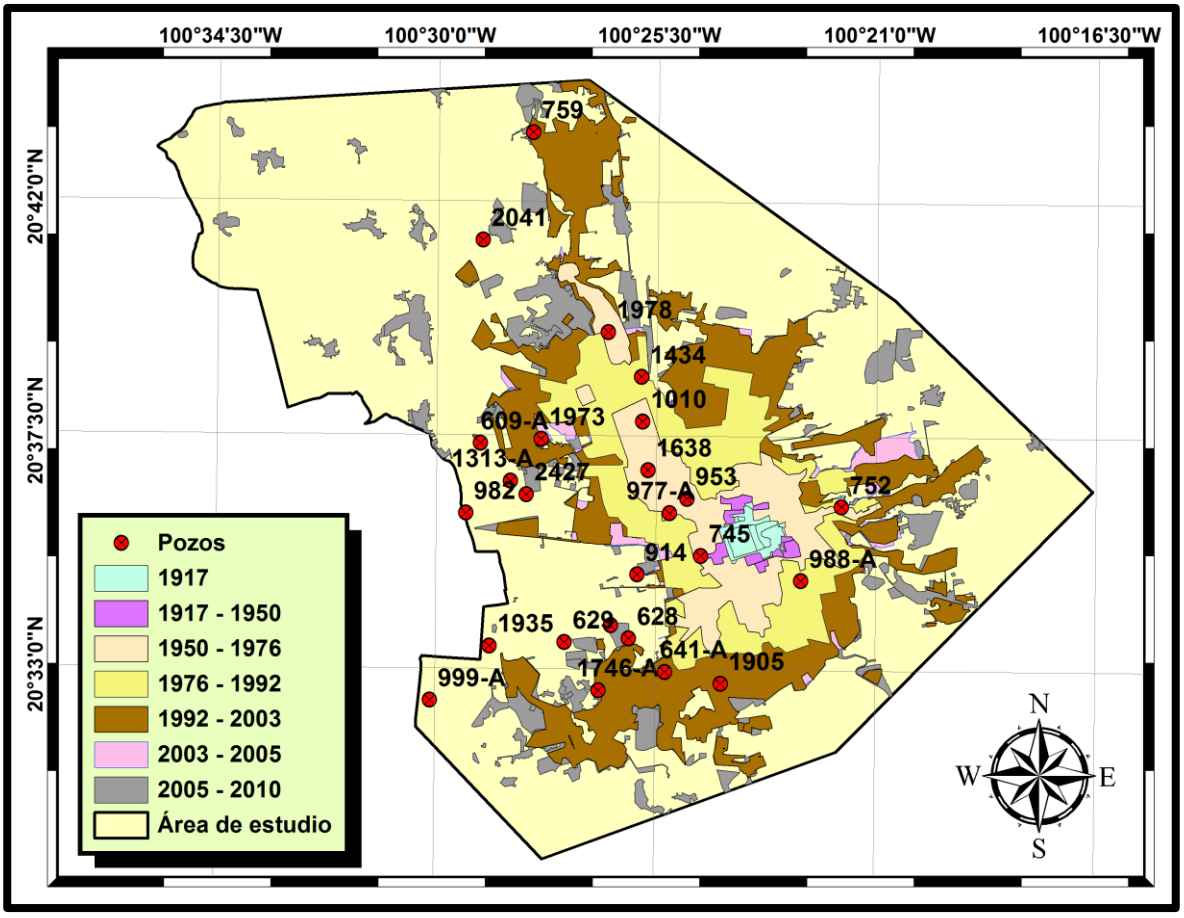

Figura 4.1. Crecimiento urbano de la zona conurbada de la ciudad de Querétaro, con datos de CONCYTEQ.

La figura 4.2 muestra el modelo digital de elevaciones de la zona de estudio, la cual representa la topografía general del valle de Querétaro, se puede visualizar que en la zona más plana o baja se tiene la mayor concentración de pozos de extracción de agua y es donde se presentan los mayores problemas de deformaciones.

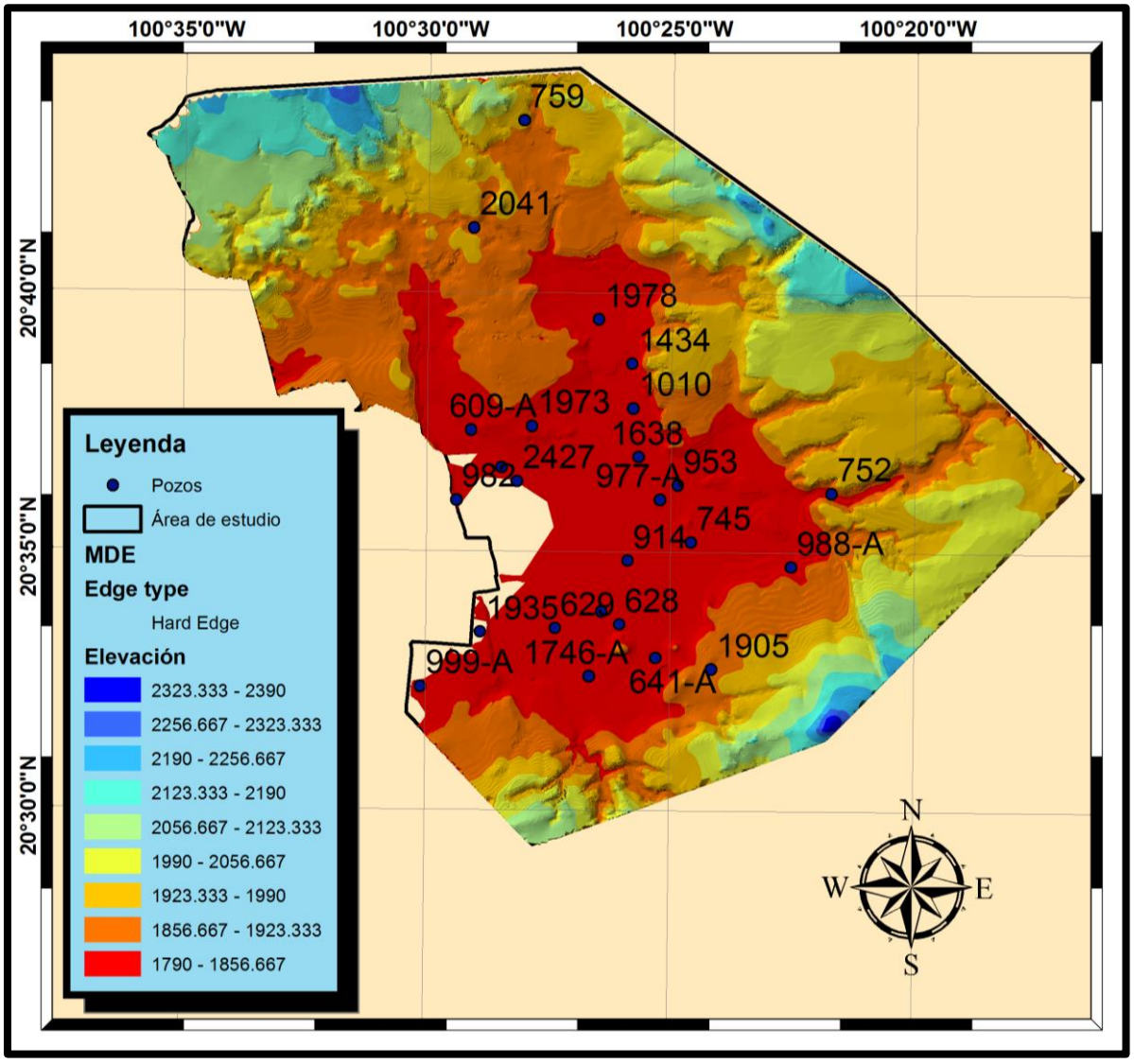

Figura 4.2. Modelo digital de elevaciones de la zona de estudio.

4.2. Análisis hidráulico e hidrológico

4.2.1. Base de datos de pozos

La base de datos gubernamental consta principalmente de la información general que contiene las características de 26 pozos, los cuales son administrados por la CONAGUA y la CEA. En la tabla 4.1, se muestra un resumen de la información contenida en la base de datos general, incluye principalmente el nombre del pozo, clave o ID para su identificación, coordenadas en formato UTM y un historial de los años de 1970 al 2011 de los niveles estáticos, sin embargo los intervalos de tiempo no son constantes, existe una variación entre los años de registro, los cuales pueden ser 5, 4, 2 y 1 año respectivamente. El intervalo de 5 años se presenta en el periodo de 1970 al 1990, de 4 años en el periodo de 1990 a 1994, de 2 años en el periodo de 1994 a 1996, y del año 1996 en adelante, y hasta llegar al año 2011 el intervalo de la medición es anual.

Es de suma importancia recalcar que para efectos del análisis y de la creación de modelos, únicamente se utilizaron las mediciones del historial de 1996 a 2011, para tener un intervalo constante y por observaciones de que los modelos se comportaban de mejor manera, aumentando la correlación.

La información analizada se recabó en un solo archivo, donde se cotejaron y completaron los datos faltantes de las mediciones de los pozos con datos de CONAGUA y la CEA, completando la información acerca de las variaciones de los niveles estáticos (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Pozos dentro de la zona conurbada de la ciudad de Querétaro, administrados por CONAGUA y CEA.

No	No. C.N.A.	Nombre del pozo	X (UTM)	Y (UTM)	Elevación de Brocal msnm	Nivel Estático Dic. 1970	Nivel Estático Dic. 2000	Nivel Estático Dic. 2011
1	759	Ejido el Nabo	347166	2292086	1950.33	15.37	64.68	86.58
2	2041	CEA El Nabo	345371	2288268	1899.90	14.75	68.40	126.40
3	1978	CEA Loma Bonita	349818	2284988	1816.52	64.30	83.63	82.05
4	1434	Bachoco	351004	2283393	1813.73	28.13	44.00	35.80
5	2427	Sta. Ma Magdalena III	346893	2279228	1799.50	45.91	112.87	133.10
6	1010	Uniroyal No. 2	351038	2281812	1805.07	43.00	110.56	124.10
7	1973	CEA San Pedro Martir IV	347432	2281192	1800.35	30.15	152.41	169.66
8	609-A	Rcho. El Rincón	345265	2281054	1806.28	51.44	123.00	142.94
9	1638	Vidriera Qro. Nte.	351229	2280079	1804.32	43.14	112.10	129.50
10	1313-A	Rcho. El Rosario	346341	2279716	1799.25	26.67	118.40	140.00
11	953	Singer Mexicana No. 2	352618	2279064	1807.69	73.69	120.64	132.20
12	612-F	Rcho. La Colmena	344440	2279792	1803.72	34.64	111.60	142.73
13	752	Alberca Leticia	358102	2278755	1840.13	12.54	49.09	45.28
14	977-A	Tecnológico	351991	2278559	1810.75	50.73	116.74	138.00
15	982	Rcho. Las Adjuntas	344744	2278574	1798.97	45.00	106.20	137.10
16	745	Colegio Fray Luis	353095	2277032	1813.83	66.54	126.67	146.90
17	914	CEA Capilla 1	350834	2276380	1803.06	38.00	112.64	141.05
18	988-A	CEA Expositor No. 2-B	356650	2276136	1818.00	20.49	150.40	175.80
19	653-A	Ejido Sta. Virginia	349900	2274577	1803.54	48.07	87.94	99.00
20	628	Rcho. Venegas	350536	2274107	1805.25	34.90	120.63	142.40
21	629	El Cerrito Frcc. 2	348247	2273979	1807.54	31.88	120.17	148.36
22	1935	Ejido Los Angeles	345579	2273859	1837.70	61.43	139.10	181.48
23	641-A	CEA Tejeda	351815	2272915	1809.01	40.00	112.77	144.85
24	1746-A	CEA El Pueblito 2A	349450	2272271	1805.00	36.73	122.30	153.78
25	1905	CEA Reforma Agraria	353795	2272498	1900.00	134.71	212.40	235.00
26	999-A	Ejido El Romeral	343449	2271929	1829.11	54.77	141.57	165.80

Fuente: Estrella (2012).

4.2.2. Análisis estadístico y pronóstico de la variación del nivel estático

La realización del análisis estadístico trajo consigo la obtención de modelos estadísticos (ejemplo representativo, figura 4.3), que se ajustan a los distintos comportamientos de cada uno de los pozos, teniendo así un número total de 26 modelos (tabla 4.2), donde se muestra una concentración de los modelos

determinados para los pozos analizados, pudiéndose observar que los niveles estáticos en el valle de Querétaro son muy variables. Una razón explicable a esta condición es la distribución del agua dentro de las zonas industriales y residenciales, se pueden observar que los modelos encontrados son distintos, todo esto a razón de que se compararon varios modelos para cada uno de los pozos y se optó por aceptar el modelo que obtuvo la mejor correlación. Los parámetros analizados son las medidas de tencencia central (media, mediana, moda, desviación estándar y varianza), de dispersión (sesgo) y de apuntalamiento (curtosis), sin embargo se produjo una incertidumbre en la selección final, dado que se dieron casos en los que dos o tres modelos contaban con los mismos valores de tendencias y se eligio como último parámetro de aceptación el valor del error cuadrático medio (RMSE).

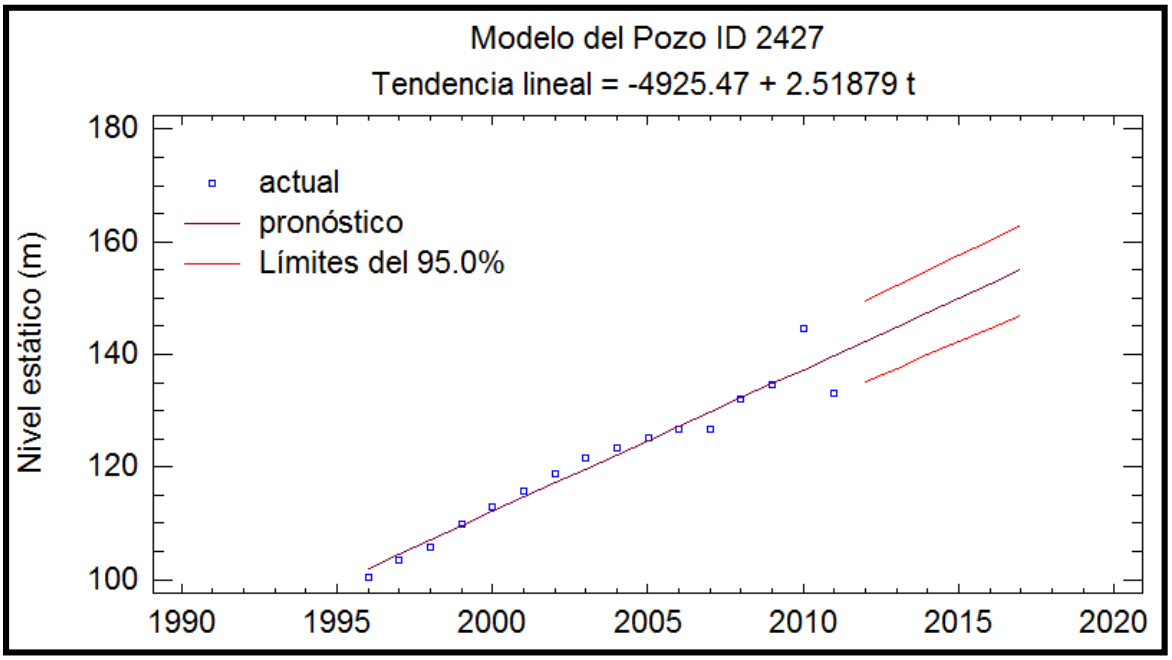

Figura 4.3. Ejemplo de gráfica donde se presenta el modelo individual para cada uno de los pozos, la gráfica anterior pertenece al pozo 2427.

Tabla 4.2. Modelos estadísticos para la extrapolación de niveles estáticos de los pozos.

ID	MODELO DE AJUSTE	RMSE
759	Tendencia lineal = -3488.21 + 1.77693 t	2.91068
2041	Caminata aleatoria con drift = 5.11867	8.43782
1978	ARIMA(0,0,2) con constante	0.69208
1434	Tendencia lineal = 1072.85 + -0.514529 t	1.73428
2427	Tendencia lineal = -4925.47 + 2.51879 t	2.86081
1010	ARIMA(0,1,1) con constante	1.68132
1973	ARIMA(0,2,2) con constante	1.45713
609-A	Caminata aleatoria con drift = 2.26467	2.38907
1638	ARIMA(2,1,1) con constante	1.21502
1313-A	ARIMA(0,1,1) con constante	1.06963
953	Caminata aleatoria con drift = 1.33733	2.06727
612-F	Tendencia lineal = -5150.18 + 2.63107 t	1.97198
752	ARIMA(0,1,2) con constante	1.6907
977-A	ARIMA (2,0,2) con constante	1.0347
982	ARIMA (0,1,1) con constante	1.9498
745	Tendencia lineal = -4430.35 + 2.27796 t	1.79227
914	Tendencia Lineal=-5259.53 + 2.68672 t	1.71584
988-A	ARIMA (0,2,2)	3.07304
653-A	Caminata aleatoria con drift = 1.08933	1.28381
628	Tendencia lineal = -5110.14 + 2.61374 t	2.76653
629	Tendencia lineal = -5144.81 + 2.63197 t	2.27148
1935	Caminata aleatoria con drift = 3.01133	3.94685
641-A	Tendencia lineal = -8065.18 + 4.08637 t	5.77344
1746-A	Tendencia lineal = -5228.5 + 2.67726 t	2.61404
1905	Tendencia lineal = -4885.24 + 2.54865 t	3.27231
999-A	ARIMA (0,1,2) con constante	1.87979

La figura 4.3 muestra uno de los análisis estadísticos (pozo ID 2427) para la obtención de los modelos de predicción de los niveles estáticos. En este análisis, se puede observar cómo es el incremento de la profundidad desde 1996 y hasta el año 2017, sin embargo si se analiza el valor del año 2010 y el 2011, se puede observar que el año 2011 tiene un valor menor, ésto se da a razón de que comenzó el funcionamiento de la obra de Acueducto II y existió una recarga y una disminución

en la extracción de agua de los pozos (CNN EXPANSIÓN, (2011). Además se pueden observar las líneas de confiabilidad de los valores en la modelación, los cuales son del 95%.

Una cualidad favorable para la realización de la presente investigación y el análisis fue el vasto historial con el que se contaba. El mejor ajuste de los distintos análisis fue el que se presentó en el pozo número 1978, el cual es un modelo ARIMA (0, 0, 2), con constante, dicho pozo es el conocido por la CEA como Loma Bonita y se encuentra ubicado en la zona residencial Real de Juriquilla. El buen ajuste se explica por su ubicación, en una zona habitacional donde la extracción no es tan excesiva como en las zonas industriales. La evolución del nivel de abatimiento en dicho pozo es de 18.45 m en un periodo de 45 años aproximadamente. Ahora, al analizar el caso más crítico, donde la correlación es menor (pozo 2041, en la comunidad del Nabo) que tiene la correlación con un modelo de caminata aleatoria con salto, con una variación de 20.35 m en el mismo periodo de 45 años.

Dar una explicación sobre las diferencias de correlación en los modelos es algo complejo, dado que pudieran existir varias consecuencias o factores, las cuales pudieran ser errores en las mediciones de los valores reportados por los organismos gubernametales o que no se tiene un adecuado suministro del agua en esta zona o por la falta de información más reciente para poder realizar una modelación más actualizada.

Cotejando los dos pozos anteriormente mencionados se puede observar que la variación entre los niveles estáticos de los pozos es de 9.83%, lo cual es muy considerable ya que la distancia entre ellos no es tan grande. Una observación muy importante a señalar es que el promedio de disminución de niveles estáticos en un periodo de 45 años es aproximadamente de 99.41 m, sin embargo existen zonas como la colonia Centro Expositor, donde se pueden encontrar extracciones de hasta

158 m en el periodo de 1970 al 2015, con condiciones críticas que producen una sobreexplotación de los mantos acuíferos.

Tabla 4.3. Extrapolaciones de niveles estáticos de los pozos de la zona conurbada de Querétaro.

No	No. C.N.A.	Nombre del pozo	X (UTM)	Y (UTM)	Extrapolación al 2015	Extrapolación al 2016	Extrapolación al 2017
1	759	Ejido el Nabo	347166	2292086	92.30	94.08	95.85
2	2041	CEA El Nabo	345371	2288268	146.75	152.10	155.92
3	1978	CEA Loma Bonita	349818	2284988	82.75	82.75	82.75
4	1434	Bachoco	351004	2283393	36.07	35.56	34.98
5	2427	Sta. Ma Magdalena III	346893	2279228	150.19	152.14	155.03
6	1010	Uniroyal No. 2	351038	2281812	130.12	131.55	132.83
7	1973	CEA San Pedro Martir IV	347432	2281192	168.10	167.19	166.03
8	609-A	Rcho. El Rincón	345265	2281054	152.00	154.26	156.53
9	1638	Vidriera Qro. Nte.	351229	2280079	137.67	139.25	141.00
10	1313-A	Rcho. El Rosario	346341	2279716	146.73	148.38	150.02
11	953	Singer Mexicana No. 2	352618	2279064	137.55	138.89	140.22
12	612-F	Rcho. La Colmena	344440	2279792	151.43	154.07	156.70
13	752	Alberca Leticia	358102	2278755	44.77	44.60	44.43
14	977-A	Tecnológico	351991	2278559	138.21	138.17	138.11
15	982	Rcho. Las Adjuntas	344744	2278574	148.38	151.28	154.18
16	745	Colegio Fray Luis	353095	2277032	159.73	162.01	164.29
17	914	CEA Capilla 1	350834	2276380	154.21	156.90	159.59
18	988-A	CEA Expositor No. 2-B	356650	2276136	179.12	179.63	180.14
19	653-A	Ejido Sta. Virginia	349900	2274577	103.36	104.45	105.54
20	628	Rcho. Venegas	350536	2274107	156.54	159.15	161.77
21	629	El Cerrito Frcc. 2	348247	2273979	158.61	161.25	163.88
22	1935	Ejido Los Angeles	345579	2273859	193.53	196.54	199.55
23	641-A	CEA Tejeda	351815	2272915	168.85	172.94	177.02
24	1746-A	CEA El Pueblito 2A	349450	2272271	166.19	168.87	171.54
25	1905	CEA Reforma Agraria	353795	2272498	250.28	252.83	255.38
26	999-A	Ejido El Romeral	343449	2271929	178.25	180.78	183.32

Es indispensable señalar que de los 22 modelos obtenidos, los que se presentaron con mayor frecuencia son los ARIMA y los de tendencia lineal, casi presentándose equitativamente la distribución, sin embargo hay que hacer hincapié en que los modelos ARIMA fueron ajustados con la raíz del cuadrado medio del

error más pequeña con respecto a los modelos de tendencia lineal, sin embargo, esto depende directamente de la varianza y la desviación estándar de los datos.

Una vez obtenidos todos los modelos de predicción de los niveles estáticos, fue necesario realizar la predicción a futuro, para efecto de la presente investigación sólo se predijeron y crearon los modelos hasta el 2017 (tabla 4.3).

4.2.3. Creación de mapas de evolución de los niveles estáticos en la zona conurbada

Una vez terminado el proceso de proyección o extrapolación de cada uno de los puntos se procedió a la construcción de mapas o isóbatas de la variabilidad de los niveles estáticos a partir de una interpolación kriging simple con la herramienta computacional ArcView, para los años de 1970 al 2011 (figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7), para los años 2015, 2016 y 2017 (figura 4.8).

Se puede observar en las isobatas cómo varían los niveles estáticos con respecto al tiempo, además que se pueden visualizar las zonas más propensas o con mayor extracción de agua, las cuales son las que se encuentran en la parte central de la ciudad de Querétaro, y paralelas a la falla de Avenida 5 de Febrero, siguiendo la traza de la México-Qurétaro (colonia la Obrera, Sierrita, Cerro de las Campanas, Centro Expositor, Lomas, etc.), sin embargo conforme pasa el tiempo, se puede visualizar cómo la tendencia cambia, y la zona que mayor extracción tendrá en los años futuros es la zona de El Pueblito, ésto a consecuencia de crecimiento y expansión de la mancha urbana y de la industria y de que varios pozos ubicados en la zona de la colonia la Obrera dejaron de ser explotados por la industria.

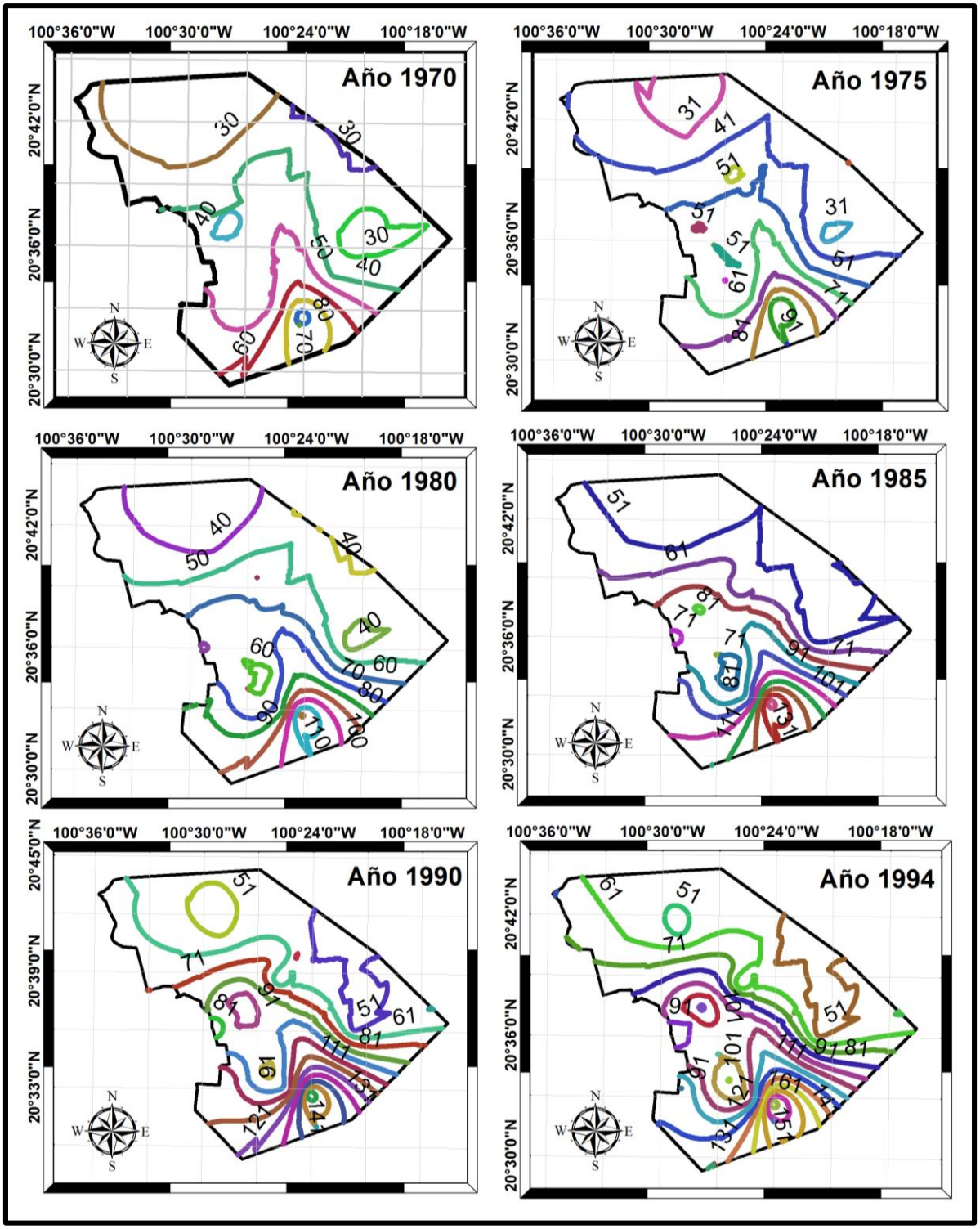

Figura 4.4. Isobatas de niveles estáticos para los años 1970, 1975, 1980, 1985, 1990 y 1994.

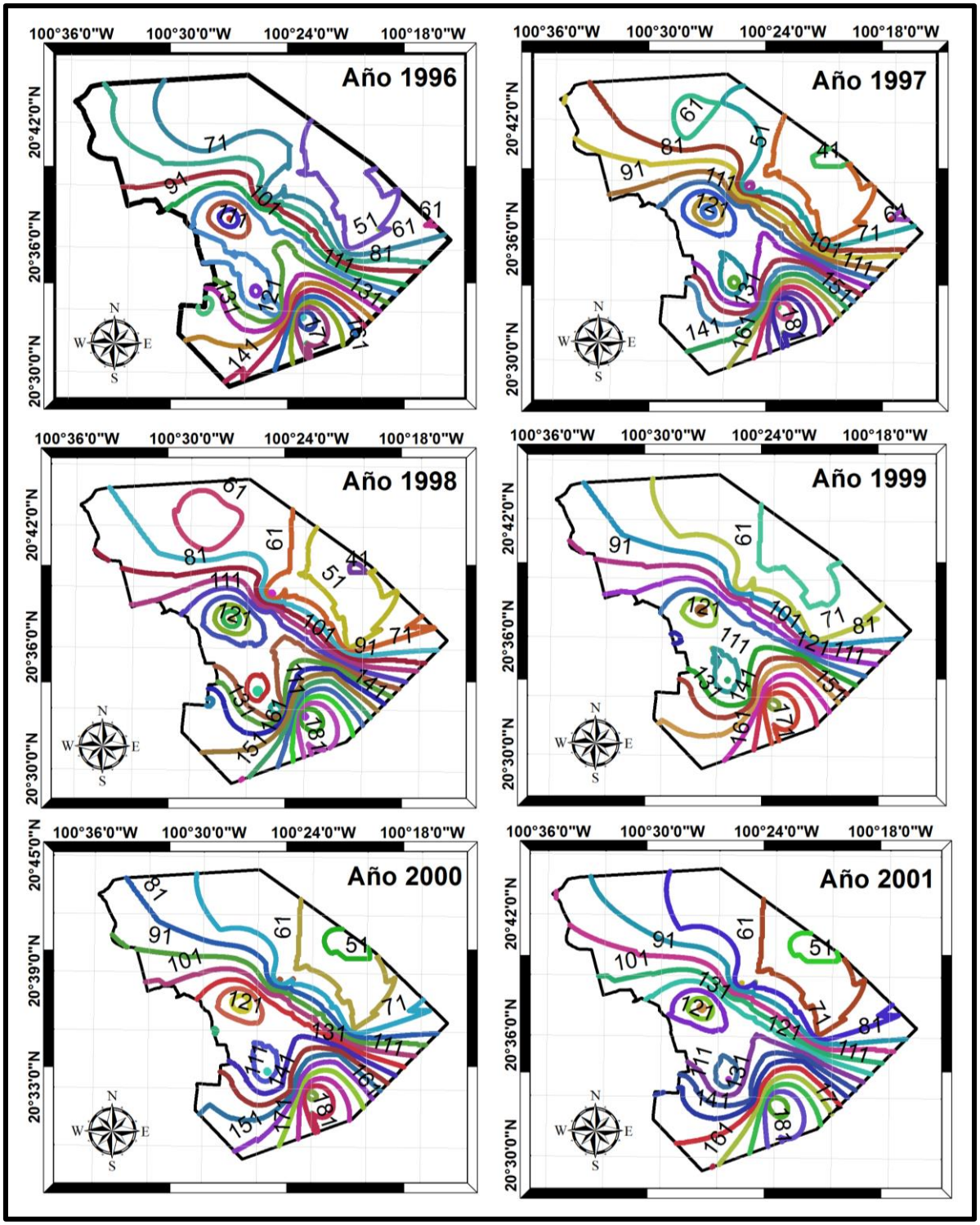

Figura 4.5. Isobatas de niveles estáticos para los años 1996, 1997, 1998, 1999, 2000 y 2001.

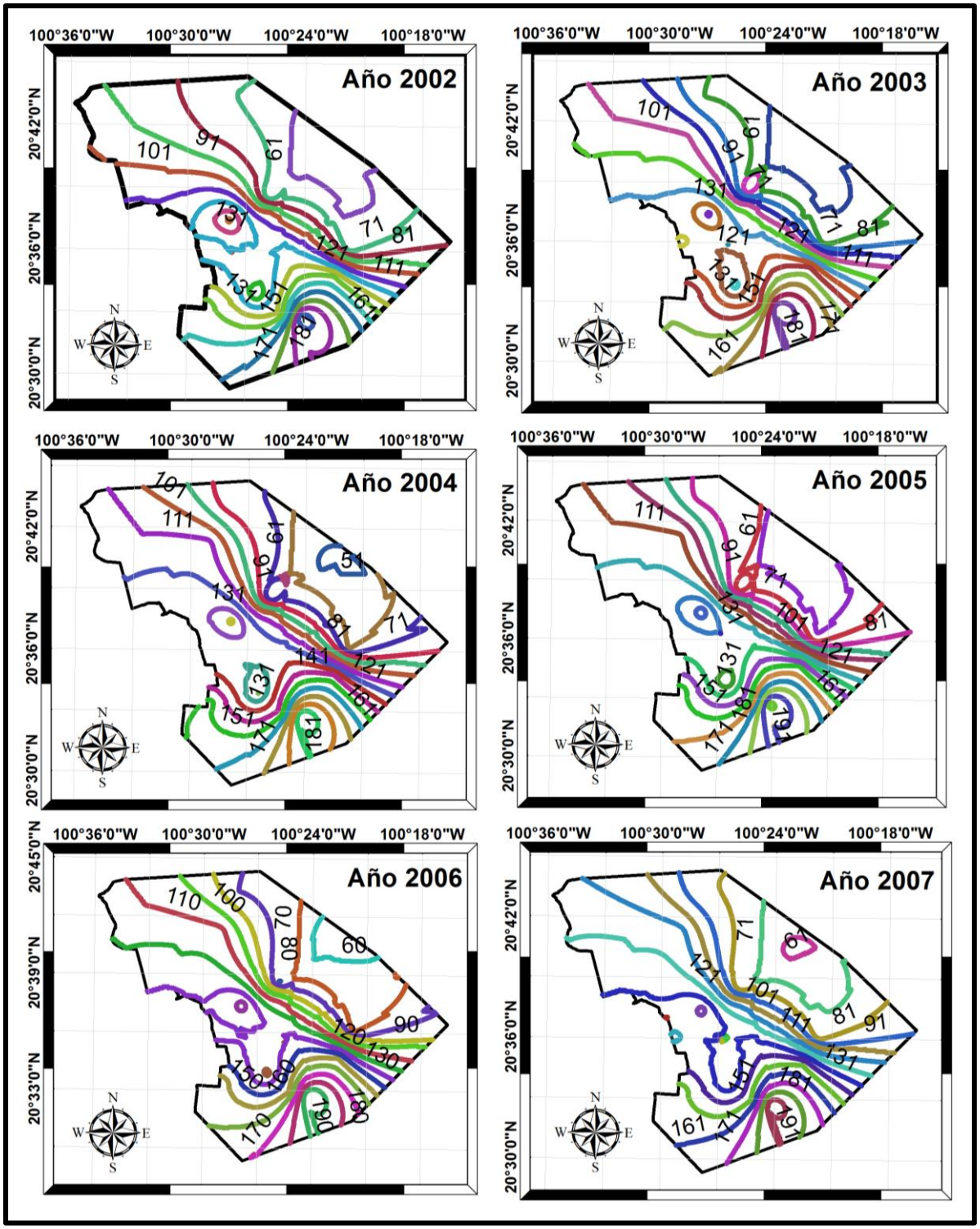

Figura 4.6. Isobatas de niveles estáticos para los años 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007.

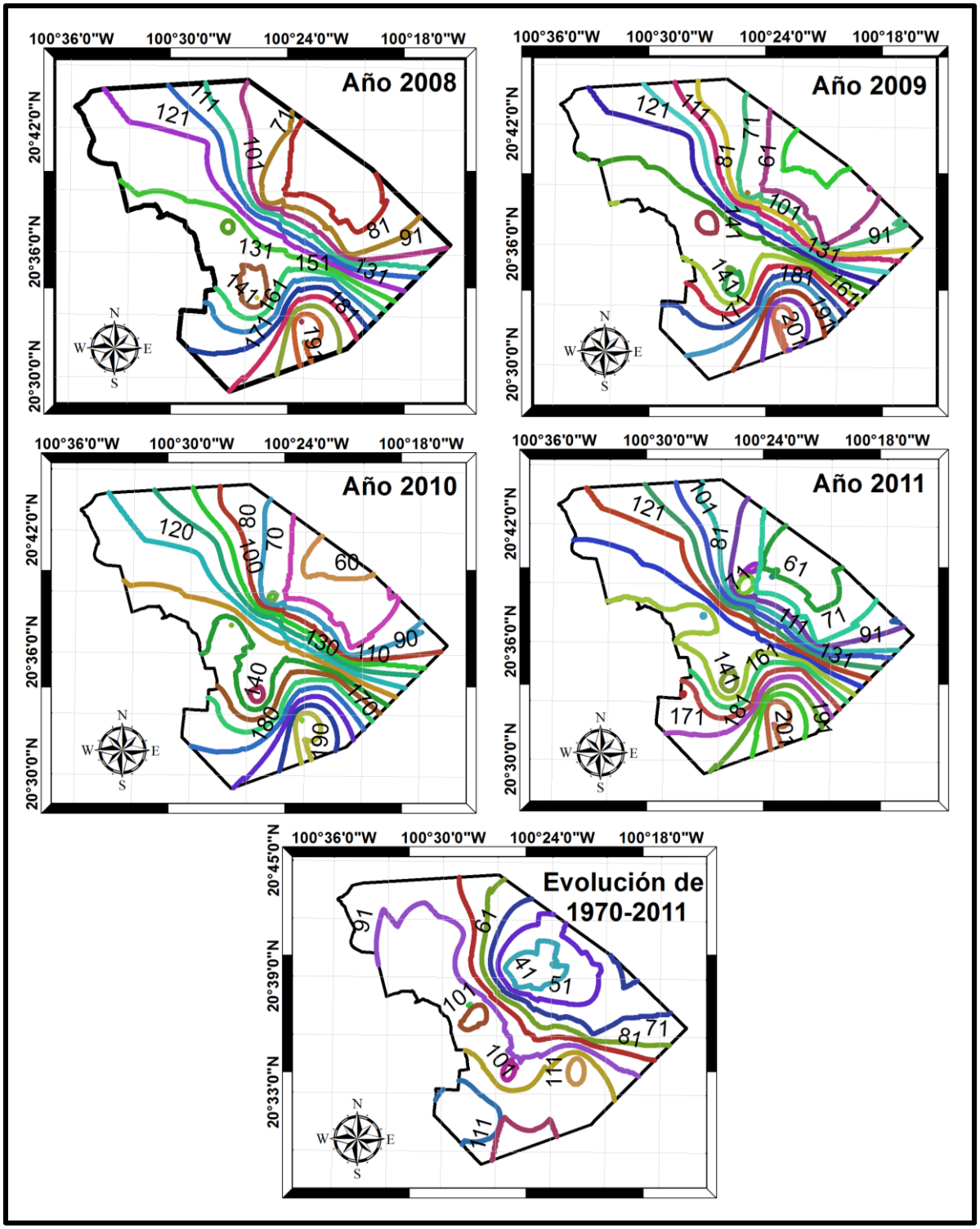

Figura 4.7. Isobatas de niveles estáticos para los años 2008, 2009, 2010, 2011 y la diferencia entre el año 2007 y 2011

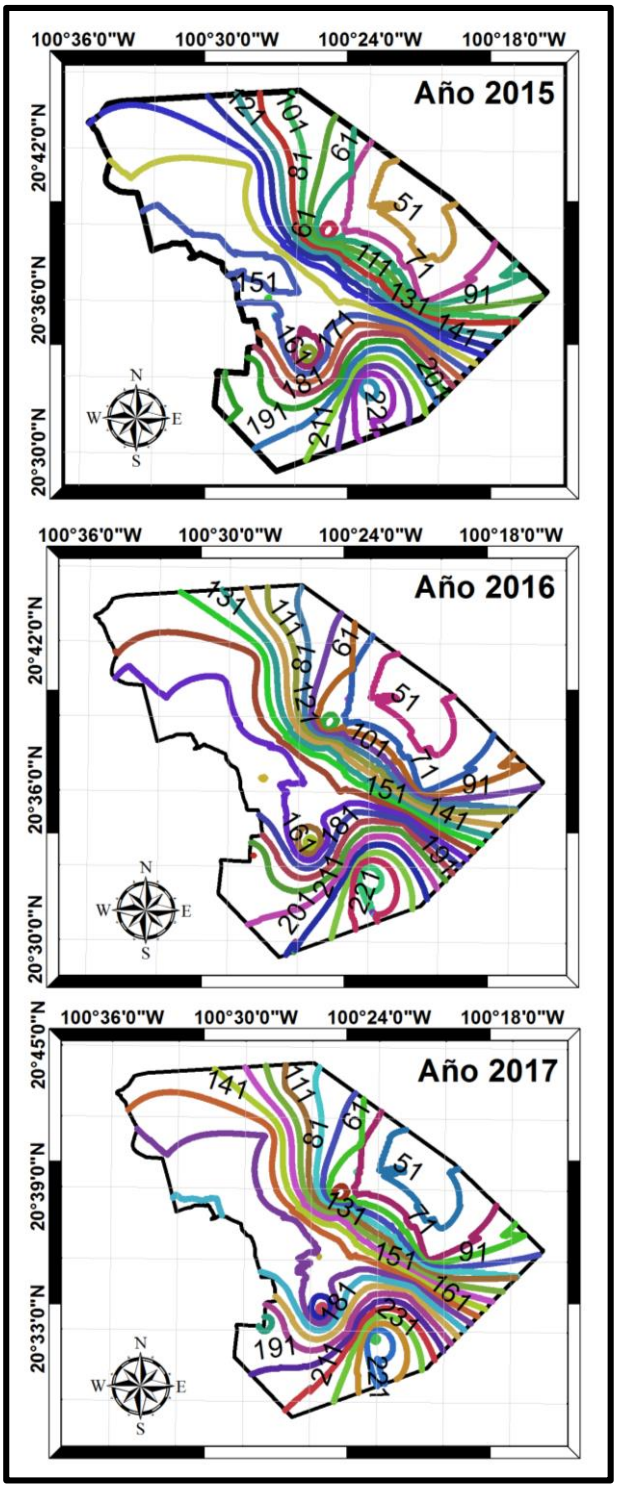

Figura 4.8. Isobatas de niveles estáticos extrapolados para los años 2015, 2016 y 2017.

4.3. Caracterización geológica y de suelo, en la zona de estudio.

4.3.1. Geología del valle de Querétaro y de la zona de estudio.

Una vez conocida la localización de la zona de estudio es indispensable realizar una caracterización geológica de los materiales que componen el valle de Querétaro, lo cual fué realizado a partir de informacion obtenida de INEGI, CONABIO y CONCYTEQ, la información fue procesada en ArcView y se obtiene la carta mostrada en la figura 4.9, se puede observar que la geología en esta zona de estudio está compuesta principalmente por rocas ígneas extrusivas y sedimentarias, y los suelos son aluviones, de la era cenozoica y de los sistemas neógeno, terciario y cuaternario (CONABIO, (2015) y Alvarez-Manilla *et al.,* (2002)).La aportación de las caracteristicas geológicas yace en conocer de que tipo de roca o de como son los estratos rigidos de la zona de estudio, dado que esta caraceristica puede considerarse como parámetro fundamental con respecto a las deformaciones diferenciales, partiendo del conocimiento de los estratos superficiales deforables y las profundidades del lecho rocoso.

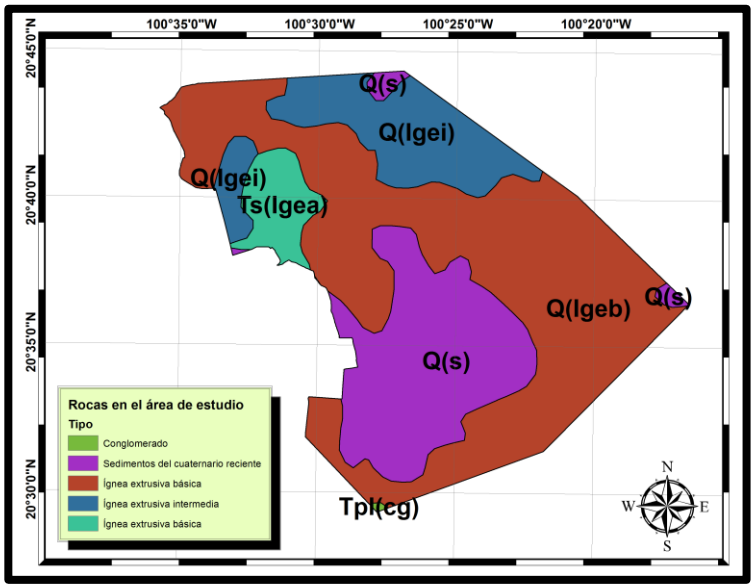

Figura 4.9. Geología presente en la zona de estudio.

4.3.2. Caracterización de las propiedades geológicas, geomecánicas y velocidades de propagación de onda en los puntos de control.

Para conocer la geología del valle y de la zona de estudio de una manera más detallada es indispensable realizar una caracterización y determinación de los espesores de sedimentos deformables (tabla 4.4) de cada uno de los puntos de monitoreo, ya que estos espesores teóricamente contribuyen a la generación de asentamientos diferenciales, por lo que es necesario realizar una georreferenciación de los puntos de control y ubicarlos dentro de las cartas de geología simplificada y espesores de sedimentos realizada por Pacheco (2007), dado que es la información mas actualizada y confiable que se tiene en el valle de Querétaro.

Tabla 4.4. Características geológicas y espesores de sedimentos en el valle de Querétaro.

Punto	X (UTM)	Y (UTM)	Carta geológica simplificada (Pacheco, 2007).	Carta geológica (Alvarez-Manilla, 2002).	Carta de espesores de sedimentos (Pacheco, 2007).
U3	352778.7846	2277466.1888	Tmt AB	Irl / Ira	0
U25	345024.4978	2278053.7105	Q Al	Ir Co	70
U6	352056.8754	2279951.1905	Q Al	III ary	20
U7	352005.2297	2279936.2460	Q Al	III ary	20
U19	352262.5388	2275960.7694	Q Al	III lad	120
U18	349254.4602	2271095.4003	Q Al	III lad	40
U16	352550.3175	2274407.0154	Q Al	Ira	40
U17	350,942.0200	2272318.0090	QAl	Ira	-

Donde:

Q Al: Rellenos aluviales del cuaternario: Arcillas, limos y arenas finas.

Tp Py lac: Sedimentos y rocas volcánicas del Plioceno.

Tmt AB: Derrames de lava de composición basáltica y andesita del Mioceno Tardío.

To-Tm Py lac: Rocas piroclásticas y sedimentos lacustre del Oligoceno-Mioceno.

To-Tm AB: Rocas volcánicas del Oligoceno al Mioceno, principalmente basalto y andesita.

Ira: Suelos residuales en partes altas

Irl: Suelos residuales en laderas

III ary: Suelos del tipo fluvial en arroyos

III lad: Suelo del tipo fluvial en laderas

Ir Co: Suelo del tipo Coluvión

Estas cartas fueron realizadas mediante la aplicación de gravimetría (determinación de densidades y espesores de materiales apartir del principio de velocidad y aceleración de la gravedad), debido a que la obtención de propiedades mecánicas de los suelos mediante exploración directa es muy costosa y dificil de realizar por las profundidades de los espesores, se opta por implementar la exploración indirecta mediante la aplicación de técnicas de geofísica, así como también es indispensable conocer las propiedades geomecánicas de los valores de onda sísmica para terminar propiedades mecanicas del valle mediante correlacion indirecta (tabla 4.5).

La tabla 4.5 muestra las distintas entidades geológicas constituyentes del valle de Querétaro, así como de los valores de onda de cortante (Vs, *"son pequeñas perturbaciones mecánicas en un medio constituido por partículas, como son los depósitos de suelos, y cuyo paso no altera prácticamente las condiciones del medio",* forman parte de la clasificación de ondas elásticas de cuerpo, LAZCANO, (2012)) de los puntos de control.

Una vez conocidas las propiedades geomecánicas y velocidades de propagación de onda se realizan a continuación perfiles estratigráficos adecuados a los puntos de control de asentamientos, en dos estapas, una para las Vs menores

(figura 4.10) y otros perfiles para las Vs mayores (figura 4.11), de acuerdo a los valores de la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Propiedades geomecánicas y velocidades de propagación de onda sísmica, adaptado de Pacheco (2007).

Entidad geológica	Velocidad de ondas compresionales (Vp), (m/s)		Velocidad de onda de cortante supuesta (VS), (m/s).		Densidad (gr/cm3)	Ed (kg/cm2)		G (kg/cm2)	
Q Al	256	363	156	221	1.564	833	6700	309	2776
Tp Py lac	436	1590	265	967	1.537	2470	22063	1024	18655
Tmt AB	1184	1316	720	800	2.065	-	-	-	-
To-Tm Py lac	592	822	360	500	1.769	-	-	-	-
To-Tm AB	3947		2400		2.61	-	-	-	-

Por lo tanto una vez realizados los perfiles apartir de los valores de velocidades de onda cortante se puede visualizar el rango o intervalo en el cual oscilan los espesor de los estratos, siendo la condición mas critica la condición de las velocidades menores.

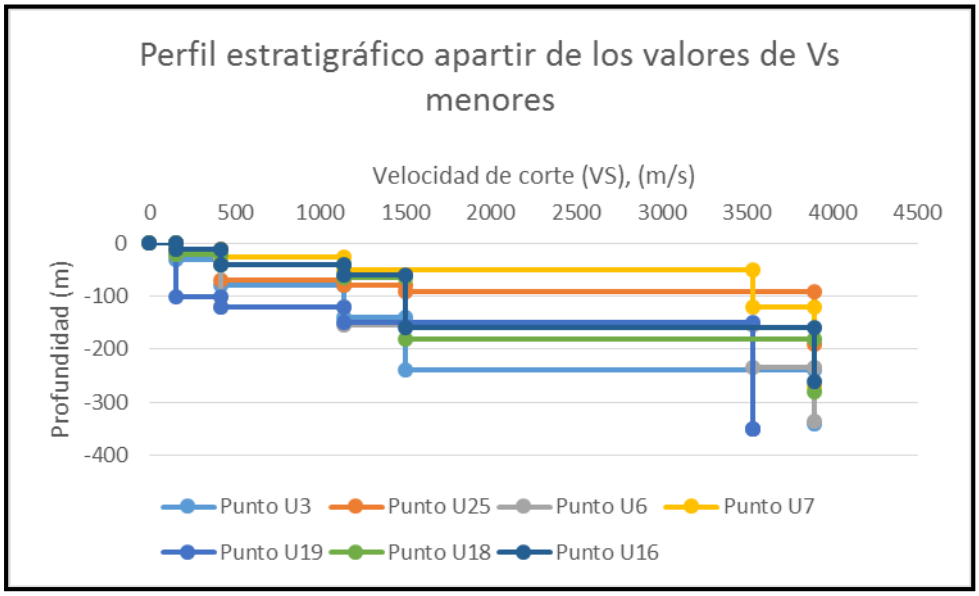

Figura 4.10. Perfil estratigráfico con los valores de Vs menores.

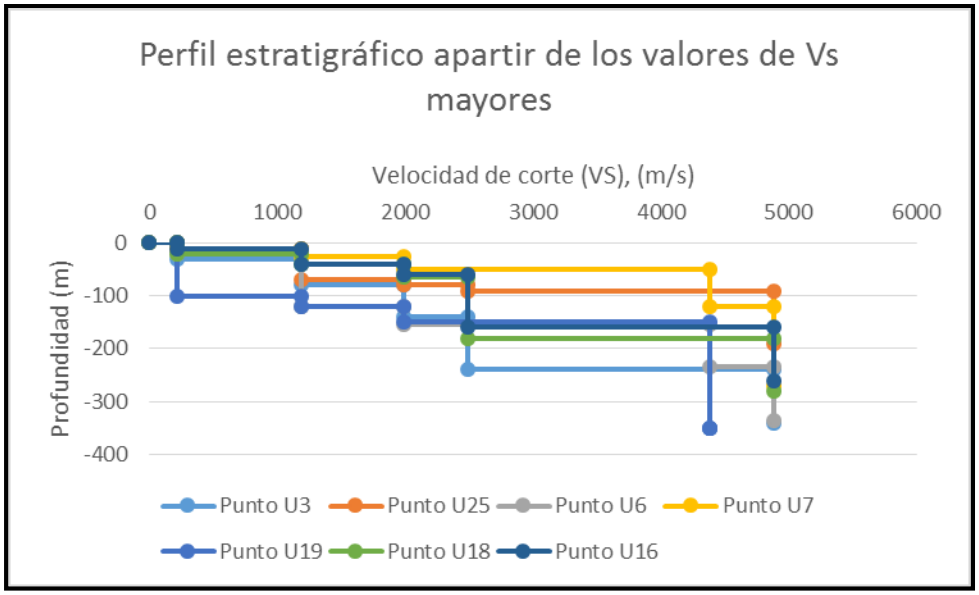

Figura 4.11. Perfil estratigráfico con los valores de Vs mayores.

4.3.3. Cambio de la presión de poro en los puntos de control

Para realizar una correcta modelación y medición de los asentamientos en la zona de estudio es indispensable contar con información de los cambios de las propiedades mecánicas de los suelos, en función del cambio del gradiente de presión de poro. La figura 4.12 muestra dicha variación en los puntos donde se realizó la interpretación geofísica mediante velocidades de onda cortante y las mediciones de asentamiento (puntos de control), obtenidos con respecto a los valores interpolados en la parte de modelación hidrológica.

Este apartado es uno de los mas importantes, dado que el cambio de gradiente de presión de poro es la variable que mas impacta en el fenómeno de subsidencia, porque los huecos que antes eran ocupados por agua, al ser extraidos se convierten en oquedades de aire, y por ende con el tiempo y reacomodo de las partículas de suelo cambia la masa del estado inicial y ocurren los asentaientos diferenciales.

Cabe meniconar que los valores obtenidos del gradiente de presión de poro dan un panorama de dónde son las partes de las ciudad con mayor extracción de agua, además se pueden observar valores de hasta 130 ton/m^2, lo cual representa una gran presión que se le quita a la masa de suelo y origina el fenómeno de subsidencia, además si cotejamos estos valores con respectoa a la estratigrafía de los espesores deformables se puede observar que corresponden las mayores presiones a las zonas donde se tienen los espesores mayores de sedimentos deformables, lo que hace que el fnomeno se petencialice y exista una mayor aparición de agrietamientos.

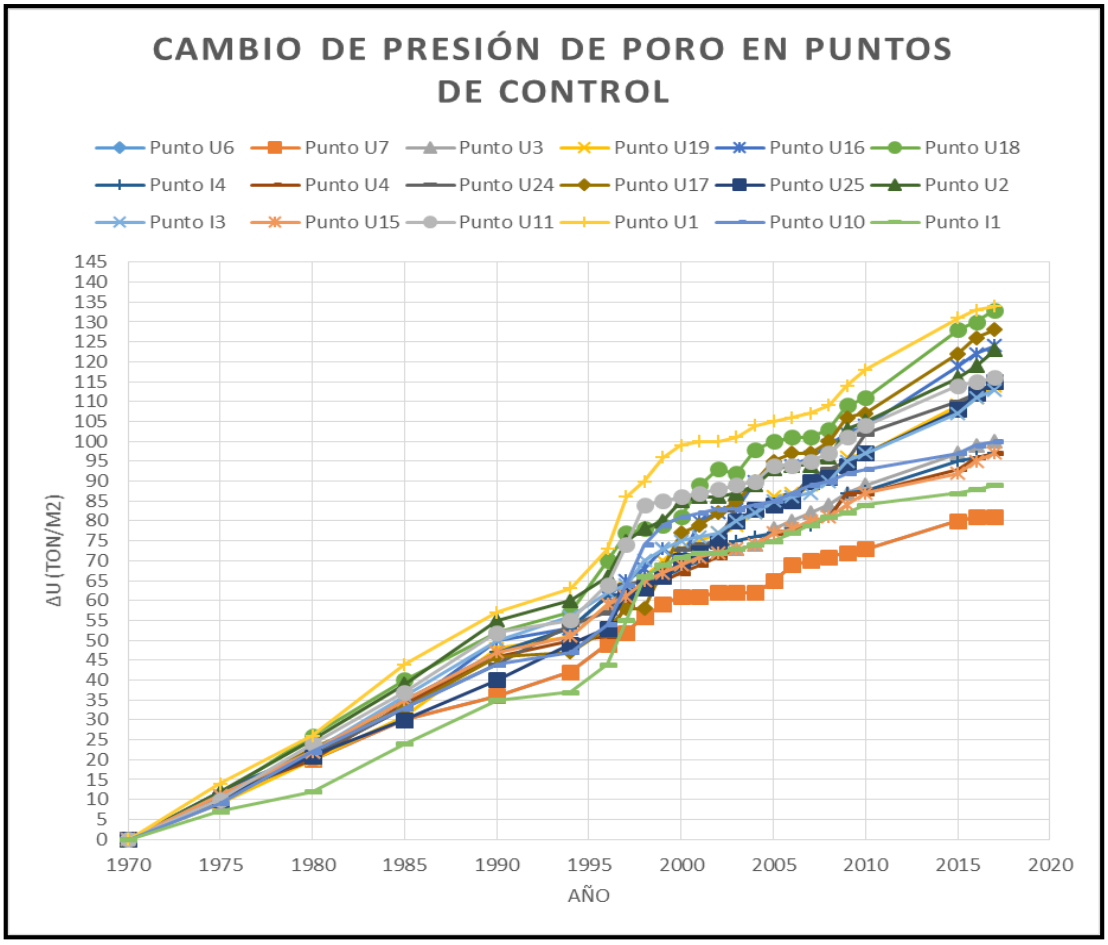

Figura 4.12. Variación de la presion de poro en puntos de control de la zona de estudio.

4.3.4. Carta de fallas geológicas y por subsidencia del valle de Querétaro.

La geología del valle de Querétaro es importante para estudiar el comportamiento del fenómeno en estudio, por lo tanto es necesario realizar una caracterización de las fallas geológicas inactivas. La zona en estudio se encuentra localizada dentro del graben de Querétaro, el cual está formado por las fallas San Bartolomé, Querétaro Norte, Querétaro Sur y Huimilpan Norte. Sin embargo, es vital recalcar que gran parte de la zona conurbada de la ciudad se encuentra dentro de una depresion o subgraben, comprendido por las fallas de Tlacote, 5 de Febrero, Jurica y Lourdes.

En este apartado se realizó la carta de fallas geológicas de acuerdo a la recopilacion de las investigaciones realizadas con anterioridad por investigadores de la ciudad de Querétaro (figura 4.13), y se añadieron las fallas por subsidencia o grietas de tensión, las cuales han ido apareciendo con el tiempo a consecuencia de la excesiva extracción de agua de la ciudad.

Si nos enfocamos directamente al comportamiento de la traza de las fallas que han ido apareciendo por el fenómeno de subsidencia (fallas de color rojo), se puede visualizar cómo es la tendencia de aparición de las fallas, dado que estas grietas se van uniendo de una manera lineal y van formando una cuadricula dentro del sub graben de Querétaro, lo que pudiera dar una visión de cómo o dónde pudieran estar las zonas más propensas a afectaciones por hundimientos regionales y agrietamientos de las estructuras.

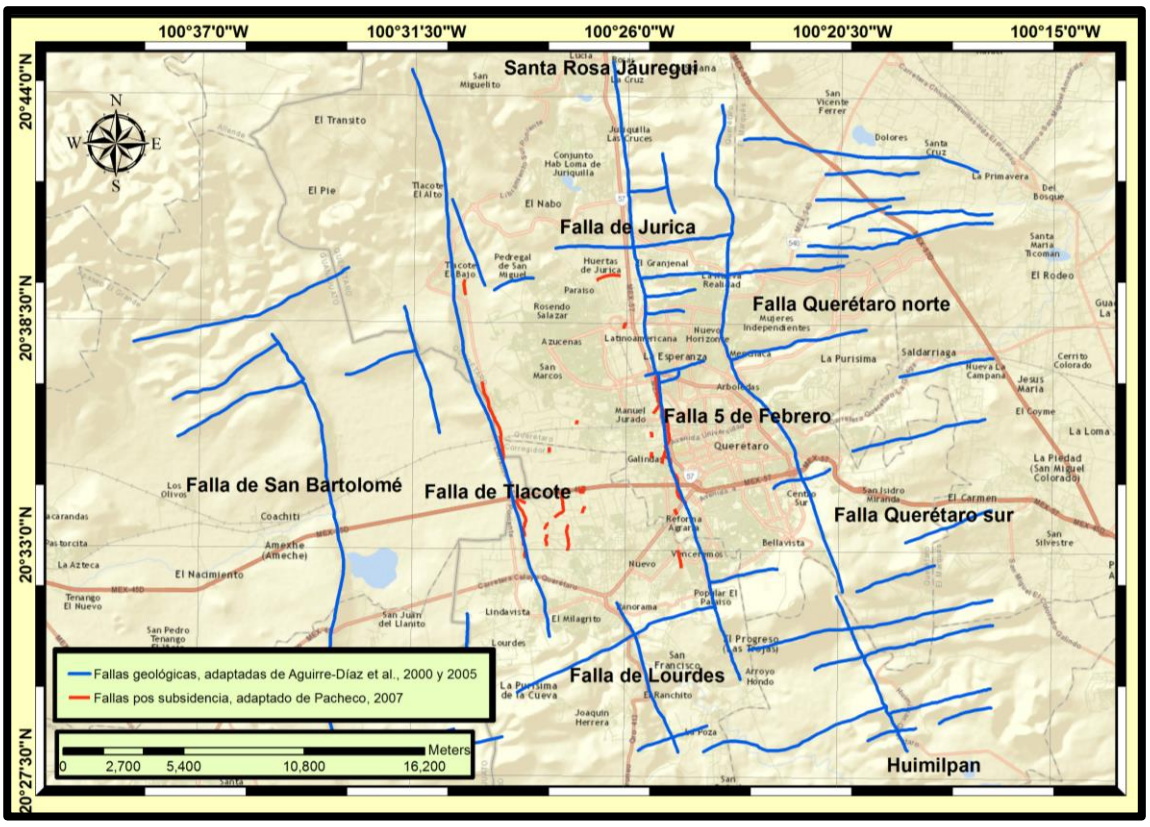

Figura 4.13. Carta de fallas geológicas y de subsidencia, en valle de Querétaro. Adaptado y editado de Aguirre-Díaz *et al.,* (2005) y Pacheco-Martínez (2007).

4.4. Medición del fenómeno de subsidencia en el valle de Querétaro

En este apartado se dan a conocer los asentamientos del valle de Queretaro, medidos en campo mediante la utilización de un GPS de alta precisión, tal y como se representan en la tablas 4.6 a la 4.9, los monitoreos de asentamientos se realizaron a distintos tiempos (4, 16, y 19 meses con respecto al punto de referencia colocados en septiembre del 2013); la figura 4.14 muestra la visualización en una sola imagen de los puntos de control y los cuales están divididos mediante cuatro cortes o secciones (sección A-A', B-B', C-C' y D-D'), para asi tener trazas longitudinales y poder facilitar la lectura de los valores por cuestiones de escala (tablas 4.6 a la 4.9 y figuras 4.15 a la 4.18).

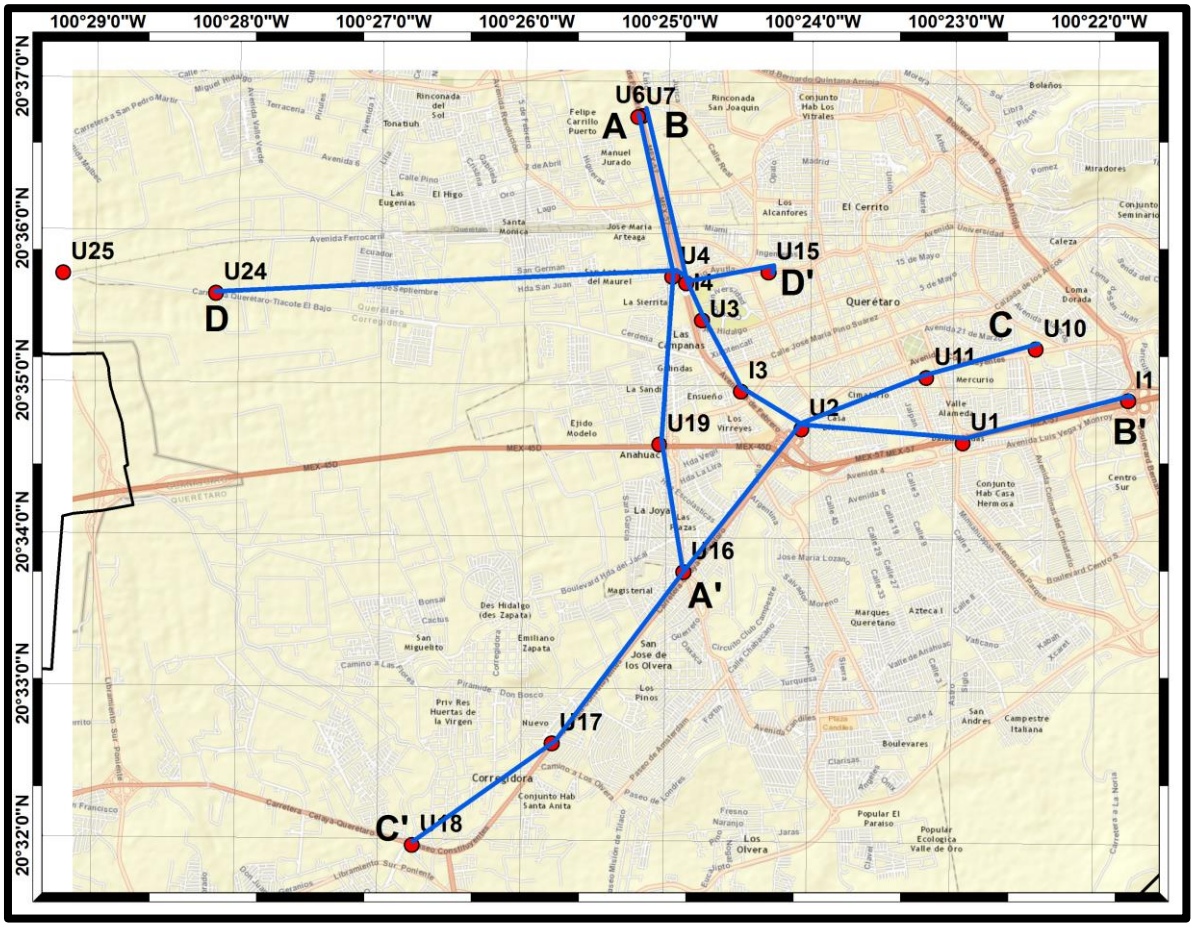

Figura 4.14. Localización de cortes de asentamientos

Tabla 4.6. Asentamientos en el valle de Querétaro, corte A-A'.

Tiempo (meses)	Asentamiento acumulados (m)			
	U7	U4	U19	U16
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-0.032	-0.028	-0.034	-0.016
Mes 16	-0.099	-0.028	-0.186	-0.166
Mes 19	-0.123	-0.092	-0.289	-0.241

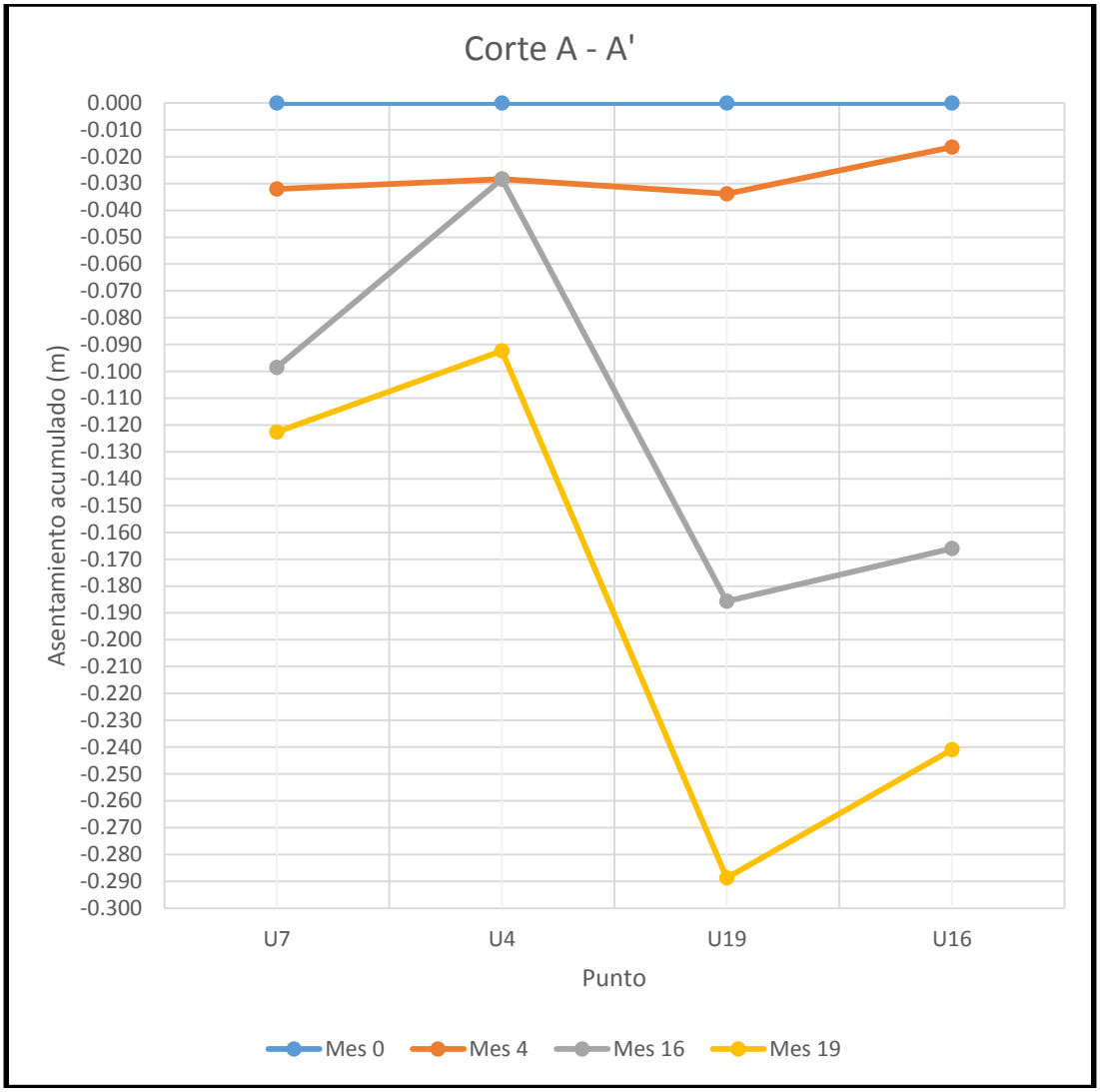

Figura 4.15. Asentamientos del corte A-A'

Tabla 4.7. Asentamientos en el valle de Querétaro, corte B-B'.

Tiempo (meses)	Asentamiento acumulados (m)						
	U6	I4	U3	I3	U2	U1	I1
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-0.027	-0.028	-0.010	-0.002	-0.004	-0.013	-0.002
Mes 16	-0.062	-0.028	-0.065	-0.002	-0.004	-0.013	-0.036
Mes 19	-0.092	-0.067		-0.069	-0.037	-0.013	-0.070

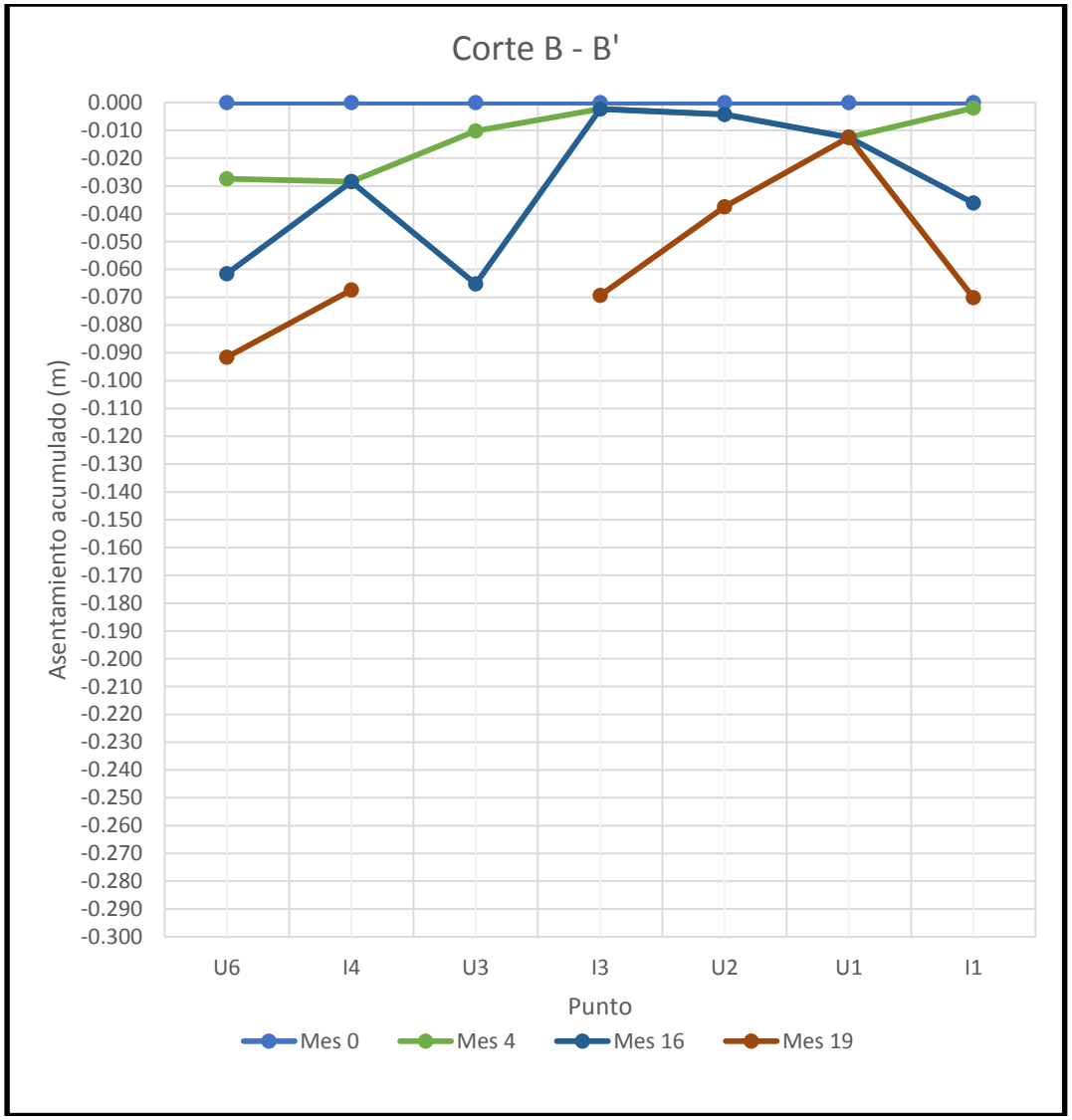

Figura 4.16. Asentamientos del corte B-B'

Tabla 4.8. Asentamientos en el valle de Querétaro, corte C-C'.

Tiempo (meses)	Asentamiento acumulados (m)					
	U10	U11	U2	U16	U17	U18
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-0.009	-0.002	-0.004	-0.016	-0.021	-0.026
Mes 16	-0.011	-0.026	-0.004	-0.166	-0.165	-0.059
Mes 19	-0.012	-0.050	-0.037	-0.241	-0.209	-0.085

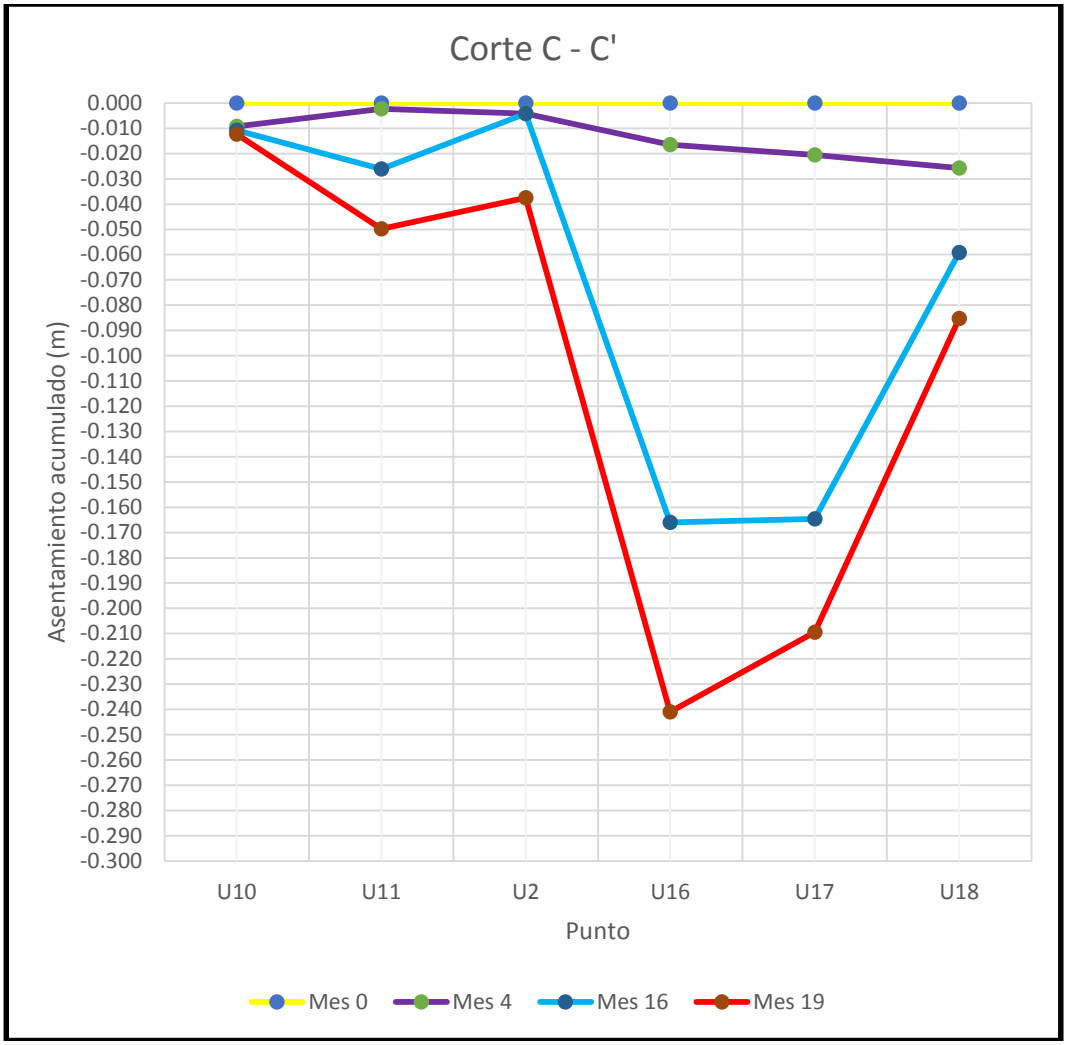

Figura 4.17. Asentamientos del corte C-C'

Tabla 4.9. Asentamientos en el valle de Querétaro, corte D-D'.

Tiempo (meses)	Asentamiento acumulados (m)			
	U24	U4	I4	U15
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-0.029	-0.028	-0.028	-0.010
Mes 16		-0.028	-0.028	-0.021
Mes 19		-0.092	-0.067	-0.031

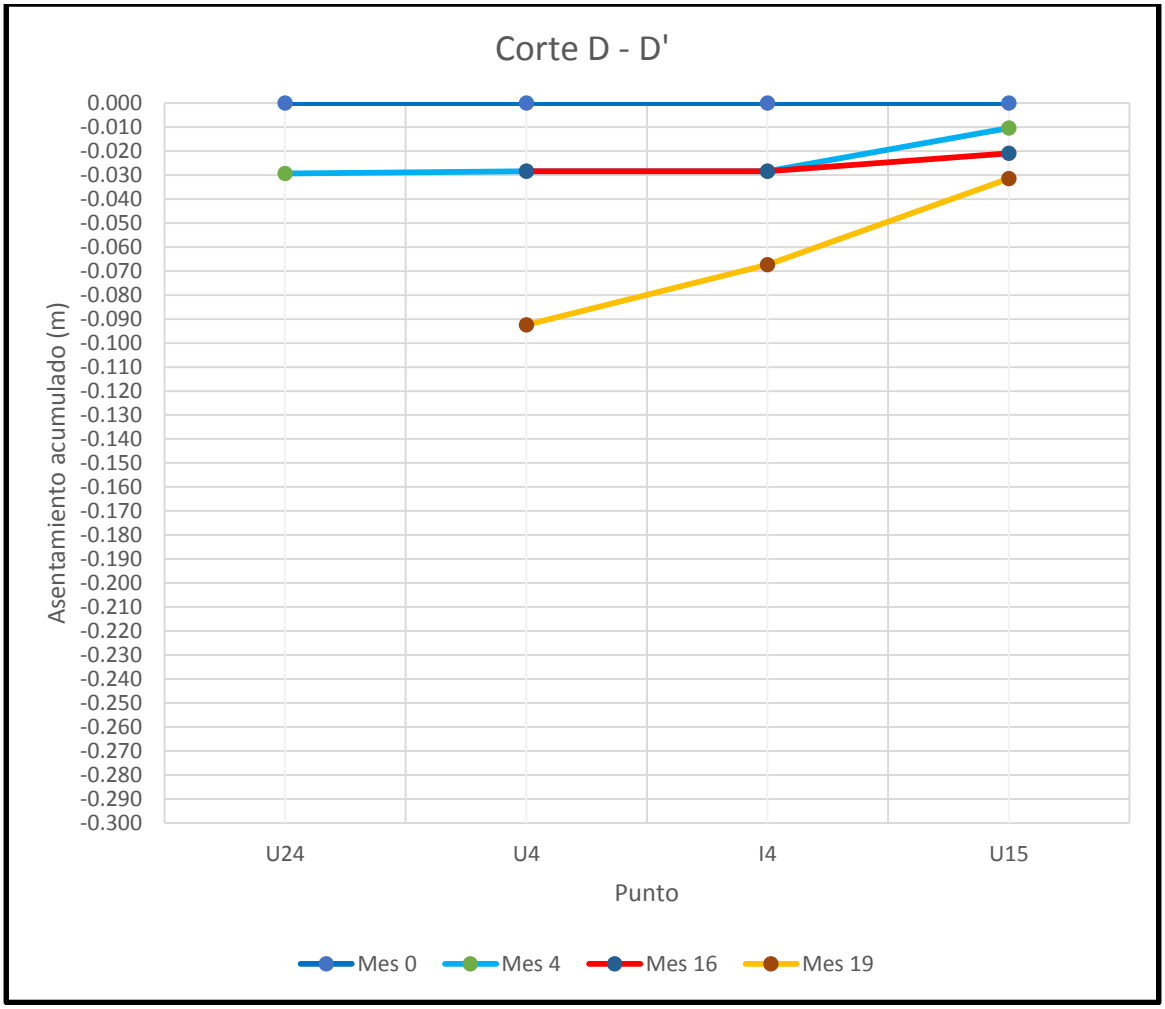

Figura 4.18. Asentamientos del corte D-D’

Una vez conocidos los valores de asentamientos del valle es indispensable la realización u obtención de los valores de velocidades de asentamiento, los cuales equivalen con respecto a los mismos tiempos de medición (tabla 4.7 y figura 4.15).

Tabla 4.10. Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte A-A’.

Tiempo (meses)	Velocidad de asentamiento (cm/año)			
	U7	U4	U19	U16
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-9.630	-8.340	-10.140	-4.950
Mes 16	-4.987		-11.392	-11.208
Mes 19	-1.516	-4.040	-6.505	-4.737

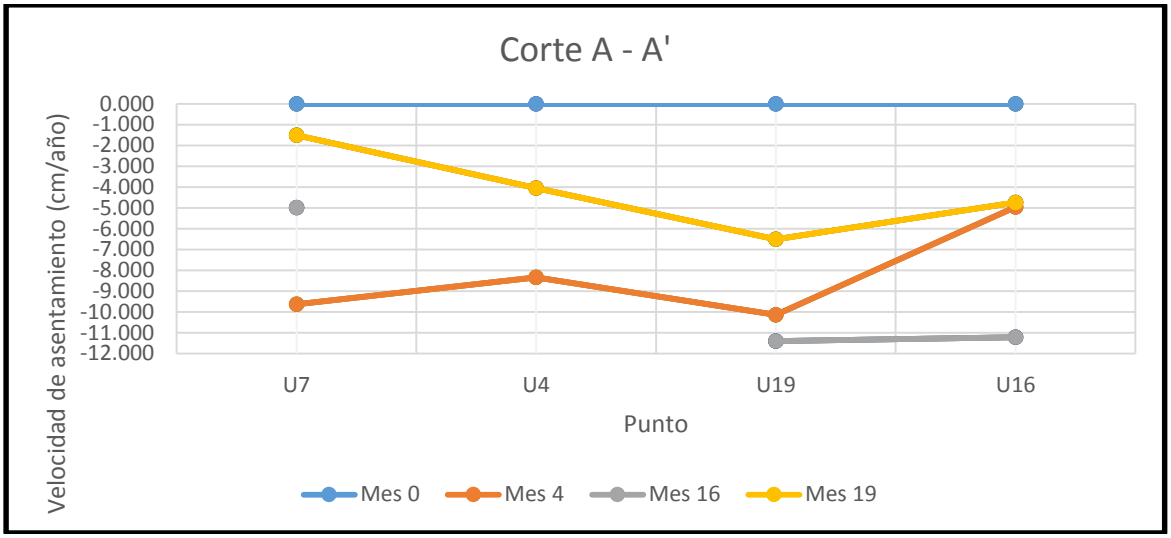

Figura 4.19. Velocidades de asentamientos del corte A-A’

Tabla 4.11. Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte B-B’.

Tiempo (meses)	Velocidad de asentamiento (cm/año)						
	U6	I4	U3	I3	U2	U1	I1
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-8.220	-8.520	-3.060	-0.690	-1.260	-0.013	-0.002
Mes 16	-2.564		-4.124				
Mes 19	-1.895	-2.463		-4.230	-2.100	-0.013	-0.070

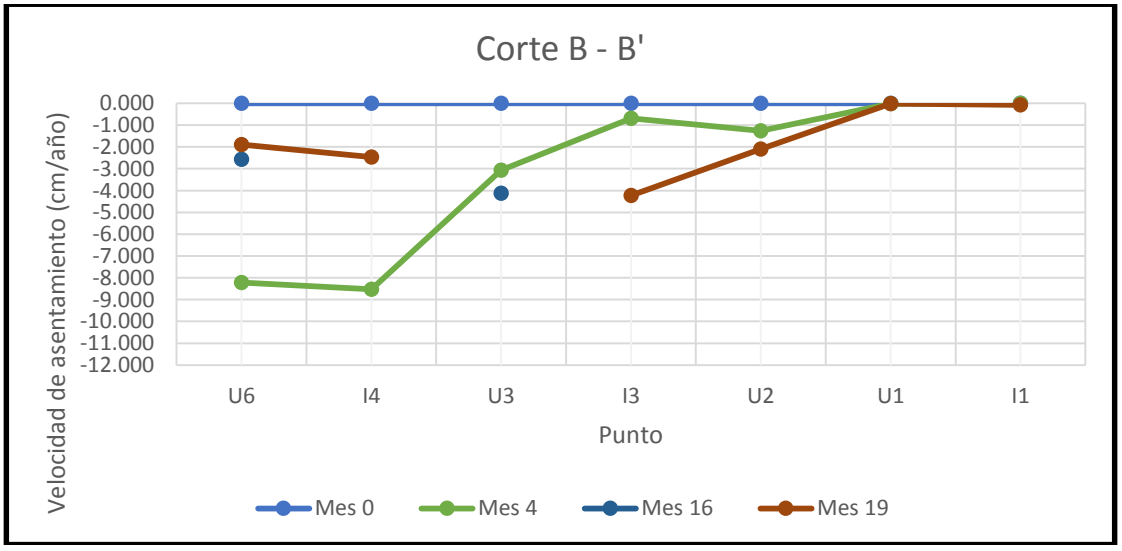

Figura 4.20. Velocidades de asentamientos del corte B-B’

Tabla 4.12. Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte C-C'.

Tiempo (meses)	Velocidad de asentamiento (cm/año)					
	U10	U11	U2	U16	U17	U18
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-0.009	-0.002	-1.260	-4.950	-6.150	-7.710
Mes 16				-11.208	-10.800	-2.515
Mes 19	-0.012	-0.050	-2.100	-4.737	-2.830	-1.641

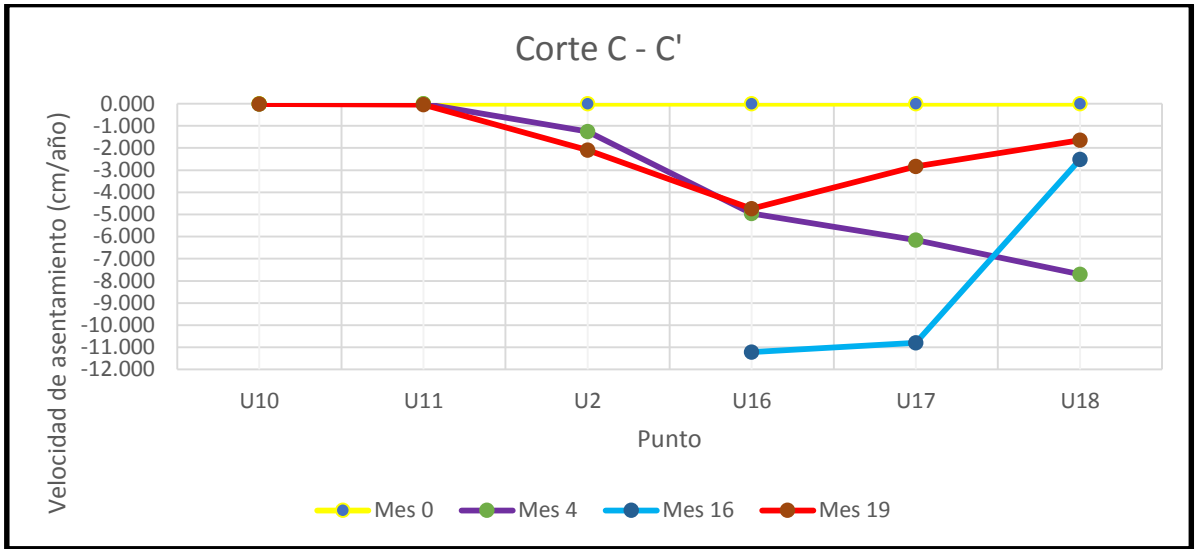

Figura 4.21. Velocidades de asentamientos del corte C-C'

Tabla 4.13. Velocidad de asentamientos en el valle de Querétaro, corte D-D'.

Tiempo (meses)	Velocidad de asentamiento (cm/año)			
	U24	U4	I4	U15
Mes 0	0.000	0.000	0.000	0.000
Mes 4	-8.820	-8.340	-8.520	-0.010
Mes 16				
Mes 19		-4.040	-2.463	-0.031

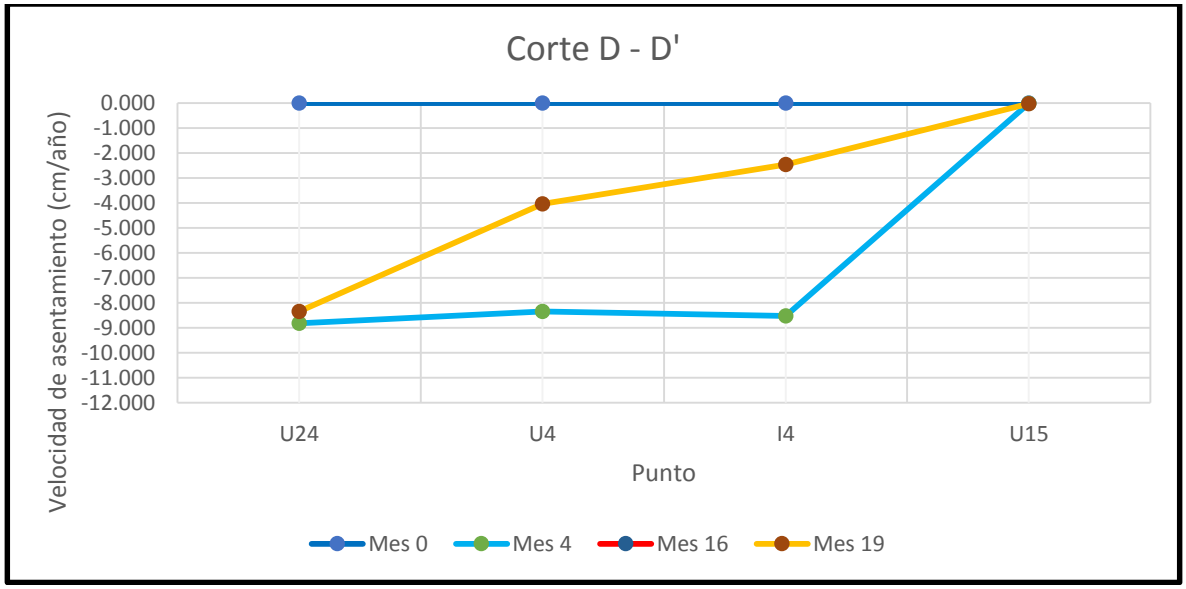

Figura 4.22. Velocidades de asentamientos del corte D-D’

4.5. Propuesta de solución

Una vez analizada toda la información del valle de Querétaro, se pude ver cual es la principal afectación a las vías terrestres e infraestructura de la ciudad, siendo estos los asentamientos diferenciales, ocasionados por el fenómeno de subsidencia, el cual es irreversible e imposible de solucionar, sin embargo es posible plantear una solución encaminada a la mitigación de las inundaciones en las zonas con mayores asentamientos; lo que da pauta a crear una red de conección de 24.78 kilómetros de drenes ubicados estratégicamente en la zona conurbada para desaguar los escurrimientos del agua que se pudiera estancar en épocas de lluvia.

Tambien se plantea la colocación de un bordo para almacenaje de agua en zonas agrícolas ubicado en la confluencia de los drenes, para asi tratar de evitar el colapso de las vialidades, la figura 4.23 muestra la red propuesta (red color morada), la cual ha sido planteada apartir de la red de drenes existentes (red color rosa) y de la topografía existente, asi como también de las mayores valores de velocidades de asentamiento encontrados dentro de la zona de estudio.

Sin embargo es indispensable mencionar que se requiere realizar una inspección de la red existente para conocer cual es su estado de funcionamiento y para realizar una red mas adecuada para las condiciones actuales, dado que se tienen indicios de que en esta red existen drenes fallados, colapsados o azolvados que no cumplen con su funcionamiento y que en vez de ayudar a solucionar el problema lo incrementan, por lo tanto es altamente recomendado realizar una rehabilitación de los drenes existentes para asi mitigar un poco los altos costos que se requiere para solucionar la problemetica de los estancamientos de agua y para reducir la infraestructura requerida.

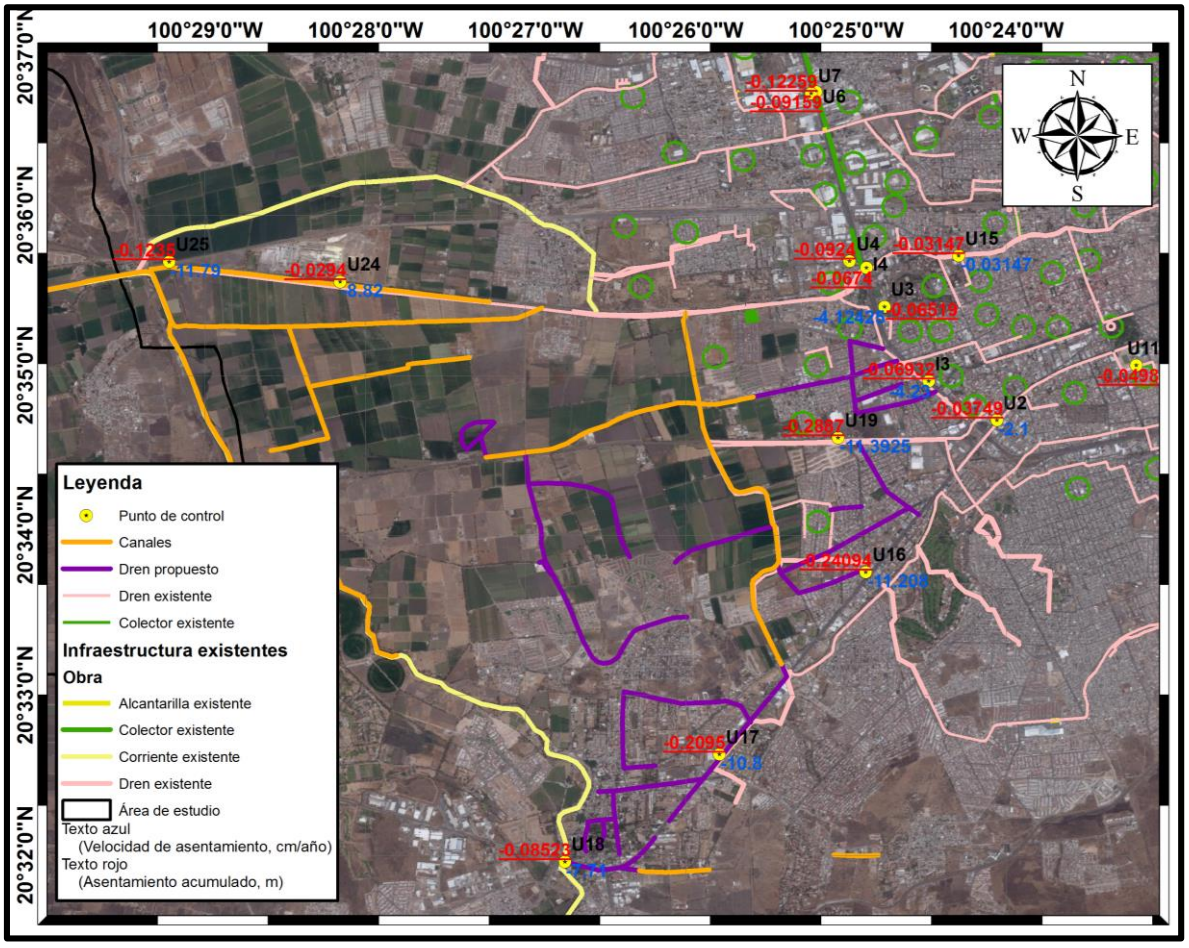

Figura 4.23. Propuesta de solución (red de drenes propuesta)

CAPITULO V.

CONCLUSIONES.

Realizando un análisis completo de la dinámica de la mancha urbana, se puede ver claramente su crecimiento exponencial desde el año 2003 y hasta la fecha, lo cual coincide directamente con la localización de las zonas con mayor suministro y extracción de agua para el consumo de la población y de la industria, esto trae consigo que exista una sobre explotación de los mantos acuíferos y por ende de la aparición del fenómeno de subsidencia.

Es importante señalar que los aspectos anteriormente mencionados coinciden con la parte plana del valle de Querétaro, donde se tienen suelos sedimentarios del cuaternario reciente de origen aluvial y coluvial con un lecho rocoso de roca ígnea extrusiva.

De los datos observados con la construcción de las isobatas, se puede observar directamente la evolución que existe de ellas con respecto al tiempo, y se puede considerar que para el 2017 el abatimiento del nivel decrementará drásticamente; en gran medida se puede observar una tendencia lineal, además las zonas de mayor extracción de agua o las más críticas, son las que pertenecen a la zona Centro (Colonias Obrera, Sierrita, Cero de las Campanas, Jardines de la Hacienda, El Ensueño, Fray Juan, Las Lomas, y Centro Expositor) y la zona Sur-Este de la zona de estudio, que forman parte de Avenida Constituyentes, El Pueblito, Hacienda Real Tejeda, entre otros.

En la isobata del año 1996, se puede observar una de las variaciones más críticas del nivel: 141 m con respecto al nivel del brocal del pozo (esta distancia es

la que determina los niveles estáticos del agua). Dicha variación se observa en la zona donde está ubicado El Pueblito, sin embargo conforme se analizan las distintas curvas, se puede determinar la más crítica, que es la ubicada en la zona de la colonia Centro Expositor (151 m, con respecto al brocal), el recorrido que realiza esta curva es por las colonia de Jardines de la Hacienda, El Ensueño, entre otras.

Otra observación importante es que existe otra zona crítica independiente a la curva anteriormente mencionada, con un nivel estático de 111 m aproximadamente y recorre las zonas aledañas a la carretera de avenida 5 de Febrero. En su recorrido se encuentran colonias con severo daños: Obreros y la Sierrita, dichas colonias corresponden a la zona de estudio.

Por otro lado, analizando la isobata perteneciente a 2011, y realizando una comparativa con la de 1996, se visualiza cómo ha sido el cambio entre las interpolaciones de los niveles estáticos, teniendo una variación de 30 m en un periodo de 15 años en la zona del Pueblito, mientras que para la zona de Avenida de 5 de Febrero los datos arrojan una variación de 20 m.

Del análisis de la curva de isobatas para 2015 se observa en el Pueblito un nivel estático de 191 m y, comparándolo con el año 2011, se puede observar una variación del nivel de 20 m en un periodo de cuatro años, con un incremento de extracción entre 250 y 300 %, mientras que para la zona de avenida 5 de Febrero se mantiene la variación de 20 m, formando un incremento de extracción hasta de 400 %.

Ahora bien, con respecto a la proyección de 2016 en la zona del Pueblito, se tendrá un incremento en la extracción aproximadamente de 400 %, y en la zona de Avenida 5 de Febrero de 200 %, con respecto a la extracción del 2015, yserá mantenida la extracción en el 2017, para las dos zonas, ésto se puede ver además

por el incremento de la presión de poro y el cual tiene una tenencia de incremento similar en todo el valle de Querétaro.

Una vez mencionado cómo es la variación de los niveles estáticos de los pozos, es indispensable conocer las características de los espesores de los estratos o los perfiles de los puntos de control o de monitoreo de los asentamientos regionales, los cuales fueron obtenidos mediante correlacion geofísica, pero partiendo de la carta de sedimentos de Pacheco, se encuentra que para la zona de la falla de Avenida 5 de Febrero se cuenta con un estrato deformable de aproximadamente 20 m, para la zona de Jardines de la Hacienda y la colonia El Ensueño de 120 m y para la zona de El Pueblito de 40 a 70 m.

Ahora bien, es de suma importancia hacer referencia que a la hora de relizar la comparación de la información de los espesores de sedimentos deformables obtenidos apartir de las cartas de Pacheco (2007), las extracciones de agua en cada uno de los puntos de control y los gradientes de presión de poro, se puede ver que los valores mayores en estas variables coinciden con la zona más crítica encontrada con respecto a los asentamientos diferenciales medidos en campo y mediante la implementación de GPS de alta precisión en el monitoreo de intervalo de tiempo de Septiembre del 2013 a Mayo del 2015, siendo esta la colonia El Ensueño y en donde se tiene un asentamiento de 29 cm en un periodo de 19 meses aproximadamente de 12 a 15 cm por año.

Mientras que para la zona cercana a la empresa Mabe, ubicada en la colonia Obrera, se presenta un asentamiento de 9 a 12 cm en el mismo periodo de 19 meses. Es necesario mencionar que para la zona correspondiente a la UAQ y la plaza de los Mariachis (intersección de Av. 5 de Febrero y Av. Universidad) se tiene un asentamiento aproximado de 6 cm en el mismo periodo de 16 a 19 meses.

Todo esto puede ser visto en el perfil de corte A-A', el cual lleva la traza similar a la falla de avenida 5 de Febrero y donde inicia el subgraben del valle de Querétaro, ademas de formar parte de la sección donde se presenta los mayores asentamientos diferenciales, los cuales siguen presentando hasta la zona de El Puebleito y donde se estiman que los incrementos de asentamientos vaya a la alza en los próximos años.

Por lo tanto, considerando y analizando los valores anteriormente mencionados, se puede decir que la implementación de técnicas de monitoreo de alta precisión sirven para monitorear el fenómeno de subsidencia y determinar las zonas con mayores velocidades de asentamiento, para asi poder realizar Atlas de riesgo o zonificación de áreas propensas a daños en la infrestructura, por agrietamientos o hundimientos regionales.

La propuesta de solución planteada anteriormente fue realizada apartir de la red de drenes existente en la ciudad de Querétaro, ademas de contemplar los valores de las pendiente en su trayectoria, es indispensable mencionar que debido a los asentamientos existentes en la zona de estudio se han calculado periodos en los cuales esta red pudiera dejar de funcionar por las velocidades de asentamientos medidas con GPS, sin embargo la información que se tiene actualmente no es definitiva del planteamiento, dado que se requiere seguir monitoreando la red de puntos de control y apliarla para asi contar con mayor detalle e información del comportamiento mecanico del valle de Querétaro, se estima que la red tenga un periodo de vida entre 20 y 60 años aproximadamente, lo cual debe de ser corroborado con la continuación de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Aguilar-Perez, L. A., Ortega-Guerrero, M. A., Lugo-Hubp, J., and Ortiz-Zamora, D. del C. (2006). Integrated numerical analysis of the vertical displacements and fracturing related to groundwater extraction in the vicinity of Mexico City. *Revista Mexicana De Ciencias Geologicas*, *23*(3), 247–261.

Aguirre-Diaz, G. J., Nieto-Obregón, J., and Zuñiga, R. (2005). Seismogenic Basin and Range and intra-arc normal faulting in the central Mexican Volcanic Belt, Querétaro, México., *40*, 1–29.

Aguirre-Diaz, G., Zuñiga-Davila Madrid, R., Pacheco Alvarado, F. G., GuzmánSpeziale, M., y Nieto Obregón, J. (2000). El Graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo: Geos, Boletin de la Unión Geofísica Mexicana, *20*, 2–7.

Alvarez-Manilla, A., Martinez-Peña, G., Pérez-Salazar, A., y Vázquez-Paulino, J. (2002). Caracterización de suelos y control espacial por medio de los sistemas de información geográfica; caso valle de Querétaro. Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Arroyo-Contreras, G., López-Cajón, C., and Pérez-Lara, M. (2010). Subsidence and seismic risck of the Queretaro city, Mexico. In *S3.9* (p. 36). Querétaro, México.

Avila-Olivera, J., Farina, P., y Guarduño-Mornoy, V. (2009). Desplazamientos de la falla 5 de Febrero en la ciuad de Queretaro: determinación con interferometría. In *SE22-1* (Vol. 29, p. 182). Geos.

Bell, J. W. (1997). Las Vegas Valley: Land Subsidence and Fissuring Due to Ground-Water Withdrawal. *Nevada Bureau of Mines and Geology. Disponível Em: Http://geochange. Er. Usgs. Gov/sw/impacts/hydrology/vegas_gw*. Retrieved from http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/vegas_gw/

Cabral-Cano, E., Díaz-Molina, O., y Delgado-Granados, H. (2011). Subsidencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, *63*(1), 53–60.

Carmona, F. (2005). Modelos lineales.pdf. Les Publicacion de la Universitat de barcelona.

Carreón-Freyre, D. C. (2011). Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Retrieved from http://www.ai.org.mx/ai/archivos/ingresos/dora_carreon/trabajo_ingreso_dra_carreon.pdf

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., and Hernández Marín, M. (2005). Propagation of fracturing related to land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico. In *Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence* (Vol. 1, pp. 155–164). Retrieved from

http://www.geociencias.unam.mx/~mcerca/pdf/Full_Paper_SISOLSCarreon.pdf

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., International Symposium on Land Subsidence, and Unesco (Eds.). (2010). *Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development: EISOLS, Eighth International Symposium on Land Subsidence, Querétaro, México, 2010 ; [17 - 22 October 2010 ; proceedings]*. Wallingford, Oxfordshire: IAHS Press.

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Luna-González, L., y Gámez-González, F. J. (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *22*(1), 1–18.

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., and Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, *140*, 94–106. http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038

Chávez, O., Arzate-Flores, J., and Rojas-González, E. (2010). Analysis of ground failure due to land subsidence by finite element method applied to the Queretaro citY. In *S3.16* (p. 40). Queretaro, Mexico.

Cortés, A., Arzate, J., & Lozano, alejandro. (2012). *El valle de Querétaro y su geoentorno.* (Fundación Universitari de Derecho, Administración y Politica, S. C., Vol. Tomo II). UNAM.

De la Fuente, S. (2014). Modelo ARIMA (p, d, q) (P, D, Q)s. Universidad Autonoma de Madrid.

Escalona-Alcazar, F. de J., Escobedo-Arellano, B., Castillo-Félix, B., García-Sandoval, P., Gurrola-Menchaca, L., Carrillo-Castillo, C., y Esparza-Martínez, A. (2012). A Geologic and Geomorphologic Analysis of the Zacatecas and Guadalupe Quadrangles in Order to Define Hazardous Zones Associated with the Erosion Processes. In S. Curkovic (Ed.), *Sustainable Development - Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management*. InTech. Retrieved from http://www.intechopen.com/books/sustainable-development-authoritative-and-leading-edge-content-for-environmental-management/a-geologic-and-geomorphologic-analysis-of-the-zacatecas-and-guadalupe-quadrangles-in-order-to-define

Estrella, G. (2012). *Monitoreo y predicción de agrietamientos por subsidencia en la falla 5 de Febrero* (Tesis). Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Fernández, M. P. (2009). *Delimitación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DInSAR* (Tesis). Universidad de Granada, Depertamento de Ingeniería Civil.

González-Martínez, M. (2014). *Replanteamiento en la estimación de periodos fundamentales del suelo para la ciudad de Querétaro* (Tesis). Universidad Autonoma de Querétaro, Querétaro, México.

Gumilar, I., Abidin, H. Z., Hutasoit, L. M., Hakim, D. M., Sidiq, T. P., and Andreas, H. (2015). Land Subsidence in Bandung Basin and its Possible Caused Factors.

Procedia Earth and Planetary Science, *12*, 47–62. http://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.03.026

Herrera, G., Fernández, J. A., Tomás, R., Cooksley, G., Mulas, J., and others. (2009). Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data-modelling and validation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, *9*(3), 647–661.

Herrera, I. L. (2012, August). *Análisis de la susceptibilidad a la subsidencia en el estado de san luis potosí (México) como herramienta de la gestión ambiental* (Tesis). Universodad Autónoma de San Luis Potosí, México.

Jaramillo L. (1990, 4 de Septiembre). Fallas Geológicas Cruzan Cd. de Querétaro, ***Noticias diario de la mañana***, p .4A.

Lazcano, S. (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos E Ingeniería Geotécnica*, 8.

Macia, F., y Oleaga, G. (2007). Procesos estocásticos y ecuaciones diferenciales: una introducción. Retrieved from http://dcain.etsin.upm.es/~fabricio/Docencia/ProcesosEstocasticos.pdf

Ochoa-González, G., Carreón-Freyre, D., and Gambolati, A. I. (2013). *Modeling the deformation of faulted volcano-sedimentary sequences associated to growndwater withdrawal in the Querétaro valley, Mexico*. 20th International Congress on Modeling and Simulation, Adelaide, Australia. Retrieved from www.mssanz.org.au/modsim2013

Pacheco, J. (2007). *Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales.* (Doctorado en ciencias de la tierra (exploración)). Uiversidad Nacional Autónoma de México, Querétaro.

Pacheco-Martínez, J. (2007). *Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales.* (Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, UNAM Campus Juriquilla, Querétaro. Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/Jesus_Pacheco2/publication/242013157_Modelo_de_subsidencia_del_valle_de_Quertaro_y_prediccin_de_agrietamientos_superficiales/links/0deec51cb37611e71d000000.pdf

Pacheco-Martínez, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., and Gil Ochoa. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, *84*(3-4), 143–160. http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003

Pacheco-Martínez, J., Zermeño-De-Leon, M., Mendoza-Otero, E., y de alba-Obregón, R. (2012). *Zonificación del peligro por subsidencia: caso Aguascalientes* (Primera). México.

Paredes Hernández, C. U., Salinas Castillo, W. E., Martínez Becerra, X., and Jiménez Hernández, S. B. (2013). Evaluation and comparison of deterministic and probabilistic interpolation methods for digital elevation model generation. *Investigaciones Geográficas*, (82), 118–130.

Pindyck, R. S., & Rubinfeld, D. L. (2001). *Econometría: modelos y pronósticos*. México: McGraw-Hill.

Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., y Regalado, C. M. (2015). Capacidad de predicción de modelos aplicados a la zns: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad-de-ajuste con significación estadística, *X*, 259.

Rodríguez-Castillo, R., y Rodríguez-Velázquez, I. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, *2*, 265–269.

Sahu, P., and Sikdar, P. K. (2011). Threat of land subsidence in and around Kolkata City and East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Journal of Earth System Science*, *120*(3), 435–446.

Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., y Peña, F. (2010). Subsidencia del terreno. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, *17*, 295–302.

Tomás, R., Márquez, Y., Lopez-Sanchez, J. M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorquí, J. J.,and Mulas, J. (2005). Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment*, *98*(2-3), 269–283. http://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.003

Torres, I. C. (2007). *Pronósticos en el mercado de derivados utilizando redes neuronales y modelos ARIMA: una aplicación al Cete de 91 días en el MexDer.* PhD thesis, Facultad de Contaduría y Administración. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from

http://www.bmv.com.mx/wb3/wb/MEX/MEX_Repositorio/_vtp/MEX/1d02_2007/_rid/21/_mto/3/Pronosticos_en_el_mercado_de_derivados_utilizando_redes_neuronales_y_modelos_ARIMA.pdf

U. S. Geological Survey. (2000). *Land Subsidence in the United States*. Retrieved from http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5218/

Valencia-Vallejo, D. G. (1995). *Fallamiento de los suelos en la ciudad de Querétaro* (Tesis). Universidad Autonoma de Querétaro, Querétaro, México.

Vega-Moreno, E. (2014). *Análisis de afectación de vías terrestres por el fenómeno de subsidencia en el valle de Querétaro.* (Tesis). Universidad Autonoma de Querétaro, Querétaro, México.

Viera, M. A. D., y González, R. C. (2002). Geoestadística aplicada. *Notas de Curso. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Geofísica Y Astronomía, CITMA. Cuba*. Retrieved from http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf

XunChun, W., Yue, Z., XingGe, J., and Peng, Z. (2011). A Dynamic Prediction Method of Deep Mining Subsidence Combines D-InSAR Technique. *Procedia Environmental Sciences*, *10*, 2533–2539. http://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.394

Yanlin, W., Xiangjun, B., Sheng, F., Yingxin, M., and Qianjin, Y. (2011). Subsidence monitoring of offshore platforms. *Procedia Engineering*, *15*, 1015–1020. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.188

Yuanfeng, Y., Chunhe, Y., Yinping, L., and Wendong, J. (2011). The Layout Parameters of Well Groups and Effect on Land Subsidence for Salt Mine in Zhangshu Tourist Area. *Procedia Engineering*, *26*, 1682–1691. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2354

Zhantayev, Z., Kurmanov, B., Bibosynov, A., Fremd, A., and Ivanchukova, A. (2014). Persistent Scatterers Interferometry Technique for Urban Subsidence Monitoring in Kazakhstan Republic. *Procedia Technology*, *16*, 583–587. http://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.006

Anexos

Anexo I. Ecuaciones del kriging ordinario

Tal y como lo da a conocer Viera y González (2002) se considera óptimo el estimador kriging porque se consideran dos criterios, el primero es que es insesagado y el segundo que se minimiza la varianza la estación.

a) Condición de insesgadez

$$E[Z_k^*] = E\left[\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, Z\left(\underline{X}_i\right)\right] = m$$

donde *m* es el valor esperado de $Z\left(\underline{X}\right)$.

Esto implica que

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, E\left[Z\left(\underline{X}_i\right)\right] = E[Z_k^*]$$

Por lo tanto

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, m = m$$

Y finalmente

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$$

b) Condición de que la estimación sea de mínima varianza

La cual se realiza mediante la siguiente explesión:

$$F = \sigma_e^2 - 2\mu\left(\sum_{i=1}^{n} \lambda_i - 1\right)$$

donde

σ_e^2 – es la varianza de la estimación

μ – un multiplcador de Lagrange

Nótece que la función *F* a minimizar consta de la varianza de la estimación σ_e^2 e incluye la condición que garantiza el no sesgo de la estimación.

La varianza de la estimación se expresa como:

$$\sigma_e^2 = var[Z_k - Z_k^*] = E[(Z_k - Z_k^*)^2]$$

$$\sigma_e^2 = var[Z_k] - 2cov[Z_k, Z_k^*] + var[Z_k^*]$$

Y sustituyendo el estimulador Z_k^* se tiene:

$$\sigma_e^2 = var[Z_k] - 2cov\left[Z_k, \sum_{i=1}^{n} \lambda_i\, Z(\underline{X}_i)\right] + var\left[\sum_{i=1}^{n} \lambda_i\, Z(\underline{X}_i)\right]$$

Desarrollando se obtiene:

$$\sigma_e^2 = \sigma_{Z_k}^2 - 2\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, \sigma_{Z_k Z_i} + \sum_{I=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \lambda_i \lambda_j \, \sigma_{Z_i Z_j}$$

Encontrando las derivadas parciales de *F* respecto a los coeficientes desconocidos con respect a μ se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F}{\partial \lambda_i} = -2\sigma_{Z_k Z_i} + \displaystyle\sum_{j=1}^{n} \lambda_i \, \sigma_{Z_i Z_j} - 2\mu = 0, \qquad i = 1, \dots, n \\ \dfrac{\partial F}{\partial \mu} = \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \lambda_i - 1 = 0 \end{cases}$$

De la manera más usual se expresa:

$$\begin{cases} \displaystyle\sum_{j=1}^{n} \lambda_i \, \sigma_{Z_i Z_j} - \mu = \sigma_{Z_k Z_i}, \qquad i = 1, \dots, n \\ \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \end{cases}$$

Este sistema de ecuaciones sirve para el cálculo de Kriging puntual. Y la varianza del error de la estimación se uede calcular de una manera mas simple sustituyendo el valor de μ:

$$\sigma_e^2 = \sigma_{Z_k}^2 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, \sigma_{Z_k Z_i} + \mu$$

Anexo II. Perfiles estratigraficos del valle de Querétaro, utilizados y realizados por Pacheco-Martínez, 2007.

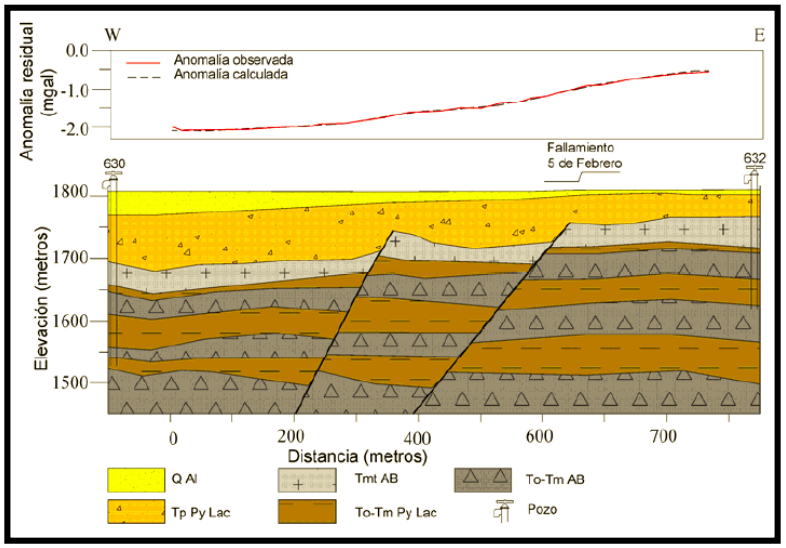

Figura A.II.1. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Vegil sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

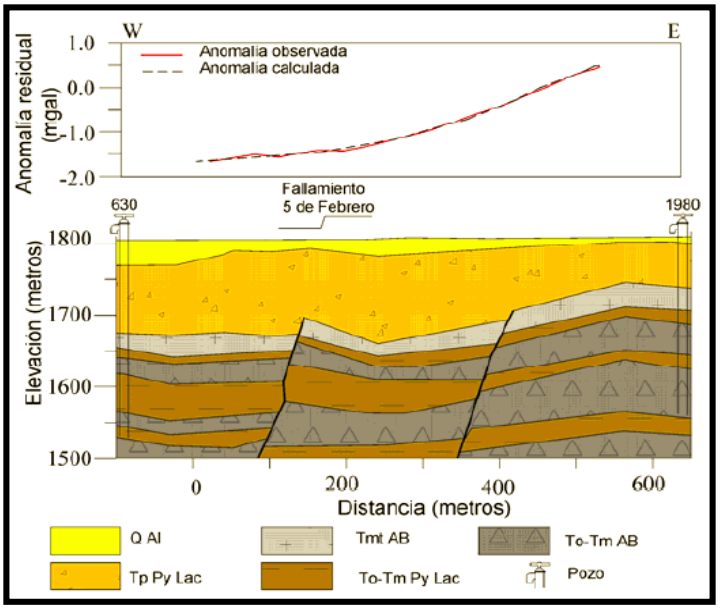

Figura A.II.2. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Zaragoza sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

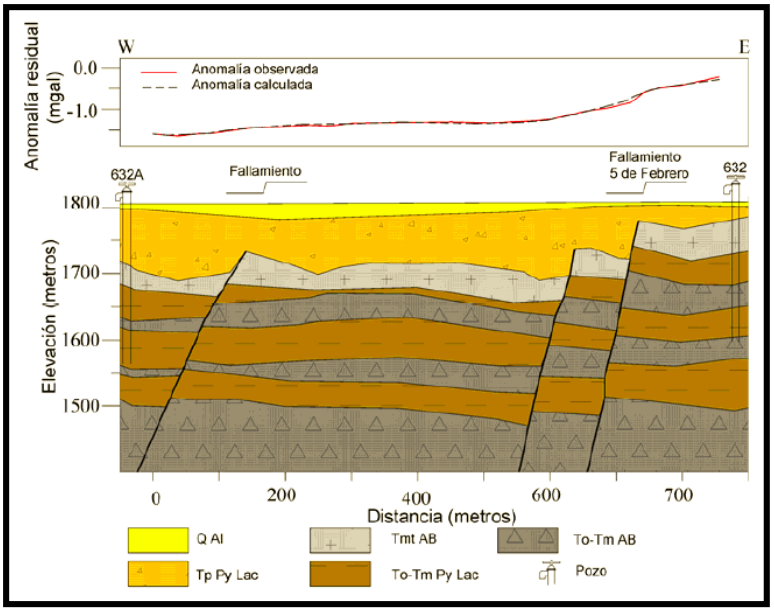

Figura A.II.3. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Jacal sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos..
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

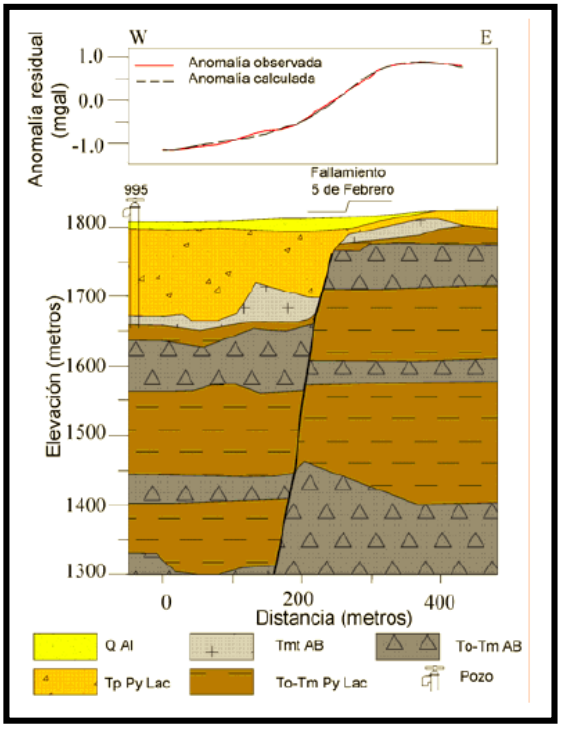

Figura A.II.4. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Obrera sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos.
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

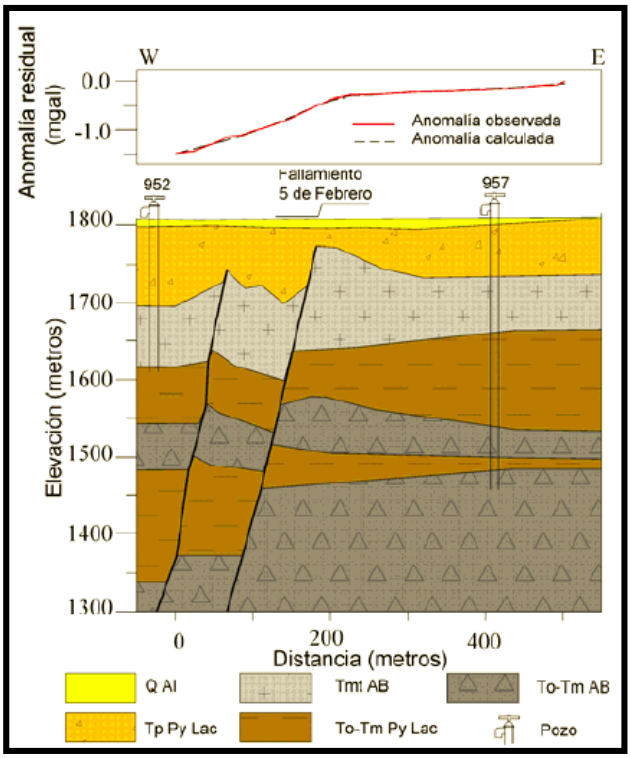

Figura A.II.5. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Epigmenio González sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos.
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

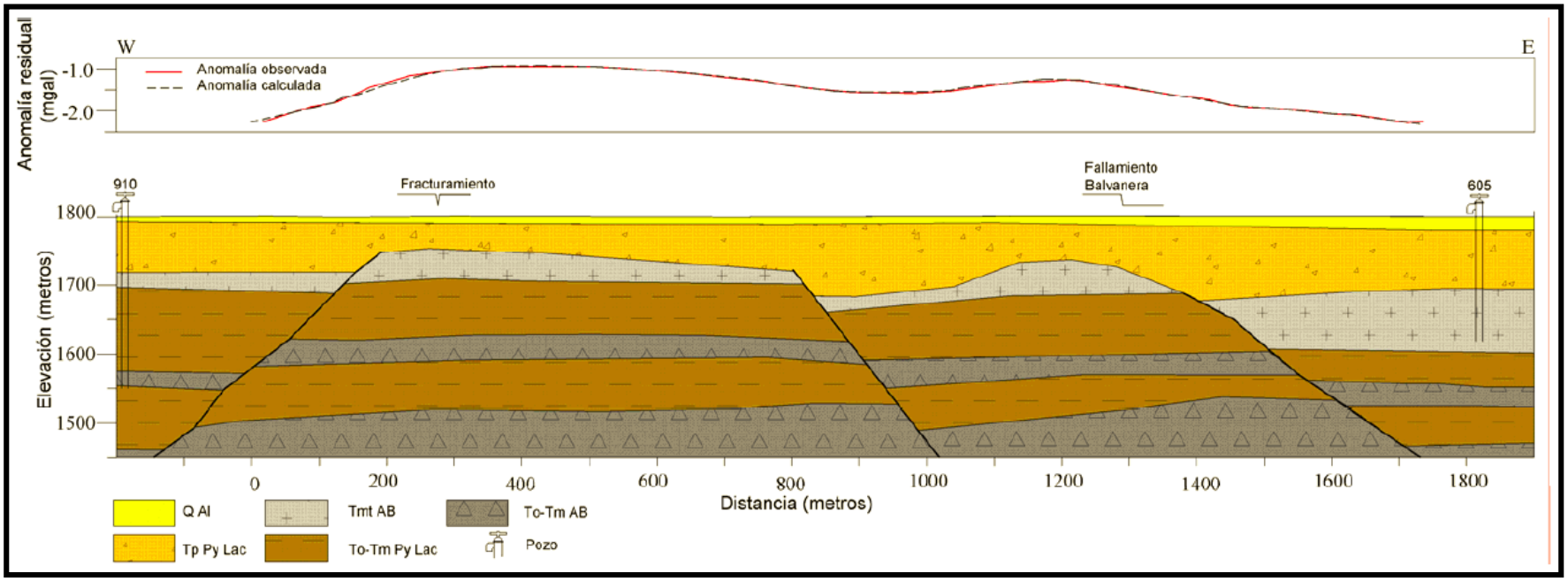

Figura A.II.6. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Venegas sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos.
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

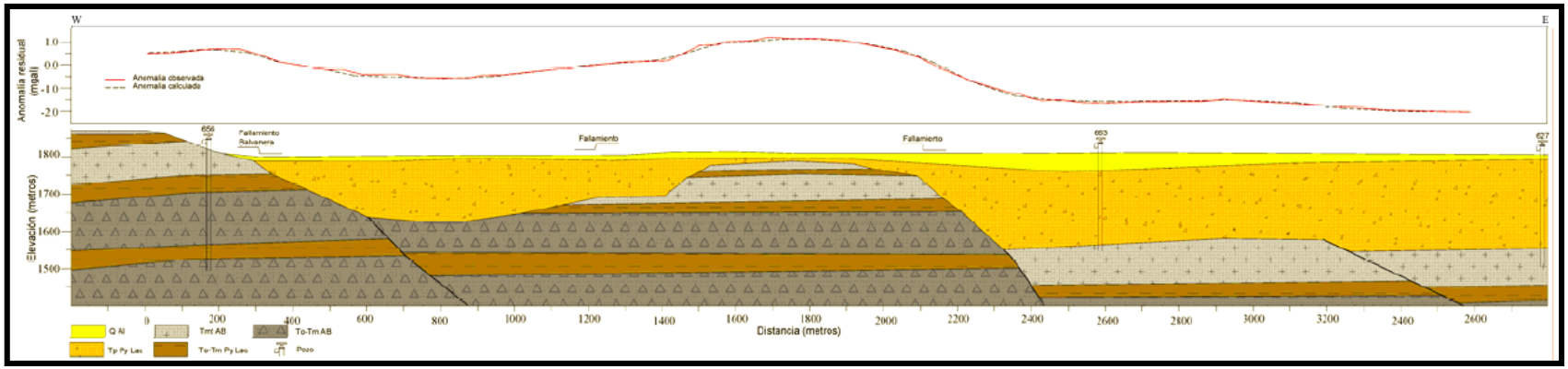

Figura A.II.7. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Las Flores - Balvanera sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos.
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

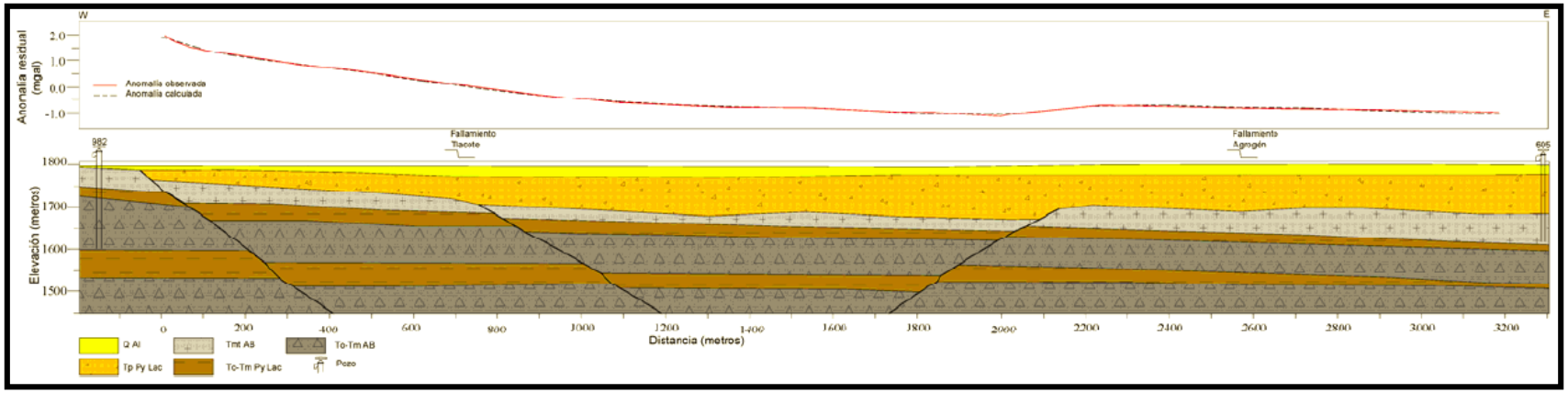

Figura A.II.8. Sección del subsuelo del valle de Querétaro en el perfil Adjuntas - Agrogén sobre el agrietamiento 5 de Febrero, inferido mediante datos gravimétricos.
Fuente: Pacheco-Martínez, 2007.

Anexo III. Perfiles estratigraficos apartir de velocidades de cortante

Perfiles estratigraficos para las velocidades de cortante menores

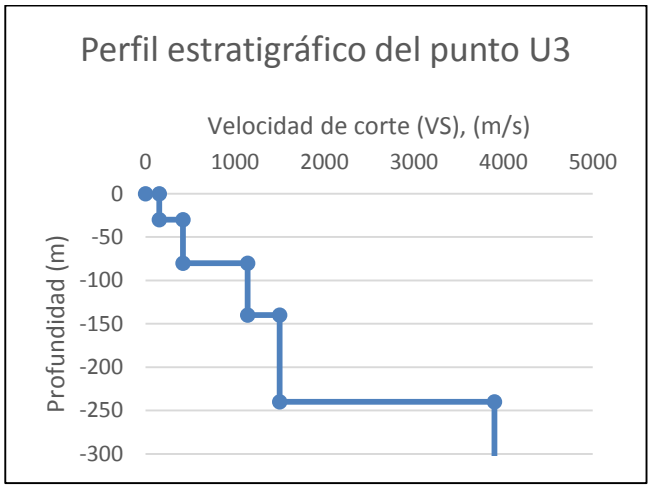

Figura A.III.1. Perfil estratigráfico del punto U3 (Vs menor)

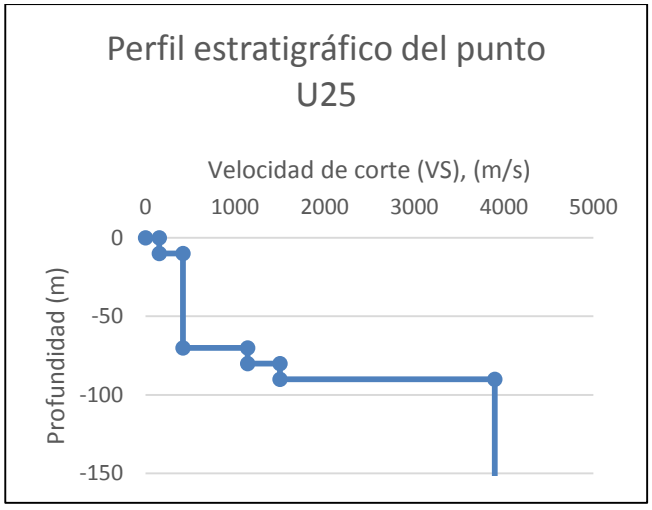

Figura A.III.2. Perfil estratigráfico del punto U25 (Vs menor)

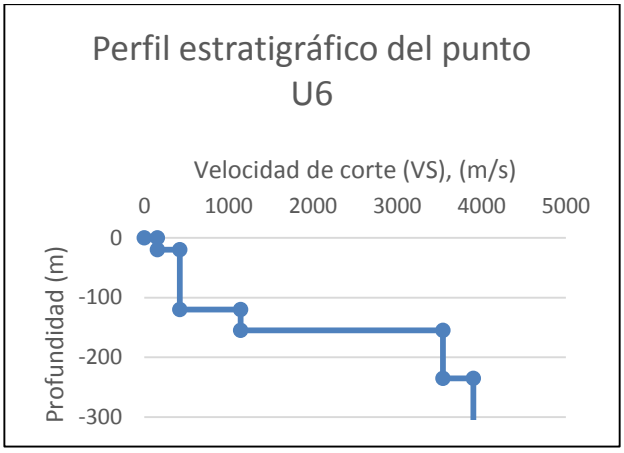

Figura A.III.3. Perfil estratigráfico del punto U6 (Vs menor).

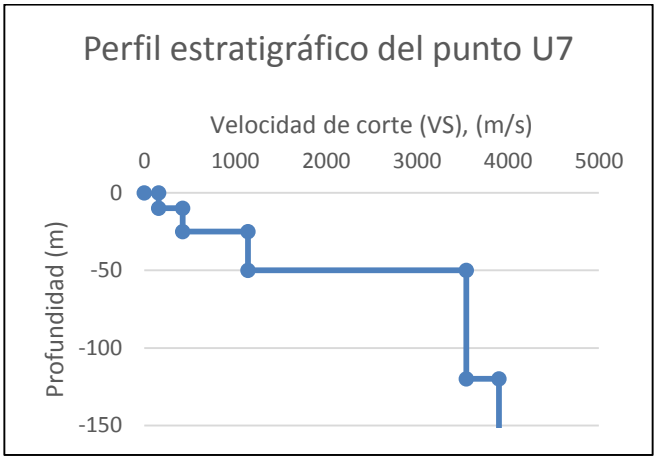

Figura A.III.4. Perfil estratigráfico del punto U7 (Vs menor).

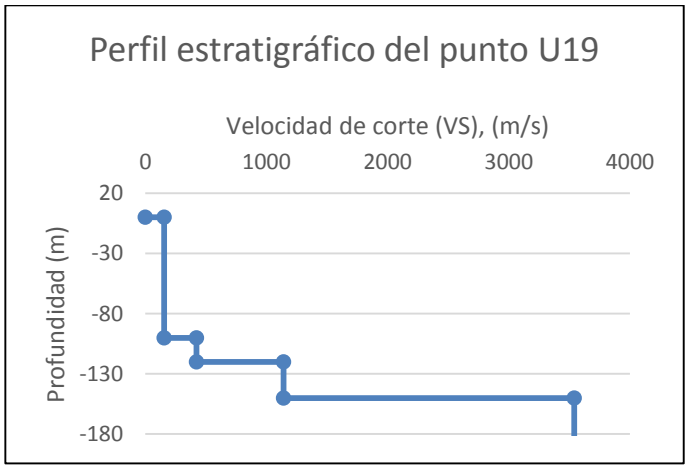

Figura A.III.5. Perfil estratigráfico del punto U19 (Vs menor).

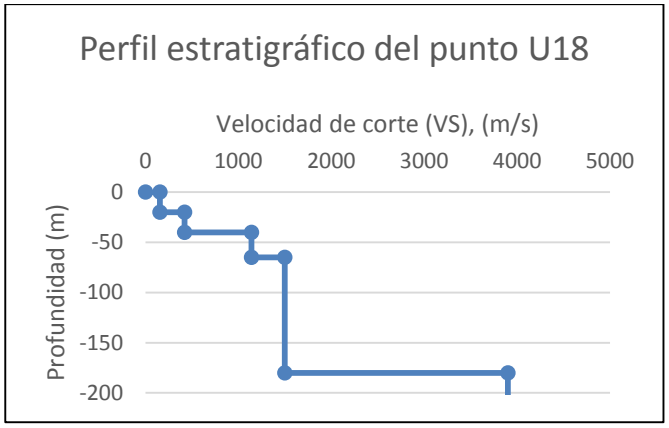

Figura A.III.6. Perfil estratigráfico del punto U18 (Vs menor).

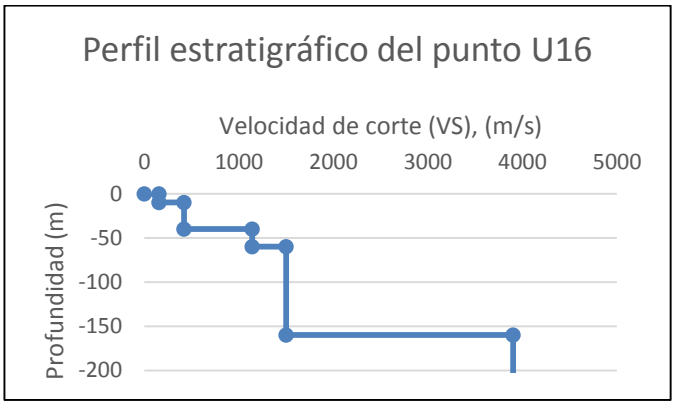

Figura A.III.7. Perfil estratigráfico del punto U16 (Vs menor).

Perfiles estratigraficos para las velocidades de cortante mayores

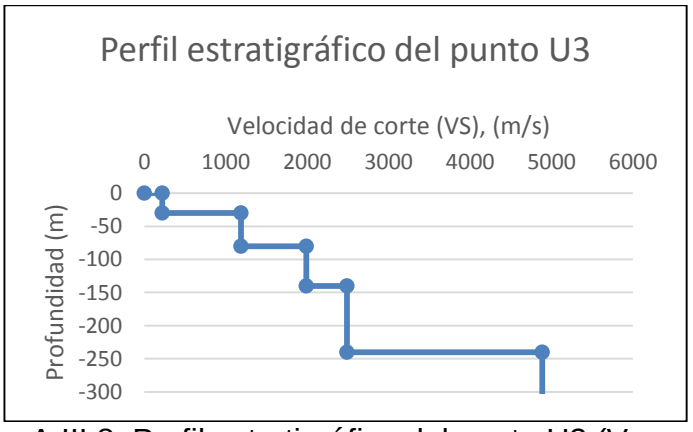

Figura A.III.8. Perfil estratigráfico del punto U3 (Vs mayor).

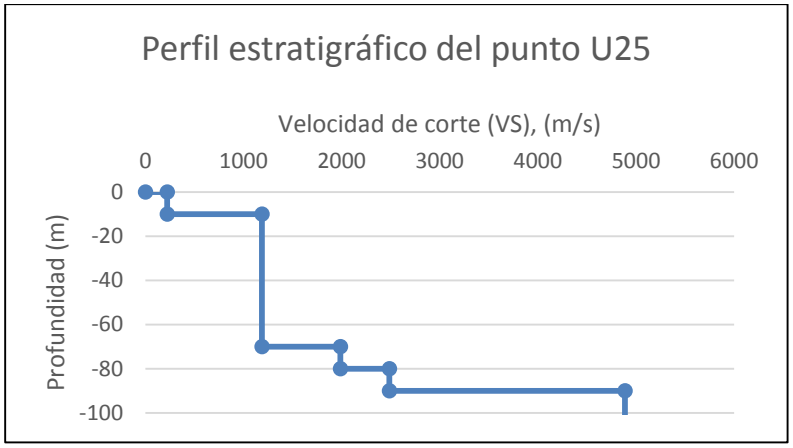

Figura A.III.9. Perfil estratigráfico del punto U25 (Vs mayor).

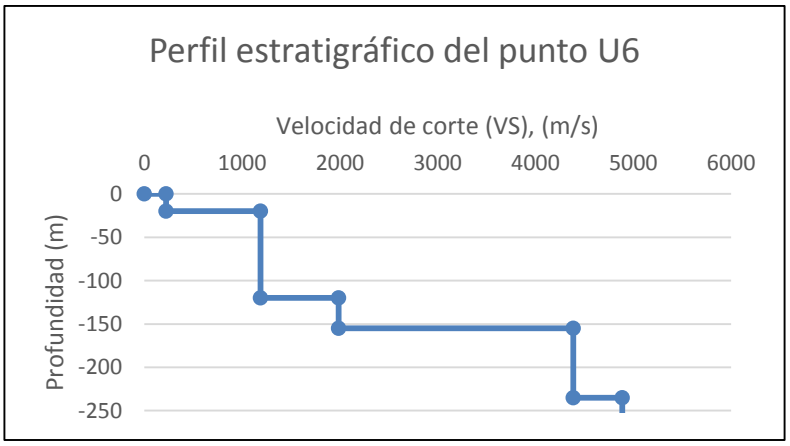

Figura A.III.10. Perfil estratigráfico del punto U6 (Vs mayor).

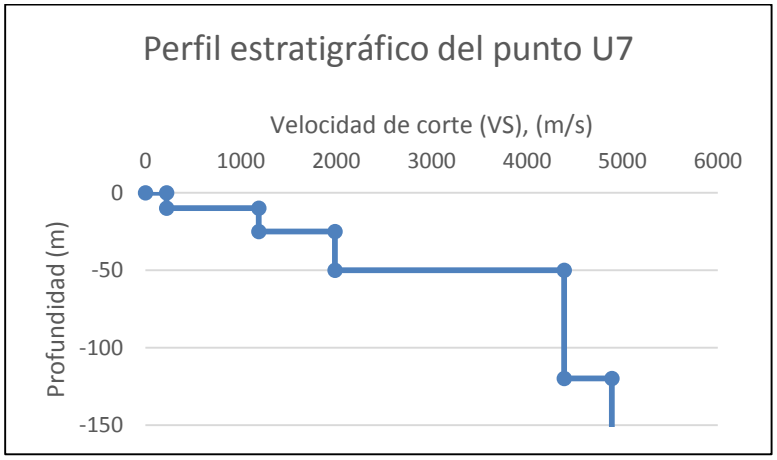

Figura A.III.11. Perfil estratigráfico del punto U7 (Vs mayor).

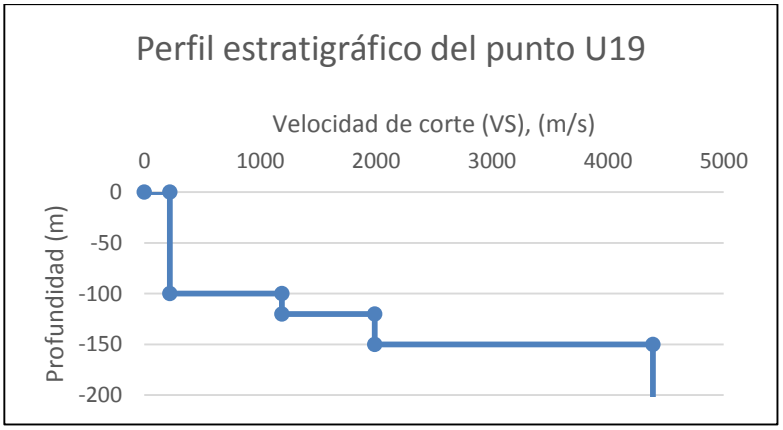

Figura A.III.12. Perfil estratigráfico del punto U19 (Vs mayor).

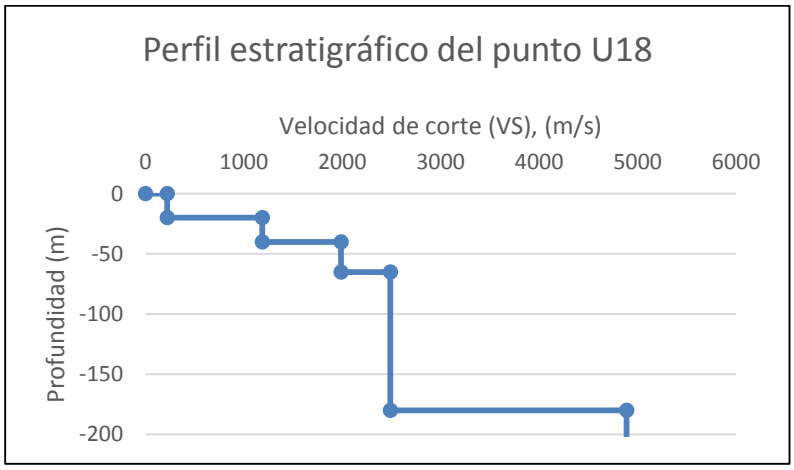

Figura A.III.13. Perfil estratigráfico del punto U18 (Vs mayor).

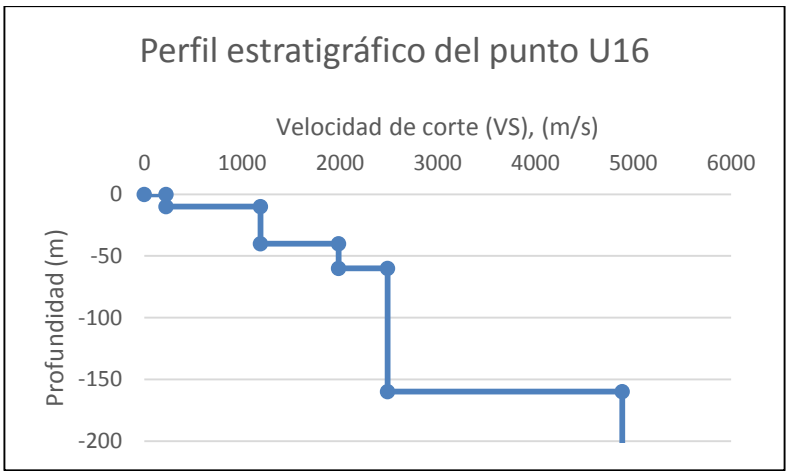

Figura A.III.14. Perfil estratigráfico del punto U16 (Vs mayor).

Anexo IV. Asentamientos en los puntos de control

Figura A.IV.1. Asentamiento del punto U6, con respecto al tiempo.

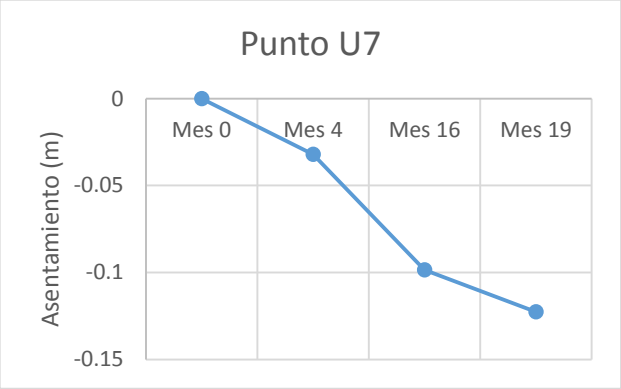

Figura A.IV.2. Asentamiento del punto U7, con respecto al tiempo.

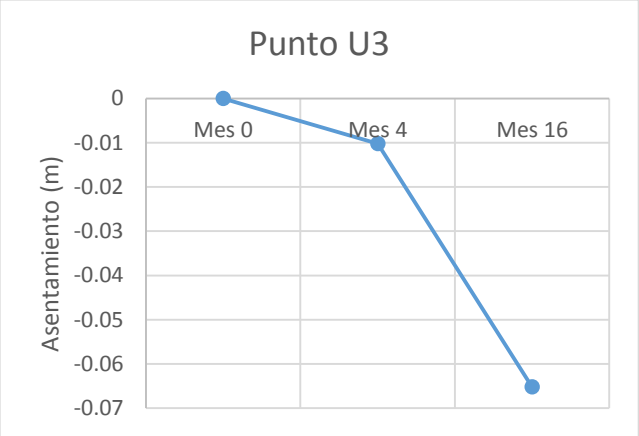

Figura A.IV.3. Asentamiento del punto U3, con respecto al tiempo.

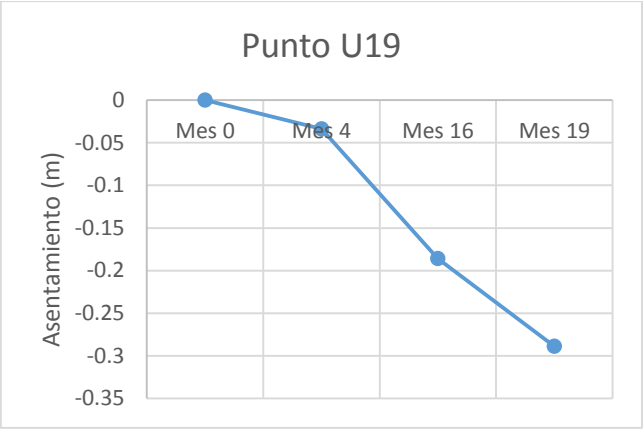

Figura A.IV.4. Asentamiento del punto U19, con respecto al tiempo

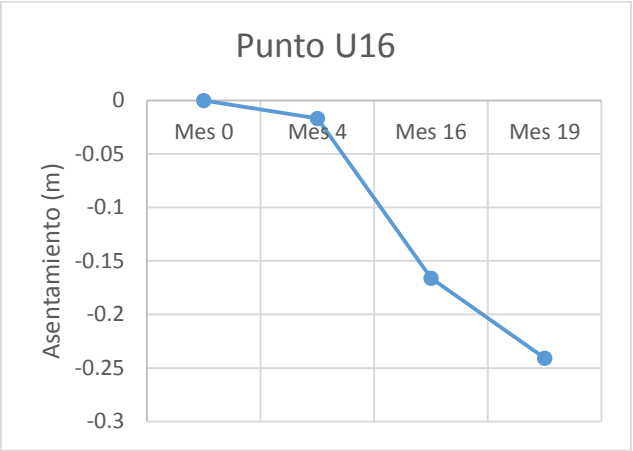

Figura A.IV.5. Asentamiento del punto U16, con respecto al tiempo

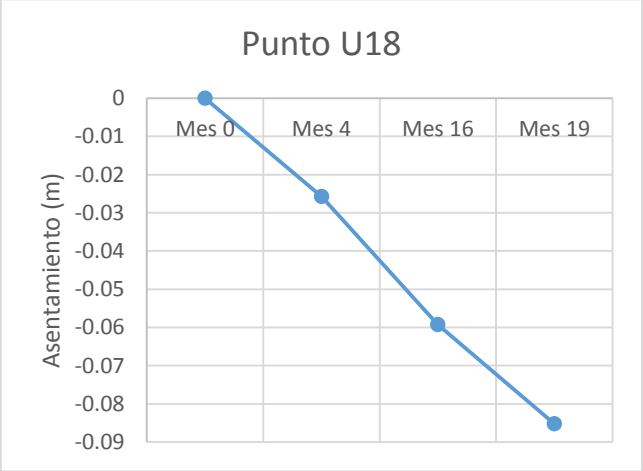

Figura A.IV.6. Asentamiento del punto U18, con respecto al tiempo

Figura A.IV.7. Asentamiento del punto I4, con respecto al tiempo

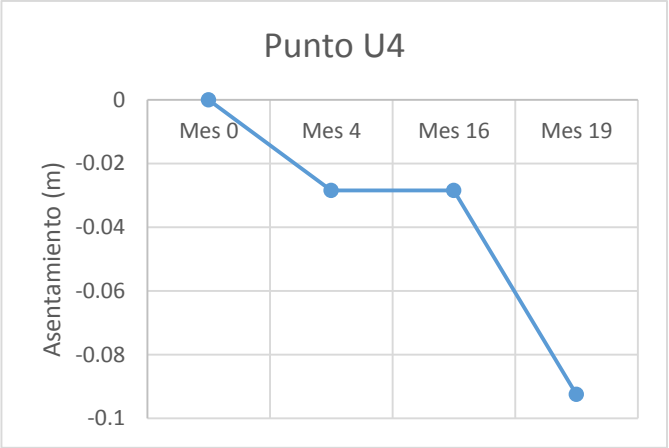

Figura A.IV.8. Asentamiento del punto U4, con respecto al tiempo.

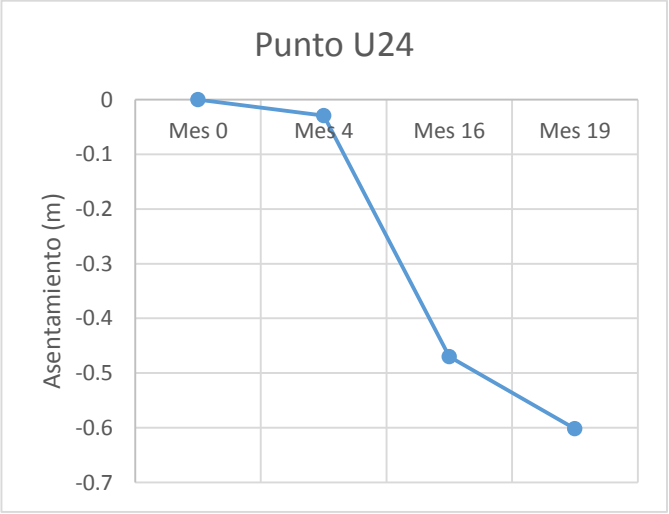

Figura A.IV.9. Asentamiento del punto U24, con respecto al tiempo

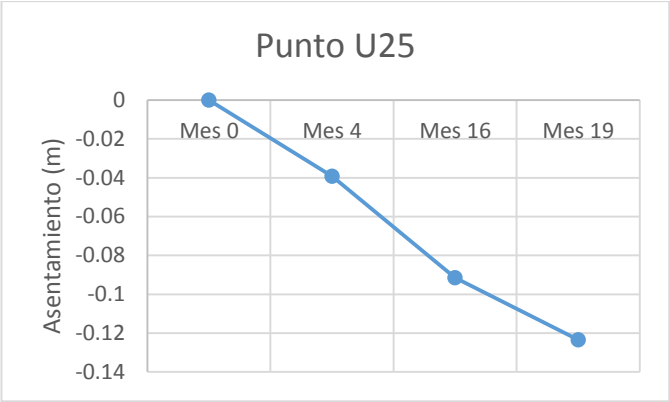

Figura A.IV.10. Asentamiento del punto U25, con respecto al tiempo

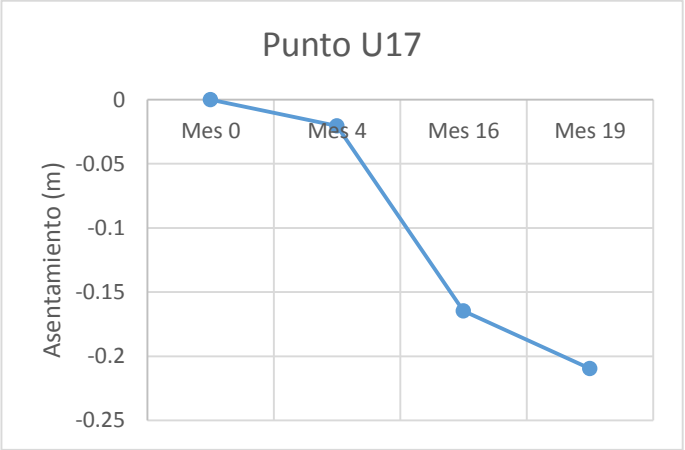

Figura A.IV.11. Asentamiento del punto U17, con respecto al tiempo

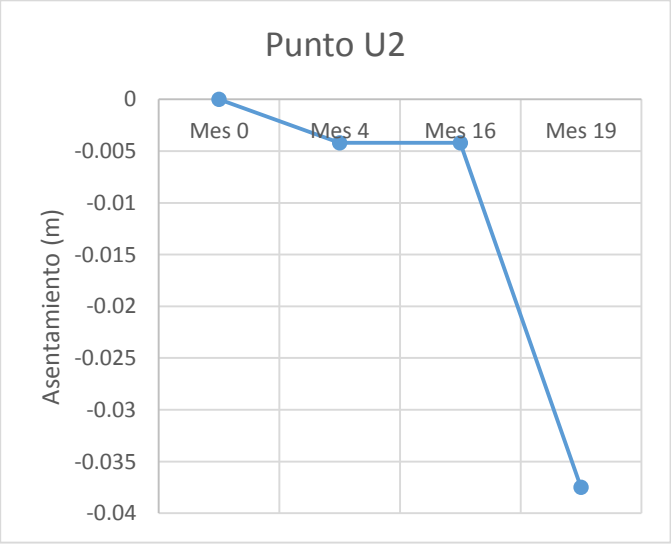

Figura A.IV.12. Asentamiento del punto U2, con respecto al tiempo.

Figura A.IV.13. Asentamiento del punto I3, con respecto al tiempo.

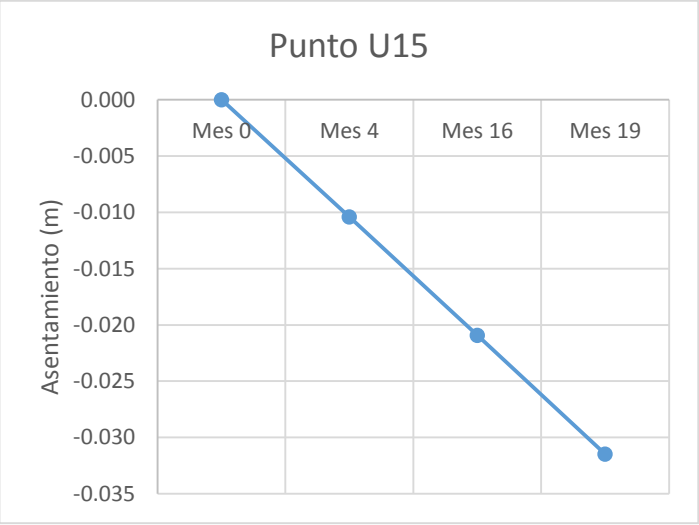

Figura A.IV.14. Asentamiento del punto U15, con respecto al tiempo.

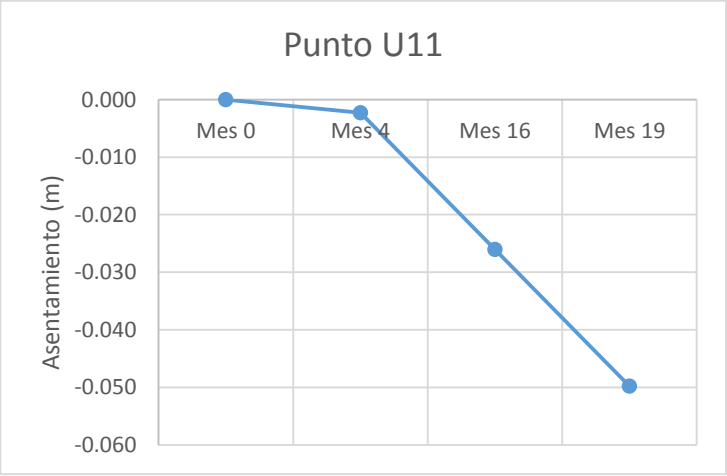

Figura A.IV.15. Asentamiento del punto U11, con respecto al tiempo.

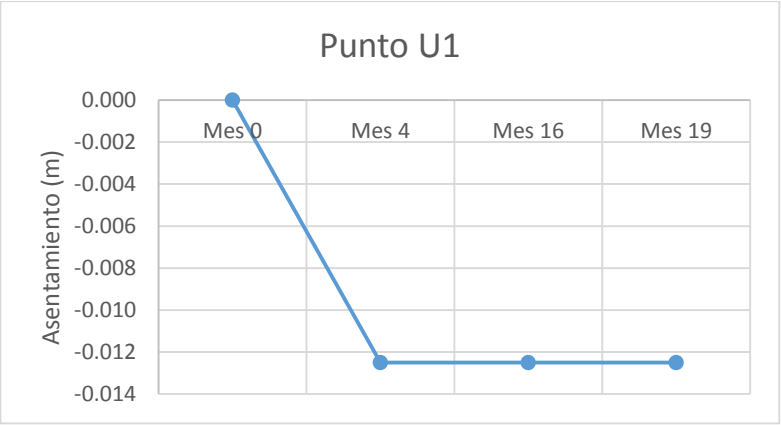

Figura A.IV.16. Asentamiento del punto U1, con respecto al tiempo.

Figura A.IV.17. Asentamiento del punto U10, con respecto al tiempo.

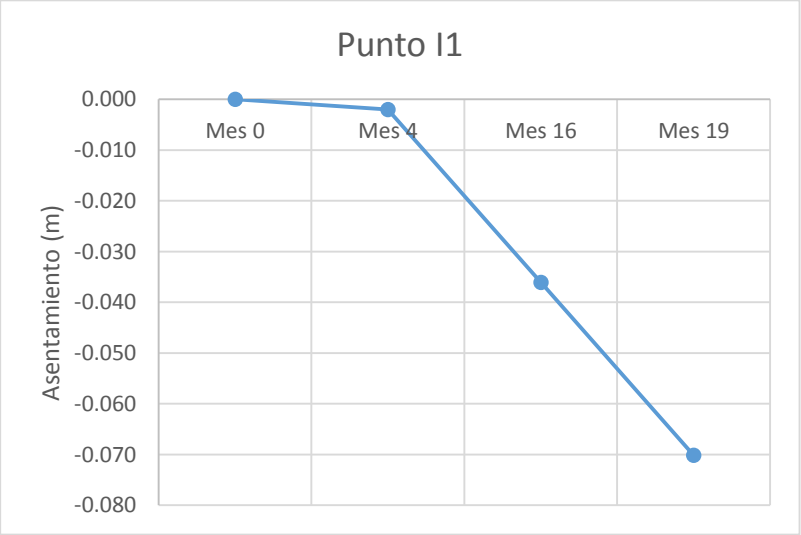

Figura A.IV.18. Asentamiento del punto I1, con respecto al tiempo

Anexo V. Velocidades de asentamiento de los puntos de control

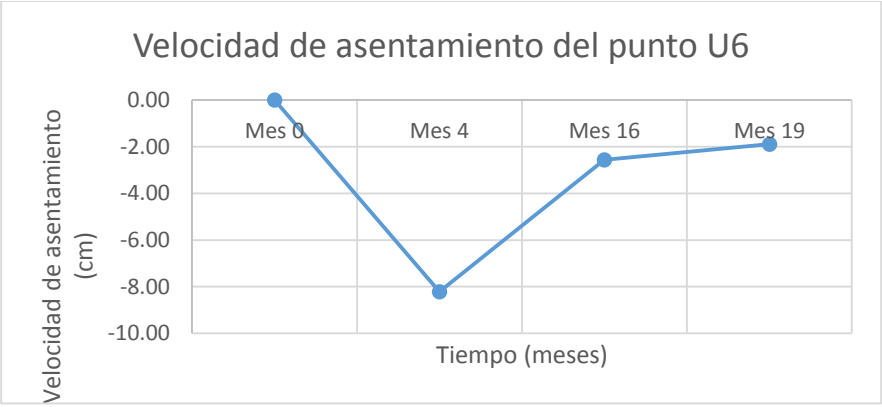

Figura A.V.1. Velocidades de asentamiento del punto U6, con respecto al tiempo.

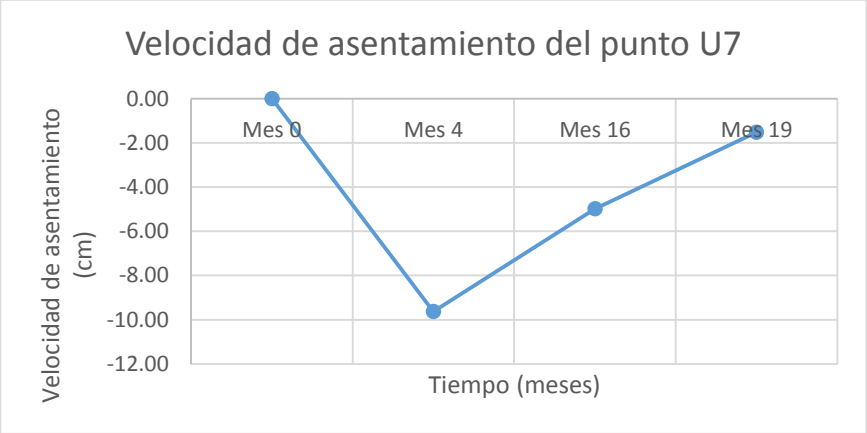

Figura A.V.2. Velocidades de asentamiento del punto U7, con respecto al tiempo.

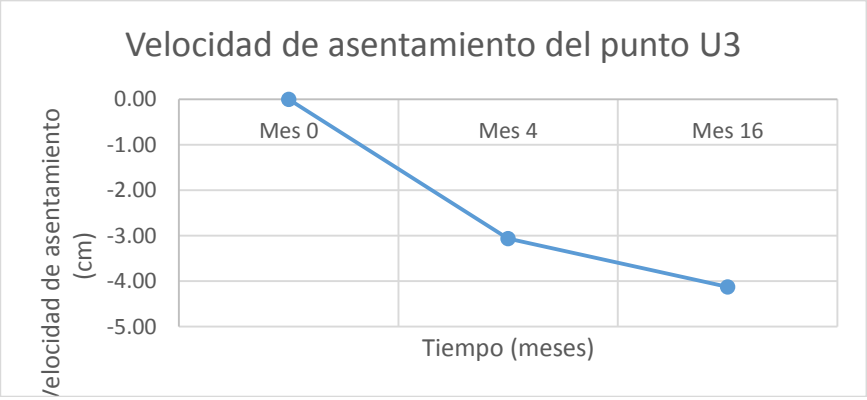

Figura A.V.3. Velocidades de asentamiento del punto U3, con respecto al tiempo.

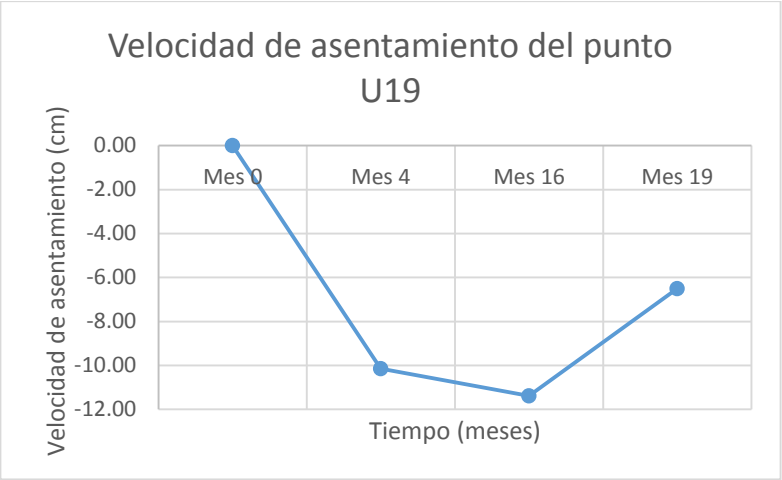

Figura A.V.4. Velocidades de asentamiento del punto U19, con respecto al tiempo

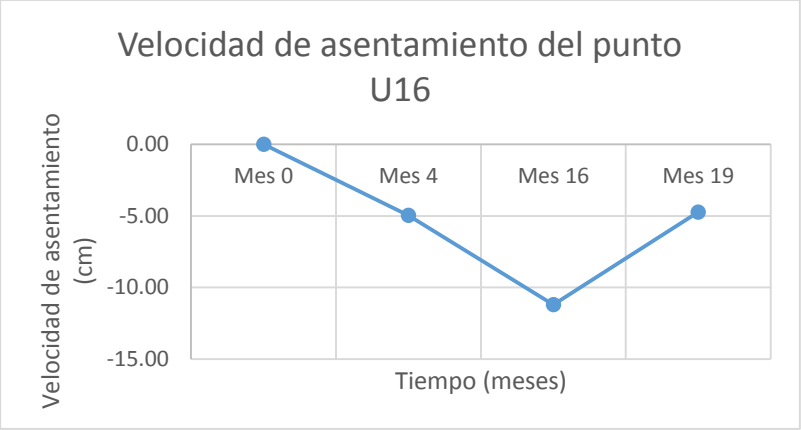

Figura A.V.5. Velocidades de asentamiento del punto U16, con respecto al tiempo.

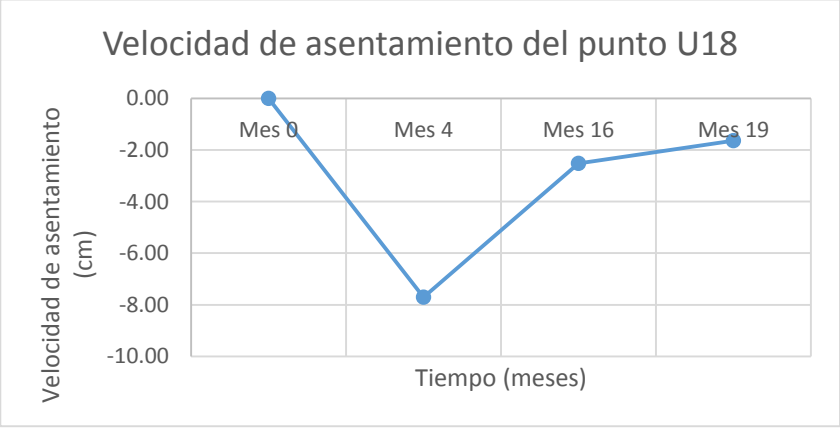

Figura A.V.6. Velocidades de asentamiento del punto U18, con respecto al tiempo.

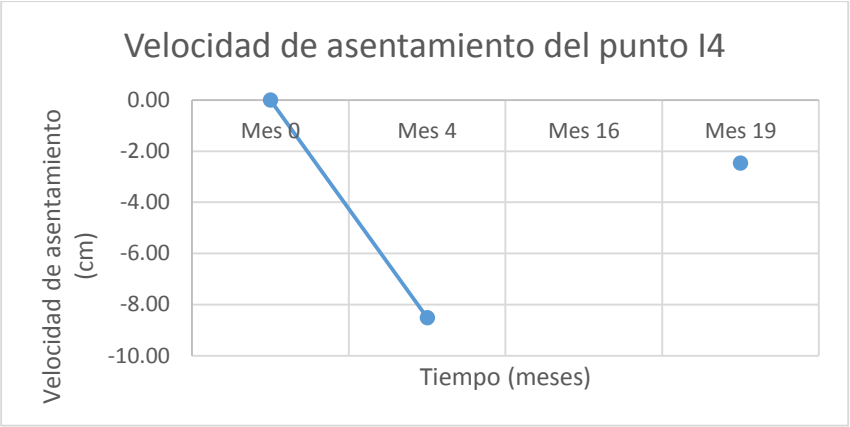

Figura A.V.7. Velocidades de asentamiento del punto I4, con respecto al tiempo.

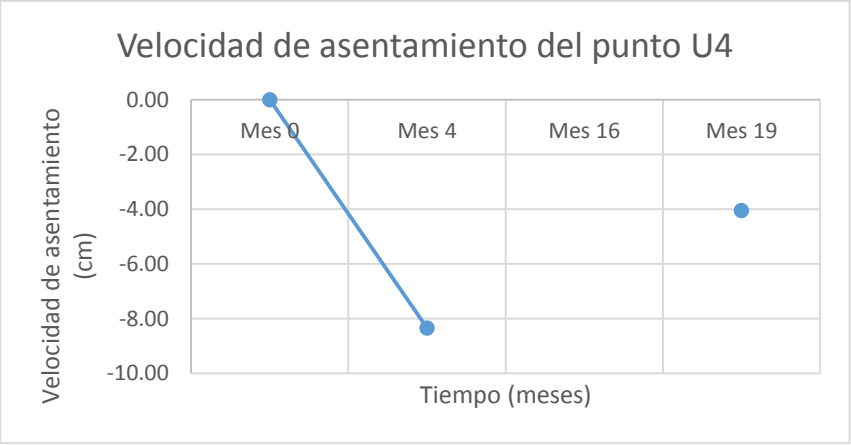

Figura A.V.8. Velocidades de asentamiento del punto U4, con respecto al tiempo.

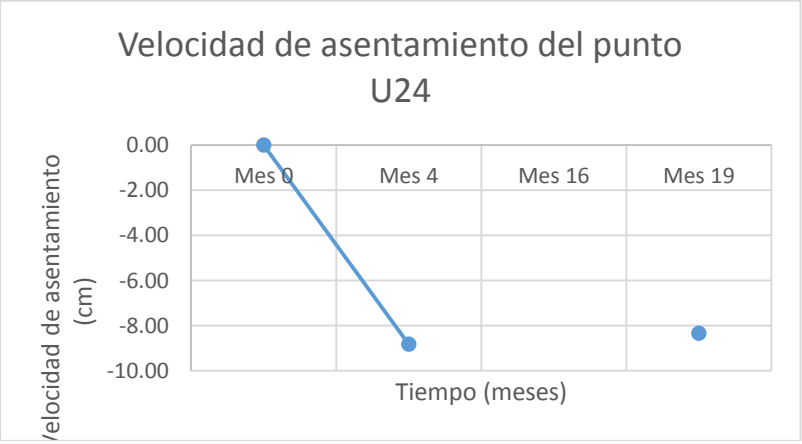

Figura A.V.9. Velocidades de asentamiento del punto U24, con respecto al tiempo.

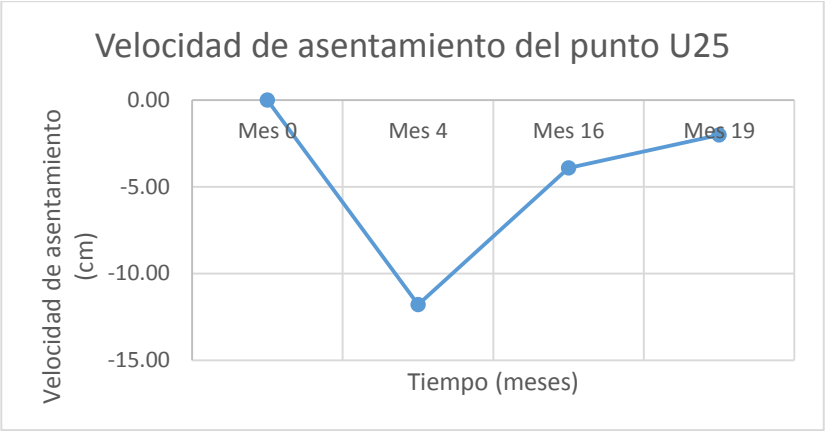

Figura A.V.10. Velocidades de asentamiento del punto U25, con respecto al tiempo.

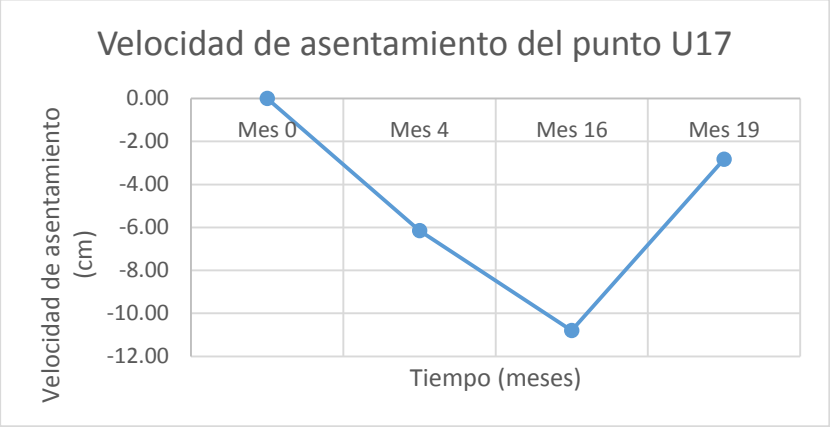

Figura A.V.11. Velocidades de asentamiento del punto U17, con respecto al tiempo.

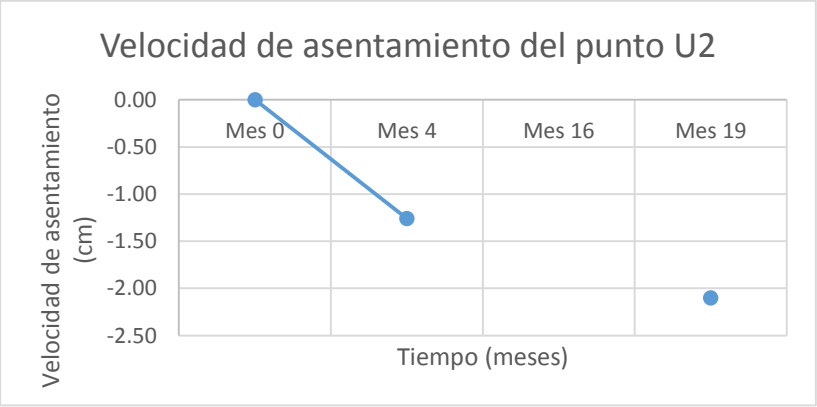

Figura A.V.12. Velocidades de asentamiento del punto U2, con respecto al tiempo.

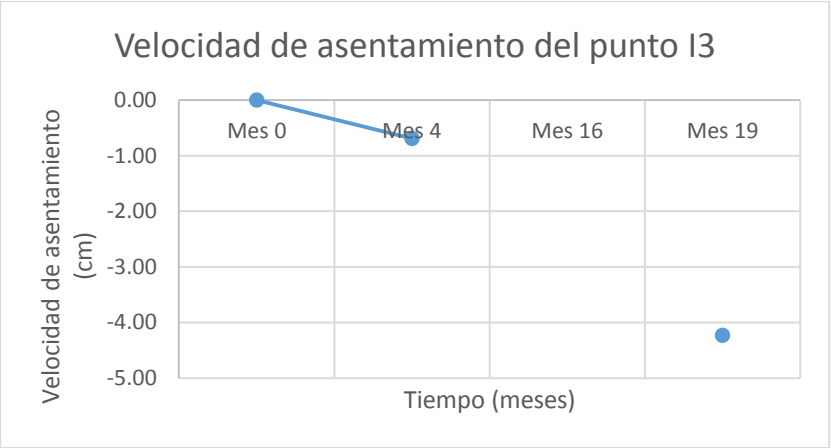

Figura A.V.13. Velocidades de asentamiento del punto I3, con respecto al tiempo.

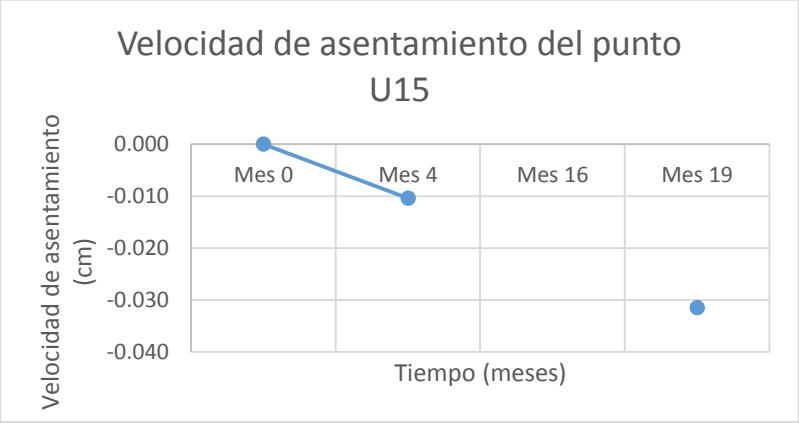

Figura A.V.14. Velocidades de asentamiento del punto U15, con respecto al tiempo.

.

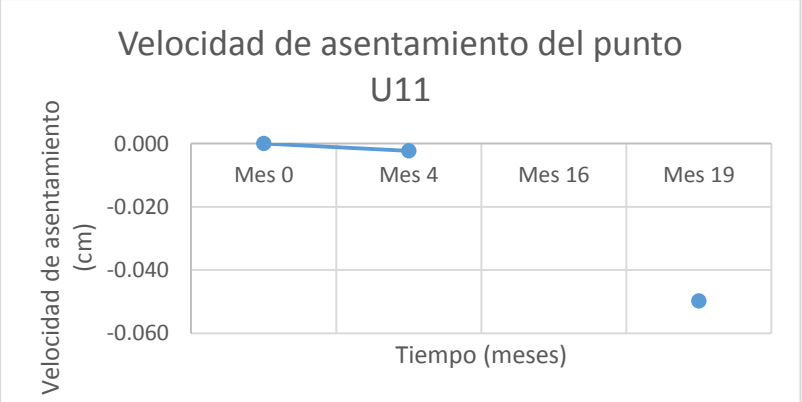

Figura A.V.15. Velocidades de asentamiento del punto U11, con respecto al tiempo

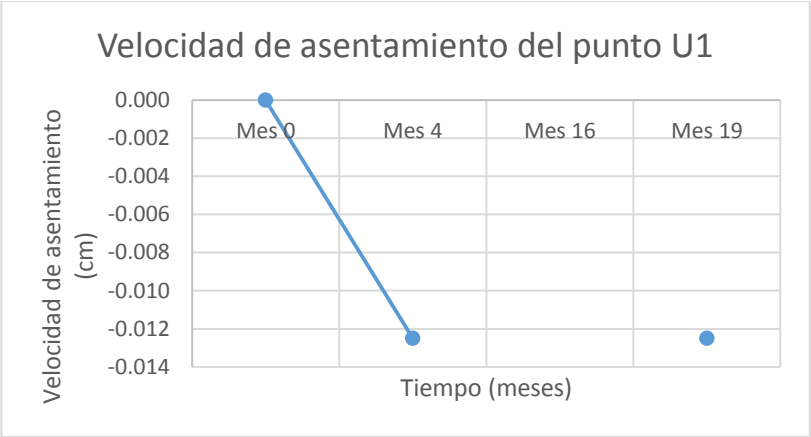

Figura A.V.16. Velocidades de asentamiento del punto U1, con respecto al tiempo.

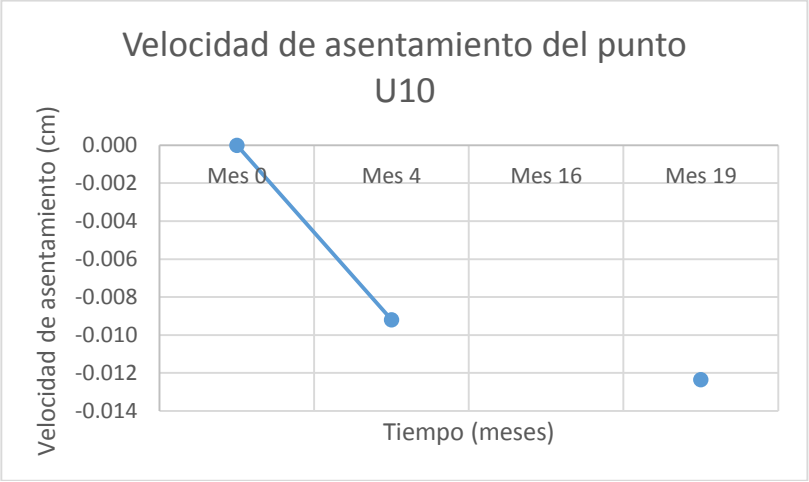

Figura A.V.17. Velocidades de asentamiento del punto U10, con respecto al tiempo.

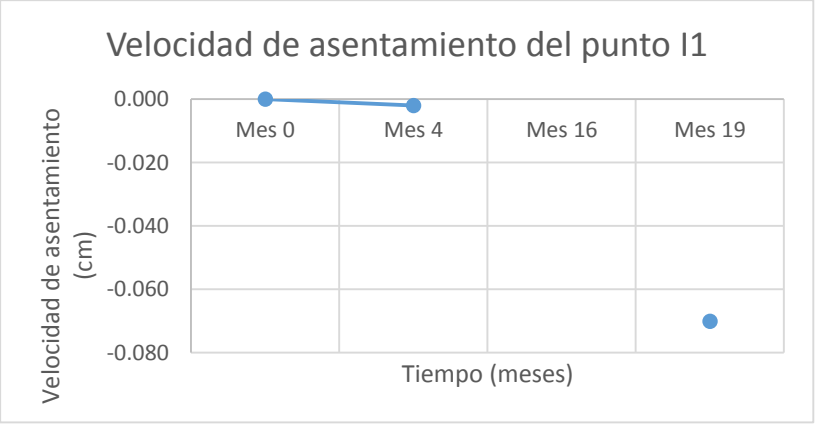

Figura A.V.18. Velocidades de asentamiento del punto I1, con respecto al tiempo.

Anexo VI. Niveles estáticos de los pozos del valle de Querétaro (2009 – 2014)

QUERETARO
Comisión Estatal de Aguas

COMISIÓN ESTATAL DE AGUAS
SUBGERENCIA DE PERFORACIÓN.

No.	No. C.N.A	Nombre del pozo	X (UTM)	Y (UTM)	Elevación de Brocal msnm	Nivel Estático Dic. 2009	Nivel Estático Dic. 2010	Nivel Estático Mayo 2011	Nivel Estático Dic. 2011	Nivel Estático Dic. 2012	Nivel Estático Dic. 2013	Nivel Estático Dic. 2014
1	759	Ejido el Nabo	347166	2292086	1,950.33	80.42	81.44	126.4	86.58	126.9	89.3	90.89
2	396-A	Mompani II	345600	2289242	1,921.61	78.24	77.9	82.7	81.95	83.45	88.65	90.89
3	2041	CEA El Nabo	345371	2288268	1,899.90	134.9	123.62	125.48	126.4	-	Operando	137.59
4	1634	Ejido Jurica	349475	2287014	1,850.00	Abejas	Abejas	70.5	70.7	Cegado	Cegado	Cegado
5	1195	Jurica Mezquites	348779	2286177	1,821.90	113.85	113.12	112.9	112.16	113.15	110.57	108
6	1963	Rcho. San Pedrito	354441	2285856	1,882.01	25.9	26.6	Tapado por piedras	Tapado por piedras	Cegado	Cegado	Cegado
7	1228-A	Ejido Tlacote No. 1	343505	2285154	1,833.50	NSPS	158.15	Operando	Sin orificio	162.45	Tiene piedras	Tiene piedras
8	1978	CEA Loma Bonita	349818	2284988	1,816.52	62.9	62.6	62.33	62.05	62.25	60.9	60.44
9	1707	CEA Garambullo No. 2	349116	2283241	1,843.00	141.7	Colapso	Colapso	Colapso	Colapso	Colapso	Colapso
10	1434	Bachoco	351004	2283393	1,813.73	42.5	37.49	36.3	35.8	35.4	35	33.28
11	2427	Sta. Ma. Magdalena III	346893	2279228	1,799.50	134.62	144.6	136.25	133.1	133.2	130.5	130.87
12	1010	Uniroyal No. 2	351038	2281812	1,805.07	121.77	123.05	NSPS	124.1	-	Operando	Operando
13	1973	CEA San Pedro Martir IV	347432	2281192	1,800.35	167.5	168.8	170.3	169.66	169.9	168.15	164.34
14	609-A	Rcho El Rincón	345265	2281054	1,806.28	133.15	134.3	141.79	142.94	143.3	139.7	138
15	967	Cardanes	350591	2281321	1,803.45	132.72	133.44	134.8	135.8	-	Operando	134.48
16	1322	Industrial II	351744	2280781	1,800.30	114.75	115.25	115.78	116	116.75	115.47	114.65
17	1638	Vidriera Qro. Nte.	351229	2280079	1,804.32	125.67	126.62	128.83	129.5	125.67	122.45	121.72
18	1313-A	Rcho El Rosario	346341	2279716	1,799.25	137.8	139.15	141.4	140	140.35	137.1	139.25
19	958	Carnation No. 2	353259	2279899	1,807.85	112.25	109.48	cegado	cegado	cegado	Cegado	Cegado
20	953	Singer Mexicana No. 2	352618	2279064	1,807.69	130.68	131.95	NSPS	132.2	-	128.1	124.16
21	612-F	Rcho. La Colmena	344440	2279792	1,803.72	137.16	137.7	156.84	153.9	-	142.7	144.13
22	752	Alberca Leticia	358102	2278755	1,840.13	44.20	47.20	46.65	45.28	46.78	46	48.95
23	977-A	Tecnológico	351991	2278559	1,810.75	138.26	138.26	NSPS	138	134.6	129.48	129.6
24	982	Rcho. Las Adjuntas	344744	2278574	1,798.97	134.74	135.3	activo	137.1	137.4	130.25	131.56
25	1639	Instituto San Javier	355293	2278744	1,824.62	110.2	72	87.2	76.5	77.15	75.43	71.28
26	1977	Rcho. Jan	346456	2277310	1,799.44	NSPS	NSPS	66.2	65.3	-	128.75	127.2
27	745	Colegio Fray Luis	353095	2277032	1,813.83	149.78	150.1	NSPS	146.9	146.15	141.88	137.05
28	914	CEA Capilla 1	350834	2276380	1,803.06	Operando.	Operando.	141.2	141.05	139.2	133.15	127.43
29	606	Rcho. Sta. Ma. el Retablo	348846	2276173	1,801.13	62.46	59.1	seco	seco	seco	seco	seco
30	988-A	CEA Expositor No. 2-B	356650	2276136	1,818.00	Operando	174.53	175.82	175.8	175.6	165.8	164.4
31	653-A	Ejido Sta. Virginia	349900	2274577	1,803.54	98.95	100.12	98.8	99	-	96.7	97.7
32	628	Rcho. Vanegas	350536	2274107	1,805.25	143.26	144.2	144.65	142.4	-	Operando	129.07
33	629	El Cerrito Frcc. 2	348247	2273979	1,807.54	143.6	144	145.44	141.1	141.85	Brocal alto (2m)	136
34	1935	Ejido Los Angeles	345579	2273859	1,837.70	164.5	Operando.	NSPS	181.48	176.5	Sonda atorada	162.5
35	641-A	CEA Tejeda	351815	2272915	1,809.01	146.0	147.7	147.85	144.85	-	141	139.3
36	1746-A	CEA El Pueblito 2A	349450	2272271	1,805.00	150.8	152.3	153.28	153.78	153.45	Operando	147.2
37	1905	CEA Reforma Agraria	353795	2272498	1,900.00	236.75	236.9	237.1	235	233	230.2	229
38	999-A	Ejido El Romeral	343449	2271929	1,829.11	165.5	Operando.	164.6	165.8	164.93	164.2	164.7
39	1239	CEA Colinas del Bosque	351693	2270923	1,830.80	65.7	70.18	71.2	72.7	No hay paso	No hay paso	No hay paso
40	1979	INSTALACIONES CEA	352500	2277300	1,808.62	133.00	129.86	135.00	133.97	134.27	132.23	131.45

Elaboró:
Ing. Ignacio Ortiz Villaseñor
Subgerente de Perforación

Figura A.VI.1. Historial de niveles de abatimiento de los pozos del valle de Querétaro, periodo (2009 – 2014)

Anexo VII. Perfil longitudinal donde se ubicara los drenes propuestos (Posible linea de investigación)

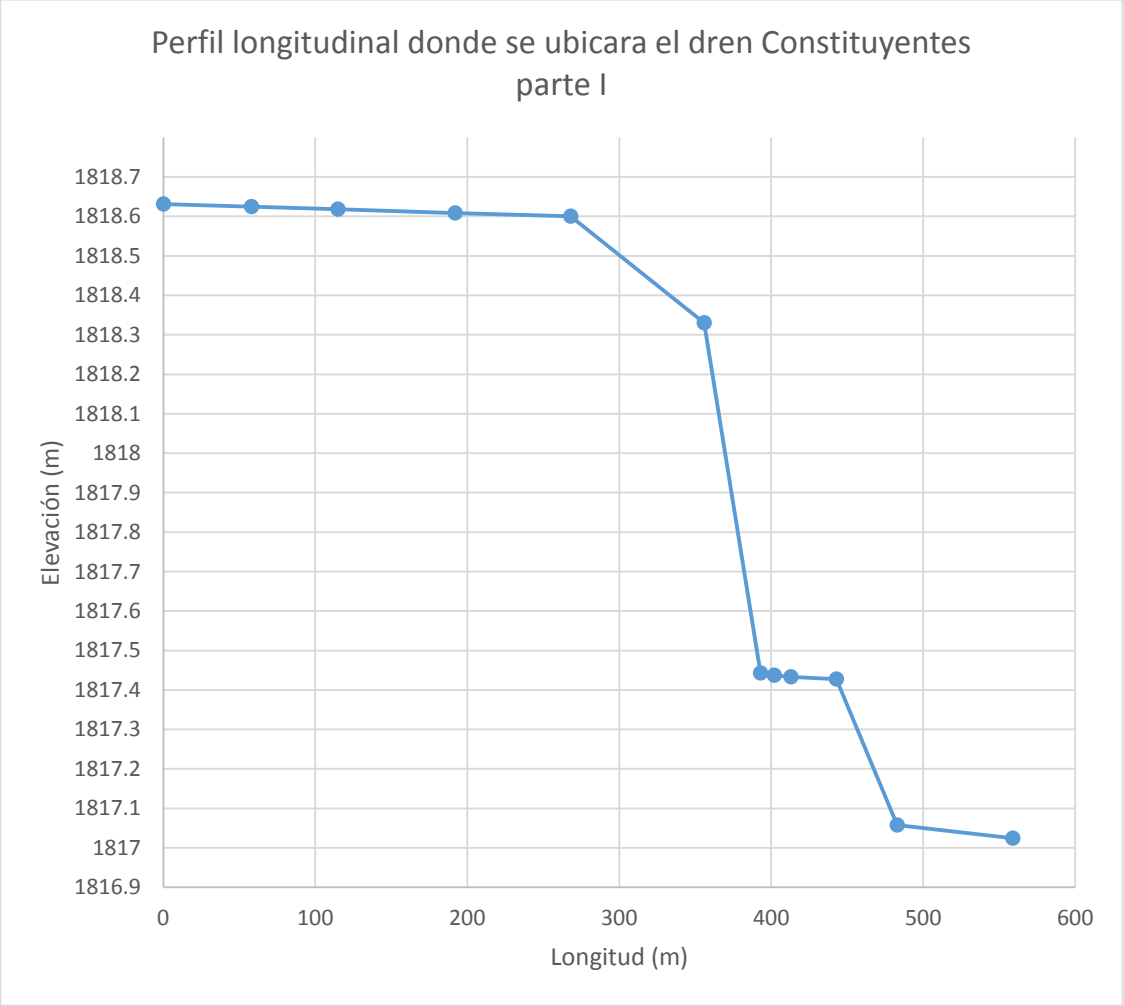

Figura A.VII.1. Perfil longitudinal donde se ubicara el dren Constituyentes parte III

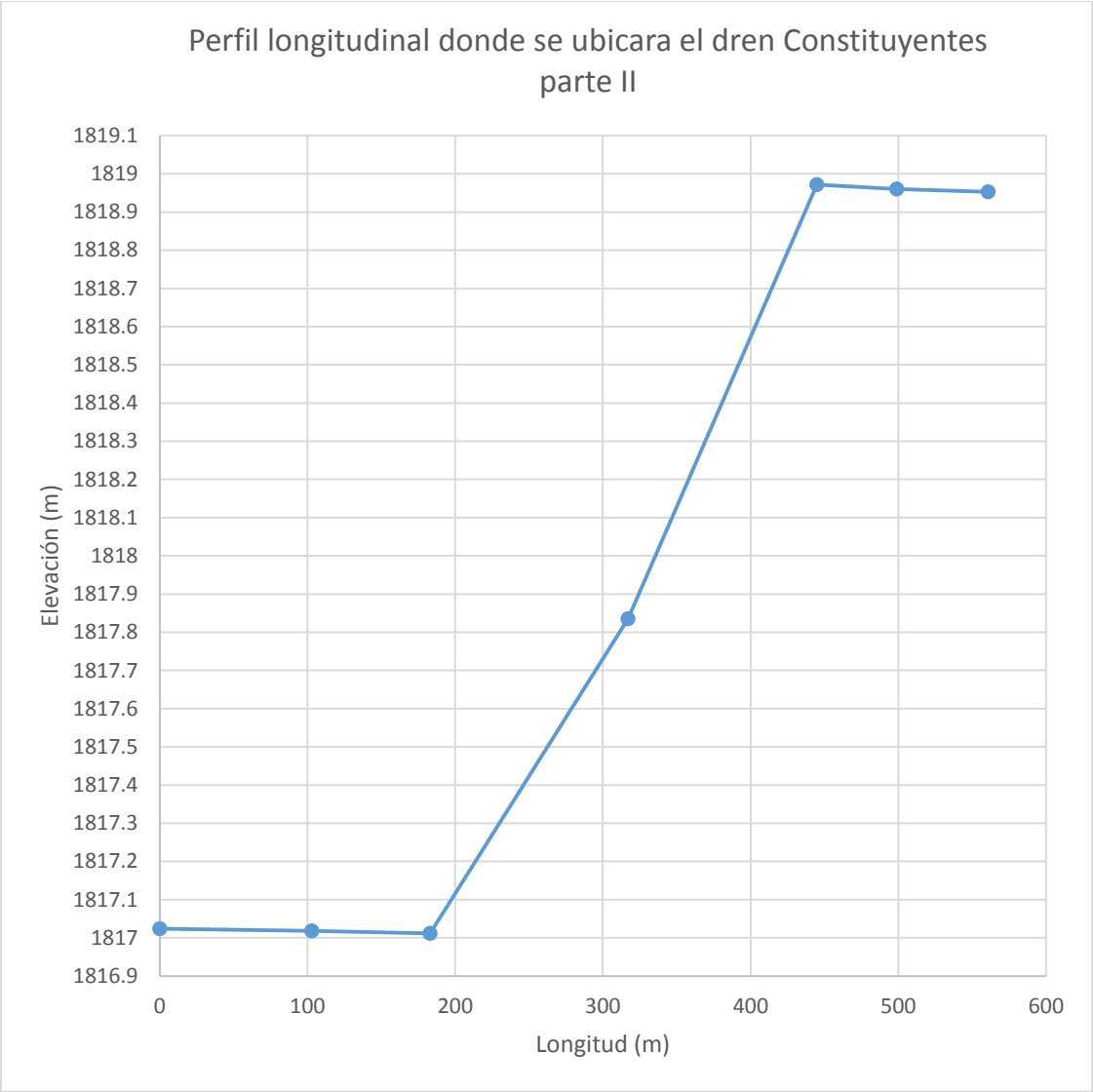

Figura A.VII.2. Perfil longitudinal donde se ubicara el dren Constituyentes parte II

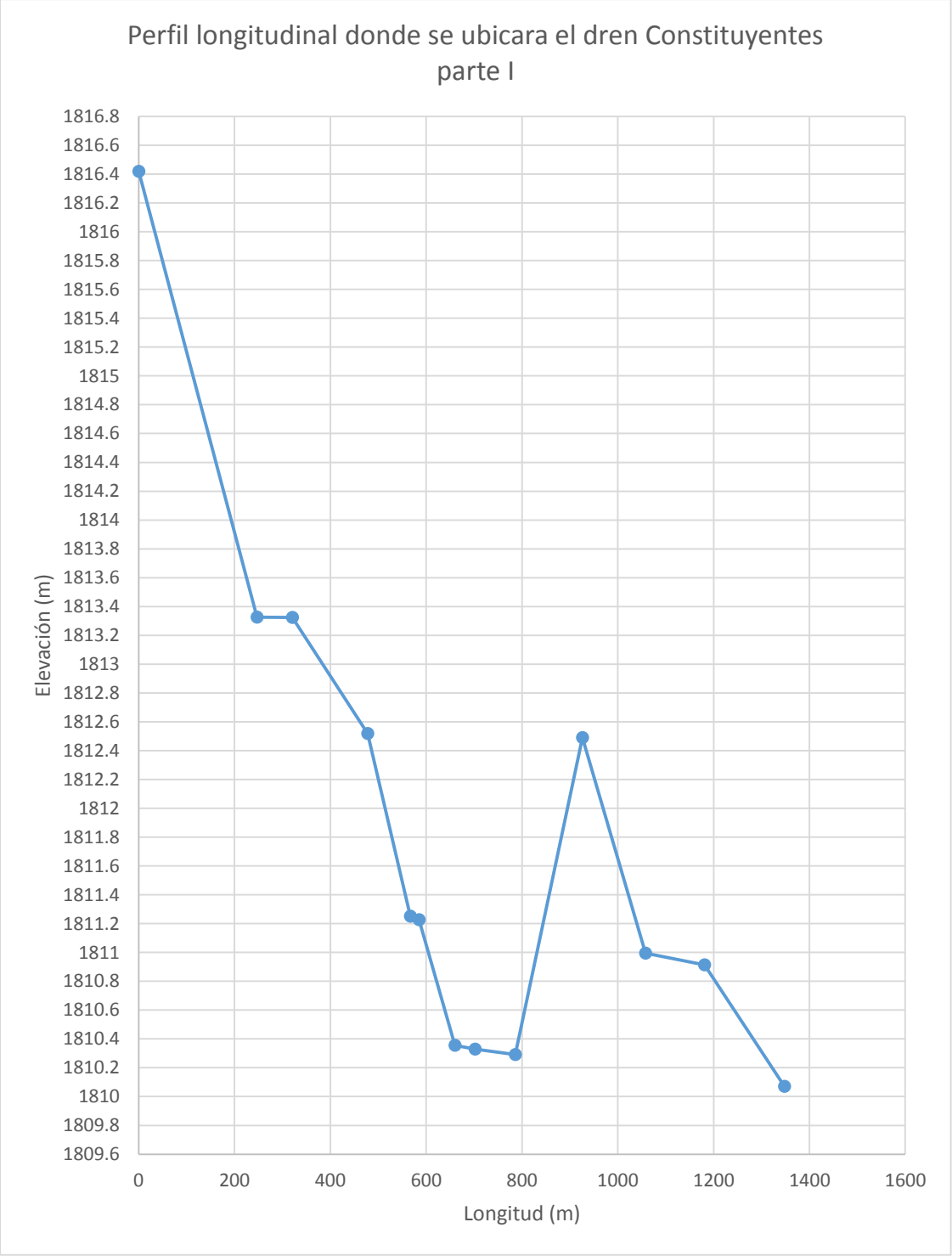

Figura A.VII.3. Perfil longitudinal donde se ubicara el dren Constituyentes parte I

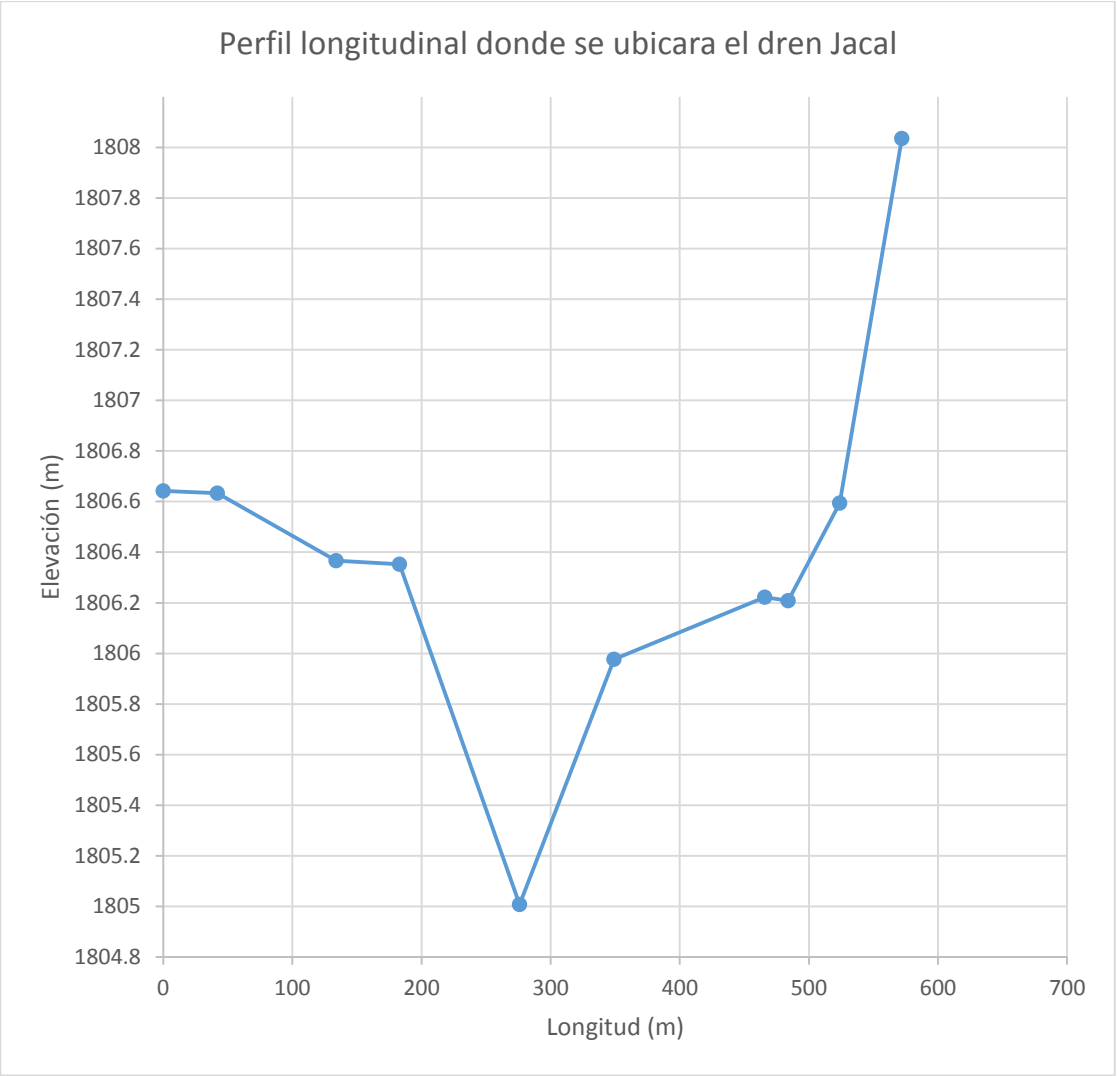

Figura A.VII.4. Perfil longitudinal donde se ubicara el dren Jacal

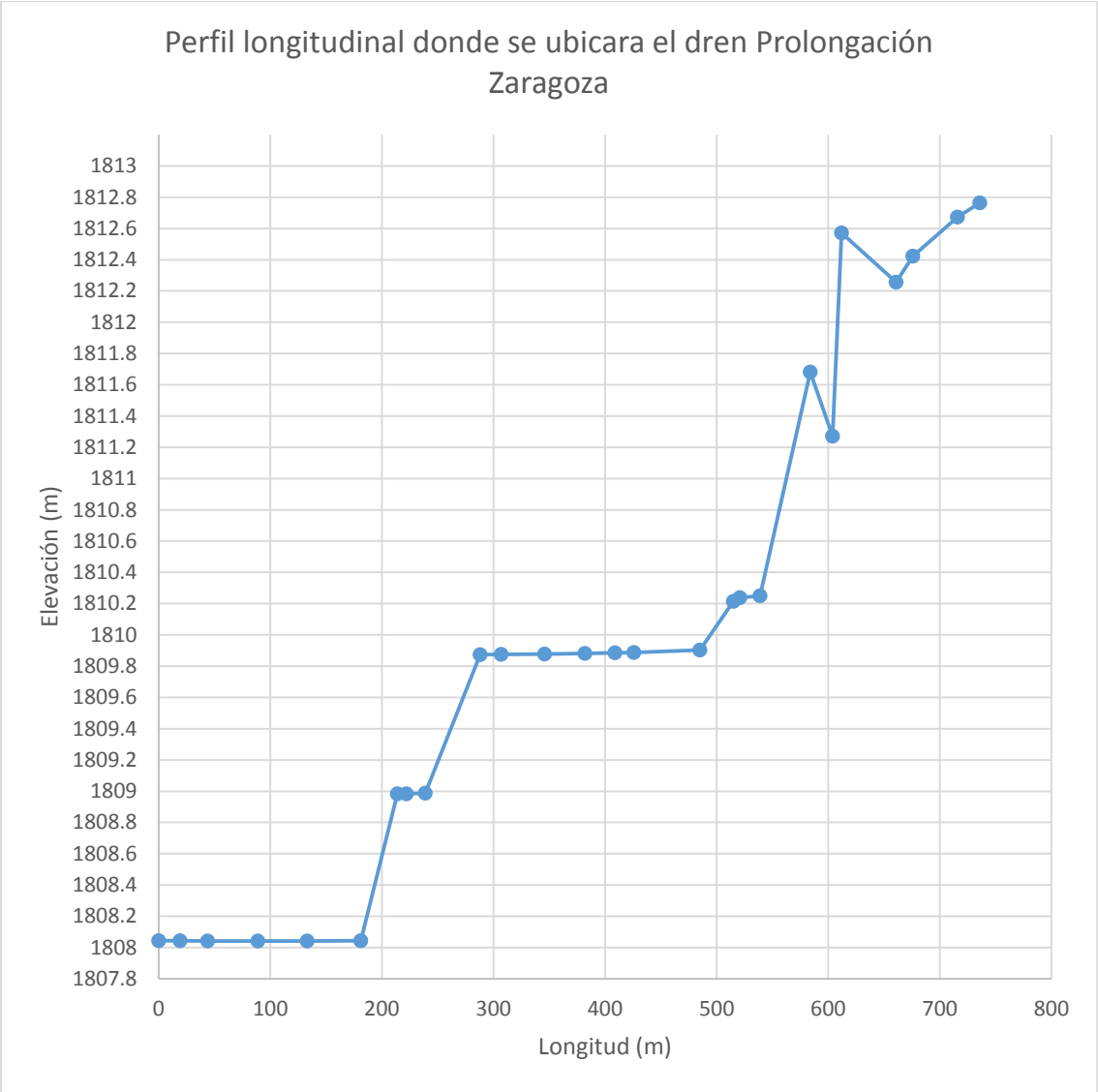

Figura A.VII.5. Perfil longitudinal donde se ubicara el dren Prolongación Zaragoza