



Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Tierra

Instituto de Geofísica

Caracterización de la deformación en las ciudades de Celaya y Salamanca a partir de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) y GPS

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
PRESENTA

CARMEN ASTRID LÓPEZ CASTILLO

TUTOR:

Dr. Gerardo Suárez Reynoso, Instituto de Geofísica, UNAM

México, Distrito Federal

Diciembre 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres y mis hermanos, por su amor y apoyo aunque a veces no les doy otra opción...

A ti, pues es tu culpa

El que me levante todos los días.

A ti, por confiar

A pesar de las dudas.

A ti, por siempre acompañarme

Aún en la lejanía.

A ti, por aceptarme

Sin importar mi locura.

A ti, por calmar

Mis tormentas.

A ti, por crear la eternidad

En mi efímera vida.

No sólo por eso, es a ti.

Agradecimientos

A todas y cada una de esas personas por las cuales fue posible lograr una meta más en mi vida.

Ustedes quienes me brindaron su apoyo, sus conocimientos, su amistad, su amor, su ayuda y su compañía, porque una parte de este trabajo también es suya, además de dejar una huella imborrable en mi persona.

A la Universidad Nacional Autónoma de México porque me ha brindado grandes oportunidades y sin ellas no sería la persona que hoy soy.

A CONACTY por la beca que me otorgo durante la realización de mis estudios de Posgrado.

Al Instituto Tecnológico de Celaya por el trato amable de su personal que nos brindó las facilidades para colocar una estación GPS.

A la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado por proporcionar los datos sobre los pozos localizados dentro de la ciudad de Celaya para el desarrollo de este trabajo, además de la ayuda que se recibió de su personal para hacer la solicitud de dicha información.

A CONAGUA por facilitar los datos del acuífero del Valle de Celaya.

Índice

RESUMEN	1
1. SUBSIDENCIA EN ZONAS URBANAS DE MÉXICO	3
1.1 SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE CELAYA.....	5
1.2 SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE SALAMANCA.....	12
2. ZONA DE ESTUDIO	14
2.1 LOCALIZACIÓN	14
2.2 GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	15
2.2.1 <i>Geología de Celaya</i>	15
2.2.2 <i>Geología de Salamanca</i>	16
2.3 HIDROGEOLOGÍA	18
2.3.1 <i>Hidrogeología de Celaya</i>	18
2.3.2 <i>Hidrogeología de Salamanca</i>	23
3. FUNDAMENTOS DE INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (INSAR).....	25
3.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SAR.	25
3.2 INTERFEROGRAMA Y FASE INTERFEROMÉTRICA	26
3.3 COHERENCIA Y ERROR EN INSAR	29
3.4 SERIES TEMPORALES	30
3.4.1 <i>Método SBAS</i>	30
3.4.2 <i>Método NSBAS</i>	30
4. METODOLOGÍA Y SELECCIÓN DE DATOS	32
4.1 SELECCIÓN DE DATOS.....	32
4.2 CÁLCULO DE LOS INTERFEROGRAMAS.....	33
4.2.1 <i>Correcciones por desenvolvimiento de fase</i>	35
4.2.2 <i>Correcciones atmosféricas</i>	35
4.3 GENERACIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO.....	36
4.4 CARTOGRAFÍA DE FALLAS Y LEVANTAMIENTOS GPS.....	40
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
5.1 INSAR: ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES Y MAPAS DE PROMEDIO PARA LA CIUDAD DE CELAYA	42
5.2 COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS	49
5.3 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.....	51
5.4 PERFILES GPS.....	61
5.5 MAPEO DE FALLAS Y REGISTRO FOTOGRÁFICO	70
5.6 SERIES TEMPORALES Y MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO DE LA CIUDAD DE SALAMANCA	75
5.7 DISCUSIÓN.....	79
6. CONCLUSIONES	82
7. REFERENCIAS	84
APÉNDICE I: REGISTRO FOTOGRÁFICO	89

Índice de figuras

Figura 1.1 Mapa de la ciudad de Celaya con la localización de las seis fallas principales (líneas negras) y en la parte inferior se muestra la sección AA'. Tomado de Trujillo-Candelaria (2009).....	5
Figura 1.2 Interferograma de las imágenes 11/02/2006-27/05/2006, de la ciudad de Celaya se ve claramente el diferente comportamiento entre la zona este (hundimiento) y la oeste (zona de menor hundimiento), Además del hundimiento presente entre las fallas Oriente y Universidad Pedagógica. Ávila-Olivera et al. (2008).	6
Figura 1.3 Plano de la Ciudad de Celaya, líneas negras las seis fallas con la nomenclatura de las fallas usada en la Tabla 1.1. Tomado de Huizar-Álvarez (2010).	8
Figura 1.4 Modelo de hundimientos a partir de datos GPS en la ciudad de Celaya, Tomada de Díaz-Salmerón et al. 2010. 9	
Figura 1.5 Resultados obtenidos de para las ciudades de Celaya, Salamanca e Irapuato. Nótese la localización de la mayor deformación en la ciudad de Celaya. Tomada de Chaussard E. et al. 2004.	9
Figura 1.6 Plano de la ciudad de Salamanca, se observa la falla reportada por primera vez Garduño et. al, (2001), la refinería principal causa de contaminación en la zona y el río Lerma.	13
Figura 2.1 Mapa donde se localiza la zona de estudio, las ciudades de Celaya y Salamanca, Guanajuato. Mapa topográfico base utilizado Global Multi-Resolution Topography (GMRT) (Ryan et al., 2009).	14
Figura 2.2 Mapa que muestra la geología de la zona de estudio, donde se muestran las principales unidades geológicas y la localización de Celaya y Salamanca. Modificada de la Carta Querétaro 77_F14-10 1:250 del Servicio Geológico Mexicano.	17
Figura 2.3 Mapa de estado de Guanajuato donde se observa los veinte acuíferos establecidos por CONAGUA (líneas rojas), además se observa la división política de los municipios del estado (líneas grises). Tomada de CONAGUA.	18
Figura 2.4 Esquema de la disposición del acuífero del Valle de Celaya debajo de la ciudad de Celaya.	20
Figura 2.5 Gráfico de la precipitación anual en mm recabada de 1951 a 2005. Eje horizontal representa los meses del año y el vertical los mm de precipitación (INEGI, 2005).	20
Figura 2.6 Mapas interpolados de los niveles estáticos a partir de los datos proporcionados de los pozos de JUMAPA, abajo izquierda 2002, abajo derecha 2004, arriba izquierda 2006 y arriba derecha 2008.	21
Figura 2.7 Arriba Mapa de niveles estáticos del año 2009, para el acuífero del Valle de Celaya generado por los datos proporcionados por CONAGUA, donde se observa un nivel estático más profundo en la zona oeste y central de Celaya. Abajo Mapa de niveles estáticos del año 2010, para el acuífero del Valle de Celaya, donde en la parte central y oeste de Celaya se reportan niveles estáticos más profundos.	22
Figura 2.8 Mapa pizométrico del acuífero somero para noviembre de 1998	24
Figura 2.9 Mapa pizométrico del acuífero intermedio para noviembre de 1998.	24
Figura 3.1 Imagen que muestra la geometría del sistema SAR.	26
Figura 4.1 Gráfica de la línea base perpendicular y el periodo de tiempo de adquisición de las imágenes, se observa por que la decisión de dividir el cálculo en dos series temporales.	37
Figura 4.2 Diagrama de que muestra las etapas para el cálculo de las series de tiempo, dentro de la plataforma GIANT. Modificada de Agram et. al. 2012.	39
Figura 4.3 Estación base colocada en el campus I del Instituto Tecnológico de Celaya, donde se instaló en el Laboratorio de Electrónica.	41
Figura 4.4 Localización de los 17 perfiles de GPS medidos dentro de la ciudad de Celaya. Su disposición va de acuerdo a las zonas donde en los interferogramas se registró mayor deformación y a las observaciones in situ. También se localizan las fallas y sitios de referencia dentro de la ciudad.	41
Figura 5.1 A) Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo de tiempo para el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, usando sólo los 11 interferogramas generados por ROI_PAC. Se observa la mayor subsidencia entre Poniente y Universidad Pedagógica. B) En la gráfica se observa de las series de tiempo para la estrella roja indicada en el mapa A, series filtradas en estrellas rojas y series sin filtrar puntos azules; se observa en este punto como la deformación aumenta hasta casi los 3.8 cm en Mayo de 2010 y después esta deformación parece ir disminuyendo con una tendencia a aumentar.	43
Figura 5.2 Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, con los 17 pares interferométricos generados por ISCE. Es evidente que son muy poco los pixeles donde se logró hacer la inversión.	45
Figura 5.3 A) Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo de tiempo para el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, usando sólo los 11 mejores interferogramas generados por ISCE. Se observa subsidencia en la parte sur de la falla Oriente y en la parte central de la ciudad de Celaya entre las fallas Poniente y	

Universidad Pedagógica. Sin embargo observamos lo que parece ser un error en el proceso de desenvolvimiento de fase entre la falla Oriente y Poniente en el área de la Central Camionera, con un aumento abrupto en la tasa de deformación. B) En la gráfica de las series de tiempo, series filtradas en estrellas rojas y series sin filtrar puntos azules; se observa en este punto como la deformación aumenta hasta casi los 3.33 cm en Mayo de 2010 y después esta deformación parece ir disminuyendo hasta llegar al mes de septiembre del mismo año. 46

Figura 5.4 El interferograma 2010/05/01-2010/06/05, se observa claramente la zona central de la ciudad así como una deformación máxima localizada sobre la falla Oriente y sus alrededores. 48

Figura 5.5 Interferograma 20100710-20100814 se observa una menor deformación pero es importante resaltar que la deformación máxima sigue apareciendo en la parte central de Celaya sobre la falla Oriente. 48

Figura 5.6 Figura donde se comparan los resultado de Díaz-Salmerón et al. (2010) y los resultado de este estudio, las líneas de colores son el modelo resultado de las campañas de GPS y debajo el interferograma mayo-junio. 50

Figura 5.7 Mapa donde se muestran la ciudad de Celaya y los pozos de extracción dentro de ella administrados por JUMAPA. Los puntos azules son pozos que cuentan con secciones litológico y los verdes aquellos los cuales no disponen con esta información. Las líneas rojas son las cinco secciones que se hicieron con base en los datos de cortes litológicos (Figuras de 5.8-5.12). 54

Figura 5.8 Sección A-A* corresponde a la zona norte de la Ciudad de Celaya, la localizada en la Figura 5.7, corta las fallas Oriente y Universidad Pedagógica. Se observa un cambio de las unidades litológicas entre los pozos Lindavista - Residencial Tecnológico. 55

Figura 5.9 Sección B-B* corresponde a la zona centro de la Ciudad de Celaya, la localizada en la Figura 5.7, corta las fallas Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica. Se observa un cambio de las unidades litológicas entre los pozos Alameda y Zapote. 56

Figura 5.10 Sección C-C* corresponde a la zona sur de la Ciudad de Celaya, la localizada en la Figura 5.7, corta las fallas Oriente y Poniente. Se observa un cambio de las unidades litológicas entre los pozos Arboledas del Pedregal y El Cantar. 57

Figura 5.11 Sección D-D* corresponde a la zona oeste de Celaya, se observa su localización en la figura 5.7, paralela a las fallas Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica, se observa que en general el espesor de la unidad lacustre es de aproximadamente 100 m. 58

Figura 5.12 Sección E-E* corresponde a la zona este de Celaya, se observa su localización en la Figura 5.7, paralela a las fallas Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica, se observa que en general el espesor de la unidad lacustre mayor a la observada en la zona oeste. 59

Figura 5.13 Mapa de isopacas de espesor de sedimentos recientes, las líneas azules son espesores más delgados y los rojos espesores más gruesos. Es evidente la relación del cambio de espesor (zona de transición) y la zona de fallas. 60

Figura 5.14 Gráfica de la altitud y la distancia entre los puntos medidos de los perfiles 1 y 2, se observa un desnivel acumulado de 0.75 m para el perfil 1 y de 1 m para el perfil 2. Además es claro que hay mayor altitud en la zona Oeste que en la zona Este de la ciudad. 62

Figura 5.15 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, el desnivel acumulado del lado izquierdo corresponde a la falla Oriente, 3m. Y el desnivel acumulado de lado izquierdo corresponde a la falla Universidad Pedagógica, 1.5m. 63

Figura 5.16 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos correspondientes al perfil 8 el desnivel acumulado corresponde a la falla Universidad Pedagógica y es de aproximadamente 1.2 m. 63

Figura 5.17 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, de izquierda a derecha el primer desnivel corresponde a la Falla Poniente, el segundo desnivel a la Falla Oriente y el tercero a la falla Universidad Pedagógica. 64

Figura 5.18 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, el desnivel acumulado de a la izquierda corresponde a la falla Poniente, 0.75 m, las mediciones antes de la falla Poniente son muy dispersas probablemente por los problemas que se tuvieron para hacer las lecturas. A la derecha desnivel acumulado de la falla Oriente de aproximadamente 1 m. 65

Figura 5.19 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, el desnivel acumulado pertenece a la falla Poniente es de alrededor de 1.2 m, mayor que el registrado sobre el perfil 13. 65

Figura 5.20 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, el desnivel acumulado pertenece a la falla Oriente es de alrededor de 1.6 m, mayor que el registrado sobre el perfil 13. 66

Figura 5.21 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 10 (rosa), 11 (marrón) y 12 (azul). Se observa el desnivel acumulado a lo largo de la falla Oriente de 3 m, perfil 10 y 11. Y el desnivel acumulado a lo largo de la falla Universidad Pedagógica de 1.5 m, perfiles 11 y 12.	66
Figura 5.22 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 4 (azul), 5 (rosa) y 7(naranja). Se observa el desnivel acumulado a lo largo de la falla Poniente de 1 a 0.5 m, perfil 4 y 5. Y el desnivel acumulado a lo largo de la falla Oriente de 2.5 m, perfiles 5 y 7.	68
Figura 5.23 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 17(morado), 15 (azul) y 6(verde). Se observa el desnivel acumulado a lo largo de la falla Poniente de 1 a 1.5 m, perfil 17 y 15. Y el desnivel acumulado a lo largo de la falla Oriente de 1.75 m, perfiles 15 y 6.	68
Figura 5.24 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 2, 8, 3, 14 y 13, para describir el comportamiento del desnivel de norte (arriba) a sur (abajo) a lo largo de la Falla Oriente, es evidente que el mayor desnivel acumulado se localiza en la zona centro-norte y central.	69
Figura 5.26 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura de la ciudad de Celaya.	70
Figura 5.27 A) Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo para la ciudad de Salamanca en el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010 usando los 17 pares interferométricos. En el mapa se observa como la deformación aumenta gradualmente además de la clara división marcada por la falla entre una zona estable y otra afectada por la subsidencia. B) En la gráfica se observan las series de tiempo obtenidas, los puntos azules son las series sin filtrar donde aumenta y disminuyen los valores sin ninguna tendencia, correspondiente a la zona de máxima deformación (estrella roja en el mapa). En el caso de las series de tiempo filtradas se observa que la deformación aumenta y después parece oscilar pero en general parece que ya no se tiene deformación.	77
Figura 5.28 A) Mapa de promedio anual resultados de las series de tiempo para la ciudad de Salamanca en el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010 usando sólo 11 pares interferométricos, se observa la ciudad dividida la falla y como su régimen de subsidencia. B) En la gráfica se observa las series sin filtrar, puntos azules y las series filtradas estrellas roja, correspondiente a la zona de máxima deformación (estrella roja en el mapa). A pesar de observar en las series sin filtrar dos valores que parecen discrepar demasiado, es evidente la tendencia de como al pasar el tiempo aumenta la subsidencia, la cual es más clara en las series de tiempo filtradas.	78
Figura 1 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura e Celaya generados por la Falla Poniente.	90
Figura 2 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura de Celaya generados por la Falla Oriente.	96
Figura 3 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura e Celaya generados por la Falla Universidad Pedagógica.	96

Índice de tablas

Tabla 1.1 Registro de los cambios de longitud de las fallas, así como los valores máximos y mínimos de la subsidencia. Modificado de Huizar-Álvarez (2010).	8
Tabla 1.2 Localización y tipos de afectaciones reportadas por Protección Civil de Celaya, dentro de la ciudad	10
Tabla 1.3 Localización y tipos de afectaciones reportadas por Protección Civil de Celaya en los alrededores de la ciudad.	11
Tabla 4.1 Imágenes SAR adquiridas para la ciudad de Celaya entre los años de 2003 a 2010.	32
Tabla 5.1 Interferogramas calculados para el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, los que se encuentran en letras rojas son los que se descartaron y los sombreados en gris son los utilizados para el análisis de interferogramas por separado.	44
Tabla 5.2 Tabla de comparación de los resultados en la tasa de deformación de estudios previos en la ciudad de Celaya.	49
Tabla 5.3 Datos del caudal por zonas de la ciudad de Celaya para el primer semestre de 2008.	53

Índice de fotografías

Fotografía 1 Calle Vasco de Quiroga en la parte sur de la ciudad, localizado detrás de la Central de Abastos. Se observa un claro desnivel que cruza la calle, afecta el camellón y también a la Av. Paseo del Sol.....	71
Fotografía 5 Sobre la calle Pedro de Gante también se pudo seguir el desnivel sobre la calle y los daños en una casa habitación la cual fue abandonada por el estado en el que se encuentra.	71
Fotografía 9 Calle Francisco I. Madero se observa el desnivel sobre estas calles y daños en la Iglesia de la Purísima concepción y en un estacionamiento frente a la iglesia.	71
Fotografía 14 Calle Plan de Igual se observa un desnivel de aproximadamente 50 cm que afecta la carpeta asfáltica, la banqueta y se encuentra junto al edificio habitacional una casa totalmente destruidas.	72
Fotografía 18 En la calle Francisco I. Madero se observa un desnivel más pronunciado de alrededor de 1.50 m se observan daños significativos en las bardas de las casa y la construcción de dos conjuntos de escalones	72
Fotografía 19 En la calle Acapulco se puede observar un desnivel de casi dos metros. Se ven al menos cuatro casas afectadas, una totalmente partida por la mitad, otra que sólo queda la barda de la construcción original y al parecer se encuentran ya deshabitadas.	72
Fotografía 23 Sobre la calle Guillermo Prieto se observa negocios que fueron separados por el desnivel. Además de otros con grietas y la construcción de varios escalones.	73
Fotografía 24 Sobre la calle Jalisco se encontraron serias afectaciones en las bardas y banquetas, y un desnivel aproximado de 1.50 m.	73
Fotografía 28 Se observa un desnivel sobre la calle Manuel Orozco y Berra donde se observa la banqueta destruida, además de una barda construida acorde al desnivel de la calle.....	73
Fotografía 33 Sobre la calle Guillermo Prieto se observaron agrietamientos en las bardas y un pequeño desnivel en el pavimento y algunas pequeñas afectaciones sobre la acera.	74
Fotografía 34 Se observa los daños sobre la calle Presa de la amistad el asfalto esta levantado del nivel de la acera de lado derecho de la calle y se observan daños sobre las casas en especial en la carpintería evidente en el zaguán	74
Fotografía 1 Calle Vasco de Quiroga en la parte sur de la ciudad, localizado detrás de la Central de Abastos. Se observa un claro desnivel que cruza la calle, afecta el camellón y también a la Av. Pase del Sol.....	90
Fotografía 2 En la calle Francisco Villa frente al mercado “El Dorado” se observó un desnivel que afecta a dicho lugar aún que su ubicación no queda tan cerca de la falla Oriente.....	90
Fotografía 3 Calle Antonio Plaza frente a la central de autobuses se observa como un desnivel afecta la calle de manera diagonal quedando en el nivel inferior la central camionera.	90
Fotografía 4 Sobre la calle Pedro de Gante también se pudo seguir el desnivel sobre la calle y los daños en una casa habitación la cual fue abandonada por el estado en el que se encuentra.	91
Fotografía 5 Calle Fray Toribio Motolinía evidente desnivel aproximadamente de un metro sobre la calle en la banqueta se observan cuatro escalones construidos por este problema. Se ve también el cambio de nivel en las casas.	91
Fotografía 6 En la esquina de las calles Luis Velasco Mendoza y Ignacio Ramírez se localiza un terreno baldío, la casa localizada en este lugar tuvo que ser demolida por los daños estructurales que presentaba.	92
Fotografía 7 Esquina de las calles Luis Cortázar y el Blvd. Adolfo López Mateos se observa el desnivel sobre la calle, pero es más evidente entre las construcciones donde está en un nivel más alto el edificio al este y las otras casa están más abajo.	92
Fotografía 8 Esquina de las calles Venustiano Carranza y José María Morelos se observaron afectaciones en diversos negocios de esa esquina.....	93
Fotografía 9 Calle Francisco I. Madero se observa el desnivel sobre estas calles y daños en la Iglesia de la Purísima concepción y en un estacionamiento frente a la iglesia.....	93
Fotografía 10 Calle 5 de Mayo se observa un desnivel de aproximadamente 70 cm, se colocaron escalones en la banqueta y daños en las bardas de las casas	94
Fotografía 11 Esquina de las calles Guadalupe y La Paz se observa un desnivel de a aproximadamente 50 cm y algunos daños en el pavimento y banquetas.....	94
Fotografía 12 Calle Aguilar y Maya sólo se notada un pequeño daños en el pavimento y banqueta de la calle de entre unos 20 cm a 30 cm.....	94
Fotografía 13 Sobre la calle Yucatán sólo se observaron agrietamientos en el pavimento y el las banquetas.....	95
Fotografía 14 Calle Plan de Igual se observa un desnivel de aproximadamente 50 cm que afecta la carpeta asfáltica, la banqueta y se encuentra junto al edificio habitacional una casa totalmente destruidas.	95

Fotografía 15 Esquina de la Blvd. Adolfo López Mateos y Calle Ocio y Ocampo se observa un desnivel de aproximadamente un metro que ha afectado la banqueta donde se han colocado cuatro escalones.....	97
Fotografía 16 Esquina de las calles Plan de Ayutla norte, Avenallanal y Dolores María, desnivel de aproximadamente un metro con afectación en la carpeta asfáltica, banqueta y se observa también la afectación en ese edificio que se utiliza como hotel.	97
Fotografía 17 Calle José María Morelos se observa un claro desnivel de 1.50 m y se observan claros daños en las construcciones y la construcción de escalones en las banquetas.	97
Fotografía 18 En la calle Francisco I. Madero se observa un desnivel más pronunciado de alrededor de 1.50 m se observan daños significativos en las bardas de las casa y la construcción de dos conjuntos de escalones.	98
Fotografía 19 En la calle Acapulco se puede observar un desnivel de casi dos metros. Se ven al menos cuatro casas afectadas, una totalmente partida por la mitad, otra que sólo queda la barda de la construcción original y al parecer se encuentran ya deshabitadas.	98
Fotografía 20 Calle Río Bravo se observa un desnivel aproximado de 1.60 m podemos ver dos casa afectadas en la esquina de la cuchilla un terreno baldío y la construcción de escalones en las banquetas	98
Fotografía 21 Calle Ignacio Manuel Altamirano se observa un desnivel de más de un metro, afectaciones tanto en el pavimento como en las casas.	99
Fotografía 22 Esquina de las calles Agustín Arroyo Chagoyán y Nuevo León, en la fotografía se observa el caro desnivel en ambas calles y hay hasta un señalamiento vehicular de rampa y hay una gran escalinata en la banqueta.	99
Fotografía 23 Sobre la calle Guillermo Prieto se observa negocios que fueron separados por el desnivel. Además de otros con grietas y la construcción de varios escalones.	99
Fotografía 24 Sobre la calle Jalisco se encontraron serias afectaciones en las bardas y banquetas, y un desnivel aproximado de 1.50 m.	100
Fotografía 25 Calle 20 de noviembre esquina con Primo de Verdad y Ramos se distinguen daños sobre el pavimento de la calle Primo de verdad y en 20 de noviembre se observa un desnivel de 1.50 m. Además de agrietamientos que afectan las viviendas y bardas.	100
Fotografía 26 En la Av. Irrigación se observa un cambio de nivel y afectaciones sobre un enrejado, personas de Tecnológico de Celaya nos informaron que antes el terreno era una secundaria pero debido a los daños en la estructura fue cerrada.....	100
Fotografía 27 Desnivel en la calle Antonio García Cubas.	101
Fotografía 28 Se observa un desnivel sobre la calle Manuel Orozco y Berra donde se observa la banqueta destruida, además de una barda construida de forma escalonada.....	101
Fotografía 29 Avenida México Japón, se observa un pequeño desnivel sobre el pavimento además de daños en la barda.	101
Fotografía 30 Sobre la Av. Tecnológico se observa un desnivel muy marcado al cruzar entre las calles Plan de Cuernavaca y Plan de Agua Prieta, se ven además daños en la acera, los escalones y las bardas de las propiedades de la zona	102
Fotografía 31 En la calle Plan de Cuernavaca se observa daños en las casa de la zona así con la un desnivel de menos de un metro sobre el pavimento.	102
Fotografía 32 Sobre la calle Guillermo Prieto se observaron agrietamientos en las bardas y un pequeño desnivel en el pavimento y algunas pequeñas afectaciones sobre la acera.....	104
Fotografía 33 Se observa los daños sobre la calle Presa de la amistad el asfalto esta levantado del nivel de la acera de lado este de la calle y se observan daños sobre las casas en especial en la carpintería evidente en el zaguán.....	104
Fotografía 34 Daños sobre la calle Presa de la Olla se observa más que nada un desnivel en la calle de terracería y ser ha evitado construir en los terrenos por donde cruza la falla.	105
Fotografía 35 Sobre la calle Poniente 4 se distinguió a penas un desnivel sobre la acera frente a un centro de entrega de trasportistas de alrededor de 50 cm.	105

Resumen

La subsidencia es el hundimiento paulatino de la superficie terrestre, y es fenómeno común en las zonas urbanas del centro de México. Este fenómeno está relacionado con los altos regímenes de extracción de agua del sistema de acuíferos. Celaya y Salamanca son ciudades en el bajío mexicano donde está presente el problema de subsidencia desde los años 50's. La subsidencia diferencial en las áreas urbanas es un factor para el desarrollo fallas y fracturas en la superficie; estas fallas y fracturas han producido daños en la infraestructura y se han relacionado con problemas de contaminación en el acuífero.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar las zonas de mayor deformación superficial debido al proceso de subsidencia, la evolución temporal de esta, así como la relación de subsidencia con la manera de explotar el acuífero y la geología del subsuelo. Para lograr el objetivo de este proyecto se aplicó la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) para caracterizar las zonas con mayor deformación dentro de estas ciudades, usando imágenes ENVISAT-ASAR adquiridas entre 2003/12/07 a 2010/09/18, procesadas utilizando ROI_PAC y ISCE. Debido a las características de línea base temporal y perpendicular de las imágenes sólo se pudo trabajar con las imágenes del periodo de septiembre del 2009 a septiembre del 2010.

Para la ciudad de Salamanca se calculó una serie temporal que abarca un año donde se obtuvo una tasa máxima de subsidencia anual de 5.5 cm/año y se definieron dos zonas claras divididas por una falla que cruza la ciudad. Una zona estable al sureste de la falla y una donde la deformación va aumentando al noroeste.

En el caso de Celaya el cálculo de una serie temporal no tuvo resultados satisfactorios debido a las líneas base y temporales mostradas en los interferogramas. Sin embargo, mediante el análisis individual de los interferogramas se determinó una tasa de 7.2 cm/año para el año que comprende de septiembre de 2009 a septiembre de 2010 en la parte centro-norte entre las fallas Poniente y Universidad Pedagógica. Con base en estos resultados, se hicieron nivelaciones con GPS, para comparar los desniveles acumulados en las zonas donde se observa mayor deformación en los interferogramas. Se realizaron 17 perfiles en la ciudad de Celaya y se observaron desniveles acumulados de entre 1.5 y 3 metros, con una tasa estimada de 6.6 cm/año.

Los resultados del análisis conjunto de InSAR y GPS muestran una relación directa entre la zona de mayor deformación calculada a partir de los interferogramas y la zona donde se obtuvo el valor máximo de dislocamiento, observada en la traza de la Falla Oriente y sus alrededores. Analizando los datos de pozos suministrados por JUMAPA (Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado) y CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), con los resultados de esta investigación, se observa que la subsidencia y la generación de fallas superficiales están correlacionadas con la estratigrafía del subsuelo y el abatimiento general del acuífero del valle

de Celaya. En las regiones donde existe un mayor hundimiento, al este de la ciudad de Celaya, los registros de JUMAPA muestran que el espesor de sedimentos compresibles es mucho mayor que en el sector occidental de la ciudad. El sistema de fallas en los suelos de la ciudad que la atraviesan de norte a sur, son producto de este cambio en la estructura estratigráfica del subsuelo.

1. Subsidencia en zonas urbanas de México

La subsidencia puede deberse a muchas causas: extracción de agua subterránea, movimientos tectónicos, colapsos de minas, construcciones subterráneas, disolución de carbonatos en rocas cársticas, etc. En el caso de múltiples zonas urbanas en el centro de México, una de las principales causas del fenómeno son los fuertes regímenes de extracción de agua del sistema de acuíferos (Carreón, 2010; Galloway y Burbey, 2011).

Los primeros reportes que relacionan los hundimientos del terreno con la extracción de agua fueron realizados por R. Fuller en 1908 (Poland, 1984). El primero en explicar científicamente el fenómeno fue Terzaghi (1925), quien propuso una ecuación de consolidación unidimensional. El tema fue retomado por Meinzer (1928), quien reconoció que la extracción de agua del almacenamiento de un acuífero se debe a la compresión del mismo y que la disminución del almacenamiento puede ser permanente (inelástica) o recuperable (elástica). Las primeras observaciones de subsidencia relacionada con la explotación de los mantos acuíferos fueron hechas en el valle de Santa Clara, California por Rappley y Tibbets (1933) y citado por Poland e Ireland (1988).

Fue hasta los años 20's que se documentó este fenómeno en la Ciudad de México. En la década de los 1950 Nabor Carrillo relacionó directamente la subsidencia de las arcillas del valle de México con la extracción de agua. Debido a la importancia de la ciudad como capital del país y a la magnitud del problema, hay una gran variedad de estudios publicados sobre el problema, donde se detallan la zonas afectadas, su extensión, la tasa anual de subsidencia y su evolución temporal (Gayol, 1925; Hiriart y Marsal, 1969; Cabral-Cano et al., 2008; López-Quiroz et al., 2009; Osmanoglu et al., 2011; Yan et al., 2012). Desde principios de la década de 1980, se ha reportado este problema en diversas ciudades de la zona central de México, principalmente en aquellas situadas sobre antiguas cuencas fluvio-lacustres, como por ejemplo: Aguascalientes, Celaya, Irapuato, Morelia, Querétaro, Salamanca, San Luis Potosí, Toluca, además de la zona conurbada de la Ciudad de México.

Los efectos de la subsidencia en las ciudades del centro de México, se reflejan como daños en la infraestructura tales como casas habitación y edificios públicos con estructuras debilitadas, afectaciones a tuberías de agua potable, drenaje y oleoductos; a su vez favorecen inundaciones, pérdidas de agua potable por fugas y contaminación del acuífero causada por infiltraciones de aguas negras e hidrocarburos.

Para el monitoreo de la subsidencia se han utilizado métodos como nivelación convencional, GPS y de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) (Cabral-Cano et al., 2008; Díaz-Salmerón, 2010; López-Quiroz et al., 2009; Osmanoglu et al., 2011; Chaussard et al. 2014). Debido a su precisión y gran potencial la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) es últimamente la más utilizada debido a su precisión para detectar deformaciones milimétricas, además de ofrecer una amplia cobertura espacial y temporal. Sin embargo tiene desventajas como la cantidad de imágenes disponibles, el lapso entre adquisiciones y la distancia orbital entre imágenes que puede generar falta de

correlación; para resolver estos problemas se han generado técnicas como Small Base Line (SBAS) y Permanent Scatterers Interferometry (PSI), aun así el hecho de tener pocas imágenes sigue siendo un problema.

En este trabajo se utilizó la técnica de SBAS para caracterizar la subsidencia en las ciudades de Celaya y Salamanca, con la intención de caracterizar la deformación en cuanto a su evolución espacial y temporal con una técnica de InSAR diferente a las ya aplicadas en la zona; además de emplear imágenes ENVISAT-ASAR adquiridas entre septiembre de 2009 y septiembre de 2010 que no habían sido utilizadas en estudios previos; complementando dicho análisis con mediciones de perfiles GPS en las zonas afectadas. Finalmente se hizo un análisis conjunto de esta información con datos geológicos y geohidrológicos, proporcionados por la JUMAPA y CONAGUA.

1.1 Subsidencia en la ciudad de Celaya.

El problema de la subsidencia del terreno en la ciudad de Celaya era conocido desde los años 50's. Sin embargo, fue a partir de la década de los años 70's que se empezó a reportar subsidencia en la parte oriental de la zona urbana. Se observó entonces la presencia de una serie de hundimientos y grietas que afectaron parte de la infraestructura del área, aparentemente sin un orden determinado (Huizar-Álvarez, 2010).

El primero en documentar el problema fue Trujillo-Candelaria (1985), quien reporta la existencia de dos fallas en la ciudad con una orientación NW 30° SE. Las llamadas Falla Oriente y la Falla Poniente, con longitudes de 4 km y 1.5 km respectivamente. Además reporta que en esta zona se había registrado hundimientos máximos de aproximadamente 60 cm.

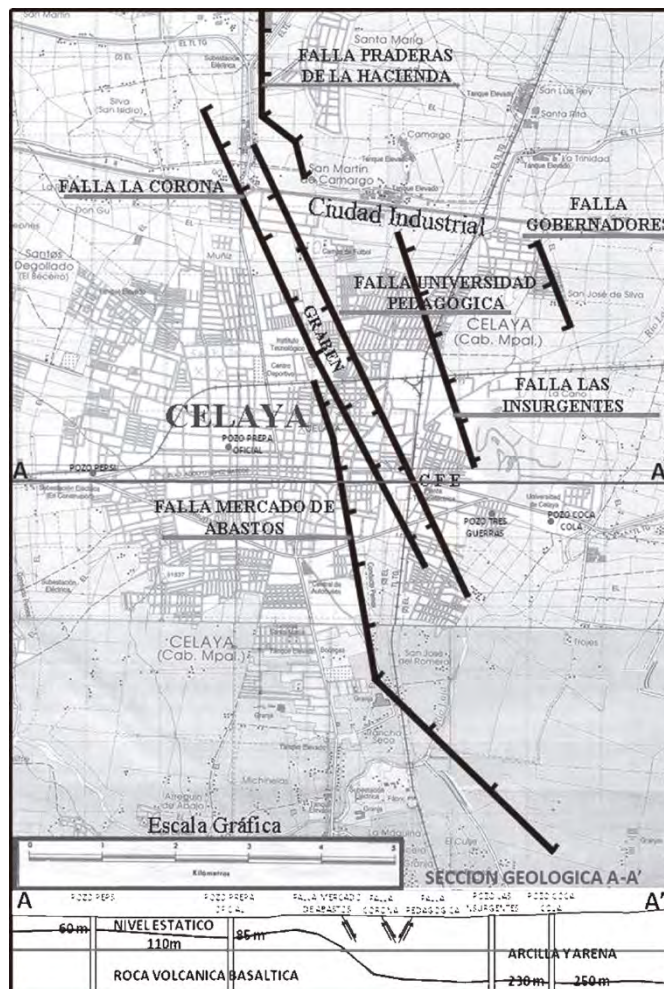


Figura 1.1 Mapa de la ciudad de Celaya con la localización de las seis fallas principales (líneas negras) y en la parte inferior se muestra la sección AA'. Tomado de Trujillo-Candelaria (2009).

En ese momento, Trujillo Candelaria (1985) propuso que la sobreexplotación del acuífero, y el correspondiente descenso del nivel freático en el agua subterránea, era la causa más probable de la formación de las fallas en los suelos de la ciudad (Figura 1.1).

En su trabajo más reciente, Trujillo-Candelaria (2009) hizo la correlación entre las seis principales fallas de la ciudad, localizadas en la parte central de la ciudad, con el registro de espesores de sedimentos, y observó que en la zona oriente alcanzan 300 m aproximadamente; en contraste con la región occidental de la ciudad de Celaya que presenta espesores máximos de sedimento del orden de 60 m, y tiene un basamento de rocas volcánicas basálticas y riolíticas. Por tanto, hay una clara correlación entre la disminución del nivel del agua subterránea y el espesor de los sedimentos arcillosos con el hundimiento del subsuelo. Ya que al descender el nivel del agua en el subsuelo, los sedimentos arcillosos, que rellenan la cuenca de la ciudad de Celaya, se compactan por la deshidratación y la disminución de la presión hidrostática. Dicha compactación causa hundimientos diferenciales, que a su vez originan el fallamiento.

Trujillo Candelaria (2009) también reporta que las tres fallas principales tienen longitudes promedio de 6.8 km y las restantes tienen longitudes de entre 5 km y 1 km; tasas máximas de hundimiento de 3,5 cm/año; un desnivel acumulado máximo de 3,5 m y reporta daños estructurales a la infraestructura urbana.

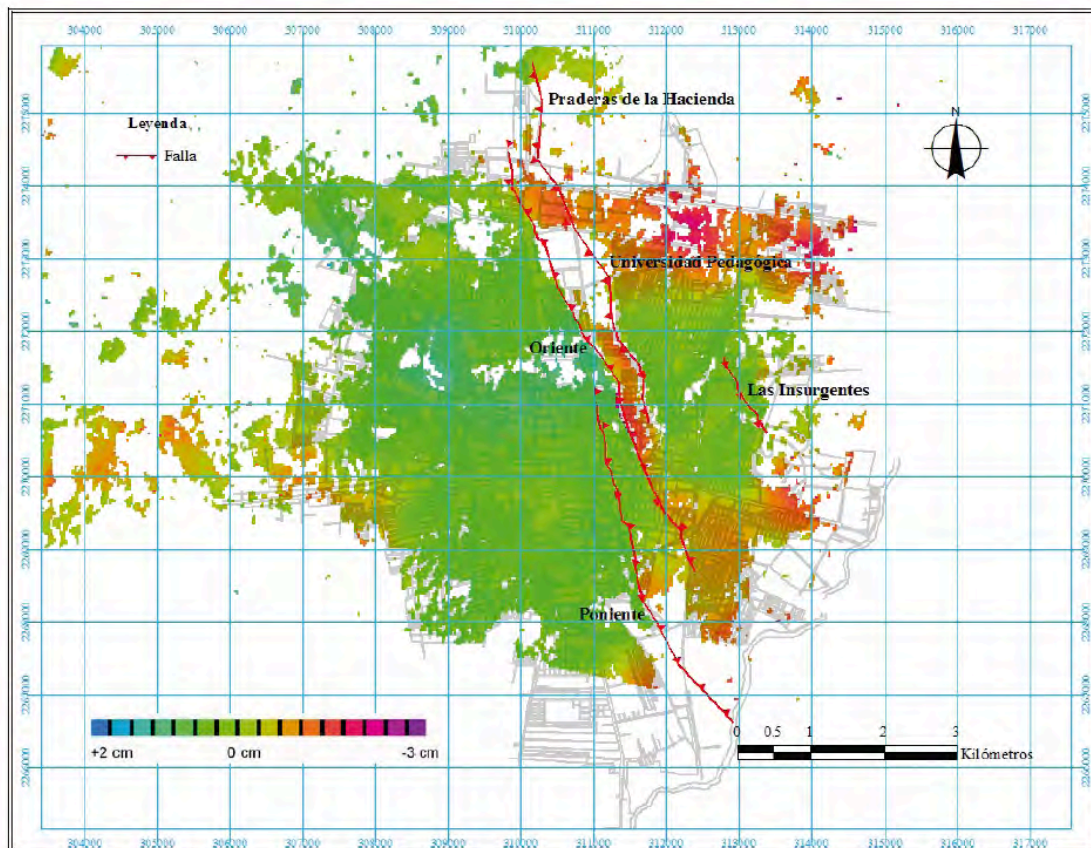


Figura 1.2 Interferograma de las imágenes 11/02/2006-27/05/2006, de la ciudad de Celaya se ve claramente el diferente comportamiento entre la zona este (hundimiento) y la oeste (zona de menor hundimiento), Además del hundimiento presente entre las fallas Oriente y Universidad Pedagógica. Ávila-Olivera et al. (2008).

Ávila-Olivera et al. (2008) hicieron un primer análisis de la zona utilizando la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). Para ello, utilizaron 9 imágenes adquiridas entre 2003 y 2006, calculando 36 interferogramas, sin embargo sólo consideraron 3 interferogramas calculados satisfactoriamente y sólo utilizaron uno de ellos para hacer un cálculo de la tasa de subsidencia (Figura 1.2). Estos autores concluyen que la ciudad de Celaya se divide en dos áreas, la región oeste en donde la subsidencia es casi nula y la región oriental, donde se observan los mayores hundimientos al igual que en el área delimitada entre las Fallas Oriente y Universidad Pedagógica (Figura 1.2).

Las tasas de subsidencia anuales calculadas por Ávila-Olivera et al. (2008) muestran un máximo de entre -7 a -10 cm/año para el año 2006. Además sugieren que la problemática de la zona no se puede explicar únicamente por la excesiva extracción de agua y la compresión diferencial del subsuelo. Estos autores sugieren que las observaciones muestran, de forma implícita, un control estructural de fallas geológicas que existen en el basamento. De acuerdo a estos autores, se lleva a cabo una deformación mediante un fenómeno conocido como proceso de deformación continua en forma viscoelástica de la falla o *creep*.

Huizar-Álvarez (2010) hizo una revisión de la subsidencia en la ciudad de Celaya (Figura 1.3 y Tabla 1.1), observando la importancia de correlacionar la geología regional, el hundimiento y la generación de fracturas. Este autor menciona que la geología regional, en particular el régimen tectónico y el vulcanismo, son factores importantes en los modelos de la generación de las fracturas puesto que su tendencia es similar a sistemas de fallas reconocidas en la región. En el caso del hundimiento diferencial, este es producto de las propiedades mecánicas de los sedimentos, las cuales varían por las distintas unidades geológicas que componen el subsuelo de la cuenca de la ciudad de Celaya, donde se presentan intercalaciones de sedimentos lacustres y coladas volcánicas.

En cuatro campañas de toma de datos de GPS (Dic/2008, May/2009, Jun/2009 y Ago/2009) Díaz-Salmerón (2010) hizo mediciones en 32 puntos de control en la zona este de la ciudad de Celaya, utilizando la estación CEGA como punto de referencia localizado en un flujo de lava en los alrededores del volcán La Gavia. Con los datos obtenidos de estas campañas se obtuvo un modelo digital de hundimientos donde se observó una tasa máxima de subsidencia de entre 12 y 14 cm anuales (punto 2) (Figura 1.4) en la zona norte y entre de 10 a 12 cm anuales al sur poniente (punto 56) (Figura 1.4). Además observaron que en sus mediciones puntos anómalos que presentaban ascensos de la superficie a corto plazo, pero que a largo plazo terminaban en hundimientos, lo que mostraba que el desplazamiento vertical del terreno en la ciudad de Celaya es oscilante.

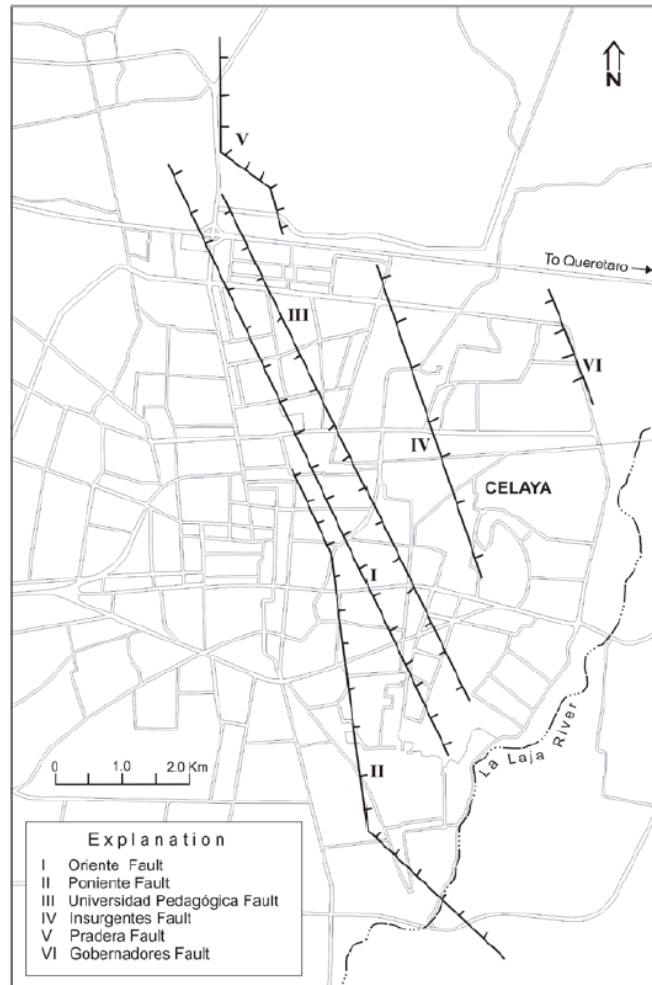


Figura 1.3 Plano de la Ciudad de Celaya, líneas negras las seis fallas con la nomenclatura de las fallas usada en la Tabla 1.1. Tomado de Huizar-Álvarez (2010).

Falla	Orientación	Longitud (km-año)	Subsidencia (m)	1985	1996	2003	2008
Oriente	NW 30°SE	4 en 85 11.2 en 2005	Min	0.10	0.20	1.5	1.5
			Máx	1.0	1.90	2.7	3.10
Poniente	NW 30°SE	7 en 85, 8 en 99 y 9 en 2005	Min	0.83	0.18	0.55	0.55
			Máx	1.0	0.68	1.7	2.60
Universidad Pedagógica	NW 30°SE	4 en 2005	Min	0.10	0.20	0.5	0.55
			Máx	0.90	0.92	1.8	2.7
insurgentes	NW 30°SE	1.2 en 2005	Min			0.10	0.10
			Máx			0.40	0.98
Praderas	NW 30°SE	2 en 85 y 3.5 en 2008	Min			0.10	0.10
			Máx			0.80	1.00
Gobernadores							0.40

Tabla 1.1 Registro de los cambios de longitud de las fallas, así como los valores máximos y mínimos de la subsidencia. Modificado de Huizar-Álvarez (2010).

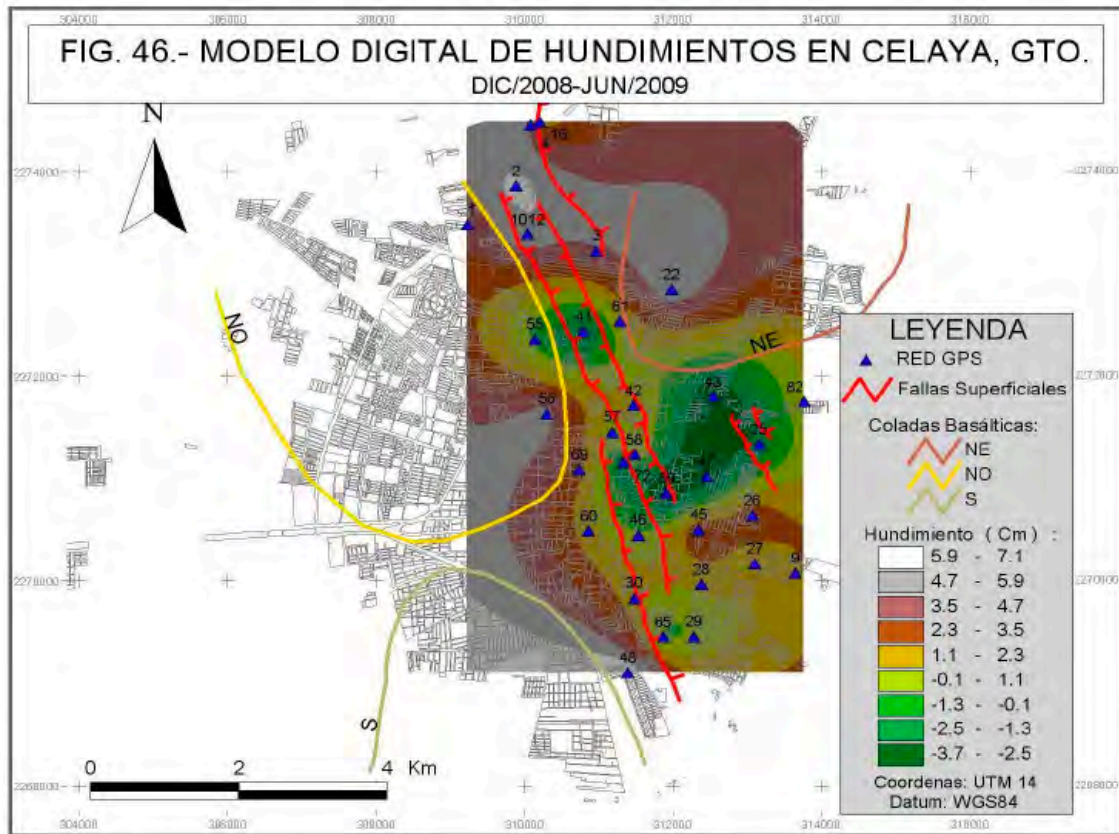


Figura 1.4 Modelo de hundimientos a partir de datos GPS en la ciudad de Celaya, Tomada de Díaz-Salmerón et al. 2010.

El estudio más reciente de InSAR (Chaussard. et al. 2014), usando imágenes de ALOS-PALSAR en el periodo de 2007 a 2011 y la metodología de SBAS obtuvo altas tasas de subsidencia del orden de 9 cm anuales además clasifican la deformación de la ciudad como controlada por fallas y de una tasa de subsidencia alta. Sin embargo, se observa que la localización de las áreas con mayor subsidencia es diferente a lo observado en estudios anteriores, ya que la mayor deformación es observada al oeste y sur de la ciudad con muy bajos niveles de subsidencia en la parte central (Figura 1.5).

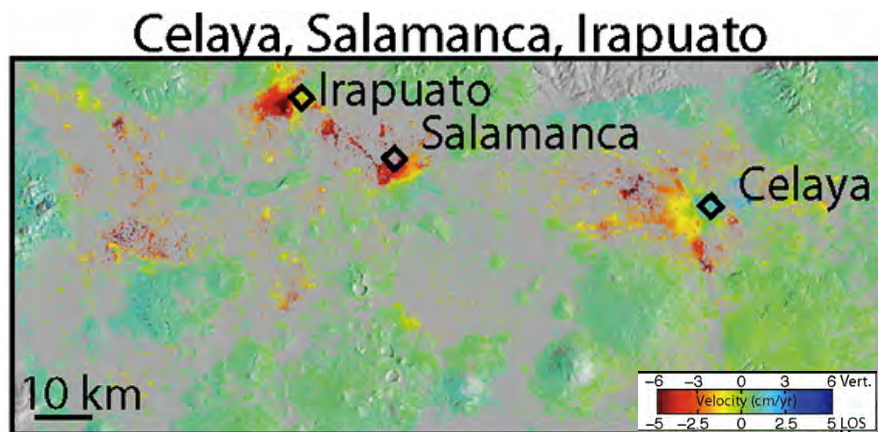


Figura 1.5 Resultados obtenidos de para las ciudades de Celaya, Salamanca e Irapuato. Nótese la localización de la mayor deformación en la ciudad de Celaya. Tomada de Chaussard E. et al. 2004.

Protección Civil de la ciudad de Celaya (<http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/atlas/geologico/celaya.php#>) ha reportado que los sitios con mayor afectación de infraestructura se encuentran dentro de la ciudad y en sus alrededores. En la Tabla 1.2 y Tabla 1.3 se muestra la localización de dichas zonas y fotografías de los daños.





Localización	Fotografía
<p>Esquina calle 20 de Noviembre y Primo de Verdad.</p>	
<p>Tezozomoc y Alejandro Humboldt.</p>	
<p>Esquina Ignacio Ramírez y Luis Velasco Mendoza.</p>	
<p>Av. Antonio Plaza frente a la Central de Autobuses.</p>	
<p>Rancho La Mora, Zona agrícola.</p>	

Tabla 1.2 Localización y tipos de afectaciones reportadas por Protección Civil de Celaya, dentro de la ciudad de Celaya.

RIESGO GEOLOGICO EN EL MUCIPIO DE CELAYA, GTO.					
No.	Evento	Ubicación	Latitud	Longitud	Observación
1	Agrietamiento y hundimiento	Localidad de la Luz	20° 27' 37"	100° 47' 23"	Área de asentamientos humanos e infraestructura con presencia de agrietamientos y hundimientos
2	Agrietamiento y hundimiento	Localidad de la Cruz	20° 27' 21"	101° 47' 48"	Área de asentamientos humanos e infraestructura con presencia de agrietamientos y hundimientos

Tabla 1.3 Localización y tipos de afectaciones reportadas por Protección Civil de Celaya en los alrededores de la ciudad.

1.2 Subsidencia en la ciudad de Salamanca

Salamanca se localiza al oeste de la ciudad de Celaya, donde también se tienen registros de subsidencia y fallas asociadas a ella (Figura 1.6). Se tienen registro de este fenómeno desde 1982. Los desplazamientos diferenciales en la zona urbana son los que ha generado la falla que cruza la ciudad y prácticamente la divide en dos. Tiene dirección ENE-WSW con una longitud promedio de 12 km, se considera una falla normal donde el bloque NW de la falla es el techo (Garduño et al., 2001). Diversos estudios reportan una tasa anual de subsidencia de 6 a 7 cm/año (Figura 1.5) (Garduño et al., 2001; Chaussard et al. 2014). Además de desplazamientos acumulados de 60 cm en el área urbana y de 1.5 metros en la comunidad rural de J. Rosas, localizada a 7 km de Salamanca (Garduño et al., 2001).

En esta ciudad se localizan tres importantes industrias, una refinería de PEMEX, una termoeléctrica y una industria de pesticidas, además de una gran actividad agrícola. Debido a la gran cantidad de agua que necesita el desarrollo de las actividades industriales y agrícolas, se ha sobre explotado el acuífero local. Cabe agregar que la falla ha afectado terrenos donde se localiza la refinería, por lo cual esta falla ha contribuido a otro problema que son las altas concentraciones de arsénico y plomo en acuífero. (Ramírez-Rodríguez et al., 2001; Borja-Ortiz y Ramírez-Rodríguez, 2004).

Chaussard et al. (2014), en su trabajo, clasifica la deformación de las ciudades de la zona central de México de acuerdo a su deformación, para el caso de Celaya y Salamanca se clasifican como zonas urbanas con rápida deformación y dicha deformación limitada por fallas.

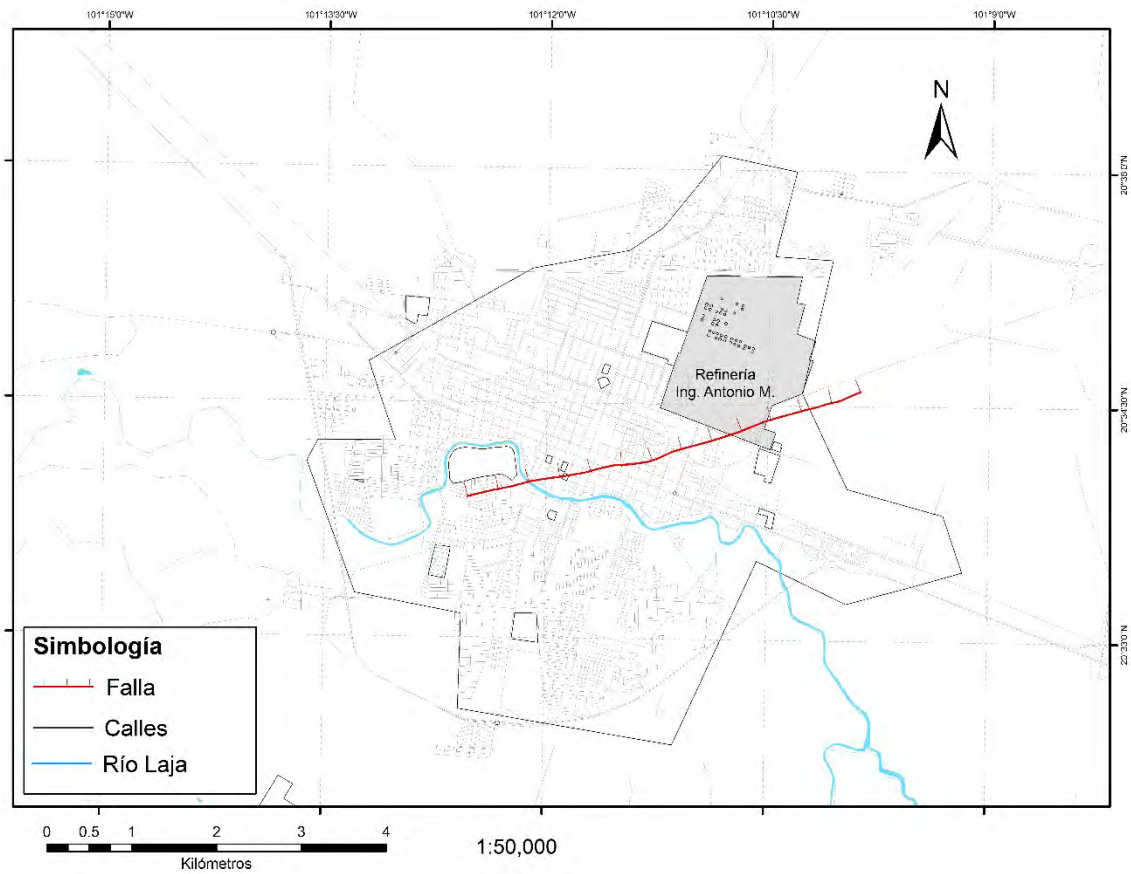


Figura 1.6 Plano de la ciudad de Salamanca, se observa la falla reportada por primera vez Garduño et. al, (2001), la refinería principal causa de contaminación en la zona y el río Laja.

2. Zona de estudio

2.1 Localización

La ciudad de Celaya se localiza en las coordenadas $20^{\circ} 31' N$ y $100^{\circ} 48' W$ con una altura promedio de 1, 752 msnm, en la zona noreste del estado de Guanajuato (Figura 2.1); pertenece al municipio de Celaya, el cual colinda al norte con los municipios El Grande y Apaseo El Alto; al sur con los municipios de Tarimoro y Cortázar, al oeste con los municipios de Cortázar, Villagrán y Santa Cruz de Juventino Rosas; este municipio con una superficie de 580 km², ocupa del 1.8 % de la superficie del estado de Guanajuato.

La ciudad Salamanca se localiza en las coordenadas $20^{\circ} 34' N$ y $101^{\circ} 11' W$ con una altura de 1, 721 msnm; pertenece a al municipio de Salamanca que colindan son al norte con Irapuato, Guanajuato, Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional y San Miguel de Allende; al este con Santa Cruz de Juventino Rosas, Villagrán y Cortázar; al sur con Jaral de Progreso y Valle de Santiago; al oeste con el Valle de Santiago, Pueblo Nuevo e Irapuato. La extensión del municipio es de 774 km², lo cual es el 2.5 % de la superficie del estado de Guanajuato.

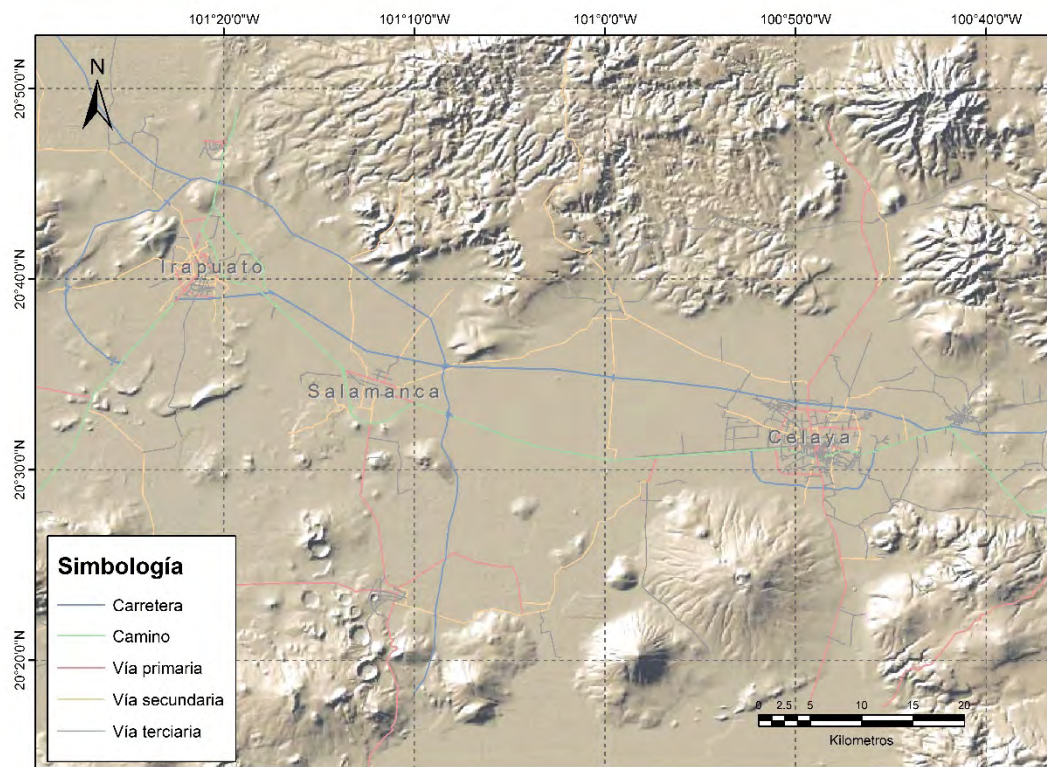


Figura 2.1 Mapa donde se localiza la zona de estudio, las ciudades de Celaya y Salamanca, Guanajuato. Mapa topográfico base utilizado Global Multi-Resolution Topography (GMRT) (Ryan et al., 2009).

2.2 Geología de la zona de estudio.

Las ciudades de Celaya y Salamanca, Guanajuato se localizan geológicamente dentro de una zona donde convergen tres provincias geológicas importantes de la geología mexicana: La Faja Ignimbrítica Mexicana, El Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas y la Faja Volcánica Transmexicana (Ortega-Gutierrez et al., 1992). Fisiográficamente, se localiza entre la Mesa Central, la Faja Volcánica Transmexicana y el Bajío que comprende una gran planicie aluvial de aproximadamente 500 km² con elevación promedio de 1,700 m.s.n.m., rodeada de cuerpos volcánicos Oligocénicos.

Las rocas del basamento están constituidas por intrusivos con composiciones y edades diversas y rocas marinas deformadas de edad Mesozoica. En la región existen numerosas fallas normales que afectan tanto al basamento como a las rocas más jóvenes y se presentan como dos sistemas conjugados casi perpendiculares, formando estructuras importantes como la sierra de Guanajuato de dirección NW-SE (Aranda-Gómez, 1989).

La cubierta se compone de una sucesión de rocas volcánicas relacionadas tanto a la formación de la Sierra Madre Occidental, compuestas principalmente de riolitas, y posteriormente de flujos basálticos y andesíticos pertenecientes a la Faja Volcánica Transmexicana. En el relieve sobresalen las estructuras volcánicas Pliocénico-Cuaternarias formadas por derrames de andesita y basalto (Demant, 1978). Los depósitos Holocénicos corresponden principalmente a secuencias fluviolacustres que rellenaron las fosas tectónicas existentes formando las grandes planicies que caracterizan a la región.

2.2.1 Geología de Celaya

Al norte de la ciudad de Celaya afloran rocas sedimentarias Cretácicas, principalmente areniscas, lutitas y calizas, pertenecientes a las formaciones Soyatal y Mezcala con un bajo grado de metamorfismo y deformadas durante la orogenia Laramídica, formando estructuras plegadas con vergencia hacia el NE, representando las unidades más antiguas que se exponen en la región.

Sobre las rocas cretácicas, se encuentran las secuencias volcánicas que datan de finales del Eoceno hasta el Mioceno (Nieto-Samaniego, 1996), representadas por domos riolíticos como la riolita El Chichindaro que se encuentra al NE, derrames andesíticos del Oligoceno como la andesita El Cedro, que también se encuentra hacia el Norte de la ciudad de Celaya, denominada andesita Presa de Manantiales por Nieto-Samaniego (1990). Las secuencias ignimbríticas Oligo-Miocénicas llegan a tener espesores de 100 m. Las ignimbríticas yacen discordantemente sobre el basamento Mesozoico, o bien sobre la riolita El Chichindaro y afloran en la región de la Cañada de la Virgen. Estas rocas se encuentran intercalada con la Andesita El Cedro (Alaniz-Álvarez, 2001). Estas unidades son importantes en el área, pero son más predominantes hacia la región de Querétaro.

Los volcanes Culiacán y El Cerro de la Gavia o Cerro Grande constituyen una unidad geomorfológica sobresaliente al sur de Celaya y representan la actividad volcánica Pliocénica de composición andesítica y basáltica. Estas estructuras volcánicas fueron fechadas en 2.10 ± 0.24 Ma y 2.27 ± 0.27 Ma, respectivamente (Ban et al., 1992).

El valle de Celaya está conformado principalmente por depósitos fluvio-lacustres, producto de la erosión de las unidades geológicas circundantes. Su granulometría es muy heterogénea ya que puede ir de gravas a arcillas; esta unidad yace sobre las unidades geológicas anteriores, por lo cual es la más reciente y su espesor promedio se ha estimado en alrededor de 100 m (Figura 2.2).

2.2.2 Geología de Salamanca

Las rocas más antiguas son la formación Soyatal y Mezcala de edad Cretácico Tardío las cuales no afloran localmente, pero se han reportado a 20 km al norte y en la región de Celaya a 15 km al Oriente. En la zona, las rocas más antiguas que afloran son las pertenecientes al conglomerado Guanajuato, observados en las localidades de Joya de Cortés y Potrerillo (Nieto-Samaniego et al., 2012).

Sobre estas rocas yace la base de la cubierta Cenozoica, la cual es un grupo de rocas andesíticas, principalmente flujos de lavas oscuras e intemperizadas en algunas zonas (Cerca-Martínez et al, 2000), llamadas andesitas el Cedro, la cual aflora en tres zonas en la parte oriental. Estas andesitas yacen discordantemente a la riolita El Chinchindaro y se reportan espesores de 250 a 650 m (Echegoyén-Sánchez et al., 1970; Gross, 1975).

La riolita El Chinchindaro se define como un conjunto de rocas volcánicas de composición ácida, derrames de lava y domos de color rosado a blanco, con espesores de 100 a 400 m. Afloran principalmente en la zona norte. En algunos lugares esta unidad está en contacto erosional con las rocas mesozoicas además que con la andesita El Cedro. Para la riolita El Chinchindaro se mencionan espesores de 100 a 400 m (Nieto-Samaniego et al., 2012).

El contacto superior, de la riolita El Chinchindaro es con la formación Rancho Nuevo, la ignimbríta El Carrizo o la ignimbríta San Nicolás, estas formaciones en general son flujos piroclásticos. Sobre esta intercalaciones de ignimbrítas se tienen dos formaciones sedimentarias: las gravas El Capulín y la arenisca Valencianita, las cuales son contemporánea y del Mioceno Temprano. Las gravas son discordantes a las ignimbrítas y se describen como material poco consolidado, con clastos de riolita e ignimbríta de ángulos a sub-ángulos y la arenisca Valencia es una arenisca arcosa de grano fino, con laminaciones.

Sobre estos depósitos se encuentra la andesita La Ordeña descrita por Nieto-Samaniego et al. (2012) como un conjunto de domos emplazados en derrames, y sobre esta encontramos el basalto Mesa San José que está formado por derrames de lava sobre puestos de composición basáltico-andesítica horizontales y de espesor uniforme, ambos de edades de Mioceno medio (Cerca-Martínez et al., 2000).

En la zona sur, se tiene expresiones volcánicas como conos cineríticos y volcanes monogenéticos de edades del Pleistoceno al Cuaternario, y se han observados derrames de basaltos vesiculares asociado a ellos (Figura 2.2).

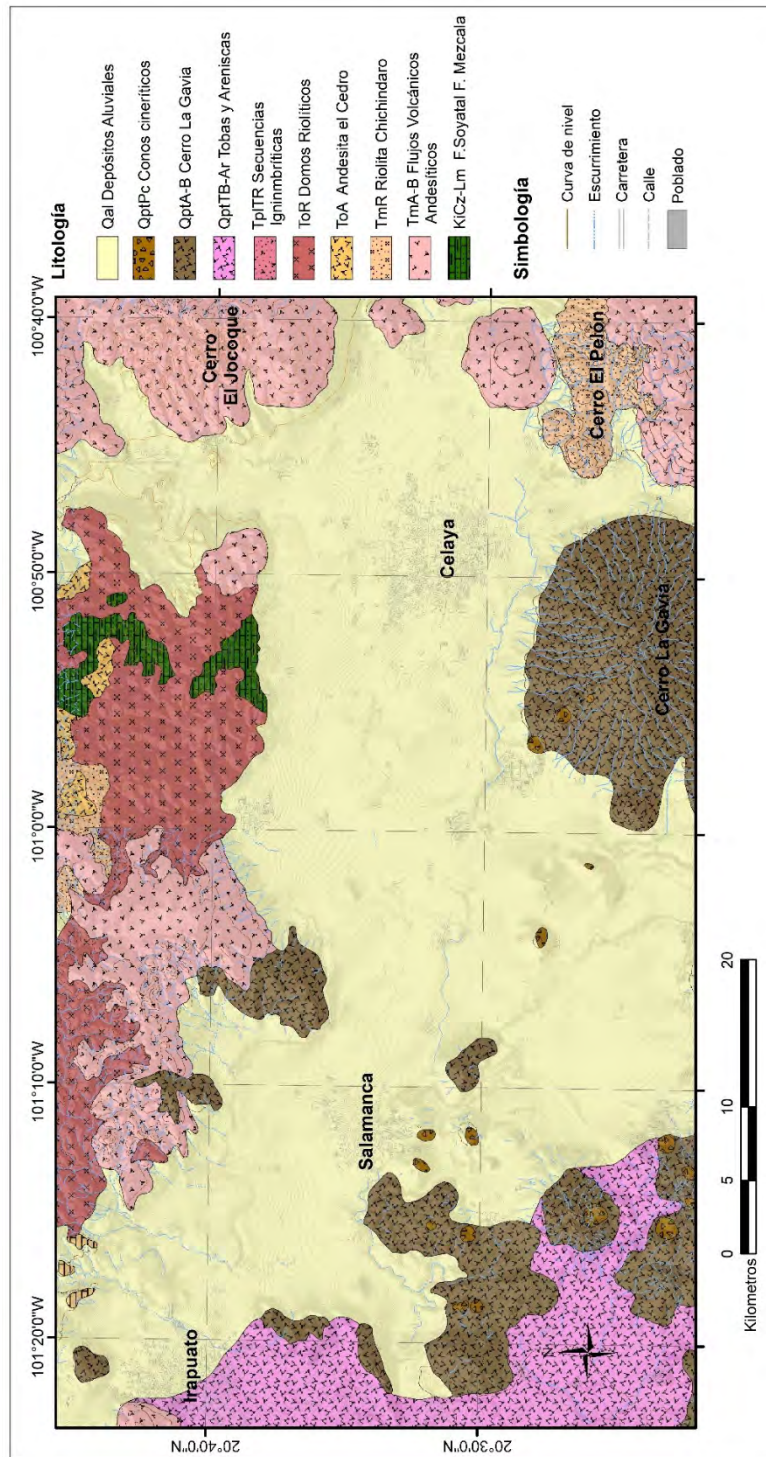


Figura 2.2 Mapa que muestra la geología de la zona de estudio, donde se muestran las principales unidades geológicas y la localización de Celaya y Salamanca. Modificada de la Carta Querétaro 77_F14-10 1:250 del Servicio Geológico Mexicano.

2.3 Hidrogeología

A partir de la delimitación establecida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para el estado de Guanajuato se definieron veinte acuíferos (Figura 2.3). Las ciudades de Celaya y Salamanca se localizan en acuíferos distintos, el acuífero de Valle de Celaya y el acuífero Irapuato-Valle de Santiago, respectivamente; los cuales serán descritos a continuación.



Figura 2.3 Mapa de estado de Guanajuato donde se observa los veinte acuíferos establecidos por CONAGUA (líneas rojas), además se observa la división política de los municipios del estado (líneas grises). Tomada de CONAGUA.

2.3.1 Hidrogeología de Celaya

El acuífero del valle de Celaya tiene una extensión de 3143 km². Se localiza en la porción oriental del estado de Guanajuato y está delimitado al este por el estado de Querétaro, al norte por el acuífero de Río Laja y San Miguel de Allende, al poniente con el acuífero de Irapuato, y al sur con los acuíferos de Salvatierra y La Cuevita.

Dentro de este acuífero se encuentra el municipio de Celaya, junto con los municipios de Cortázar, Villagrán, Santa Cruz de Juventino Rosas, Comonfort, Apaseo El Grande y Apaseo El Alto. Cabe mencionar que este acuífero se encuentra en la Región Hidrológica No. 12, Lerma-Santiago. Dentro de esta región se tiene el distrito de riego No. 085. “La Begoña” al norte de la ciudad de Celaya, la cual se utiliza para regar una superficie de 10,000 hectáreas.

El subsuelo del acuífero de Valle de Celaya está conformado por secuencias de basaltos que están cubiertos, en algunas zonas, por depósitos aluviales y lacustres de espesor relativamente reducido. Las principales unidades geológicas del acuífero de acuerdo al estudio hidrogeológico realizado por Lesser y Asociados S.A de C. V. son las siguientes:

- Las formaciones Soyatal y Mezcala son consideradas como el acuitardo, aunque en la zona del Rincón de Centeno aparece como acuífero tipo “libre”. Igualmente, las rocas volcánicas del Terciario temprano se comportan como acuitardo; sin embargo, estas rocas no están distribuidas en toda la zona.
- Las secuencias de ignimbrítas del Oligoceno-Mioceno son el acuífero y se clasifican como un acuífero semiconfinado, debido a las intercalaciones de tobas de baja permeabilidad. La andesita Allende también se considera como acuífero, pero en este caso de tipo “libre”, localizado principalmente en la porción nororiental.
- La riolita Chichíndaro se ha identificado como zona de recarga en algunas áreas del acuífero; sin embargo, no se tiene mucha información en cuanto a sus características hidrogeológicas. Son de igual forma áreas de recarga para el acuífero los volcanes monogenéticos y de tipo escudo de edad Pliocénica-Pleistocénica, por ser zonas altas y con una gran infiltración. Igualmente, las mesetas basálticas datadas del Mioceno Tardío, sirven en zonas donde están expuestas como los lugares de captación y recarga; además de ser buenos acuíferos cuando se encuentran en el subsuelo.
- Los depósitos aluviales recientes que conforman el acuífero libre, al ser desecados por la extracción masiva de agua se abaten y cambian su comportamiento al de un acuífero semiconfinado.

En el caso de la ciudad de Celaya, se explotan dos acuíferos: uno es inferior con temperatura de 40°C formado por los depósitos de toba riolítica. El acuífero superior está formado por paquetes de sedimentos lacustres y derrames de rocas volcánicas de composición basáltica. En gran parte del área ambos acuíferos actúan conjuntamente pues no hay una capa confinante que los separe (Figura 2.4).

El clima en este municipio se clasifica como semiseco semicálido (65% de humedad). En cuanto a la temperatura el rango oscila entre 14-20°C y el rango de precipitación anual es de 600-800 mm. El registro promedio anual de precipitación de los años de 1951 a 2005 (Figura 2.5), muestra que el periodo de mayor precipitación se registra entre los meses de junio a septiembre, teniendo el máximo en el mes de agosto (INEGI, 2005).

izquierda-derecha) se observa que la profundidad de los niveles aumentan 5 m y se encuentran tanto en la zona oeste, central y este de la ciudad de Celaya, lo que aumenta la extensión de la zona de mayor profundidad del nivel estático en al menos 2.5 km (Figura 2.6).

Debido a que JUMAPA no contaba con los datos de los años 2009 y 2010, estos se solicitaron a CONAGUA, quien facilitó la información de los niveles estáticos del acuífero del Valle de Celaya para estos años. Con base en dichos datos, se generaron los mapas del nivel estático para toda el área que cubre el acuífero (Figura 2.7). Para la ciudad de Celaya se observan niveles estáticos más profundos en la zona centro y oeste, 100 m; no es notorio un cambio tan evidente entre los mapas de 2009 y 2010 como en los de años anteriores, pues al tener un menor número de pozos dentro de la zona, la interpolación en el área de estudio es de menor detalle.

Los cortes litológicos están disponibles en 60 pozos; en su mayoría estimados a partir de registro eléctrico. Estos datos se solicitaron para hacer una análisis de la geología del subsuelo, su relación con al hidrogeología y el problema de subsidencia que se hará en el capítulo de análisis de resultados.

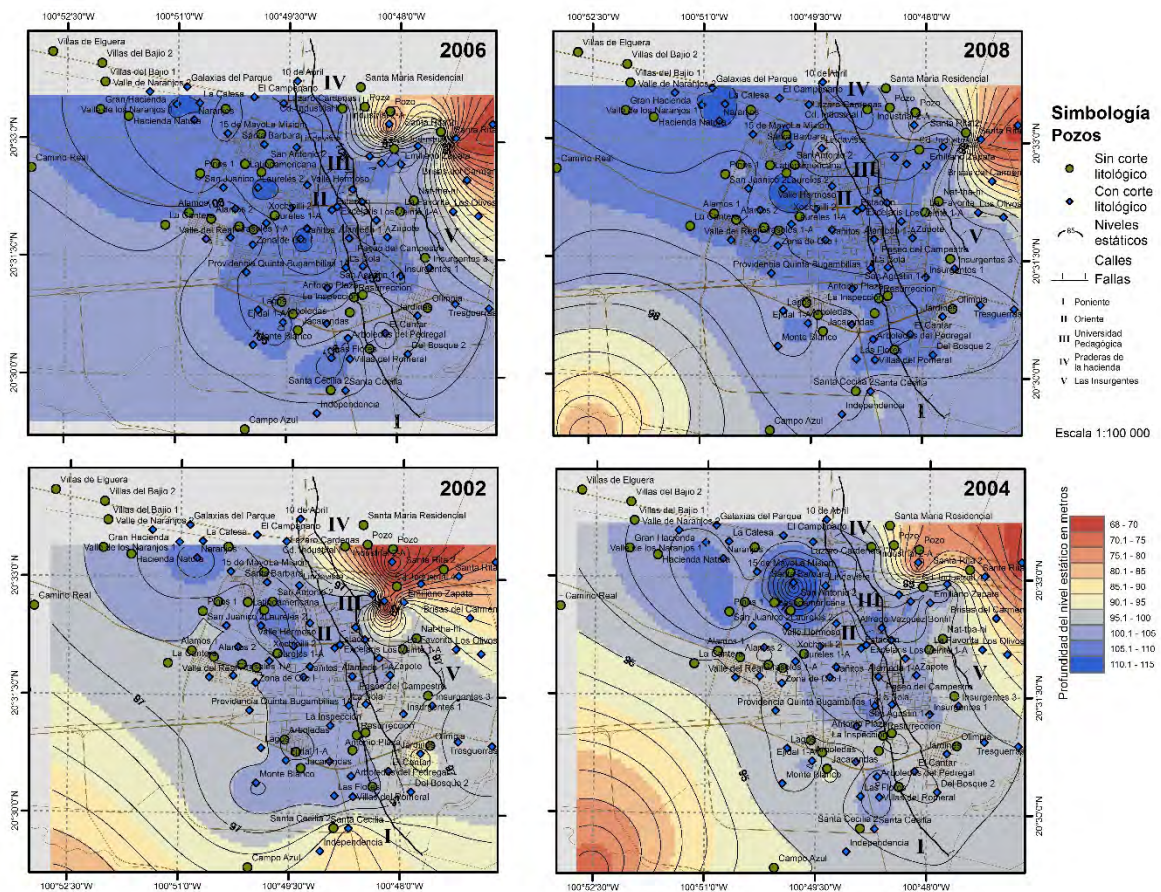


Figura 2.6 Mapas interpolados de los niveles estáticos a partir de los datos proporcionados de los pozos de JUMAPA, abajo izquierda 2002, abajo derecha 2004, arriba izquierda 2006 y arriba derecha 2008.

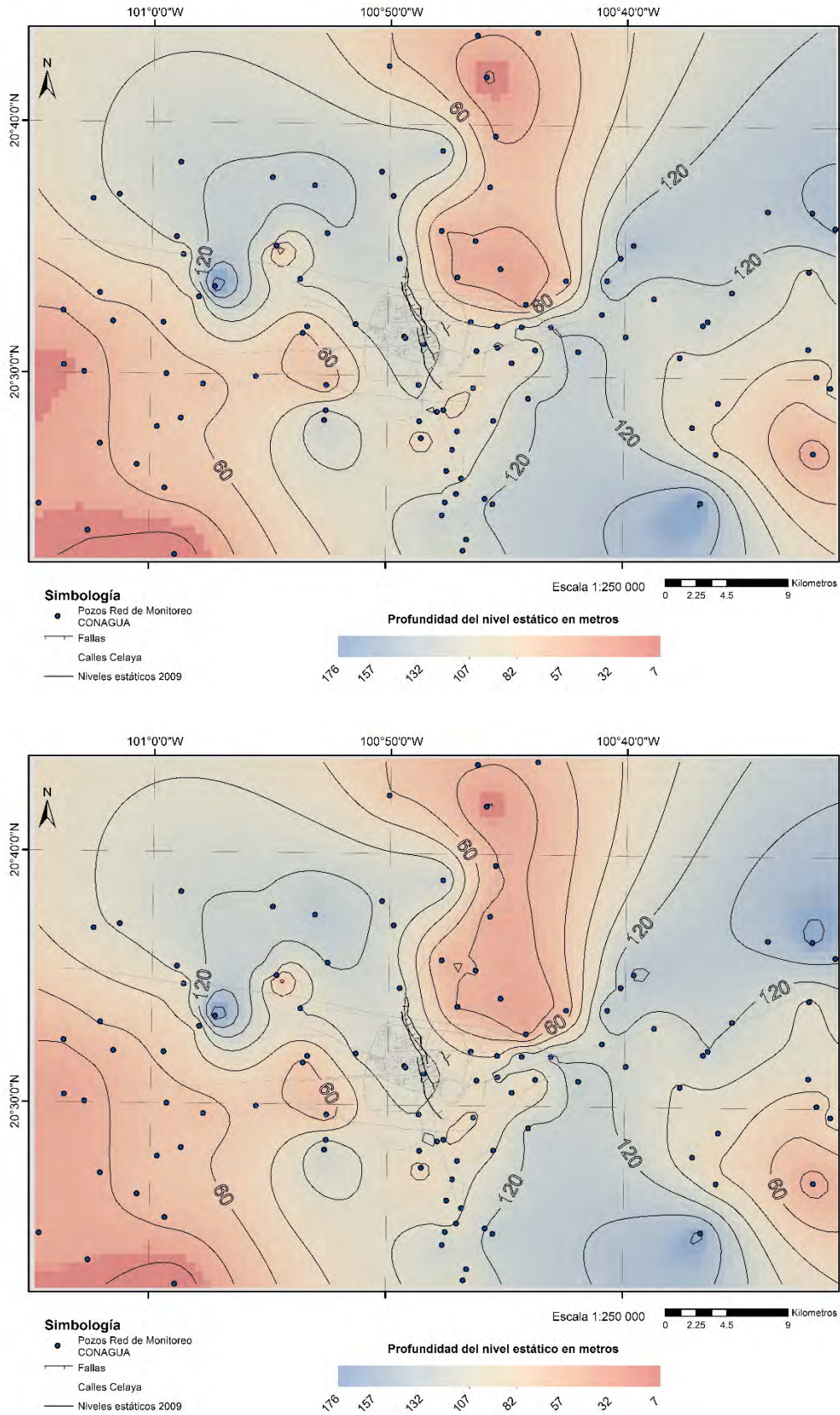


Figura 2.7 Arriba Mapa de niveles estáticos del año 2009, para el acuífero del Valle de Celaya generado por los datos proporcionados por CONAGUA, donde se observa un nivel estático más profundo en la zona oeste y central de Celaya. Abajo Mapa de niveles estáticos del año 2010, para el acuífero del Valle de Celaya, donde en la parte central y oeste de Celaya se reportan niveles estáticos más profundo..

2.3.2 Hidrogeología de Salamanca

La región acuífera Irapuato-Valle de Santiago, con una superficie de 1683 km², se ubica geográficamente en la porción sur oriental del Estado de Guanajuato y pertenece a la región del Bajío Guanajuatense. Las ciudades más importantes que se encuentran en la zona además de Salamanca, son Irapuato y Valle de Santiago.

Este sistema hidrológico está formado por tres unidades, un acuífero somero emplazado en materiales granulares, uno intermedio constituido por materiales granulares del Terciario y principios del Cuaternario, con intercalaciones de basalto fracturado y uno profundo formado por rocas riolíticas fracturadas del Terciario. El acuífero superficial es muy poco explotado ya que ha sido muy vulnerable a la contaminación (Ramiro-Rodríguez et. al., 2002).

Mejía et. al. (2001) registraron con una red piloto piezométrica que consta de 102 pozos productivos para el año de 1998, depresiones para el acuífero somero e intermedio relacionadas con la posición de la falla; debido a que acuífero somero no es muy explotado este indica que dichos acuíferos están interconectados (Figura 2.8 y Figura 2.9).

Mejía Gómez y Sandoval Minero (2004) realizaron un análisis regional del acuífero por medio de la red piloto pizométrica para conocer la evolución del acuífero desde 1998. Con estos datos observaron que la mayor profundidad del nivel estático se localiza al pie de la Sierra de Guanajuato, al Norte del canal Ing. A. Coria, fuera de la influencia del distrito de riego 011, en el cual se han encontrado niveles de hasta 100 m de profundidad. Los niveles más someros se han encontrado al norte de la ciudad de Valle de Santiago, en el área más favorecida por los Ríos Lerma y Laja, y por los canales del distrito de riego 011. Además detectaron la existencia de un cono de abatimiento localizado al sur de la ciudad de Salamanca. El mapa de isolíneas generado con los datos de la red de monitoreo muestra que las zonas de recarga en la región son las sierras que lo franquean, así como los cauces principales y los canales de riego.

En lo que se refiere a la evolución del nivel estático, se ha observado que en temporada de lluvias, cuando hay altos niveles de precipitación y recarga, las áreas contiguas a la de riego del distrito 011 presentan recuperaciones en el nivel estático de hasta 4 m; en cambio, en zonas donde la explotación del acuífero es muy alta, llegan a presentarse descensos hasta de 10 m. El promedio regional de descenso del nivel estático se ha mantenido desde 1998 entre los 2 y 3 m anuales (Mejía Gómez y Sandoval Minero, 2004).

De manera local, el acuífero en la ciudad de Salamanca está delimitado por el cauce del río Lerma, al norte del río hay tres acuíferos, pero al sur del río el acuífero más somero parece no definirse claramente. Se observan en esta zona acuíferos colgados con pequeña extensión y de forma irregular. El cauce del río también delimita cambios en la litología, al norte se observan principalmente depósitos sedimentarios de grano fino y en la zona sur predominan las rocas volcánicas fracturadas (Borja-Ortiz y Rodríguez, 2004),

evidentemente por la cercanía a los conos cineríticos. En este caso no se solicitaron datos de niveles estáticos y cortes litológicos.

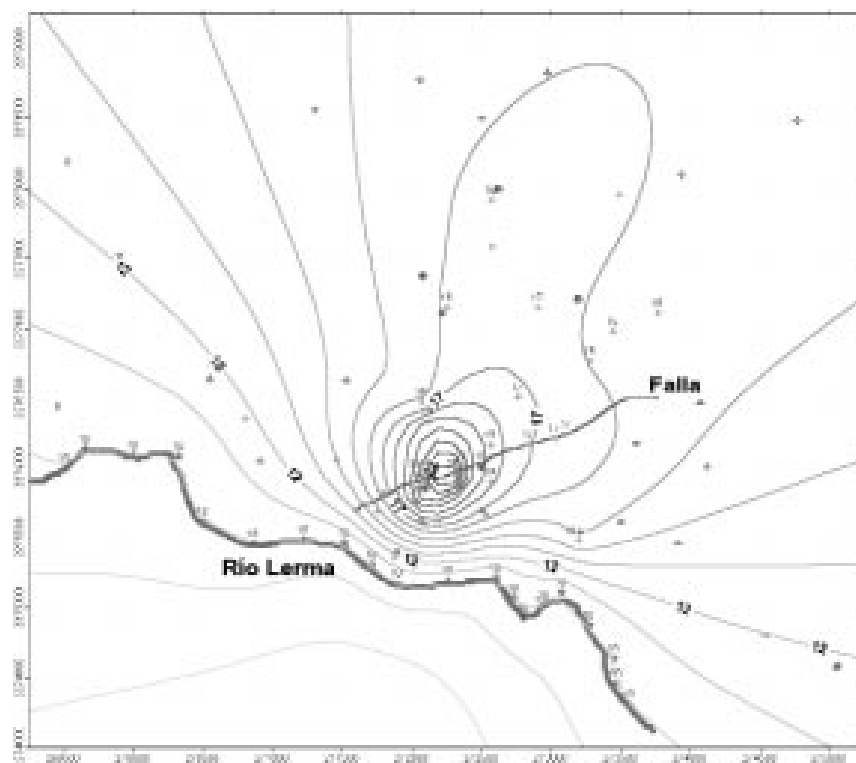


Figura 2.8 Mapa pizométrico del acuífero somero para noviembre de 1998, tomada de Mejía et. al. (2001).

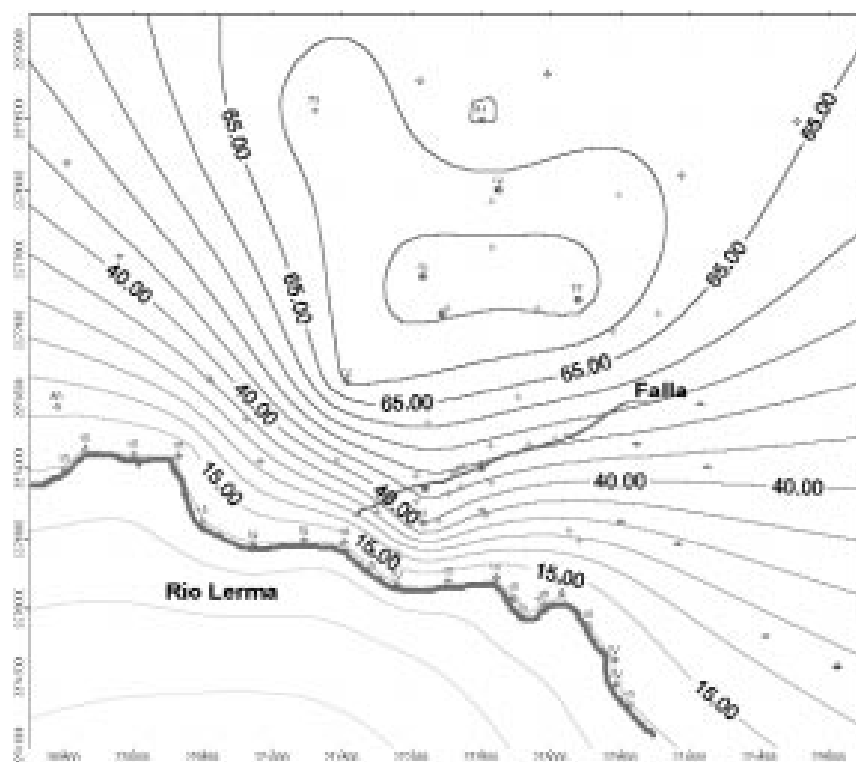


Figura 2.9 Mapa pizométrico del acuífero intermedio para noviembre de 1998, tomada de Mejía et. al. (2001).

3. Fundamentos de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR).

InSAR es una técnica de percepción remota activa, para la cual se requieren dos imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) de una misma zona. A partir de la diferencia de fase de estas imágenes se obtiene una nueva imagen denominada interferograma. La adquisición de las escenas puede ser simultánea, por un satélite con dos antenas separadas perpendicularmente en la dirección del azimut (InSAR de un solo paso), o pueden ser dos imágenes adquiridas por la misma antena, recorriendo el mismo trayecto en diferentes tiempos; a esto último llamamos interferometría de pase repetido. La diferencia de fase se observa como cambios en el patrón de franjas del interferograma, que pueden deberse a factores como desplazamientos en la superficie, topografía, hundimientos o levantamientos del terreno, cambios de humedad en el suelo, cambio del nivel de agua, etc.

Por la capacidad de esta técnica de medir cambios de fase relacionados con diversos factores, se han encontrado muchas aplicaciones para InSAR dentro del campo de las Ciencias de la Tierra.

3.1 Sistema de adquisición de imágenes SAR.

El sistema SAR cuenta con un radar, el cual es una herramienta que mide el regreso de la señal electromagnética (emitida a frecuencia de microondas entre 300 MHz y 300 GHz) que incide con un objetivo, además de medir la distancia entre el objetivo y la antena emisora. El sistema utiliza el efecto Doppler del movimiento del satélite para aumentar la apertura y la resolución de la imagen.

Para obtener una imagen SAR, la antena tiene un ángulo de visión, denominado línea de visión (*Line of Sight (LOS)*), envía un pulso electromagnético, el cual se emite repetidamente en dirección perpendicular (*range direction*) al movimiento de la antena (*azimuth direction*). Las ondas entonces viajan hacia la superficie de la Tierra atravesando la atmósfera, cuando la onda incide en la superficie parte de la señal es retrodispersada y recibida por la antena. A la zona iluminada por el pulso se le denomina huella (*footprint*); al ancho de esta, medido en la dirección perpendicular, se le llama *radar swath* (Figura 3.1).

La distancia entre la antena y el pixel de terreno se denomina rango oblicuo (*slant range*). Además se tiene la distancia entre la proyección de la órbita del satélite sobre la superficie de la Tierra (*ground track*) y el pixel de terreno, denominado (*ground range*) (Figura 3.1).

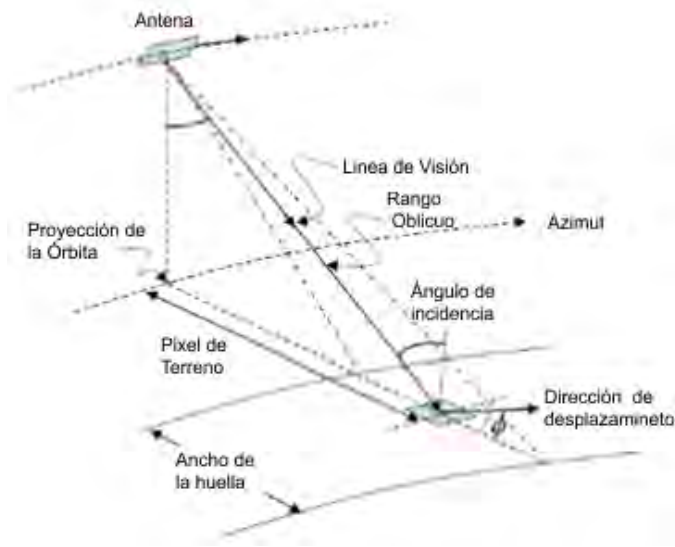


Figura 3.1 Imagen que muestra la geometría del sistema SAR.

Se forma una imagen SAR con la parte de la señal que es reflejada por el terreno de cada pulso que emite la antena, ordenando estos “ecos” por su tiempo de ida y regreso. Estos ecos se caracterizan por tener dos cualidades: amplitud y fase. Es decir al digitalizar la señal cada pixel es representado por conveniencia como un número complejo.

La amplitud de un pixel en la imagen de radar representa la capacidad de un área de superficie terrestre de enviar de regreso la energía que incide en ella, reflectividad. En la superficie terrestre hay muchas superficies que envía parte de la señal emitida por el satélite de regreso, a las cuales se les denomina como reflectores, se tienen reflectores perfectos (reflejando en un ángulo) y difusos (reflejado la señal en muchos ángulos).

Un pixel de terreno se refiere a la correspondiente área registrada en la superficie de suelo. Usualmente las dimensiones de un pixel de terreno son más grandes que la longitud de onda del radar, por dicha razón la fase de un pixel de imagen es generalmente la suma estadística de la fase de cientos de objetivos elementales, con dimensión igual a longitud de onda, dentro de un pixel de terreno. Por tanto un pixel en la imagen de radar es un concepto diferente a un pixel de terreno.

3.2 Interferograma y fase interferométrica

Un interferograma InSAR es una imagen formada por la diferencia de dos imágenes de fase SAR corregistradas de la misma zona. La primera imagen (imagen de referencia) se denomina imagen maestra y la segunda imagen esclava. Para las imágenes adquiridas en diferentes tiempos, la separación entre la posición de las dos antenas se denomina línea base.

Matemáticamente el cálculo de interferograma se expresa así:

$$I(x, y) = S_1(x, y) \cdot S_2^*(x, y) \quad (1)$$

Donde $I(x, y)$ el interferograma, $S_1(x, y)$ es la imagen maestra y $S_2^*(x, y)$ es el complejo conjugado de la imagen esclava (Sandwell y Price, 1998).

Para formar un interferograma, es necesario que dos imágenes SAR de la misma área, estén alineadas (corregistro) de tal forma que los pixeles de una imagen de fase correspondan exactamente a los de la otra, geográficamente.

Una franja (*fringe*) es una línea de igual fase en el interferograma. El número de franjas en un interferograma se cuenta a partir del punto de referencia, donde la superficie de deformación es tomada como nula. Para contar las franjas en las regiones donde estas son muy delgadas, el interferograma necesita ser generado con una resolución espacial muy alta o usar dos imágenes con intervalos de tiempo muy cortos.

Si se observa un movimiento tan sólo en un pixel completo en la imagen (sin tomar en cuenta la distorsión de este) a lo largo de la dirección del rango, ese desplazamiento se traducirá en un cambio directo en la fase del pixel a comparación del resto de los pixeles de la imagen. Entonces se moverá a lo largo de la dirección del rango media longitud de onda para el pixel y en consecuencia esto corresponde a una longitud de onda en toda la distancia de viaje, creándose una franja en la señal del radar (diferencia de fase de 2π). Lo que significa que una franja en un interferograma, corresponde al desplazamiento de media longitud de onda en el desplazamiento del suelo, en la dirección del rango. Esto es el principio de cómo se mide la deformación del suelo a partir de InSAR.

Se debe de tomar en cuenta que como un interferograma es la diferencia de fase entre dos imágenes corregistradas, entonces si algún factor impacta la fase de la señal SAR también afectará el interferograma. Un claro ejemplo son las contribuciones atmosféricas, puesto que no se cancelan al hacer la diferencia de fase entre las 2 imágenes.

Hay muchos factores que afectan la fase interferométrica (diferencia de fase entre las dos imágenes de fase corregistradas), dada por:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta D_0 + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{HB_{\perp}}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{pn} + \Delta\varphi_{dieléctrico} + 2n\pi \quad (2)$$

Donde ΔD_0 es línea de vista, λ es la longitud de onda, B_{\parallel} y B_{\perp} son las componentes verticales y paralelas de la line base; H es la altura del pixel sobre el nivel de referencia de la superficie. R es el rango oblicuo entre el pixel de terreno y la antena de la imagen maestra. θ es el ángulo de incidencia, el ángulo entre el haz y una línea perpendicular a la superficie y al punto de incidencia.

En la ecuación 2, el primer término corresponde a la componente de la fase interferométrica, debida al cambio sobre de línea de vista (LOS). Como las dos componentes (amplitud y fase) de las imágenes SAR son adquiridas de observaciones repetidas en cierto intervalo de tiempo, esta diferencia puede deberse a la deformación de la superficie durante el intervalo de tiempo. Entonces, el desplazamiento de la superficie puede ser medido a partir de un interferograma si los otros términos de la ecuación son conocidos.

El segundo término en la ecuación 2 es el efecto topográfico; dicha contribución genera una artefacto en la fase conocido como “franjas topográficas”. Para calcular este efecto, un modelo digital de elevación preciso es necesario. Con él se genera un interferograma sintético para eliminar el efecto topográfico. Sustrayendo el interferograma sintético del interferograma original. También se tiene el caso de poder obtener un modelo digital de elevación a partir del interferograma, si se conocen los otros términos de la ecuación.

El tercer término de la ecuación es la diferencia relativa de fase de la imagen esclava debido a la imagen maestra porque hay un cambio en la trayectoria de la órbita entre la adquisición de las dos imágenes por B_{\perp} y línea de vista (LOS). El desfase debido a la línea base paralela B_{\parallel} puede ser estimada usando orbitas precisas. También se pueden utilizar datos de GPS para ajustar las franjas en el interferograma y remover los efectos orbitales, dicho efecto se denomina “franjas orbitales”.

- $\Delta\varphi_{atm}$ En la ecuación 2 representa los efectos atmosféricos, los cuales pueden producir una mala interpretación de los resultados. Sin embargo el cálculo de este componente frecuentemente es difícil, algunas metodologías utilizadas son el apilamiento de interferogramas o stacking y los permanent scatterers o dispersores permanentes.
- $\Delta\varphi_{pn}$ Es el ruido en la fase, lo cual se reduce utilizando técnicas como un filtro adaptativo y multi-looks, lo cual consiste en promediar pixeles de la periferia.
- $\Delta\varphi_{dieléctrico}$ Representa el efecto debido a los cambios de las propiedades dieléctricas de cada pixel de terreno, por ejemplo las diferencias de humedad generan cambios en las propiedades dieléctricas. Por ello si se logran conocer todas las demás variables de la ecuación de la fase interferométrica, se puede determinar la humedad del suelo a partir del interferograma.
- El último término representa la ambigüedad de 2π asociado con la fase wrapping (empaquetada), dicha ambigüedad se trata de corregir al desenvolver la fase en cada pixel del interferograma.

La forma de determinar el desplazamiento a partir del interferograma, es eliminando por medio de diferentes correcciones aquellas contribuciones de la fase, que no representan un diferencia en la fase relacionado con un cambio en el terreno entre las adquisiciones de las imágenes corregistradas. A pesar de hacer dichas correcciones aún queda remanente

un error. Las franjas obtenidas en el interferograma final corresponden cada una a un cambio de fase de 2π , para transformarlas en desplazamiento se multiplica el número de franjas por $\lambda/2$. Este es el desplazamiento en la proyección a lo largo de LOS, para transformarlo en desplazamiento horizontal en dirección de los desplazamientos se utiliza:

$$\Delta D = \Delta D_0 / (\sin \theta \cos \phi) \quad (3)$$

3.3 Coherencia y error en InSAR

La coherencia es una medida de la correlación de la fase, entre un pixel particular de la imagen maestra y el pixel correspondiente en la imagen esclava, que resultan en un interferograma. La coherencia se define como (Hanssen, 2001),

$$\gamma = \frac{\sum C_1 C_2}{\sqrt{\sum |C_1|^2 \sum |C_2|^2}} \quad (4)$$

Donde la sumatoria va hasta el número total de pixeles que contiene el interferograma. El rango de valores que adquiere la coherencia va de 0 a 1. El valor 0 significa que el pixel está completamente decorrelacionada y un valor de 1 habla de una correlación completa. Para obtener interferogramas sin decorrelacionar se utiliza el concepto de distancia orbital crítica. Definido con la siguiente ecuación:

$$B_{crit} \geq \frac{\lambda \rho}{2\delta \cos^2 \theta} \quad (5)$$

Donde λ es la longitud de onda de la señal transmitida, ρ es la distancia de la antena al satélite a la superficie, δ es la resolución en la dirección de rango y θ es el ángulo de vista. Se ha observado que para distancias orbitales críticas con valores por lo menos de la mitad de lo que establece la ecuación se consigue una buena correlación (Sandwell et al., 2008).

A pesar de utilizar este parámetro para evitar decorrelaciones en los pares interferométricos, se puede tener baja coherencia a causa de cambios notables en las propiedades reflectivas del terreno en cada adquisición de la imagen SAR, causadas por ejemplo por actividad agrícola, urbana, derrumbes o cobertura vegetal, etc.

3.4 Series Temporales

Las series de tiempo es una técnica basada en una combinación apropiada de interferogramas producidos por pares de imágenes caracterizadas por una línea base pequeña en orden para disminuir la falta de correlación espacial (Bernardino 2002). Los análisis de series temporales es una de las estrategias más comunes para describir los desplazamientos del suelo a partir de un apilado de interferogramas.

3.4.1 Método SBAS.

SBAS (Small Baseline Subset) se utilizó por primera vez por Bernardino 2002, pero ahora este término es referido a una gran cantidad de metodologías. El método se basa en que la fase interferométrica observada se puede escribir como la combinación lineal de valores de fase de escenas SAR para cada pixel independientemente.

$$\Phi_{ij} = \sum_{n=i}^{j-1} \delta\varphi_n \quad (5)$$

Φ_{ij} Es la fase del pixel del interferograma de la combinación de la adquisición de i y j , $\delta\varphi_n$ es el incremento de la fase del pixel entre la adquisición en tiempo n y $n+1$.

Entonces el problema inverso está dado por:

$$d = Gm \Leftrightarrow \Phi_{ij} = \sum_{n=i}^{j-1} \delta\varphi_n \quad (6)$$

Donde se hace una inversión utilizando mínimos cuadrados.

3.4.2 Método NSBAS.

Este método se basa en estimar los cambios de fase en LOS para cada pixel independientemente usando un sistema lineal construido con un ensamble Γ de interferogramas y una serie de combinaciones a priori de N adquisiciones (Lopez-Quiroz et al., 2009).

$$d = Gm \Leftrightarrow \begin{cases} \forall (i, j) \in \Gamma \quad \Phi_{ij} = \sum_{n=i}^{j-1} \delta\varphi_n \\ \forall k \in [2, N] \quad 0 = \sum_{n=1}^{k-1} \delta\varphi_n - f(\Delta t_k) + eB_{\text{perp}}^k \end{cases} \quad (7)$$

Donde Φ_{ij} es el valor de la fase del pixel para el interferograma de la combinación de las adquisiciones i y j , es el incremento de la fase entre la adquisición en tiempo n y $n+1$. $\Delta t_k = t_k - t_0$, e es un error de la estimación del modelo digital de elevaciones, B_{perp}^k es la línea base perpendicular entre el recorrido del satélite y la adquisición 1 y k . $f(t)$ es una representación paramétrica de la forma temporal de la deformación. Se asume como

$$f(t) = at^2 + vt + c \quad (8)$$

Donde a es la aceleración del pixel, v es la velocidad del pixel y c es la constante.

El operador lineal resultante G se puede escribir como:

$$\left(\begin{array}{cccc|cc} & & & & 0 & 0 \\ & & & & \vdots & \vdots \\ & & & & 0 & 0 \\ & & & & & \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -f(\Delta t_1) & -B_{perp}^1 \\ 1 & 1 & & 0 & -f(\Delta t_2) & -B_{perp}^2 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -f(\Delta t_3) & -B_{perp}^3 \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & -f(\Delta t_N) & -B_{perp}^N \end{array} \right) \quad (9)$$

Donde D es la matriz relacionada con la adquisición de los interferogramas dado por la ecuación (7).

La función $f(t)$ es usada como una función de regularización. Su contribución en el operador lineal G es el peso dado por el parámetro γ , lo suficientemente pequeño de manera que, si la secuencia de interferogramas de SBAS es completa, la parte superior del operador G no influye en la inversión. Si la secuencia de interferogramas de SBAS es incompleta y surge a partir de series de subgrupos desconectados temporalmente, esta función anexa a para estos subgrupos.

De esta manera se crea el operador lineal G completo (ecuación 9), en el cual pixel por pixel, se selecciona las líneas y columnas de G correspondientes a un particular pixel del apilado de los interferogramas y se invierte el sistema usando este operador.

El apilado tradicional es el método más simple para analizar una serie de interferograma y estimar las velocidades de cada pixel a lo largo de la línea de vista. A pesar de que este tipo de análisis no toma en cuenta las variaciones temporales en las tasas de deformación en comparación con los métodos de series temporales robustos, aún es una buena manera de buscar rápidamente una solución en un conjunto de datos. La estimación tradicional de la velocidad por un apilado es un caso especial para la inversión de NSBAS, donde se usa una función lineal en el tiempo para ligar observaciones entre interferogramas desconectados.

4. Metodología y Selección de Datos

4.1 Selección de Datos

Se revisó el catálogo EOLI-SA de imágenes para el área de estudio, seleccionando así 27 imágenes ENVISAT-ASAR en órbita descendente del track 69 frame 3195, adquiridas entre mayo 2003 a septiembre de 2010. Se muestra la lista de imágenes y su respectiva línea base perpendicular (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Imágenes SAR adquiridas para la ciudad de Celaya entre los años de 2003 a 2010

Imagen	B_{\perp} [m]
20030712	1334
20030816	1319
20040207	451
20040313	-147
20040417	150
20040731	302
20041113	1234
20041218	780
20050122	603
20050507	-263
20050611	723
20050716	-321
20050820	358
20051203	839
20060211	1052
20060527	1121
20061223	252
20070127	946
20081227	583
20091003	673
20100220	740
20100327	304
20100501	341
20100605	340
20100710	604
20100814	576
20100918	316

*Notación de las imágenes año, mes, día (aaaammdd)

4.2 Cálculo de los interferogramas.

En este trabajo, el procesamiento de InSAR se realizó mediante dos programas computacionales: ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry Package (Rosen et al., 2004) y ISCE (InSAR Scientific Computing Environment (Rosen et. al 2012). En general los procesos para la generación de interferogramas son los mismos para ambos programas.

Las diferencias radican en que ISCE es el nuevo software modular de licencia libre generado en el Jet Propulsion Laboratory (JPL), con la intención de mejorar y corregir errores y problemas en el software libre más utilizado para procesar datos de InSAR, ROI_PAC. En primera instancia se mejoró la eficiencia de tiempo de cómputo. ISCE es 10 veces más rápido que ROI_PAC, y se mejoró la compatibilidad con diferentes plataformas de computadoras de escritorio como Linux, MacOS y Unix, además de contar con una eficiente implementación en servidores. Se corrigieron errores de geolocalización existentes en ROI_PAC con rangos de cientos de metros y, finalmente, se agregaron bibliotecas para facilitar otros análisis posteriores como el cálculo de Series de Tiempo (Agram et. al. 2012).

Los pasos generales para el cálculo de un interferograma a partir de dos imágenes SAR son los siguientes:

1. Convertir dos imágenes raw a imágenes SLC (Single-Look Complex) SAR:

Las imágenes crudas representan la señal retrodispersada por el suelo y recuperada por la antena del satélite, ordenadas en un arreglo bidimensional, el cual incluye información sobre cómo fue adquirida la imagen, plataforma, órbita, altura, satélite y parametro de adquisición. Estas se transforman a imágenes SLC a partir de un procedimiento denominado enfoque o focalización, en él a partir de las señales retrodispersada y haciendo uso del efecto Doppler, se reconstruye la respuesta de cada dispersor en la superficie del terreno. Como resultado se obtiene un arreglo bidimensional de pixeles los cuales contienen la información de varios dispersores, lo cual se expresa matemáticamente como $z = \sum_{n=1}^N a_n e^{j\phi_n}$ donde $a_n e^{j\phi_n}$ es la contribución de cada dispersor en el valor de cada pixel.

2. Corregistrar las dos imágenes SLC SAR con una precisión de menos de 0.1 de pixel:

El corregistro se refiere a sobreponer una imagen en la misma geometría de la otra, teniendo conocimiento del desplazamiento en la dirección de rango y azimut (offset); para esto se utiliza la correlación cruzada. En el proceso las imágenes son divididas en fragmentos que consisten en valores de amplitud calculados partir de las imágenes SLC, después de la correlación las imágenes son re-muestreadas por un factor de dos y el proceso de correlación es repetido, después del cual sólo se quedan aquellos fragmentos con alta coherencia. Los desplazamientos en rango y azimut son modelados por medio de funciones polinomiales de la posición del rango y azimut de la imagen que se usa de referencia, los coeficientes de estas funciones son estimadas. Así se puede determinar la posición de un pixel de una imagen en

otra. Finalmente se hace una interpolación de los fragmentos en su nueva ubicación y se obtiene una imagen reajustada a la geometría de otra imagen.

3. Cálculo del interferograma:

El interferograma se calcula multiplicando la primera imagen por el complejo conjugado de la segunda pixel por pixel, como se describió en la capítulo anterior.

4. Reducir el ruido en la fase, debido a los errores de alineación y al efecto speckle (causado por la presencia de varios dispersores dentro de una celda):

Para esto se utiliza un proceso de *multilook*, en el cual se hace un promedio de varios pixeles adyacentes logrando cancelar amplitudes aleatorias y aumentar la coherencia de señales. Se utilizó con un factor de 5 en la dirección del azimut y 1 en la dirección del rango y así obtener una resolución de 20 m por 20 m.

5. Eliminación de la contribución de la curvatura de la Tierra:

En esta etapa se remueve la función de la curvatura de la Tierra relacionada con la separación entre las órbitas durante la adquisición de cada una de las imágenes. Se calcula con base en la geometría de adquisición de la imagen para ello se utilizaron las órbitas proporcionadas por la ESA (Agencia Espacial Europea) y por la DEOS (Department of Earth Observation and Space System) de Delft University of Technology.

6. Eliminación de los efectos topográficos:

Se elimina la fase correspondiente a la topografía, usando para en este trabajo un modelo digital de elevación de 30 m, generado a partir del Modelo Digital de Elevaciones Global ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) versión 2, distribuido por The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI) y National Aeronautics and Space Administration (NASA).

7. Filtrado del interferograma:

Los interferogramas se filtraron con un filtro adaptativo (Goldstein y Werner, 1998) el cual incrementa la relación señal/ruido. Se necesita un filtro de este tipo debido a que en el interferograma, la fase local está dominada por la frecuencia de una sola franja, lo que significa que el espectro de potencia local será de una banda estrecha de señal y una grande de ruido, así se consigue evitar discontinuidades en los extremos.

8. Desdoblamiento de fase:

El desdoblamiento de fase se utiliza para eliminar la ambigüedad de 2π del interferograma. En este procedimiento se agregan o sustraen los múltiplos de enteros de 2π para estimar el valor absoluto de la fase para cada pixel.

Para este trabajo se utilizaron dos métodos, el branch-cut (Goldstein et. al. 1988) el cual consiste en desdoblamiento de la fase siguiendo una serie de trayectorias de integración en un campo

conservativo. En este método se asume que los píxeles vecinos no tienen cambios mayores a medio ciclo de fase, en caso contrario se genera un residuo; los residuos a su vez también generan trayectos por los cuales no habrá un proceso de integración, cabe agregar que en este método los errores de desenvolvimiento de fase son múltiplos de 2π .

El segundo método utilizado para desenvolver las fases es el Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping (SNAPHU) (Chen y Zebker 2002). En dicho algoritmo se desenvuelve la fase como un problema de estimación máxima de probabilidad a posteriori (MAP), calcula la solución de fase desenvuelta más probable para los datos de entrada. Debido a que las estadísticas de los datos de entrada a la solución dependen de la cantidad medida, se plantean tres modelos estadísticos, para la topografía, los datos de deformación y los datos genéricos suavizados.

4.2.1 Correcciones por desenvolvimiento de fase

Para el caso del método branch-cut se corrigieron errores de desenvolvimiento de fase. El proceso consiste en eliminar o establecer trayectoria durante el proceso de desenvolvimiento de fase, modificando el archivo donde se tiene la información de los píxeles considerados como residuos (Hernández-Jaramillo 2011). Este archivo se modifica cambiando el valor del píxel dependiendo si se considera que sea residuo o señal, después se repite el proceso de desenvolvimiento de fase. La decisión de cambiar los valores de estos píxeles se toma en base a estudios previos, la imagen de coherencia del interferograma, además de la información de interferogramas que tengan línea base perpendicular y temporal similar.

4.2.2 Correcciones atmosféricas

Existen dos tipos de contribuciones atmosféricas en el interferograma: las debidas a turbulencia en la atmósfera y la segunda debida a la estratificación vertical. Generalmente, es más fácil eliminar la contribución por estratificación vertical, que está relacionada con la altitud. Sin embargo, la turbulencia es altamente no lineal y, por ello, es difícil su modelación.

Generalmente, la contribución por la estratificación atmosférica se estima mediante una regresión lineal entre la fase interferométrica y la altitud, usando todos y cada uno de los píxeles donde la fase fue desdoblada, excepto las que están en zonas planas (Cavalié et. al. 2007). Sin embargo, este proceso no pudo llevarse a cabo debido a que sólo se pudieron desdoblar los píxeles dentro de la ciudad de Celaya que es prácticamente una planicie.

Entonces se utilizó la librería PyAPS (Python based Atmospheric Phase Screen Estimation) (Joliet et. al., 2011) para hacer la corrección atmosférica. PyAPS hace el cálculo del retraso producido en la fase debido a la atmósfera y correlacionado con la topografía a partir de Modelos Globales Atmosféricos (GAM). Los modelos atmosféricos que se utilizan se tienen

ERA-Interim (European Center for Medium-Range Weather Forecast), MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis, Goddard Space Flight Center, NASA). Los GAM proporcionan estimaciones de la temperatura del aire, la presión atmosférica y la humedad como función de la elevación para una malla gruesa de latitud y longitud, con esta distribución tridimensional de variables se calculan los retrasos en cada pixel del interferograma.

El algoritmo selecciona puntos de la malla del GAM que se superpone con la cobertura espacial de la escena SAR, obteniendo los datos de las variables atmosféricas de estos puntos, se interpola verticalmente en una malla regular entre la superficie y una altitud de referencia, sobre esta se asume que los cambios son mínimos aproximadamente de ~30000 m. Y luego se calculan los retrasos en cada seleccionado del GAM como una función de la altura. La función de los trayectos retrasados $\delta L_{LOS}^g(z)$ en una elevación z es dada (Jovilet et. al. 2011) por:

$$\delta L_{LOS}^g(z) = \frac{10^{-6}}{\cos(\theta)} \left\{ \frac{k_1 R_d}{g_m} (P(z) - P(z_{ref})) + \int_z^{z_{ref}} \left(\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz \right\}$$

Donde θ es el ángulo de incidencia local, $R_d = 287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y $R_v = 461,495$ son las constantes específicas para el aire seco y húmedo, g_m es el promedio ponderado de la aceleración de la gravedad entre z y z_{ref} . P es la presión atmosférica del aire parcialmente seco en Pascales, e es la presión parcial del vapor agua en Pascales y t la temperatura en grados Kelvin. Las constantes son $k_1 = 0.776 \text{ K Pa}^{-1}$, $k_2 = 0.716 \text{ K Pa}^{-1}$ y $k_3 = 3.75 \text{ K Pa}^{-1}$

Este cálculo se hace para cada una de las imágenes SAR y se combinan para producir el mapa diferencial de retraso para corregir el interferograma correspondiente.

4.3 Generación de las series de tiempo

Para la metodología SBAS se necesitan interferogramas con una línea base perpendicular y temporal pequeña, lo cual nos asegura tener suficientes pixeles con buena coherencia en cada interferograma a utilizar en el proceso de inversión. Para escoger los interferogramas, se revisaron los archivos de coherencia de cada par interferométrico, buscando que en la zona de interés se tuvieran suficientes pixeles con una coherencia mayor a 0.4, además de que en el proceso de desenvolvimiento de fase no se encontraran errores que no hayan sido corregidos adecuadamente.

Con base en estos parámetros, se seleccionaron los interferogramas a utilizar en el proceso de inversión. En primer lugar, se tiene una sola imagen adquirida en el año 2008, que no es posible ligar para formar pares interferométricos en una sola serie de tiempo, que abarcara el rango total de las adquisiciones, es decir de año 2003 a 2010. Por esta razón, se decidió calcular dos series temporales una para el período 2003-2009 y otra del 2009-2010 (Figura 4.1). El total de interferogramas para el periodo de 2003-2009 es de 3 interferogramas que cumplieran con

las características descritas y no abarcaban el periodo completo. Por esta razón, no pudo logro realizarse el cálculo de la serie temporal. En el caso de los interferogramas de periodo de 2009-2010 de un total de 27 sólo se utilizaron 17 interferogramas para el cálculo de la serie temporal.

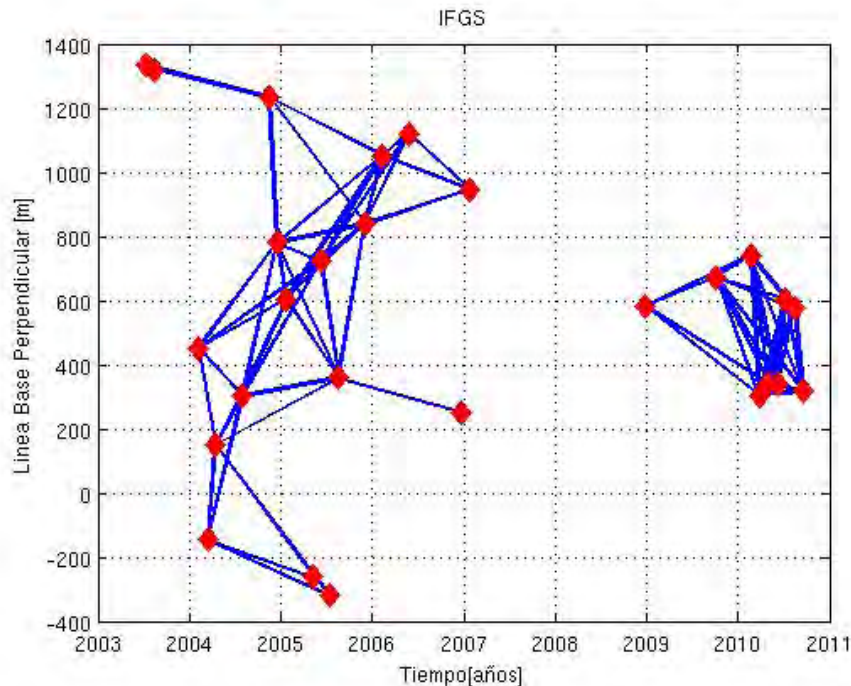


Figura 4.1 Gráfica de la línea base perpendicular y el periodo de tiempo de adquisición de las imágenes, se observa por que la decisión de dividir el cálculo en dos series temporales.

Después de generar los interferogramas se procede a corregirlos, antes de realizar el proceso de inversión para la obtención de la series de tiempo; la razón fundamental es porque así se tendrá la misma geometría para poder hacer la inversión pixel por pixel de todos los interferogramas.

Para el proceso de inversión se utilizó Generic InSAR Analysis Toolbox (GIAnT) (Agram et. al. 2012), descrito como una serie de librerías y scripts donde se implementan varios algoritmos para el cálculo de series de tiempo, como por ejemplo SBAS, N-SBAS y MInTs, además de utilizar PyAPS (Python based Atmospheric Phase Screen Estimation), el cual es una implementación de corrección de atmósfera estratificada usando modelos de atmosfera global. También consta de un módulo de correcciones orbitales a partir de datos GPS.

La secuencia de pasos para utilizar GIANt después de obtener los interferogramas y sus archivos de coherencia corregistrados con las mismas dimensiones es la siguiente. (Ver Figura 4.2):

- Generar los siguientes archivos de entrada: una lista que contenga las fechas (imagen maestra y esclava), línea base perpendicular y satélite de adquisición, dos archivos de longitud y latitud; y un archivo extensión .rsc con los datos generales de los interferogramas
- Después hay que generar los archivos de entrada: para generar un apilado de los interferogramas, donde se colocan parámetros tales como el valor de coherencia mínimo, el tipo de corrección atmosférica estratificada y corrección orbital a utilizar.
- Para terminar se genera un archivo de entrada para la inversión, donde se escoge el interferograma de referencia, el valor del filtro gaussiano, función de tiempo, entre otros parámetros dependiendo el algoritmos de generación de series de tiempo a utilizar.
- Además para algunos algoritmos además se puede hacer el cálculo de incertidumbre sólo en el caso de N-SBAS.

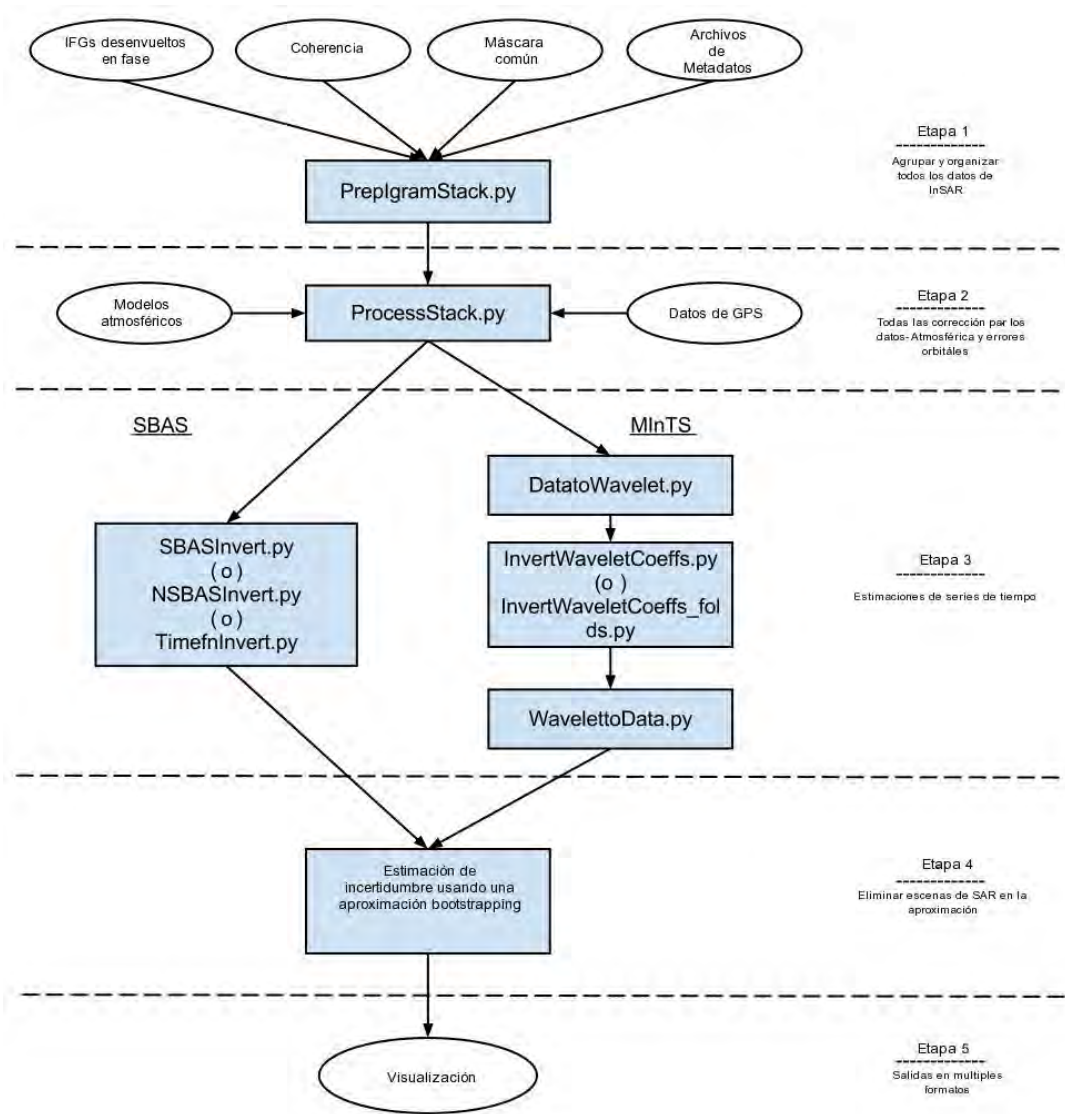


Figura 4.2 Diagrama de que muestra las etapas para el cálculo de las series de tiempo, dentro de la plataforma GIANT. Modificada de Agram et. al. 2012.

4.4 Cartografía de Fallas y Levantamientos GPS

Se hicieron observaciones en situ en la ciudad de Celaya con el objetivo de corroborar la localización de las fallas detectadas mediante InSAR y medir sus desplazamientos acumulados a lo largo de los años. Para este trabajo se realizaron dos vistas de campo a la ciudad de Celaya:

Se realizó en una primera vista en julio de 2014 donde se hizo una evaluación de las zonas donde en la literatura se han reportados los mayores daños (Ávila-Olivera et al. 2008, Díaz-Salmerón et al. 2010) y los lugares donde se habían observado cambios de fase en los interferogramas procesados. Este trabajo de campo se hizo con el objetivo de identificar zonas donde se observan grandes desniveles, además de realizar un registro fotográfico de los daños en la infraestructura urbana.

En la segunda visita realizada en abril de 2015, se realizaron mediciones de GPS, con el objetivo de cuantificar los desniveles acumulados y la topografía general cercana a las fallas de suelos Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica generadas por la subsidencia. Para conseguir este objetivo se decidió hacer un levantamiento diferencial estático, el cual consiste en tiempos cortos de observación. Esta metodología utiliza una estación como base y un receptor móvil hace la medición en el sitio de interés. Se utiliza una estación base ya que la señal emitida por el satélite antes de ser medida por un receptor es distorsionada a su paso por la ionosfera y la troposfera que afectan la precisión de las localizaciones. La estación base emite correcciones a la localización de la estación móvil en formato RTK y esto permite que los dos receptores, al observar simultáneamente los satélites, hacen la medición eliminando los efectos atmosféricos casi por completo. Para tener una precisión de 1 a 5 cm es necesario que la distancia entre la estación base y la estación móvil del orden de 5-7 km.

La estación base fue colocada en el campus I del Instituto Tecnológico de Celaya (ITC) (Figura 4.3), y las mediciones del levantamiento GPS se hicieron a lo largo de varios perfiles. Los primeros se midieron en forma perpendicular a las fallas; las mediciones se iniciaban algunas decenas de metros antes de la falla, cruzaban la traza de la falla y seguían después de ella, lo cual aseguraría observar claramente el cambio de nivel del suelo. También se hicieron mediciones paralelas a la traza de las fallas con el objetivo de observar variaciones del desnivel a lo largo de sus rumbos. En la Figura 4.4 se muestran los lugares donde se hicieron las mediciones de GPS en la ciudad de Celaya. De estos levantamientos se obtuvieron 17 perfiles.



Figura 4.3 Estación base colocada en el campus I del Instituto Tecnológico de Celaya, donde se instaló en el Laboratorio de Electrónica.

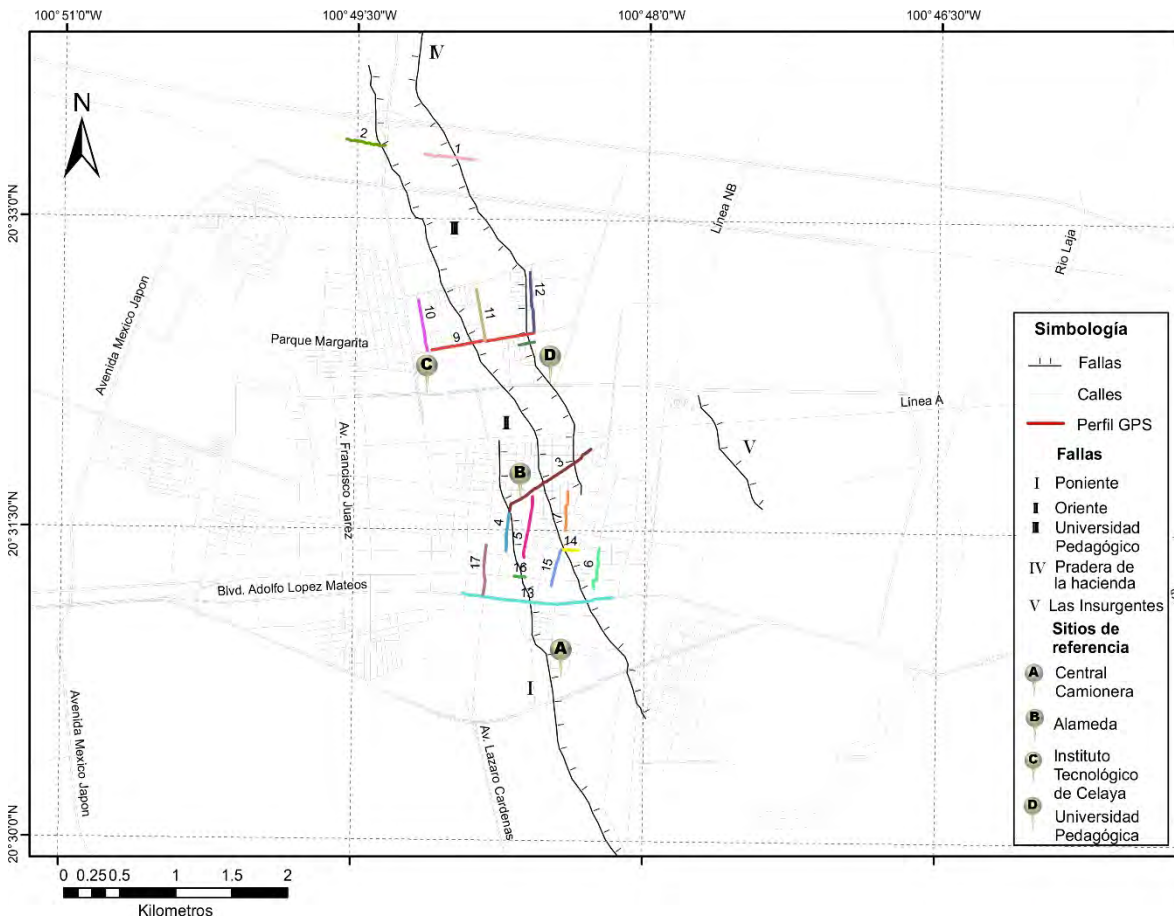


Figura 4.4 Localización de los 17 perfiles de GPS medidos dentro de la ciudad de Celaya. Su disposición va de acuerdo a las zonas donde en los interferogramas se registró mayor deformación y a las observaciones in situ. También se localizan las fallas y sitios de referencia dentro de la ciudad.

5. Resultados y Discusión

5.1 InSAR: Análisis de Series Temporales y Mapas de Promedio para la Ciudad de Celaya

Como se mencionó en el capítulo anterior se dividió el análisis de series temporales de los datos de InSAR en dos periodos: el primero corresponde a las imágenes adquiridas de 2003/07/12 a 2007/01/27 y un segundo de 2009/10/30 a 2010/09/18.

Durante el primer periodo, que abarca de 2003 a 2007, se calcularon 36 interferogramas. Sin embargo, se encontraron problemas de desenvolvimiento de fase que no se lograron corregir. Esta dificultad en desenvolver la fase se debe en parte a la localización de la deformación entre las fallas que dividen a la ciudad en dos regiones. Además, las líneas base, tanto perpendicular mayores a 300 como de tiempo mayores a 150 días, por lo cual se presentan efecto de decorrelación. Otro problema en el proceso de desenvolvimiento de fase, fue que sólo se desenvolvía la fase en la dentro de la ciudad, esto se debe a que la ciudad de Celaya se encuentra rodeada de campos agrícolas que producen una baja coherencia, lo que no permite desenvolvimiento de fase fuera de la ciudad; por lo tanto, no se pudo elegir un punto de referencia estable en los alrededores de la ciudad para iniciar el proceso de desenvolvimiento la fase. En el trabajo de Ávila-Olivera (2008), que utiliza las imágenes del mismo periodo, se menciona este problema y lo atribuye a la tasa de deformación en la ciudad de Celaya, aunado a los problemas de tener líneas temporales y una línea base entre adquisiciones muy grandes.

En el caso de las imágenes que comprenden el periodo de 2009 a 2010, se calcularon 27 interferogramas. Sin embargo, debido a los problemas de desenvolvimiento de fase observados se descartaron aquellos con líneas base perpendiculares mayores a 300 m y con líneas temporales mayores a 140 días. Por lo cual, el número de interferogramas para el cálculo de las series de tiempo se redujo a sólo 17.

Para el caso de los interferogramas procesados con ROI_PAC, de estos 17 interferogramas obtenidos, se eliminaron otros 6 debido a que no se pudo corregir satisfactoriamente los errores de desenvolvimiento de fase (Tabla 5.1). En los resultados de las series de tiempo se observa una tasa máxima de subsidencia de 3.5 cm/ años en dirección de vista de satélite (LOS) para el periodo de septiembre 2009 a septiembre 2010, localizada principalmente entre la Falla Oriente y la Falla Universidad Pedagógica. La estrella en el mapa de promedio muestra el área de mayor subsidencia, además en este mismo punto la gráfica muestra la evolución de la serie temporal en la zona (Figura 5.1), se observa como en la evolución de la serie de tiempo existen oscilaciones en los meses de marzo y abril hay un hundimiento de 3.7 cm.

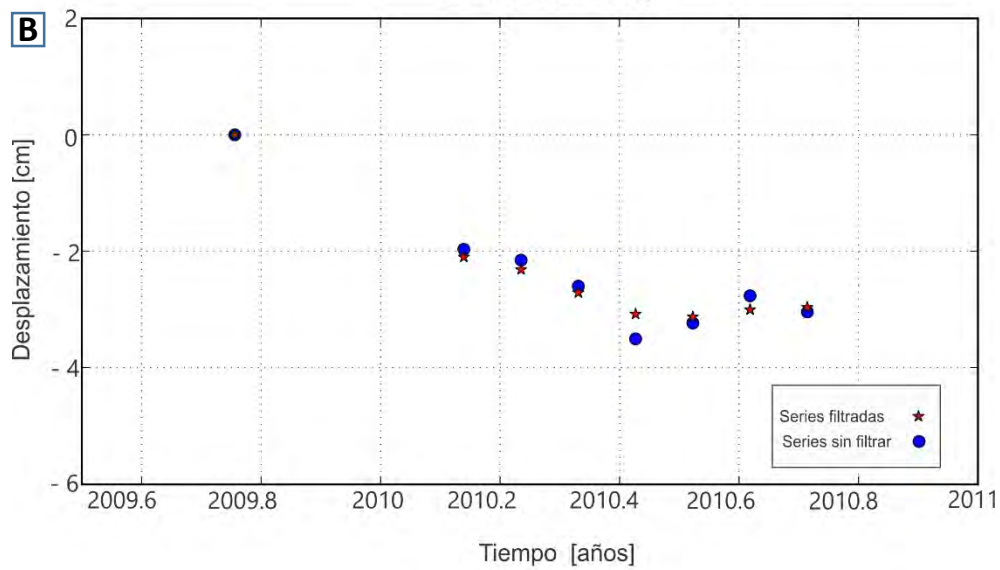
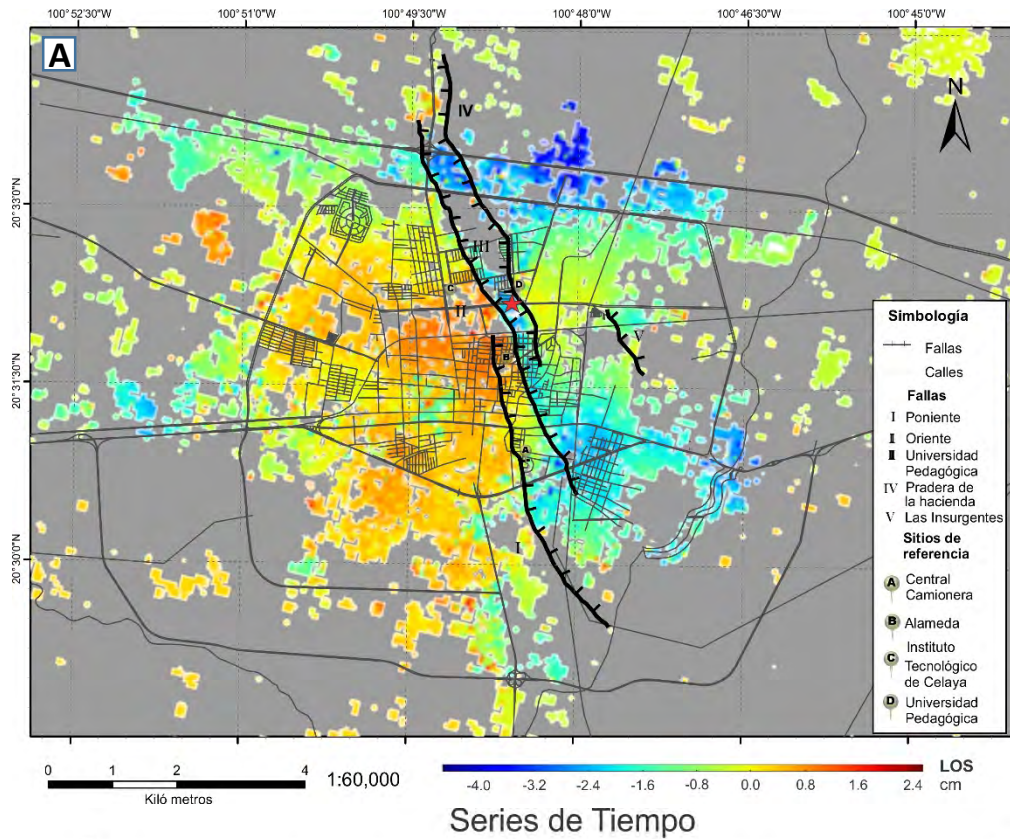


Figura 5.1 A) Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo de tiempo para el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, usando sólo los 11 interferogramas generados por ROI_PAC. Se observa la mayor subsidencia entre Oriente y Universidad Pedagógica. B) En la gráfica se observa de las series de tiempo para la estrella roja indicada en el mapa A, series filtradas en estrellas rojas y series sin filtrar puntos azules; se observa en este punto como la deformación aumenta hasta casi los 3.8 cm en Mayo de 2010 y después esta deformación parece ir disminuyendo con una tendencia a aumentar.

Los interferogramas obtenidos por el software ISCE no fueron corregidos por los errores generados en el desenvolvimiento de fase. Se hizo una primera inversión para obtener las series de tiempo con los 17 interferogramas, sin embargo no se tuvo un resultado satisfactorio (Figura 5.2). Por tanto, se decidió revisar los interferogramas y eliminar aquellos donde eran más evidentes los errores de desenvolvimiento de fase y con menor número de píxeles con alta coherencia. En esta etapa se descartaron 6 interferogramas más (Tabla 5.1). Finalmente, se realizó la inversión con 11 interferogramas que cubren el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010. Como resultado de este análisis, se muestra que la zona de mayor deformación se localiza junto a la falla Poniente; en las series temporales se observa como la mayor subsidencia es de 3.3 cm, en el periodo comprendido entre los meses de marzo y abril (Figura 5.3). En los meses subsecuentes, la deformación disminuye. Igualmente, se observa subsidencia entre la Falla Oriente y la Falla Universidad Pedagógica, pero a diferencia del resultado obtenido con los interferogramas generados en ROI_PAC la subsidencia tiene en valor máximo de 2.2 cm. Es importante reiterar dos puntos importantes en este resultado: primero, son más evidentes los errores de desenvolvimiento de fase generados por las características particulares de la Ciudad de Celaya y la localización de las fallas y de la subsidencia. En segundo término, hay que señalar que se presenta una fuerte decorrelación que no permite tener una cobertura más detallada de la subsidencia, sobre las fallas y principalmente en entre las fallas Poniente y Universidad Pedagógica en la zona norte.

Fechas	Días transcurridos	Diferencia en las líneas bases
20091003_20100220	140	67
20100220_20100327	35	-435
20100220_20100814	175	-164
20100327_20100501	35	37
20100327_20100710	105	300
20100327_20100814	140	272
20100501_20100605	35	-1
20100501_20100710	70	236
20100501_20100814	105	235
20100501_20100918	140	-25
20100605_20100710	35	254
20100605_20100814	70	286
20100605_20100918	105	-24
20100710_20100814	35	-28
20100710_20100918	105	-288
20100814_20100918	35	-260

Tabla 5.1 Interferogramas calculados para el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, los que se encuentran en letras rojas son los que se descartaron y los sombreados en gris son los utilizados para el análisis de interferogramas por separado.

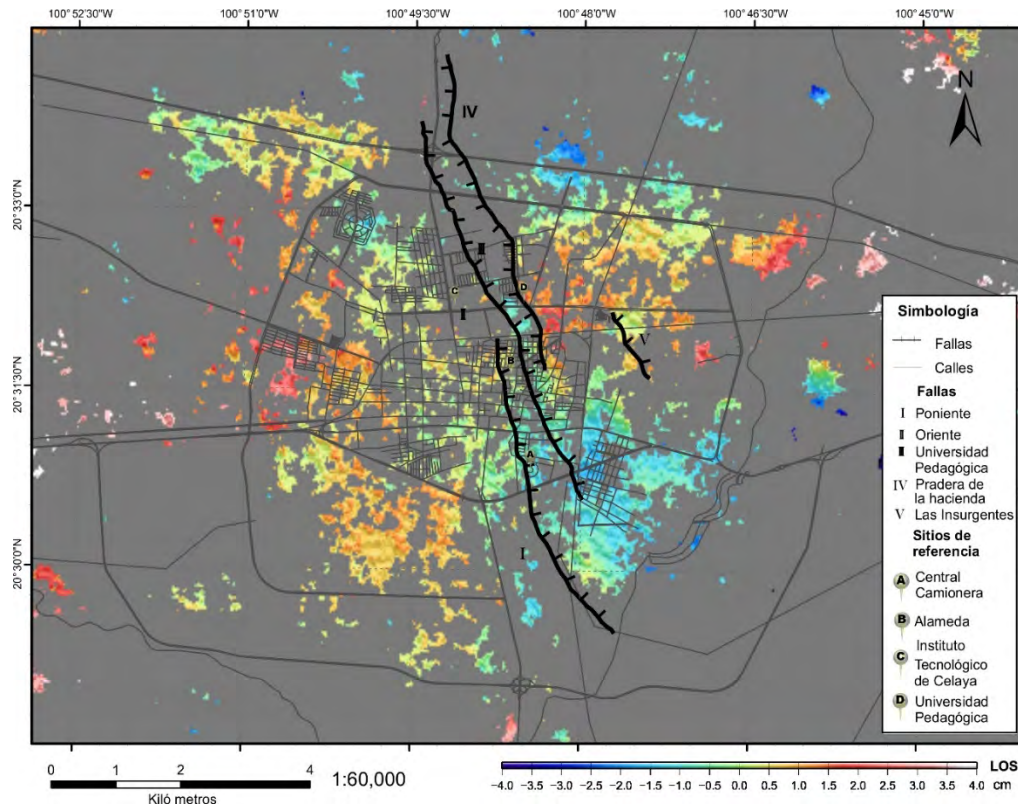
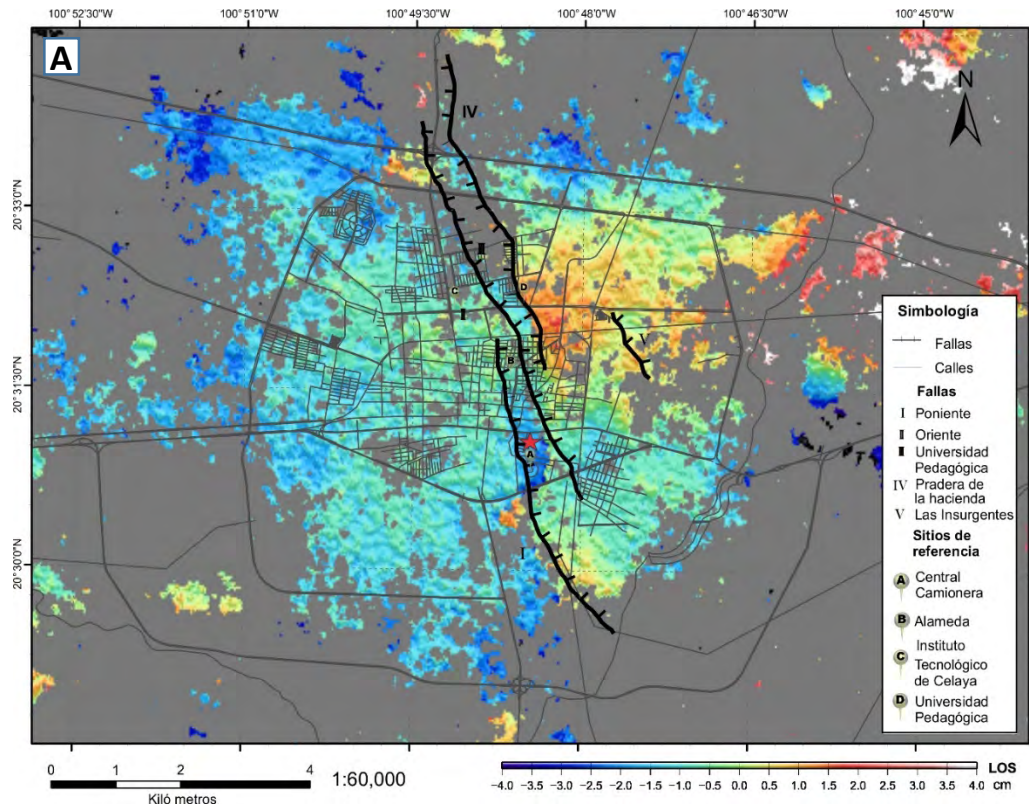


Figura 5.2 Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, con los 17 pares interferométricos generados por ISCE. Es evidente que son muy poco los pixeles donde se logró hacer la inversión.

Los mapas que muestran la tasa anual de subsidencia de la ciudad de Celaya (Figura 5.2) muestran claramente que este se acumula en la zona central y está delimitada por las fallas Poniente, Oriente y Universidad Pedagógica. Fuera de estas fallas no se observa subsidencia significativa. La mayor tasa de hundimiento es de 3 cm/año y está localizada entre las Falla Oriente y la Falla Poniente en el periodo de septiembre 2009 –septiembre 2010.



Series de Tiempo

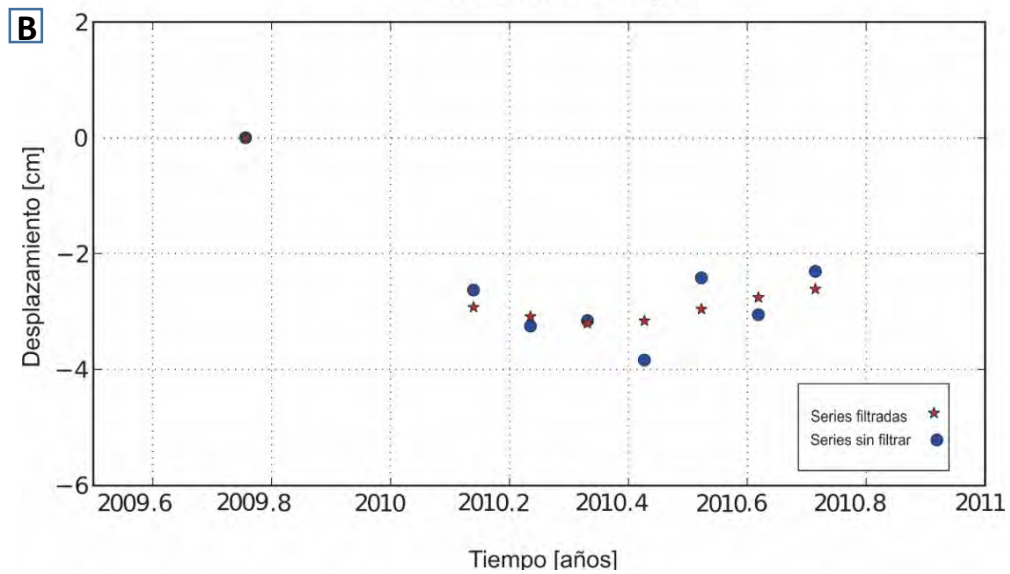


Figura 5.3 A) Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo de tiempo para el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, usando sólo los 11 mejores interferogramas generados por ISCE. Se observa subsidencia en la parte sur de la falla Oriente y en la parte central de la ciudad de Celaya entre las fallas Poniente y Universidad Pedagógica. Sin embargo observamos lo que parece ser un error en el proceso de desenvolvimiento de fase entre la falla Oriente y Poniente en el área de la Central Camionera, con un aumento abrupto en la tasa de deformación. B) En la gráfica de las series de tiempo, series filtradas en estrellas rojas y series sin filtrar puntos azules; se observa en este punto como la deformación aumenta hasta casi los 3.3 cm en Mayo de 2010 y después esta deformación parece ir disminuyendo hasta llegar al mes de septiembre del mismo año.

En estudios previos para la ciudad de Celaya, se propone que la tasa de deformación oscila entre 7-14 cm anuales (Ávila-Olivera et al 2008; Díaz-Salmerón et al 2010; Chaussard et al 2014). Así, los resultados obtenidos aquí parecen subestimar este valor. Por esta razón, se hizo un análisis de la tasa de deformación basado en interferogramas por separado; seleccionando los dos interferogramas con menor línea base perpendicular y línea temporal.

Con estas características se analizaron dos interferogramas, el generado por las imágenes adquiridas el 2010/05/01 y el 2010/06/05, con un la línea base temporal de -1 metros y una línea temporal de 35 días. El otro interferograma es generado por las imágenes 2010/07/10 y 2010/08/14, con un la línea base temporal de -28 metros y una línea temporal de 35 días, los dos corregidos por efectos atmosféricos y errores orbitales (Tabla 5.1).

La deformación máxima registrada en el interferograma 2010/05/01-2010/06/05 es de 1.2 cm y se localizada sobre la falla Oriente y sus alrededores, como se observa en la figura la deformación en Celaya se localiza principalmente en la parte central de oeste a este y de sur a norte. En general la tasa de deformación está en el rango de 1.2 a 0.5 cm en la zona, en un período de 35 días (Figura 5.4).

En el interferograma 2010/07/10-2010/08/14, se observó una deformación máxima de 0.5 cm, pero en este caso no es tan clara, como en el interferograma anterior, una región con mayor deformación (Figura 5.5). Sin embargo, la deformación principal esta concentrar dentro de la misma área como en el caso del interferograma de 2010/05/01-2010/06/05.

Para hacer una aproximación de la tasa de subsidencia, se hizo una extrapolación para obtener un promedio anual de la tasa en dos zonas iguales en ambos interferogramas, se obtiene así una tasa de 0.75 cm en 35 días, dando un valor de 7.7 cm anuales.

Es evidente la diferencia del valor de deformación para los dos interferogramas analizados, a pesar de que la diferencia entre la adquisición de las imágenes para ambos es de 35 días. Revisando la época del año para cada par de interferogramas, se observa que entre mayo y junio es la época donde termina la temporada de estiaje en la región y en los meses de junio y agosto es cuando comienza la temporada de lluvia y se han registrado altos niveles en la precipitación promedio anual (Figura 2.2).

Esto sugiere que estamos observando cambios en la subsidencia en Celaya producto de los cambios estacionales. Este mismo comportamiento se observa en las series de tiempo discutidas anteriormente (Figura 5.3). Hay una tendencia a aumentar la subsidencia entre septiembre de 2009 a mayo de 2010 y luego disminuye ligeramente entre junio y septiembre (época donde se registra la mayor precipitación promedio anual).

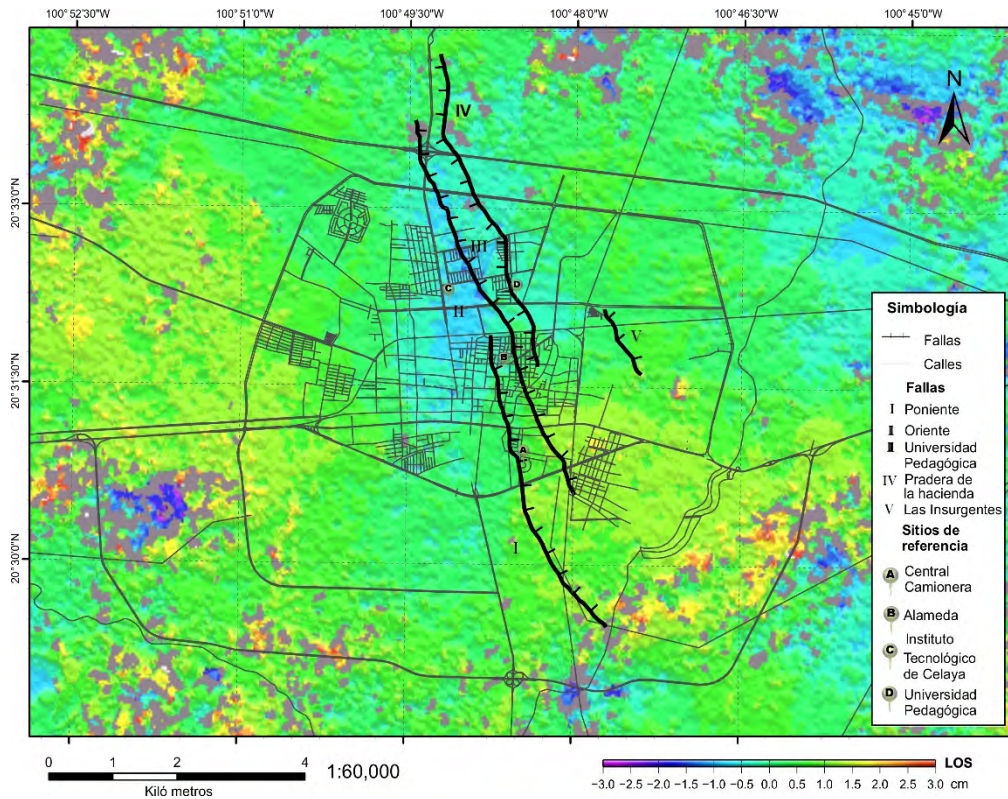


Figura 5.4 El interferograma 2010/05/01-2010/06/05, se observa claramente la zona central de la ciudad así como una deformación máxima localizada sobre la falla Oriente y sus alrededores.

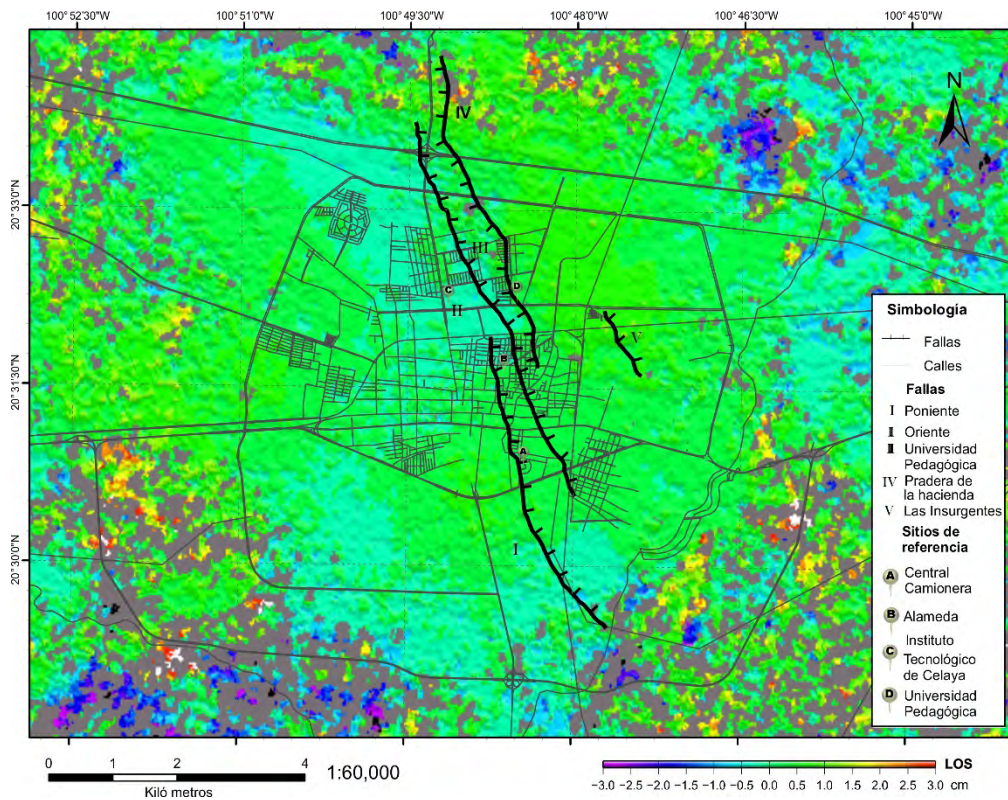


Figura 5.5 Interferograma 20100710-20100814 se observa una menor deformación pero es importante resaltar que la deformación máxima sigue apareciendo en la parte central de Celaya sobre la falla Oriente.

5.2 Comparación con estudios previos

Para la ciudad de Celaya se han hecho anteriormente dos estudios usando interferometría de radar los cuales se mencionan en el capítulo 1. El primero de Ávila-Olivera et al. (2008) obtuvo una tasa de deformación de 7 y 10 cm/año para el año 2006 y la mayor deformación se localizó entre la as falla Oriente y Universidad Pedagógica (Figura 1.2); se observa una localización muy parecida a los resultados de series de tiempo presentados en este trabajo, pero además se observa deformación entre la falla Poniente y Oriente; lo que difiere notablemente es la estimación de la tasa anual ya que se obtuvo un máximo de 3.5 cm/año para el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010, es decir casi 7 cm menos que lo estimado por Ávila-Olivera et al. (2008). En el caso del análisis por interferogramas individuales (Figura 6.4) se observa que la mayor deformación se localiza principalmente sobre la falla Poniente y sus alrededores, es decir un área de mayor deformación que la reportada por Ávila-Olivera et al. (2008), en cuanto a los valores de tasas anuales de subsidencia se reportan valores similares (Tabla 5.2).

Autor	Técnica	Datos utilizados	Tasa de deformación
Ávila-Olivera et al. (2008)	D-InSAR	9 imágenes ENVISAT, julio 2003-mayo 2006	7 y 10 cm/año para el 2006 (LOS)
Díaz-Salmerón et al. (2010)	GPS	4 campañas realizadas en Dic/2008, May/2009, Jun/2009, Ago/2009.	12-14 cm/año (vertical)
Chaussard E. et al. (2014)	SBAS	8 imágenes ALOS-PALSAR, octubre 2007 – febrero 2011	8.5 cm/año (vertical)
Este estudio	SBAS	8 imágenes ENVISAT, septiembre 2009-septiembre 2010	3.5 cm/año para el periodo sep 2009- sep 2010 (LOS)
	D-InSAR		7.2 cm/año para el periodo sep 2009- sep 2010 (LOS)

Tabla 5.2 Tabla de comparación de los resultados en la tasa de deformación de estudios previos en la ciudad de Celaya.

Chaussard et al. (2014) haciendo un estudio de series de tiempo de 2007 a 2011, reportan una tasa de 8.5 cm/año y clasifica a la subsidencia de Celaya como controlada por fallas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el análisis de interferogramas individuales. Sin embargo se observa que la localización de las áreas con mayor subsidencia es diferente a lo observado en estudios anteriores y en este, ya que la mayor deformación es observada al oeste y sur de la ciudad y muy baja en la parte central.

En el trabajo de Díaz-Salmerón et al. (2010) se utilizaron datos de GPS en la zona este de la ciudad registrando tasas de 10 a 14 cm/año. Estos resultados muestran dos sitios con máximos valores de deformación, el primero en la zona central al oeste de las fallas Oriente y Universidad Pedagógica; el segundo al norte sobre la falla Oriente y se extiende hasta casi llegar a la falla Universidad Pedagógica. En la Figura 5.6 se compara el estudio de GPS y el interferograma de mayo a junio de 2010. La deformación sobre en la falla Oriente se registra

en ambos estudios. Sin embargo la otra área donde el estudio de GPS reporta deformación no es registrada por el interferograma. Los resultados de este estudio no coinciden totalmente con lo reportado en el trabajo de GPS debido a que el interferograma sólo registra 35 días de deformación. En cambio el estudio de GPS fue realizado en cuatro campañas y reportan la deformación vertical. Esto sugiere que al no ser el mismo periodo de análisis y la misma dirección de deformación, no se logró registrar la subsidencia en la parte central al este de las fallas Oriente y Universidad Pedagógica, además de que los valores en sus tasas de deformación son casi 4 cm mayores a las registradas por los estudios de InSAR.

Además reportan que en algunos puntos de medición observan ascensos de la superficie en periodos de lapso cortos, pero estos mismos puntos en lapsos largos tienden a registrar hundimiento, así concluyen que el comportamiento del terreno de Celaya es oscilante. Este mismo comportamiento se observa en los resultados de la series de tiempo, pero la mayor oscilación del terreno se observa entre el cambio de las época de secas a lluvias, lo cual sugiere una relación entre este comportamiento y la recarga del acuífero.

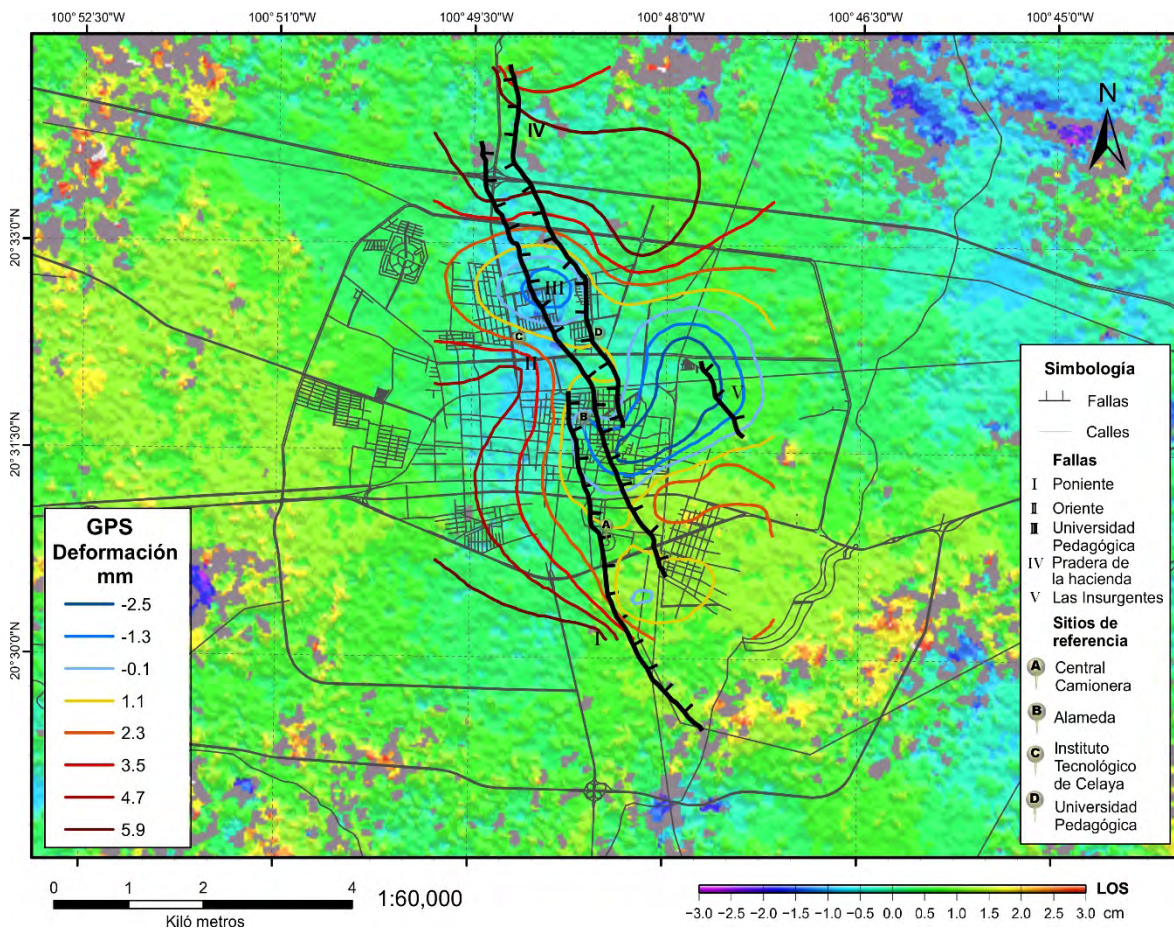


Figura 5.6 Figura donde se comparan los resultado de Díaz-Salmerón et al. (2010) y los resultado de este estudio, las líneas de colores son el modelo resultado de las campañas de GPS y debajo el interferograma mayo-junio.

5.3 Interpretación geológica e hidrogeológica

A partir de los datos proporcionados por la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (JUMAPA) que incluye los cortes litológicos de 60 pozos localizados dentro de la ciudad de Celaya, se realizaron correlaciones entre los pozos generando así 5 secciones esquemáticas. Una de las principales razones para hacer la correlación de los columnas estratigráficas de cada pozo y generar las secciones, fue para observar si las fallas en observadas en superficie eran fallas tectónicas activas, producto de una falla tectónica en el basamento o su relación con la geología del subsuelo.

Los rumbos de las secciones generadas a partir de esta información fueron seleccionados para observar si se observaban cambios en la estratigrafía relacionados con las fallas en superficie. La sección A-A* corta las fallas Oriente y Universidad Pedagógica de E a W en la parte Norte de la ciudad, la sección B-B* corta las Fallas Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica en el centro de la ciudad. Después, en la zona Sur, la sección C-C* corta las fallas Oriente y Poniente. Finalmente, dos secciones paralelas al rumbo de las tres fallas principales Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica, la sección D-D* al Oeste y la E-E* al Este (Figura 5.7).

En los perfiles se identificaron diferentes unidades: la más reciente corresponde a una capa de depósitos lacustres. Por debajo de esta se encuentran intercalaciones de coladas de basalto con tobas. Dentro de estas intercalaciones se diferenciaron tres coladas basálticas presentes en el subsuelo a distintas profundidades.

En las secciones A-A* y C-C* al cruzar las fallas de oeste a este, hay un cambio en las unidades litológicas principalmente en el espesor de la unidad más superficial de depósitos lacustres y un cambio en la profundidad de las unidades subyacentes, que contienen intercalaciones de basaltos fragmentados y basaltos sanos. El espesor de los depósitos lacustres aumenta súbitamente al cruzar el escarpe de las fallas (~120 m). El espesor de los sedimentos lacustres es menor al este de las fallas que en la parte occidental de la ciudad. Por tanto, la unidad de basaltos se encuentra más somera en la zona oeste y más profunda en la zona Este (Figura 5.8 y Figura 5.10); lo cual es una clara evidencia de un cambio estratigráfico drástico en el área que cruza por el centro a la ciudad de Celaya de sur a norte con un rumbo de NW 30° SE. En el caso de la sección B-B*, se esperaba ver una cambio más evidente entre los pozos Cañitos, Alameda 1-A y Zapote (Figura 5.9). En el caso de Cañitos y Alameda 1-A, que cruzan la falla Poniente, no se observó un cambio evidente. Entre Alameda 1-A y Zapote se nota la diferencia de espesor de la unidad lacustre y la posición del al unidad de basaltos, como en la sección A-A* y C-C*, pero este cambio no es tan marcado (Figura 5.9).

La sección D-D* localizada al oeste de las fallas centrales, y paralela a las mismas, muestra que el espesor de sedimentos recientes varía de 100 a 38 m de norte a sur. Igualmente, se observa que las intercalaciones de coladas basálticas no son uniformes a lo largo de la sección. Sin

embargo, existe una clara correlación de las unidades de basalto en la zona sur de la sección de los pozos La inspección a Santa Cecilia (Figura 5.11). La sección E-E* muestra el comportamiento de las unidades litológicas al este de las fallas centrales de norte a sur. Se nota que, a diferencia de la sección D-D*, el espesor de sedimentos fluvio-lacustres es más homogéneo y potente (200 a 250 m); sólo el pozo Zapote muestra un espesor menor 130 m. En el caso de las unidades de lava basáltica también se observa un comportamiento más homogéneo que en la sección D-D* y se localizan a mayor profundidad (Figura 5.12). En resumen, al comparar la sección D-D* con la sección E-E* se observa una diferencia muy marcada en el espesor de los sedimentos lacustres, en cuanto a las coladas de lava se observa en la sección D-D* al parecer tres coladas y en la sección E-E* una de distribución más homogénea. La frontera entre ambas regiones está representada en superficie por el sistema de fallas observado en suelos. Sin embargo, no hay ninguna evidencia directa que indique que esta diferencia en la profundidad de las capas de lava se deba a una falla geológica activa que corte dichas unidades. Se propone que el número de coladas y su disposición diferente entre la zona este y oeste, es la que produce el cambio de espesor en los sedimentos recientes, y por tanto las fallas.

La estratigrafía de pozos indican que existen unidades que son producto de eventos volcánicos intercaladas con unidades vulcano-sedimentarias; por encima de estos depósitos de lava se depositaron los sedimentos de origen fluvio-lacustre. La correlación de estas unidades producidas por eventos volcánicos no es tan directa como en el caso de unidades de origen puramente sedimentario. Además los cortes litológicos de pozos localizados entre las fallas Poniente Oriente y Universidad Pedagógica son pocos y no se encuentran homogéneamente distribuidos.

La unidad estratigráfica de sedimentos recientes es la que mejor puede ser correlacionada, con el fin de visualizar de mejor manera su distribución se hizo un mapa de isopacas interpolando los datos de los espesores de los sedimentos fluvio lacustres observadas de los pozos Figura 5.13. Las isopacas de los sedimentos lacustres muestran tres zonas bien definidas: 1) en la zona este el espesor de los sedimentos lacustres varía de 30 a 120 m; 2) en la zona central de la ciudad, la potencia es de 120 a 160 m; y 3) en la zona oeste de la ciudad, el espesor de los sedimentos compresibles varía de 170 a 270 m.

Es muy probable que el cambio abrupto en el espesor de los sedimentos fluvio-lacustres tiene una relación con la subsidencia y con la presencia de zona de fallas en suelos (Figura 5.13). En la zona oriental, donde se observa una menor subsidencia, el espesor de los sedimentos es menor. El mayor hundimiento en los suelos de la ciudad de Celaya se localiza al este de la zona de la Falla Universidad Pedagógica. En esa región, el mayor espesor de sedimentos de origen fluvio-lacustres es correspondientemente mayor.

Las fallas observadas en los suelos que cruzan la ciudad de norte a sur, son el reflejo superficial del contraste en la potencia y consolidación diferencial entre la región occidental y oriental de la ciudad.

Igualmente, se encontró una correlación de los niveles estáticos observados entre los años 2009 y 2010 del acuífero del valle de Celaya (Figura 2.4) con la localización de las falla Oriente, Poniente y de la Universidad Pedagógica. En los mapas de nivel estático se observa un cono de abatimiento en la zona central de la ciudad de Celaya, coincidente con la localización de las fallas.

JUMAPA proporciono datos sobre el gasto por zona de la ciudad para el primer semestre del año 2008, se observa que el mayor gasto y el mayor numero de pozos explotados se localiza en los pozos de la zona NW de la ciudad, donde el espesor de sedimentos es menor; sin embargo, si se observa las estadísticas para la zona norte en general es donde hay más pozos 69.51 % y hay el mayor el gasto 68.97%, además los resultados obtenidos de mayores tasas de hundimiento entre la fallas Oriente y Universidad Pedagógica se localizan en igualmente al norte de la ciudad (Tabla 5.3).

2008-1					
Zona	No. de pozos	%	Caudal instantaneo	%	% Acumulado
NW	35	42.68	717	39.88	68.97
NE	22	26.83	523	29.09	
SW	13	15.85	303	16.85	31.03
SE	12	14.63	255	14.18	
Total	82	100.00	1798	100.00	100.00

Tabla 5.3 Datos del caudal por zonas de la ciudad de Celaya para el primer semestre de 2008.

Ambas relaciones se explican debido a que la unidad de sedimentos de origen fluvio-lacustre se encuentra saturada de agua, al extraer grandes cantidades de esta disminuye la presión de fluido contenido en los poros de los sedimentos lo cual a su vez produce una contracción en el espacio del poro generando subsidencia.

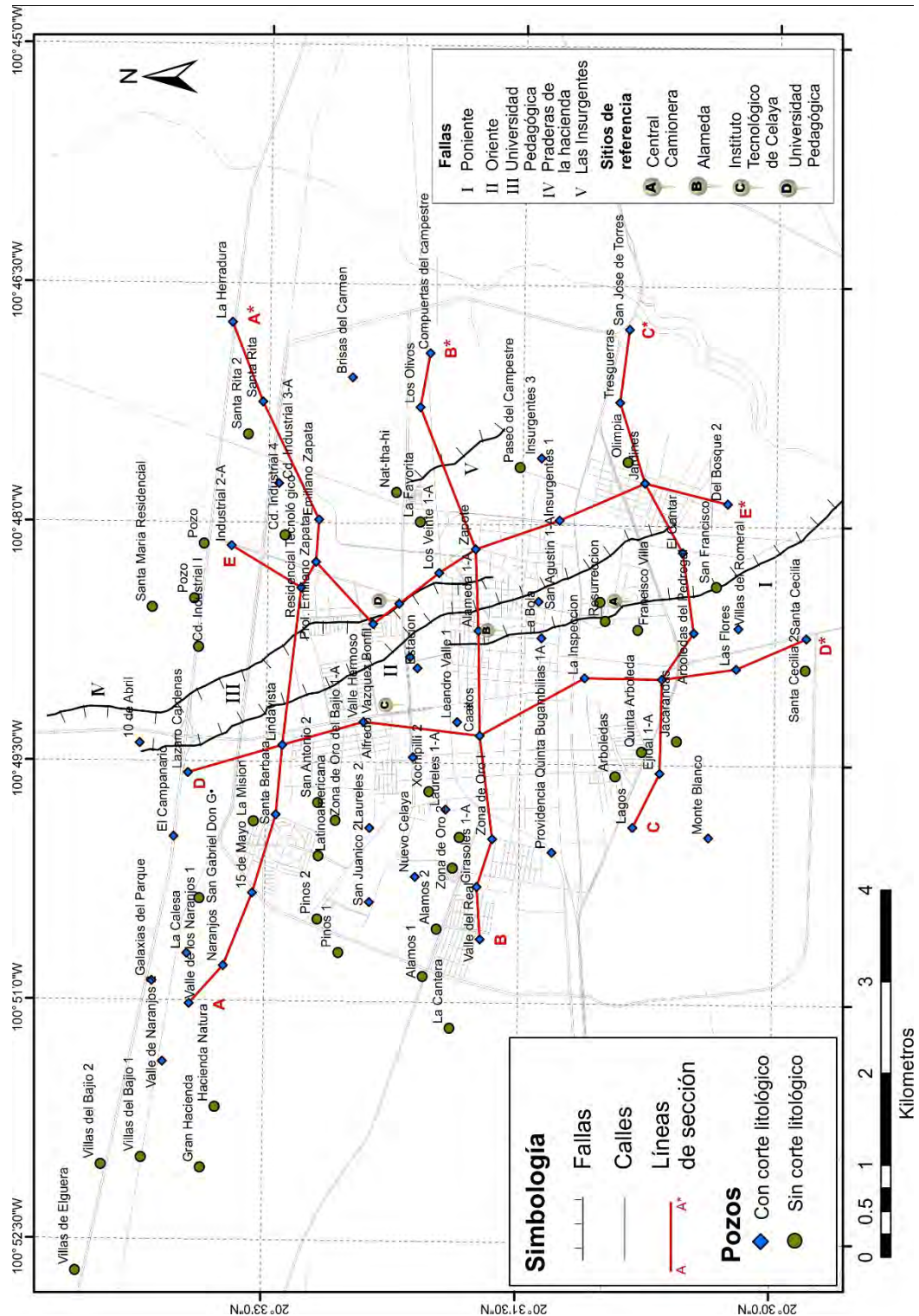


Figura 5.7 Mapa donde se muestran la ciudad de Celaya y los pozos de extracción dentro de ella administrados por JUMAPA. Los puntos azules son pozos que cuentan con secciones litológicas y los verdes aquellos los cuales no disponen con esta información. Las líneas rojas son las cinco secciones que se hicieron con base en los datos de cortes litológicos (Figuras de 5.8-5.12).

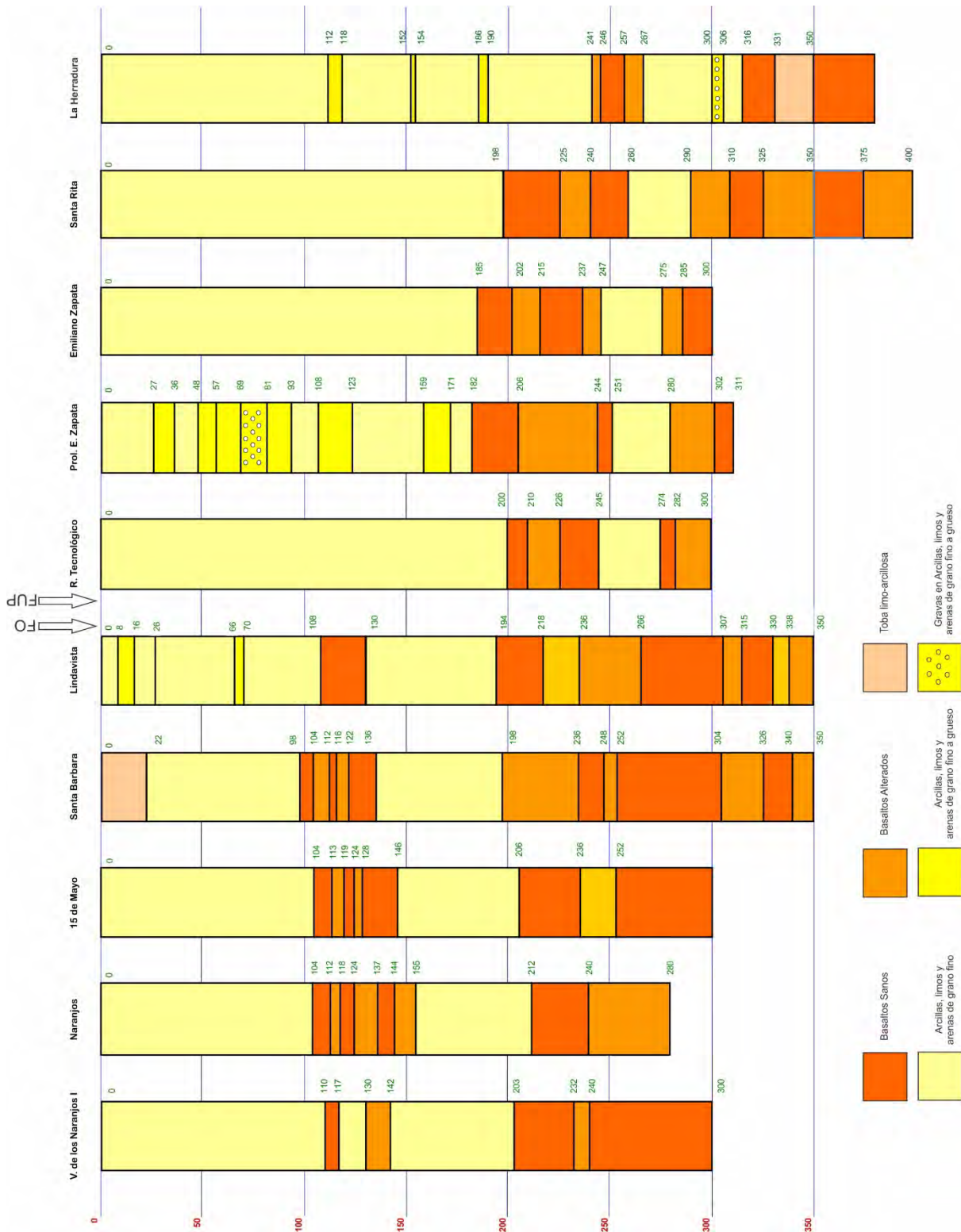


Figura 5.8 Sección A-A* corresponde a la zona norte de la Ciudad de Celaya, la localizada en la Figura 5.7, corta las fallas Oriente y Universidad Pedagógica. Se observa un cambio de las unidades litológicas entre los pozos Lindavista - Residencial Tecnológico.

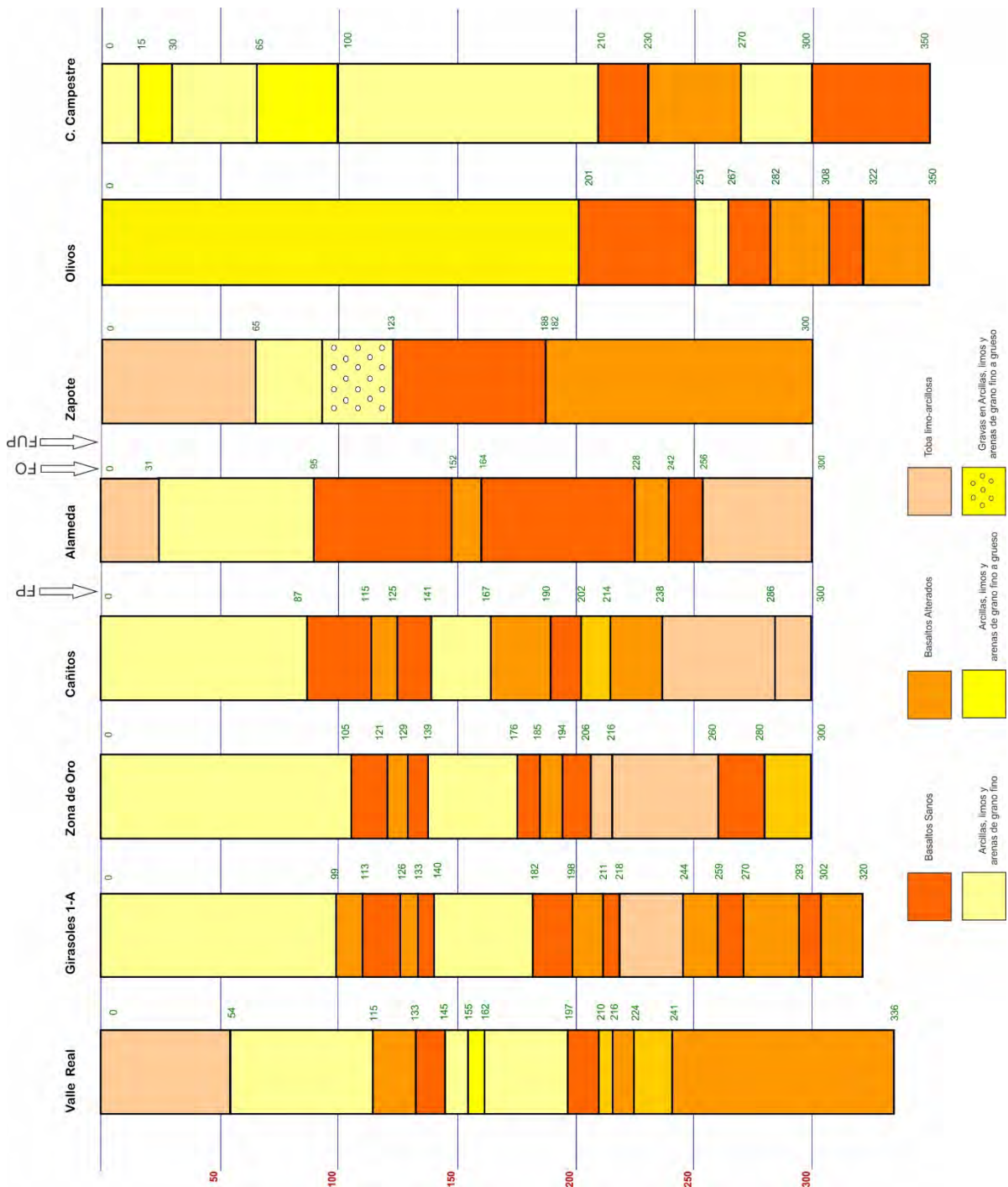


Figura 5.9 Sección B-B* corresponde a la zona centro de la Ciudad de Celaya, la localizada en la Figura 5.7, corta las fallas Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica. Se observa un cambio de las unidades litológicas entre los pozos Alameda y Zapote.

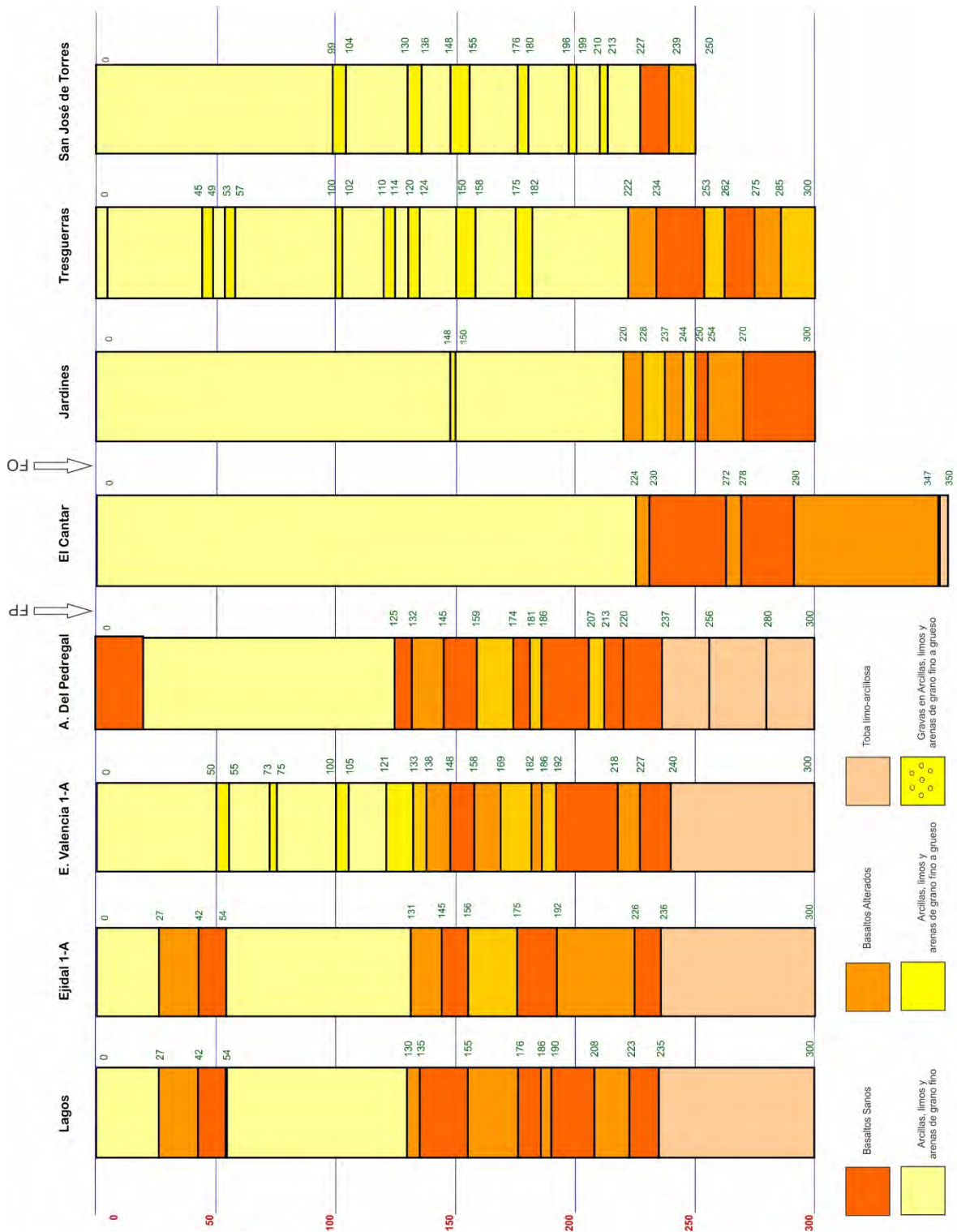


Figura 5.10 Sección C-C* corresponde a la zona sur de la Ciudad de Celaya, la localizada en la Figura 5.7, corta las fallas Oriente y Poniente. Se observa un cambio de las unidades litológicas entre los pozos Arboledas del Pedregal y El Cantar.

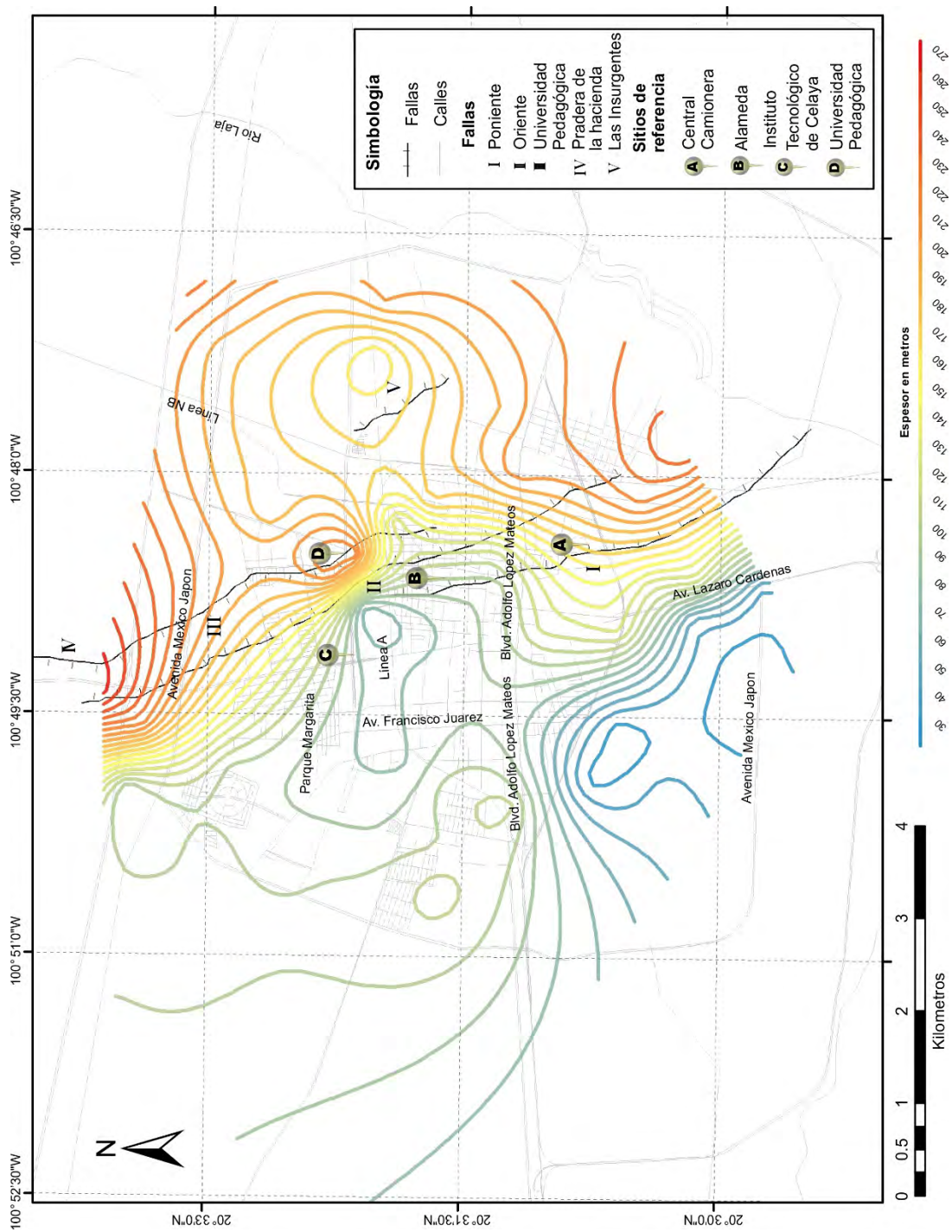


Figura 5.13 Mapa de isopacas de espesor de sedimentos recientes, las líneas azules son espesores más delgados y los rojos espesores más gruesos. Es evidente la relación del cambio de espesor (zona de transición) y la zona de fallas.

5.4 Perfiles GPS

Uno de los principales objetivos de las mediciones de GPS en la ciudad de Celaya fue cuantificar los desplazamientos acumulados en cada una de las fallas reportadas y observar si existía una correlación directa entre estos desniveles y los resultados obtenidos con los interferogramas.

De los 17 perfiles obtenidos, se describen primeramente los resultados para los perfiles perpendiculares a las fallas, perfil 1, 2, 9, 3 y 13, ordenados de acuerdo a su localización de norte a sur; los valores de altitud graficados de oeste a este. Además, se midieron otros complementarios, perfil 8, 14 y 16, ordenados de la misma forma cruzando la zona de fallas (Figura 4.2). Estos perfiles dan una visión complementaria de la deformación acumulada que ha sufrido el subsuelo de la ciudad de Celaya. Las mediciones cercanas a las fallas, que se han hecho tradicionalmente, están afectadas por la constante repavimentación de la zona, que enmascara el hundimiento real

El perfil 1 se midió sobre la calle Poniente 4 que atraviesa la falla Universidad Pedagógica. En este perfil se registró un desnivel promedio de 0.75 m; en el caso del perfil 2 que corta perpendicularmente a la Falla Oriente al norte sobre la calle Plan de Cuernavaca se observa un desnivel aproximado de 1 m. En todos los casos se hizo un esfuerzo por mantener una orientación paralela de los perfiles. Fue necesario realizar dos perfiles ya que no se pudo hacer la medición continua debido a que existe una gran zona industrial que divide la zona. En la Figura se observa un desnivel total de aproximadamente 2 m entre el perfil 1 y perfil 2 (Figura 5.14).

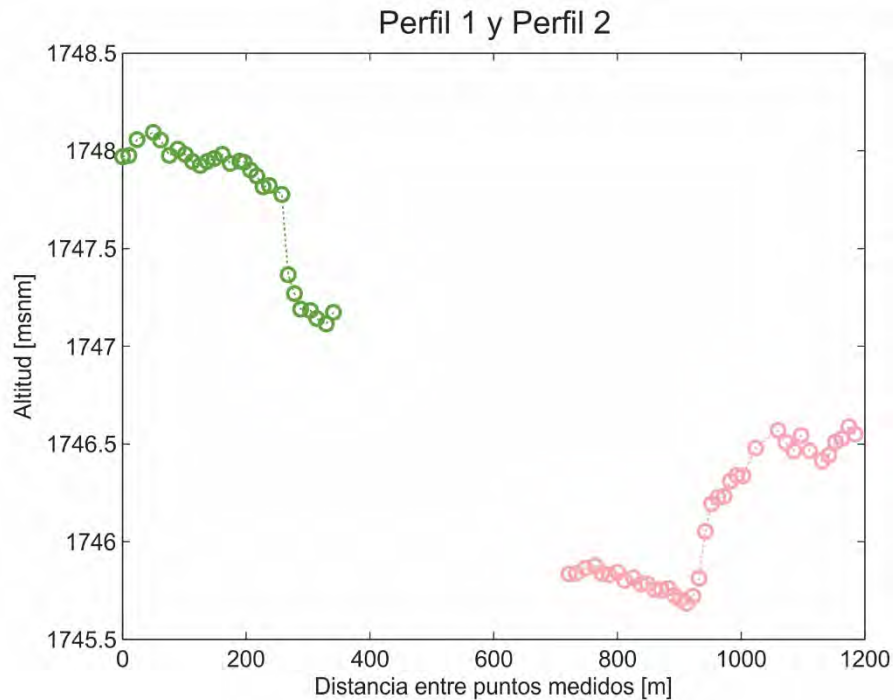


Figura 5.14 Gráfica de la altitud y la distancia entre los puntos medidos de los perfiles 1 y 2, se observa un desnivel acumulado de 0.75 m para el perfil 1 y de 1 m para el perfil 2. Además es claro que hay mayor altitud en la zona Oeste que en la zona Este de la ciudad.

El perfil 9 cruza las fallas Oriente y Universidad Pedagógica (Figura 5.15). Las mediciones de este perfil fueron hechas sobre la calle Antonio García Cubas. En la figura se observa un desnivel acumulado sobre la falla Oriente de aproximadamente 3 m. En el caso de la falla Universidad Pedagógica se observó un desnivel menor de aproximadamente 1.5 m. En el área donde se hicieron las mediciones sobre la falla Universidad Pedagógica era evidente un reciente mantenimiento sobre el asfalto, puesto que dicho factor podría enmascarar el valor real de desnivel, se hizo un perfil complementario (perfil 8) sobre una calle paralela a Antonio García Cubas. Para ello, se escogió la calle Presa de la Olla, la cual no tiene carpeta asfáltica. Así, el perfil 8 muestra un desnivel acumulado de aproximadamente 1.2 m (Figura 5.16). El promedio de los desniveles obtenidos de los perfiles 9 y 8 para la falla Universidad, es de 1.35 m.

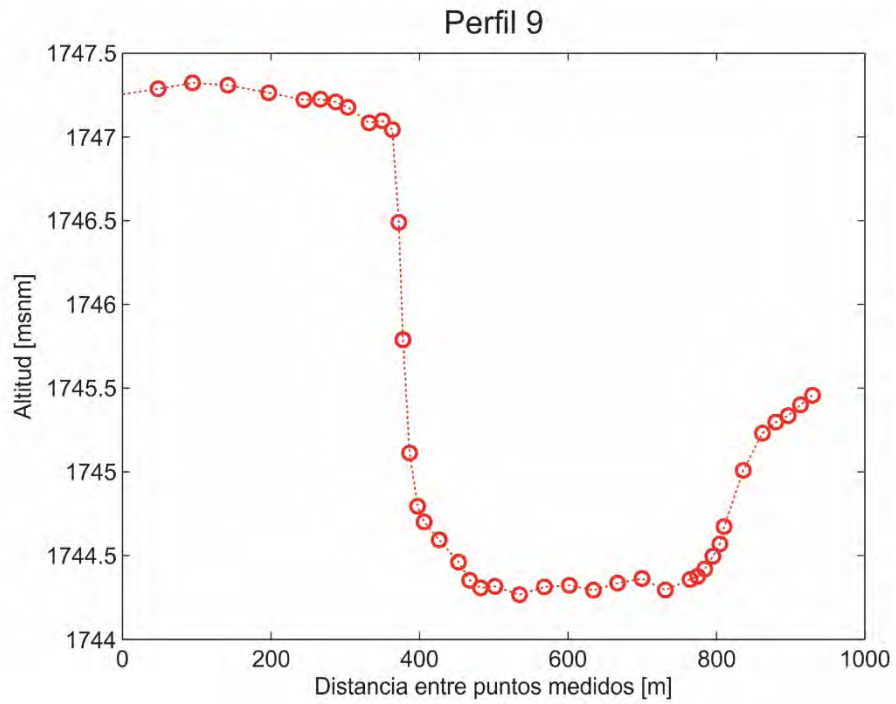


Figura 5.15 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, el desnivel acumulado del lado izquierdo corresponde a la falla Oriente, 3m. Y el desnivel acumulado de lado izquierdo corresponde a la falla Universidad Pedagógica, 1.5m.

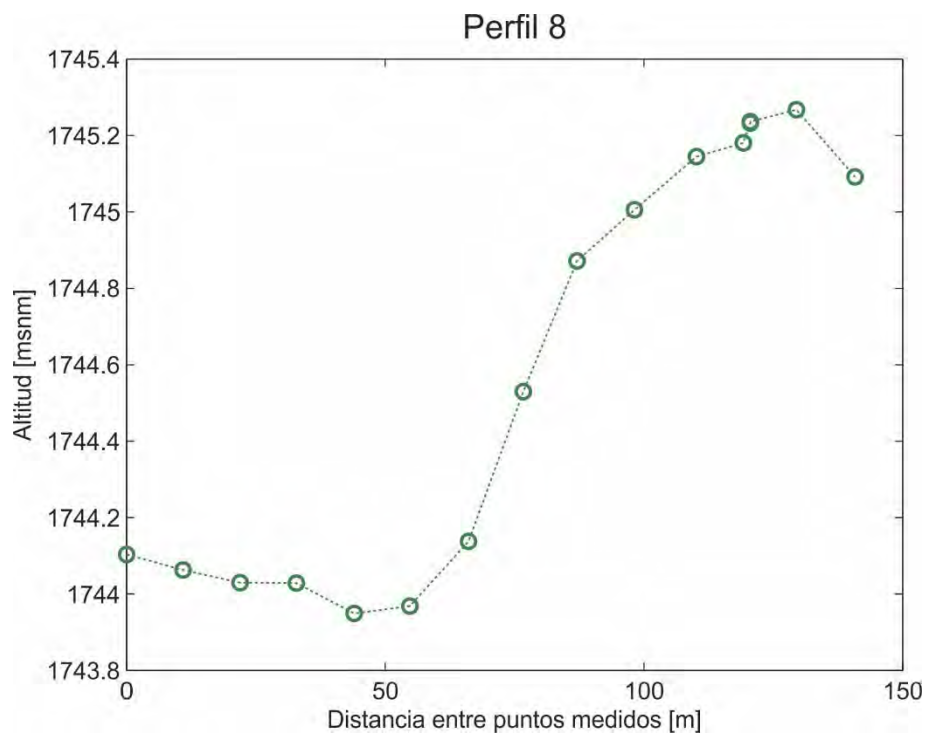


Figura 5.16 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos correspondientes al perfil 8 el desnivel acumulado corresponde a la falla Universidad Pedagógica y es de aproximadamente 1.2 m.

El perfil 3 cruza la falla Poniente, Oriente y Universidad Pedagógica; las mediciones se realizaron sobre la calle Guillermo Prieto. El desnivel en la falla Poniente es poco evidente en este perfil, puesto que se observó un desnivel de tan sólo 0.5 m, para la falla Oriente el desnivel acumulado promedio es de 2.5 m y el desnivel en la falla Universidad Pedagógica registrado es de 1.5 m (Figura 5.17).

En la zona sur las mediciones para el perfil 13 se hicieron sobre el Bulevar Adolfo López Mateos que atraviesa la falla Poniente y Oriente. En esta zona el desnivel acumulado en la falla Poniente es de aproximadamente 0.75 m y en la falla Oriente se registró un desnivel de 1 m (Figura 5.18). Durante las mediciones se observaron evidencias de un reciente trabajo de mantenimiento sobre el bulevar. Por esta razón, se decidió hacer mediciones complementarias a lo largo de los perfiles 14 y perfil 16. El perfil 16 se localiza sobre la calle José María Morelos donde se registró un desnivel acumulado de 1.2 m sobre la falla Poniente y en el perfil 14, localizado en la calle Acapulco, el desnivel acumulado en la falla Oriente es de 1.6 metros aproximadamente (Figura 5.19 y Figura 5.20).

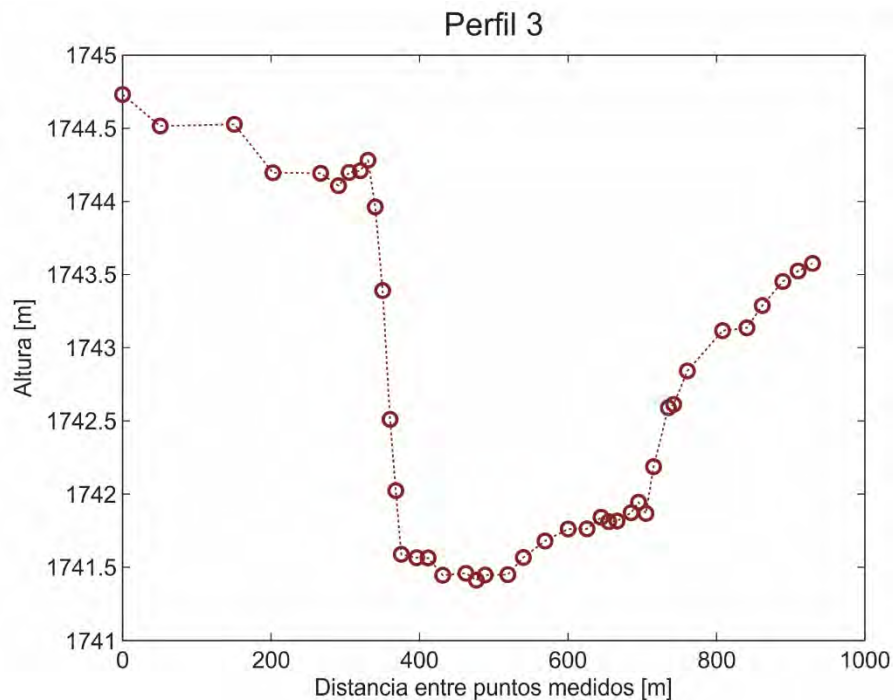


Figura 5.17 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, de izquierda a derecha el primer desnivel corresponde a la Falla Poniente, el segundo desnivel a la Falla Oriente y el tercero a la falla Universidad Pedagógica.

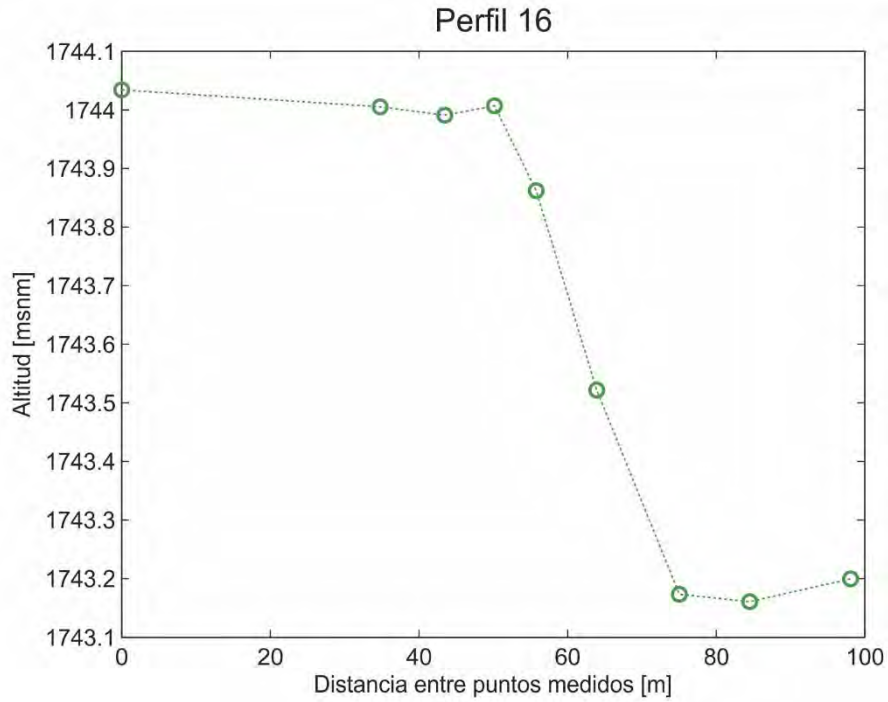


Figura 5.20 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos, el desnivel acumulado pertenece a la falla Oriente es de alrededor de 1.6 m, mayor que el registrado sobre el perfil 13.

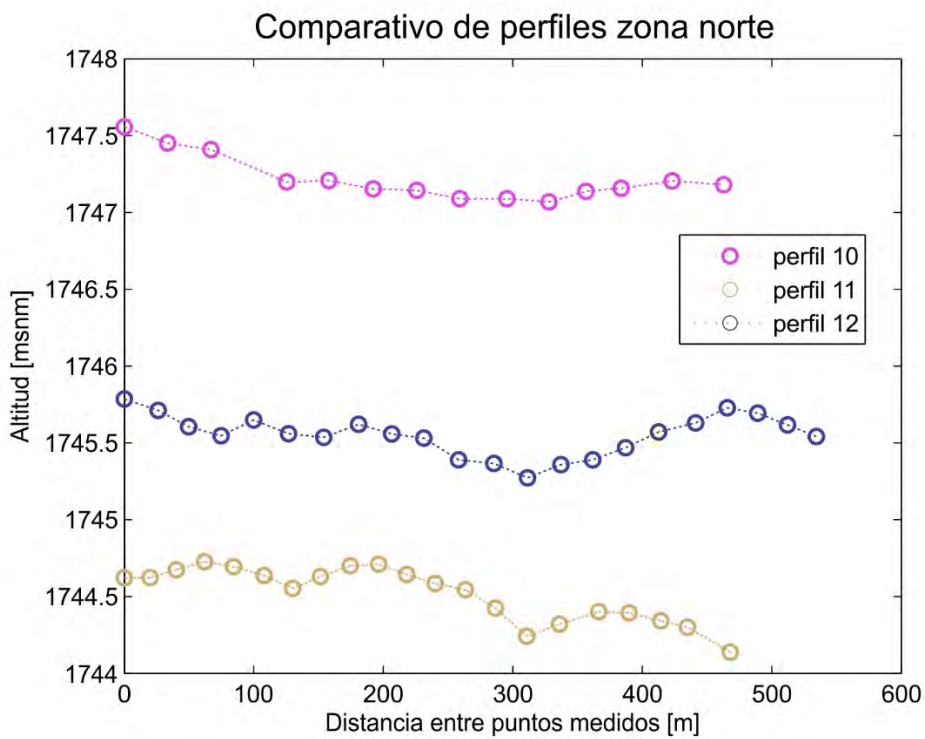


Figura 5.21 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 10 (rosa), 11 (marrón) y 12 (azul). Se observa el desnivel acumulado a lo largo de la falla Oriente de 3 m, perfil 10 y 11. Y el desnivel acumulado a lo largo de la falla Universidad Pedagógica de 1.5 m, perfiles 11 y 12.

Como se mencionó arriba, en muchas zonas de la ciudad donde se ubican las fallas las calles han tenido mantenimiento y repavimentación. La deformación a ambos lados de las fallas está muchas veces enmascarada por estas frecuentes reparaciones. Con el fin de ver la deformación acumulada a ambos lados de las fallas que cruzan la ciudad, se realizaron perfiles paralelos a las mismas, alejados de la zona donde se manifiestan las fallas. Estos perfiles nos permiten ver la deformación acumulada a ambos lados de las fallas centrales, Poniente, Oriente y Universidad Pedagógica. En este caso se gráfica la altitud de sur a norte.

Los perfiles 10, 11 y 12 en la zona norte son paralelos a las fallas Oriente y Universidad Pedagógica. La Figura 5.21 muestra un desnivel casi constante de aproximadamente 3 m entre los perfiles 10 y 11. Esta diferencia refleja que en esta zona la deformación del subsuelo a lo largo de la Falla Oriente es prácticamente constante. En el caso de los perfiles 11 y 12, que son paralelos a la falla Universidad Pedagógica, se observa un hundimiento de aproximadamente 1.5 en la parte sur del perfil, mientras que hacia el norte el nivel va disminuyendo hasta 1 m (Figura 5.21).

Los perfiles 4, 5 y 7 se localizan en la zona central de la ciudad y muestran el desnivel a lo largo de la Falla Poniente y Oriente. En el gráfico se observa que el cambio de nivel entre el perfil 4 y 5 disminuye hacia el norte de 1m a 0.5 m el cual corresponde al cambio de nivel en la Falla Poniente (Figura 5.22). En el caso de los perfiles 5 y 7, se muestra un desnivel acumulado para la Falla Oriente de 2.5 m (Figura 5.22).

Los perfiles 17, 15 y 6 se localizan en la zona centro sur y muestran los desniveles observados a lo largo de la Falla Poniente y Oriente. En el gráfico se observa que el cambio de nivel entre el perfil 17 y 15 disminuye hacia el norte de 1.5 m a 1 m el cual corresponde al cambio de nivel en la Falla Poniente (Figura 5.24). Los perfiles 15 y 6 muestra un desnivel acumulado para la Falla Oriente de aproximadamente 1.75 m (Figura 5.23).

Al analizar estos resultados se observó que, en general, la Falla Oriente que cruza prácticamente a la ciudad de norte a sur es donde se registraron los mayores valores de desnivel, lo cual es más evidente en las figuras 5.22, 5.23, 5.24. Con el fin de analizar el comportamiento de esta falla de norte a sur, se graficaron los perfiles 2, 9, 3, 14, y 13 en la (Figura 5.24). Se observa que el mayor desnivel se registra principalmente el perfil 9, 3 y 14, ubicados en las zonas centro y centro-norte de la ciudad, con valores que oscilan alrededor de 2.5 m. Los perfiles localizados más al norte y más al sur, perfil 9 y perfil 13 respectivamente, muestran un desnivel menor al anterior, de aproximadamente 1 m. Estos datos sugieren que la zona centro y centro-norte es la zona donde hay una mayor deformación sobre la falla Oriente y esta va disminuyendo hacia el sur y hacia el norte.

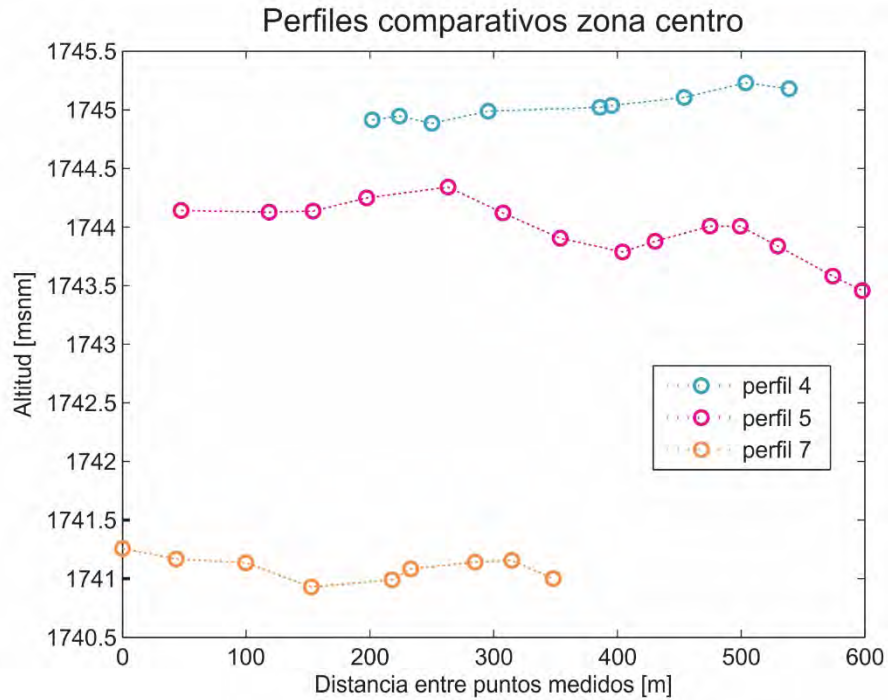


Figura 5.22 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 4 (azul), 5 (rosa) y 7(naranja). Se observa el desnivel acumulado a lo largo de la falla Poniente de 1 a 0.5 m, perfil 4 y 5. Y el desnivel acumulado a lo largo de la falla Oriente de 2.5 m, perfiles 5 y 7.

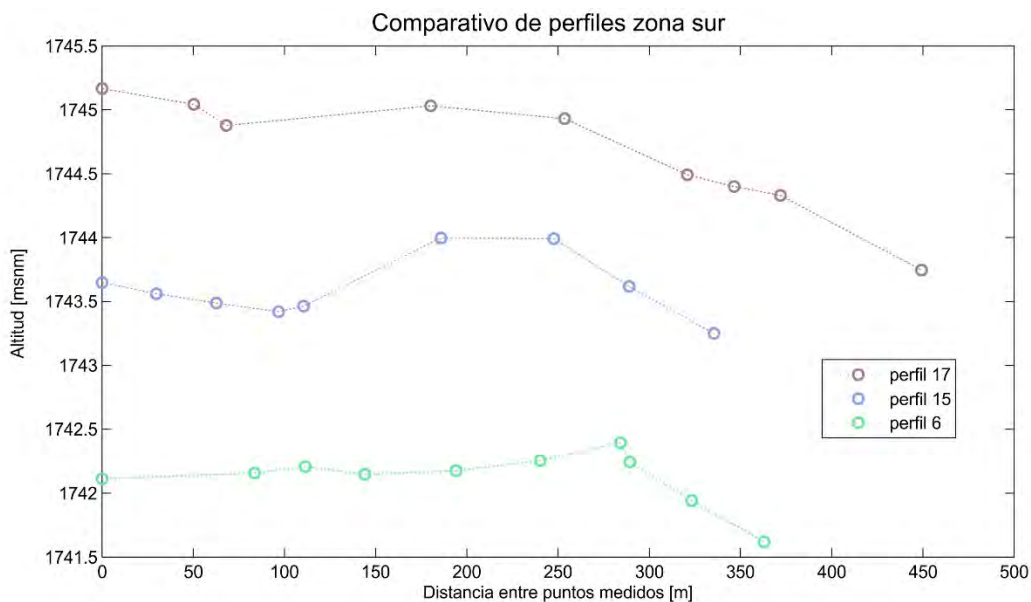


Figura 5.23 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 17(morado), 15 (azul) y 6(verde). Se observa el desnivel acumulado a lo largo de la falla Poniente de 1 a 1.5 m, perfil 17 y 15. Y el desnivel acumulado a lo largo de la falla Oriente de 1.75 m, perfiles 15 y 6.

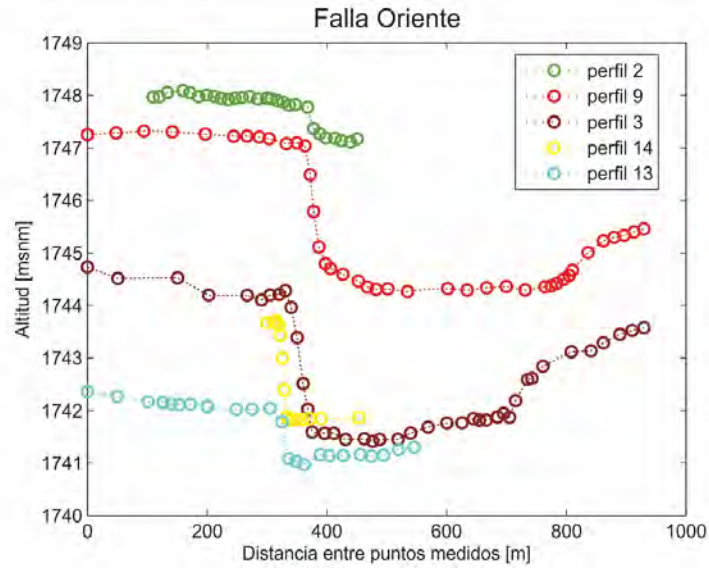


Figura 5.24 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 2, 8, 3, 14 y 13, para describir el comportamiento del desnivel de norte (arriba) a sur (abajo) a lo largo de la Falla Oriente, es evidente que el mayor desnivel acumulado se localiza en la zona centro-norte y central.

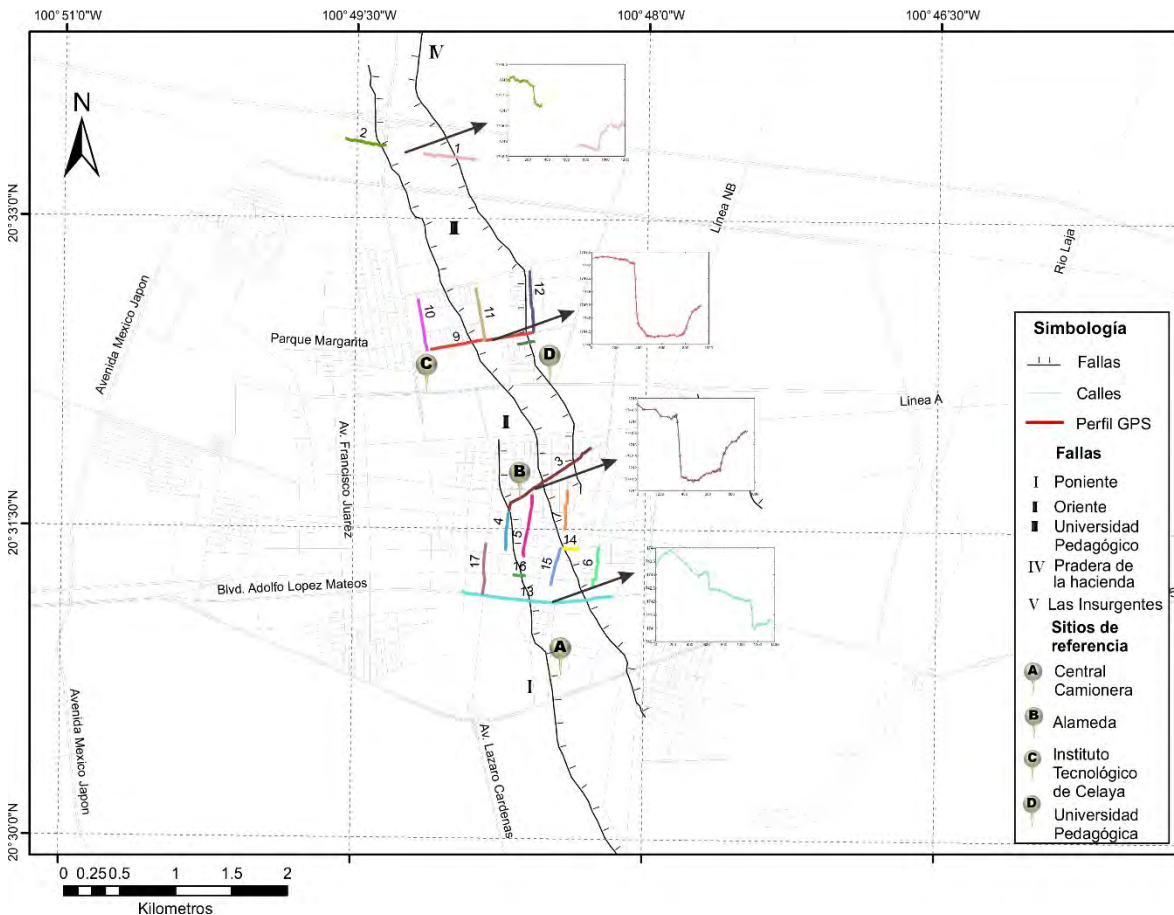


Figura 5.25 Gráfica de la altitud y la distancia entre puntos medidos para los perfiles 1,2, 9, 3 y 13 localizados en el mapa de Ciudad de Celaya; se observa cómo cambian los desplazamientos acumulados en las fallas de norte a sur y como el desnivel máximo se midió en la falla Oriente.

5.5 Mapeo de Fallas y Registro Fotográfico

Los daños en la infraestructura de la ciudad de Celaya causados por la subsidencia fueron documentados a partir de un registro fotográfico. Las fotografías tomadas durante las dos visitas de campo, a lo largo de las tres fallas que dividen a la ciudad, Poniente, Oriente y Universidad Pedagógica, de los daños en casas e infraestructura fueron geo localizadas (Figura 5.26). Más adelante se muestran algunas de estas fotografías y el resto se encuentran en el Apéndice I. Para el caso de las fallas Praderas de Haciendas y Las Insurgentes no se observaron daños en la infraestructura.

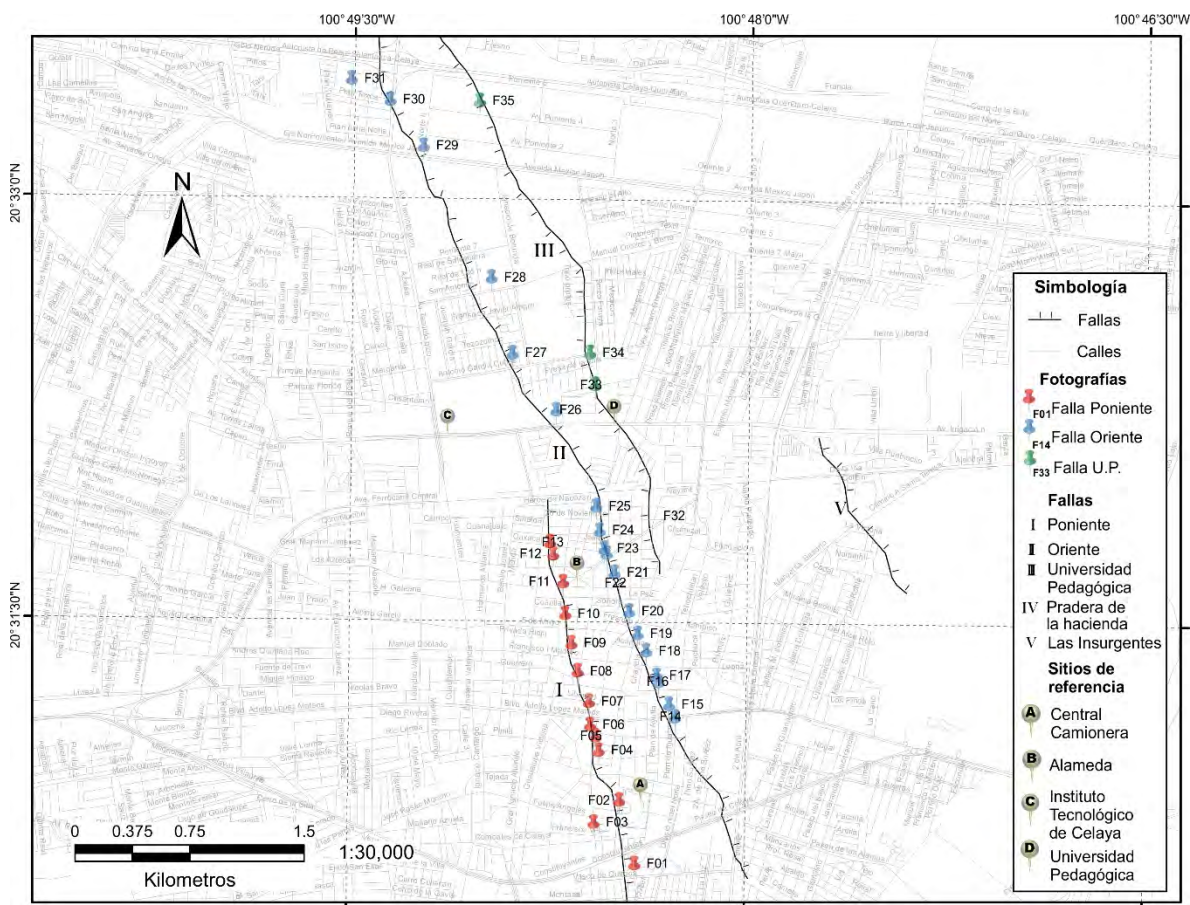


Figura 5.26 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura de la ciudad de Celaya.



Fotografía 1 Calle Vasco de Quiroga en la parte sur de la ciudad, localizado detrás de la Central de Abastos. Se observa un claro desnivel que cruza la calle, afecta el camellón y también a la Av. Paseo del Sol.



Fotografía 5 Sobre la calle Pedro de Gante también se pudo seguir el desnivel sobre la calle y los daños en una casa habitación la cual fue abandonada por el estado en el que se encuentra.



Fotografía 9 Calle Francisco I. Madero se observa el desnivel sobre estas calles y daños en la Iglesia de la Purísima concepción y en un estacionamiento frente a la iglesia.



Fotografía 14 Calle Plan de Igual se observa un desnivel de aproximadamente 50 cm que afecta la carpeta asfáltica, la banqueta y se encuentra junto al edificio habitacional una casa totalmente destruidas.



Fotografía 18 En la calle Francisco I. Madero se observa un desnivel más pronunciado de alrededor de 1.50 m se observan daños significativos en las bardas de las casas y la construcción de dos conjuntos de escalones



Fotografía 19 En la calle Acapulco se puede observar un desnivel de casi dos metros. Se ven al menos cuatro casas afectadas, una totalmente partida por la mitad, otra que sólo queda la barda de la construcción original y al parecer se encuentran ya deshabitadas.



Fotografía 23 Sobre la calle Guillermo Prieto se observa negocios que fueron separados por el desnivel. Además de otros con grietas y la construcción de varios escalones.



Fotografía 24 Sobre la calle Jalisco se encontraron serias afectaciones en las bardas y banquetas, y un desnivel aproximado de 1.50 m.



Fotografía 28 Se observa un desnivel sobre la calle Manuel Orozco y Berra donde se observa la banquetta destruida, además de una barda construida acorde al desnivel de la calle.



Fotografía 33 Sobre la calle Guillermo Prieto se observaron agrietamientos en las bardas y un pequeño desnivel en el pavimento y algunas pequeñas afectaciones sobre la acera.



Fotografía 34 Se observa los daños sobre la calle Presa de la amistad el asfalto esta levantado del nivel de la acera de lado derecho de la calle y se observan daños sobre las casas en especial en la carpintería evidente en el zaguán.

5.6 Series Temporales y Mapas de Subsistencia Promedio de la Ciudad de Salamanca

En los interferogramas utilizados para el área de estudio de la ciudad de Celaya, también se observa la deformación en la ciudad de Salamanca. En esta ciudad también se tienen reportes de subsidencia que no han sido estudiados en detalle. Por ello, se decidió incluir y obtener un análisis de series temporales.

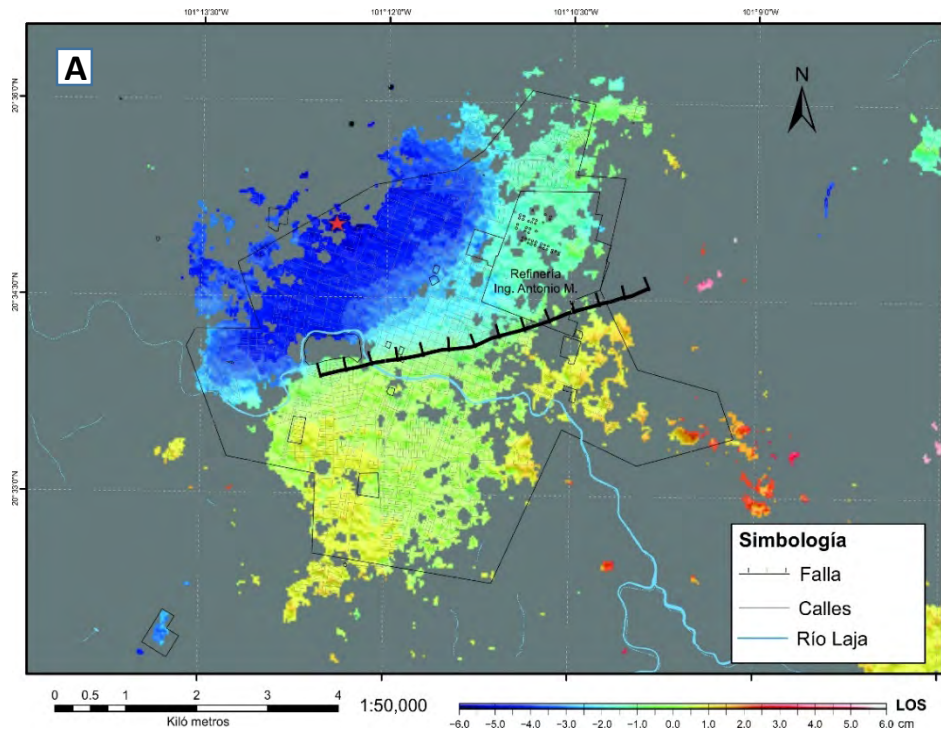
En la Figuras 5.27 y 5.28 se muestran los resultados obtenidos en las series de tiempo para la ciudad de Salamanca, utilizando 17 y 11 interferogramas respectivamente. Con base en estos interferogramas se estima una tasa máxima de deformación acumulada de 5.48 cm/anales para el periodo de septiembre 2009 a septiembre 2010. Igualmente, se observan algunas oscilaciones temporales, aunque, en términos generales, se aprecia una clara tendencia de subsidencia constante. En cuando a la tasa de deformación calculada el valor es consistente con los reportados en trabajos previos.

El la Figura 5.3 se muestra el mapa de hundimiento promedio anual, donde resulta evidente como se divide a la ciudad en dos áreas: una estable donde prácticamente la deformación es nula, y la otra donde la subsidencia va aumentando gradualmente desde 2 cm hasta la tasa máxima de 5.5 cm el periodo de septiembre 2009 a septiembre 2010. Cabe agregar que es consistente la división de estas zonas con la localización de la falla reportada dentro de la ciudad de Salamanca.

En la descripción de las características del acuífero de la ciudad, se menciona que hay un cambio importante entre dos regiones. En la zona norte existen tres acuíferos, uno somero, uno intermedio y uno profundo. En la zona sur, con características no bien definidas sólo se sabe que pasa de tener un comportamiento de acuífero libre á semiconfinado.

Si se observa el mapa de hundimiento promedio anual (Figura 5.28), la zona de subsidencia se localiza al norte y la zona estable se encuentra al sur. Esto coincide con la descripción de cambios en las características del acuífero. Si se observa el mapa geológico (Figura 2.1), al sur de la ciudad de Salamanca se han reportado conos cineríticos por lo cual se infiere la posibilidad de un control estructural en la deformación, donde el espesor de sedimentos lacustres y compresibles varía, de acuerdo a la geometría de las coladas volcánicas que se encuentran por debajo de ellos. Esta situación es similar a la observada en la ciudad de Celaya, donde la subsidencia está controlada aparentemente por el espesor de los sedimentos lacustres superficiales; sin embargo, a diferencia de Celaya la máxima deformación no se localiza inmediatamente después de la falla, lo que nos hace inferir que el cambio en la geología del subsuelo es gradual y por el patrón que define la deformación es posible la generación de otra falla en la zona donde la tasa cambia de 3 a 4 cm/anales.

En cuanto a la relación de la explotación del manto acuífero en los mapas pizométricos reportados para noviembre de 1998, ya se observa una relación de un cono de abatimiento para el acuífero somero sobre la zona de falla y un cono de abatimiento del acuífero intermedio coincidente con la zona de mayor deformación (Figura 2.8 y Figura 2.9).



Series de Tiempo

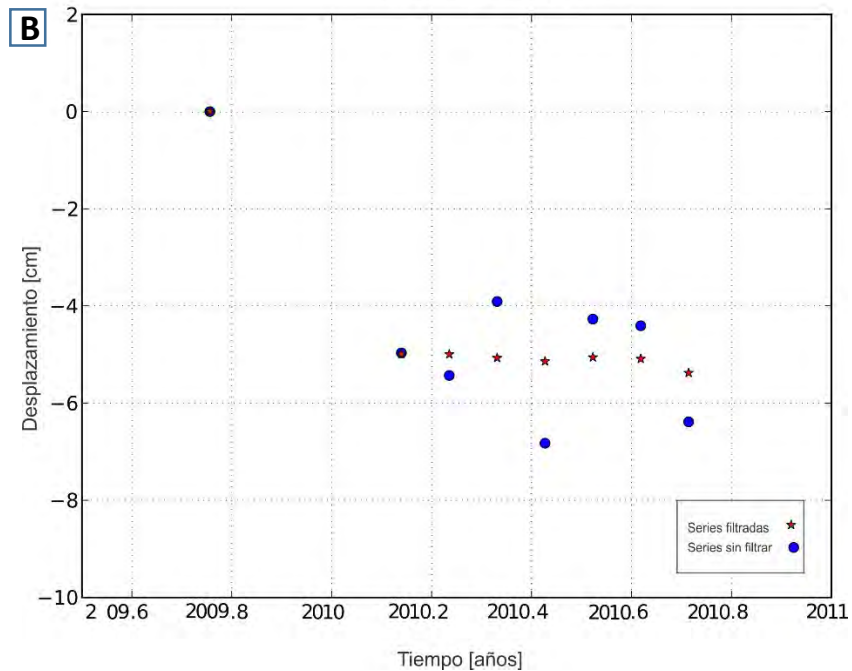
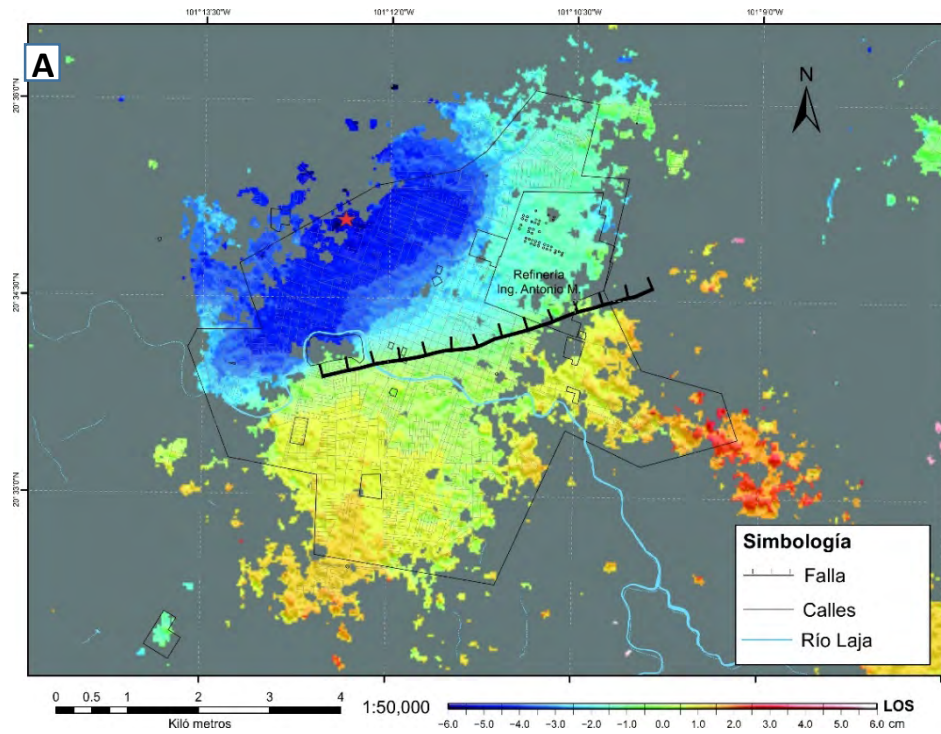


Figura 5.27 A) Mapa de promedio anual resultado de las series de tiempo para la ciudad de Salamanca en el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010 usando los 17 pares interferométricos. En el mapa se observa como la deformación aumenta gradualmente además de la clara división marcada por la falla entre una zona estable y otra afectada por la subsidencia. B) En la gráfica se observan las series de tiempo obtenidas, los puntos azules son las series sin filtrar donde aumenta y disminuyen los valores sin ninguna tendencia, correspondiente a la zona de máxima deformación (estrella roja en el mapa). En el caso de las series de tiempo filtradas se observa que la deformación aumenta y después parece oscilar pero en general parece que ya no se tiene deformación.



Series de Tiempo

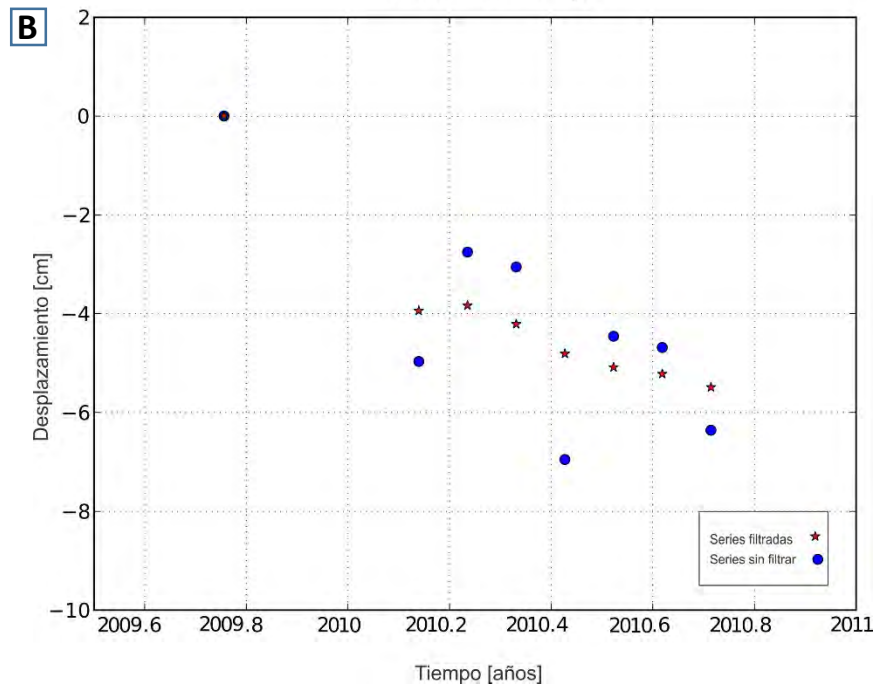


Figura 5.28 A) Mapa de promedio anual resultados de las series de tiempo para la ciudad de Salamanca en el periodo de septiembre de 2009 a septiembre de 2010 usando sólo 11 pares interferométricos, se observa la ciudad dividida la falla y como su régimen de subsidencia . B) En la gráfica se observa las series sin filtrar, puntos azules y las series filtradas estrellas roja, correspondiente a la zona de máxima deformación (estrella roja en el mapa). A pesar de observar en las series sin filtrar dos valores que parecen discrepar demasiado, es evidente la tendencia de como al pasar el tiempo aumenta la subsidencia, la cual es más clara en las series de tiempo filtradas.

5.7 Discusión

Los resultados obtenidos en este trabajo para la ciudad de Celaya del análisis de interferogramas que comprenden 2010/05/01- 2010/06/05 y 2010/07/10 - 2010/08/14 muestran que la zona de deformación se localiza en la Falla Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica. La tasa de deformación es de aproximadamente 7.2 cm/año en dirección LOS en la zona norte, entre las fallas Oriente y Universidad Pedagógica. Se observa un cambio en el hundimiento del subsuelo en ambos periodos que coincide con los cambios entre la época de estiaje y la época de lluvias.

Los resultados de las series temporales que abarcan de septiembre de 2009 a septiembre de 2010 no fueron del todo favorables debido a dos problemas. El primero es la poca cantidad de imágenes adquiridas por los satélites en la zona de estudio. Además, al ser combinadas para generar los interferogramas se descartaron muchos por con líneas bases perpendiculares y temporales muy grandes. Estas condiciones desfavorables generaron muchos problemas en el proceso de desenvolvimiento de fase. Por esa razón, se descartaron varios interferogramas para el proceso de inversión de las series temporales de deformación. La segunda razón se debe a que las características de la deformación de la ciudad de Celaya muestran una tasa de deformación muy alta y la disposición espacial de mayor subsidencia en una zona muy estrecha que divide a la ciudad. Esto contribuyó a acrecentar los problemas de desenvolvimiento de fase. Sin embargo, los resultados del análisis concuerdan en la identificación de las zonas donde la subsidencia afecta la ciudad. Entre las fallas, también se observa esta variación coincidente con el cambio estacional, al parecer el único problema fue una subestimación en el valor de la tasa de subsidencia. Es importante poner en consideración que esta subestimación de la tasa de hundimiento en comparación con estudios previos se debe a: el lapso analizado por los mismos no coincidentes con el lapso cubierto por las imágenes ENVISAT-ASAR utilizadas en este trabajo; se observan oscilaciones de los valores en la subsidencia de forma estacional coincidentes con la época de estiaje y lluvia; aunado a que el periodo de análisis fue de apenas 1 año (septiembre 2009- septiembre 2010).

De los perfiles medidos usando GPS, es evidente que el mayor desnivel acumulado, de alrededor de 2.5 m, se observa en la Falla Oriente y que el máximo desnivel sobre esta falla tiene lugar en la zona norte y disminuye a medida que se avanza hacia el sur. Con estos resultados es evidente que el proceso de subsidencia de la ciudad se divide en tres zonas: 1) la zona este con mayor estabilidad de las tres; 2) la zona central donde se encuentran las fallas Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica y donde las consecuencias de la subsidencia son muy claras y por último; 3) la zona oeste donde también existe subsidencia pero es menor que en la zona central.

Un análisis de la deformación acumulada en las fallas de sur a norte, muestra una variación importante en su comportamiento. En la zona sur las fallas Oriente y Poniente se comportan como fallas normales donde el bloque que cae es del lado noreste, generando una secuencia

escalonada, en donde el mayor desnivel acumulado está localizado en la falla Oriente con un valor de 1 m, mientras que la falla Poniente tiene un desnivel menor y de aproximadamente 0.75 m.

En la zona central, los desniveles acumulados de las tres fallas, Poniente, Oriente y Universidad Pedagógica, muestran que el comportamiento de las fallas Oriente y Poniente es igual que en la parte sur. Sin embargo en la Falla Universidad Pedagógica el bloque de piso cae en dirección opuesta, suroeste. Se observa un desnivel de 2.5 m en la Falla Oriente, que es mayor que el observado en las otras fallas. En esta misma zona, el desnivel sobre la falla Universidad Pedagógica es 1.5 m mayor que el de la falla Poniente, 0.5 m.

En la parte norte de la ciudad los desniveles acumulados en la falla Oriente, 3 m, y Universidad Pedagógica, 1.5 m, muestran también una subsidencia mayor en la falla Oriente. Este es el valor más grande que fue observado a lo largo de esta falla. Por la dirección en la que caen los bloques de piso para las dos fallas, la deformación se asemeja a la formación de un graben.

Con base en el análisis de los desniveles acumulados por medio de las mediciones de GPS, se determinó que la falla Oriente es la zona donde se acumula la mayor deformación, ya que en las fallas Poniente y Universidad Pedagógica el desnivel acumulado siempre es menor. Por otro lado, esta falla es la que tiene una mayor influencia en la subsidencia observada en la ciudad ya que esta falla cruza la ciudad de norte a sur, a diferencia de las fallas Poniente y Universidad Pedagógica que no son tan extensas.

En trabajos previos donde se estudia la subsidencia en la ciudad, se menciona que el origen de las fallas que dividen la ciudad, está relacionado con una falla tectónicamente activa en el basamento. Con el fin de entender el alineamiento claro de la subsidencia, se hicieron las correlaciones entre los pozos que contaban con datos de cortes litológicos para encontrar evidencia de la existencia de estas fallas en la disposición de las unidades litológicas del subsuelo. Sin embargo no se encontró ninguna evidencia clara de la existencia de dicha falla.

En cambio, se observó una diferencia drástica entre el espesor de sedimentos recientes entre la parte este y oeste de la ciudad de Celaya. Por ello, se realizó una interpolación del espesor de sedimentos para observar su distribución espacial debajo de la ciudad. Se observa que la zona Oeste tiene un espesor de sedimentos que van desde 30 m hasta 90 m. Al oriente, se observa una zona de transición donde el espesor de los sedimentos aumenta abruptamente, de 90 a 170 m. Este límite entre estas dos regiones donde hay un cambio drástico en el espesor de los sedimentos lacustres, coincide con la zona de fallas. Finalmente en la zona este el espesor varía de 170 a 220 m.

También es evidente que hay coladas de lavas basálticas con diferentes disposiciones en la zona este y oeste de la ciudad. En la parte oeste existen más, al parecer 2 o 3, y son más superficiales. En cambio en la zona este sólo parece haber una con mayor profundidad.

Lo cual indica que las fallas que afectan en superficie a la infraestructura de la ciudad de Celaya, no son fallas de origen tectónico que cortan todas las unidades litológicas. Son grietas generadas sobre los sedimentos superficiales, puesto que su localización tiene una evidente relación con la distribución de las unidades litodémicas del subsuelo y el espesor de los sedimentos. Esto se explica debido a que la unidad más reciente de origen fluvio-lacustre se encuentra saturada de agua, cuando se hay una extracción excesiva de agua disminuye la presión de fluido contenido en los poros de los sedimentos produciendo una contracción en el espacio del poro, generando a su vez la subsidencia.

Los datos de nivel estático de la ciudad de Celaya, fueron proporcionados por JUMAPA. Al relacionarlos con las zonas de mayor subsidencia, no se encontró relación muy evidente en la zona de mayor subsidencia, sólo se observó que la profundidad del nivel estático va aumentando alrededor de 2.5 m al año y su extensión 0.5 km. Sin embargo, la información de nivel estático de los pozos distribuidos en todo el acuífero el valle de Celaya suministrada por CONAGUA para los años 2009 y 2010, muestra un mínimo en la región central de la ciudad de Celaya que concuerda con la zona de fallas y de mayor deformación de suelos. Es decir, el acuífero presenta la formación de un cono de abatimiento en esta zona.

Para el caso de la ciudad de Salamanca los resultados de las series temporales y los mapas anuales muestran que la ciudad también está dividida en dos por una falla. Hacia el sur de la ciudad no hay subsidencia mientras que al norte se tiene un patrón de subsidencia que va aumentando a medida que nos alejamos de la falla en dirección noroeste. En la zona de mayor deformación se calculó una tasa de 5.5 cm/año en dirección LOS. Lamentablemente, no fue posible obtener información de los pozos de extracción de agua para definir los datos hidrológicos y geológicos del subsuelo. Sin embargo, con base en la información de geología regional e hidrológica reportada en la literatura, se induce una relación de la zona de subsidencia con los cambios reportados en el comportamiento del acuífero que pasa de un comportamiento libre al norte a uno semi confinado al sur. Además, al sur de la ciudad de Salamanca se reportan algunos conos cineríticos que sugieren que existe también un control estructural de la subsidencia debido a la diferencia de profundidad a la que se encuentran las coladas volcánicas, de manera análoga a lo que ocurre en Celaya.

6. Conclusiones

La caracterización de la subsidencia en la ciudad de Celaya por medio de series de tiempo basadas en imágenes de InSAR no fue óptima debido a la calidad de los datos Envisat.

La tasa de deformación máxima estimada por medio del análisis de dos interferogramas con menor línea base y línea temporal resultó en un valor de 7.2 cm/año en dirección LOS, entre los septiembre de 2009 a septiembre de 2010, acorde a trabajos previos. La máxima subsidencia se localizó entre la fallas Oriente y Universidad Pedagógica al norte de la ciudad. En ambos resultados se observó un cambio en la deformación, la cual es mayor en la época de secas y menor en la época de lluvias.

Las mediciones realizadas por medio de perfiles GPS muestran que el mayor desnivel acumulado se encuentra sobre la falla Oriente, principalmente en la zona norte y centro. El máximo valor es de 3 m y se localiza sobre el perfil 3 en la misma zona donde los interferogramas registraron la máxima tasa de subsidencia. En la literatura existe un registro de la existencia de los agrietamientos desde los años 70, si consideramos una tasa de deformación lineal y utilizando el valor máximo de desnivel acumulado a lo largo de 45 años se obtendría un valor de 6.6 cm anuales como tasa de deformación máxima, valor que no se aleja mucho de los resultados obtenidos en el análisis de los interferogramas.

Las secciones realizadas a partir de los datos de perfiles litológicos para los pozos ubicados dentro de la ciudad mostraron que no hay evidencia de la existencia de fallas geológicas en el basamento mencionadas en trabajos previos (referencias), sin embargo si muestran que la zona de deformación está controlada por la disposición de las unidades lito-estratigráficas del subsuelo, principalmente por el espesor de los sedimentos recientes y la distinta profundidad de las coladas basálticas en las zonas este, centro y oeste de la ciudad.

Además, los datos de nivel estático del el acuífero del Valle de Celaya para los años 2009 y 2010 muestran la generación de un cono de abatimiento en la zona central de Celaya, coincidente con la zona de fallas y subsidencia.

Por tanto, las fallas Oriente, Poniente y Universidad Pedagógica no son en el sentido estricto fallas de origen tectónico, son grietas en suelos producidas en los sedimentos sobre los que se sitúa la ciudad de Celaya generadas por el exceso de extracción de agua combinado con la diferencia de espesor de los sedimentos, donde a lo largo la falla Oriente se localiza el mayor desplazamiento y las fallas Poniente y Universidad Pedagógica son fallas secundarias.

La falla Universidad Pedagógica es paralela a las fallas Oriente y Poniente pero de sentido opuesto, la razón de este comportamiento se puede deber a la zona en donde se localiza. El

cono de abatimiento y se tiene un aumento en el nivel estático, reduciendo el grado de compactación de los sedimentos hacia el este.

El análisis de series de tiempo y mapas de promedio anual de la ciudad de Salamanca muestran una tasa máxima de subsidencia en la zona noroeste de 5.5 cm/año en dirección LOS, entre septiembre de 2009 a septiembre de 2010. La ciudad se encuentra dividida en dos zonas, al sur no existe evidencia de deformación y al norte donde esta aumenta en dirección noroeste, estas dos zonas están divididas por una falla de rumbo N15°E. Por las características de la geología en la región es probable que se tenga un control estructural análogo a lo observado en Celaya, pero como la deformación no se encuentra inmediatamente después de la falla, es probable un cambio gradual en espesor de sedimentos, asimismo la posible generación de otra falla por un aumento en la tasa y la localización hundimiento al NW de la falla actual.

De acuerdo a los resultados y conclusiones de este trabajo se extienden algunas recomendaciones:

- Sería necesario hacer un estudio más detallado y completo de los rasgos de la subsidencia en la ciudad de Celaya. Con este fin se propone la instalación de una red permanente de GPS y el uso de nuevas imágenes satelitales en donde el periodo entre adquisiciones no sea de más de 70 días y la línea base no mayor a 200 m. También el uso de otras metodologías además de las Series Temporales (SBAS) como PSI (Persistent Scatterer Interferometry).
- Debido a la relación entre la subsidencia y la formación de un cono de abatimiento en el acuífero del Valle de Celaya, es necesario hacer un estudio del balance del acuífero, con el fin de realizar un programa de regulación del volumen de extracción de agua y mejorar la recarga del acuífero.
- Se recomienda hacer un estudio más detallado de la geología del subsuelo, ya que a pesar de que se tienen varios datos de perfiles litológicos en pozos estos son definidos a partir de registros eléctricos. En algunas zonas, es necesario obtener datos con más detalle, tal vez utilizando técnicas geofísicas. Esto, contribuirá a una mejor descripción del control estructural de la zona afectada y a predecir el comportamiento futuro de la zona de subsidencia.
- Para la ciudad de Salamanca es necesario recabar mayor información de geología de subsuelo, hidrogeología y hacer mediciones in situ, para poder corroborar la hipótesis que plante este trabajo.

7. Referencias

Agram, P., Jolivet, R. y Simons, M., 2012, Generic InSAR Analysis Toolbox (GIANt) - User Guide), <http://earthdef.caltech.edu>.

Aranda-Gómez, J.J., Aranda-Gómez, J.M., y Nieto-Samaniego, Á.F., 1989, Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la parte Meridional de la Mesa Central: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 8, 33-46.

Alaniz-Alvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Reyes-Zaragoza, M. A., Orozco-Esquivel, M. T., Ojeda-García, A. C., y Vassallo-Morales, L. F., 2001, Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 18, 129-148.

Ávila-Olivera, J.A., Farina, P. y Garduño-Monroy, V. H., 2008, Integration of InSAR and GIS in the Study of Surface Faults Caused by Subsidence-Creep-Fault Processes in Celaya, Guanajuato, México en GIS IN GEOLOGY AND EARTH SCIENCES: 4th International Conference "In Vista of New Approaches for the Geoinformatics" 2007, Querétaro, México, American Institute of Physics, 1009, 200-211.

Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H. y Takaoka, N., 1992, KAr ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacán- Guanajuato volcanic field, México: Geofísica Internacional, 31, 467-473.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. y Sansosti, E., 2002, A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (11) ,2375 – 2383.

Borja-Ortiz, R. I. y Rodríguez, C. R., 2004, Acuífer vulnerability changes due to faults and riverbeds in Salamanca, Guanajuato, Mexico: Geofísica Internacional, 43(4), 623-628

Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., y Carande, R. E., 2008, Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City: Geological Society of America Bulletin, 120(11-12), 1556-1566.

Cavalié, O., M.-P. Doin, C. Lasserre, y Briole, P., 2007, Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis: Probing the lithosphere rheological structure: J. Geophys. Res., 112, B03403

Cerca-Martínez, L.M., 1998, Relación estratigráfica y geocronológica entre el volcanismo de la Sierra Madre Occidental y el Cinturón Volcánico Mexicano en la parte sur de la Sierra de Guanajuato. Implicaciones geocronológicas y tectónicas: Ensenada, B.C., México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Tesis de Maestría, 105.

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. y Amelung, F., 2014, Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series: *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106.

Chen, C. W. y Zebker, H. A., 2002, Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models: *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(8), 1709-1719.

Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista* 2, 172-187.

Díaz-Salmerón, J. E., 2010, Geometría y monitoreo con GPS de los procesos de subsidencia-creep-falla (PSCF), en la ciudad de Celaya, Guanajuato, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tesis de Maestría, 101.

Echegoyén-Sánchez, J., Romero-Martínez S. y Velázquez-Silva, S., 1970, Geología y yacimientos minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato: Consejo de Recursos Naturales No Renovables, *Boletín* 75, 48.

Galloway, D. L., y Burbey, T. J., 2011, Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486.

Garduño, V. H., Arreygue, E. y Rodríguez, G., 2001, Mapa de Riesgos de Salamanca, Gto. : Reporte Técnico Municipio de Salamanca, Universidad de Michoacán.

Gayol, R., 1925, Estudio de las perturbaciones que en el fondo de la Ciudad de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras del desagüe y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los efectos producidos: *Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura*, III, 96-132.

Goldstein, R. M., H. A., Zebker, y Werner, C. L., 1988, Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping: *Radio Sci.*, 23(4), 713-720.

Goldstein, R. M., y Werner, C. L., 1998, Radar interferogram filtering for geophysical applications: *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035-4038.

Gross, W.H., 1975, New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, Mexico: *Economic Geology*, 70, 1175-1189.

Hernández-Jaramillo, S. I., 2011, Análisis de series temporales de la subsidencia en cuencas en el centro de México obtenidas a partir de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR): Caso Morelia, Universidad Autónoma de México, Tesis de Maestría, 137.

Huizar-Álvarez, R., Mitre-Salazar, L. M., Marín-Córdoba, S., Trujillo-Candelaria J. A., y Martínez-Reyes, J., 2011, Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: Implications for groundwater extraction and the neotectonic regime: *Geofísica International*, 50 (3), 255-270.

Hanssen, R. F., 2001, Radar interferometry: data interpretation and error analysis Delf University, Doctoral Thesis, 298.

Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M. P. y Peltzer, G., 2011, Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data: *Geophysical Research Letters*, 38(17), L17311.

López-Quiroz, P., Doin, M.P., Tupin, F., Briole, P., y Nicolas, J. M., 2009, Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry: *Journal of Applied Geophysics*, 69, 1-15.

Lasser y Asociados S. A. de C. V., 2000, Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de Celaya, Gto. para Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, 28.

Meinzer, O. E., 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifers: *Journal of Geology*, 23(3), 49-52.

Mejía, J. A., Rodríguez, R. y Berlín, J., 2001, Hydrodynamic and pollution of the urban aquifer system of Salamanca, Gto. The Salamanca case 1. In Proc. 1st Int. Workshop on Investigation, Management and Remediation of Contaminated Aquifers, 335-346.

Mejía Gómez, J.A. y Sandoval Minero, R., 2004, Uso del agua subterránea en la región acuífera Irapuato-Valle de Santiago (México) y su impacto sobre el sistema hidrogeológico: *Boletín Geológico y Minero*, 115 (Núm. Especial), 311-318.

Nieto-Samaniego, A.F., 1990, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 9, 146-155.

Nieto-Samaniego, A. F., Macías-Romo, C., y Alaniz-Alvarez, S. A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 117-122.

Nieto-Samaniego, Á. F., Ojeda-García, Á. C., Alaniz-Álvarez, S. A., y Xu, S., 2012. Geología de la región de Salamanca, Guanajuato, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 411-425.

Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L.M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J.J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.N., 1992, Carta geológica de la República Mexicana 1:2,000,000: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 1 map.

Osmanoğlu, B., Dixon, T. H. Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., y Jiang, Y., 2011, Mexico City subsidence observed with persistent scatters InSAR, *International: Journey of Applied earth Observation and Geoinformation*, 13,1-12.

Poland, J. F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal: International hydrogeological Programmer, working Group 8.4. UNESCO, Book Crafters, Chelsea, Massachusetts.

Poland, J. F., e Ireland R. L., 1988, Land subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982: U.S. Geological Survey Professional Paper 497-F, 61.

Ramíro-Rodríguez, A. A., Berlín, J. y Mejía, J. A., 2002, Arsenic and lead pollution of the Salamanca aquifer, Mexico: origin, mobilization and restoration alternatives: *Groundwater quality: Natural and enhanced restoration of groundwater pollution*, 275, 561-565.

Rosen, P. A., S. Hensley, G. Peltzer, y M., Simons, 2004, Updated repeat orbit interferometry package released: *Eos Trans. AGU*, 85, 35.

Rosen, P. A., Gurrola, E., Shams, K. S., Brett G. y Knight G., 2012, Interferometric Synthetic aperture Radar (InSAR) Scientific Computing Enviroment on the Cloud: Fall Meeting AGU 2012, IN31C-1508.

Ryan, W.B.F., S.M. Carbotte, J.O. Coplan, S. O'Hara, A. Melkonian, R. Arko, R.A. Weissel, V. Ferrini, A. Goodwillie, F. Nitsche, J. Bonczkowski, y Zemsky R., 2009, Global Multi-Resolution Topography synthesis: *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03014.

Sandwell, D. T., Myer, D., Mellors, R., Shimada, M., Brooks, B., y Foster, J., 2008, Accuracy and resolution of ALOS interferometry: Vector deformation maps of the Father's Day intrusion at Kilauea: *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 46(11), 3524-3534.

Terzaghi, K., 1925, Principles of soil mechanics, IV: settlement and consolidation of clay: Eng. News-Record, 95(3), 874-878

Trujillo-Candelaria, J. A., 2009, Fallamiento de terrenos por sobre explotación en Celaya, Gto.: Aquaforum, 52, 24-27.

Yan, Y., Doin, M. P., López-Quiroz, P., Tupi, F., Fruneau, B., Pinel, V., y Trouve, E, 2012. Mexico City Subsidence Measured by InSAR Time Series: Joint Analysis Using PS and SBAS Approaches, Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, 5(4), 1312-1320.

Página de la secretaría de Seguridad Pública del estado de Guanajuato, consultada en 2014.
<http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/atlas/geologico/celaya.php#>
<http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/atlas/hidrometeorologico/celaya.php#>

Apéndice I: Registro Fotográfico

1.-Falla Poniente

Secuencia fotográfica de los daños sobre Falla Poniente, se muestra el mapa con la localización de la zona afectada seguida de las fotografías (Figura 1)

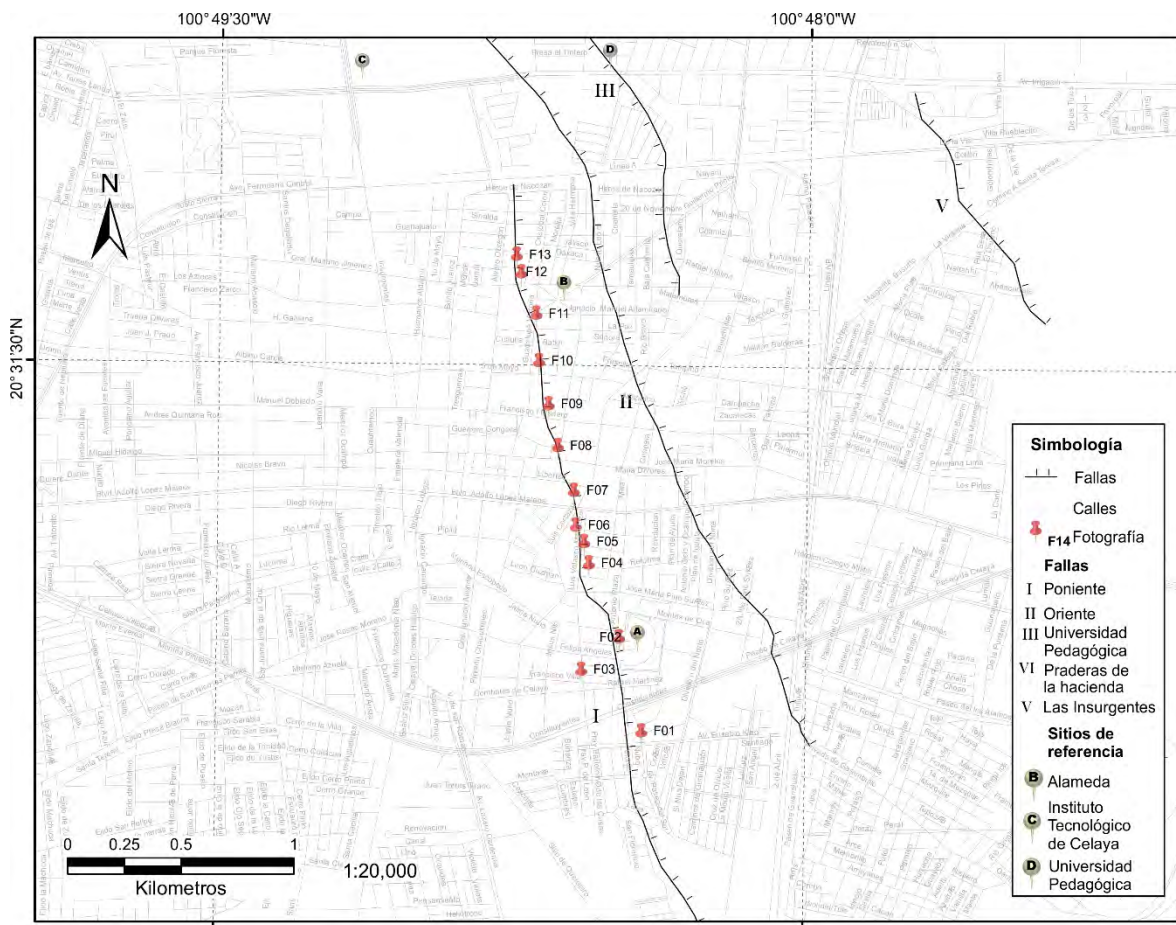


Figura 1 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura e Celaya generados por la Falla Poniente.



Fotografía 1 Calle Vasco de Quiroga en la parte sur de la ciudad, localizado detrás de la Central de Abastos. Se observa un claro desnivel que cruza la calle, afecta el camellón y también a la Av. Pase del Sol.



Fotografía 3 Calle Antonio Plaza frente a la central de autobuses se observa como un desnivel afecta la calle de manera diagonal quedando en el nivel inferior la central camionera.



Fotografía 2 En la calle Francisco Villa frente al mercado "El Dorado" se observó un desnivel que afecta a dicho lugar aún que su ubicación no queda tan cerca de la falla Oriente



Fotografía 5 Calle Fray Toribio Motolinía evidente desnivel aproximadamente de un metro sobre la calle en la banqueta se observan cuatro escalones contruidos por este problema. Se ve también el cambio de nivel en las casas.



Fotografía 4 Sobre la calle Pedro de Gante también se pudo seguir el desnivel sobre la calle y los daños en una casa habitación la cual fue abandonada por el estado en el que se encuentra.



Fotografía 6 En la esquina de las calles Luis Velasco Mendoza y Ignacio Ramírez se localiza un terreno baldío, la casa localizada en este lugar tuvo que ser demolida por los daños estructurales que presentaba.



Fotografía 7 Esquina de las calles Luis Cortázar y el Blvd. Adolfo López Mateos se observa el desnivel sobre la calle, pero es más evidente entre las construcciones donde está en un nivel más alto el edificio al este y las otras casa están más abajo.



Fotografía 8 Esquina de las calles Venustiano Carranza y José María Morelos se observaron afectaciones en diversos negocios de esa esquina.



Fotografía 9 Calle Francisco I. Madero se observa el desnivel sobre estas calles y daños en la Iglesia de la Purísima concepción y en un estacionamiento frente a la iglesia.



Fotografía 10 Calle 5 de Mayo se observa un desnivel de aproximadamente 70 cm, se colocaron escalones en la banqueta y daños en las bardas de las casas



Fotografía 11 Esquina de las calles Guadalupe y La Paz se observa un desnivel de a aproximadamente 50 cm y algunos daños en el pavimento y banquetas.



Fotografía 12 Calle Aguilar y Maya sólo se notada un pequeño daños en el pavimento y banqueta de la calle de entre unos 20 cm a 30 cm.



Fotografía 13 Sobre la calle Yucatán sólo se observaron agrietamientos en el pavimento y el las banquetas.

2.-Falla Oriente

Secuencia fotográfica de los daños sobre Falla Oriente, se muestra el mapa con la localización de la zona afectada seguida de las fotografías (Figura 2)



Fotografía 14 Calle Plan de Igual se observa un desnivel de aproximadamente 50 cm que afecta la carpeta asfáltica, la banqueta y se encuentra junto al edificio habitacional una casa totalmente destruidas.

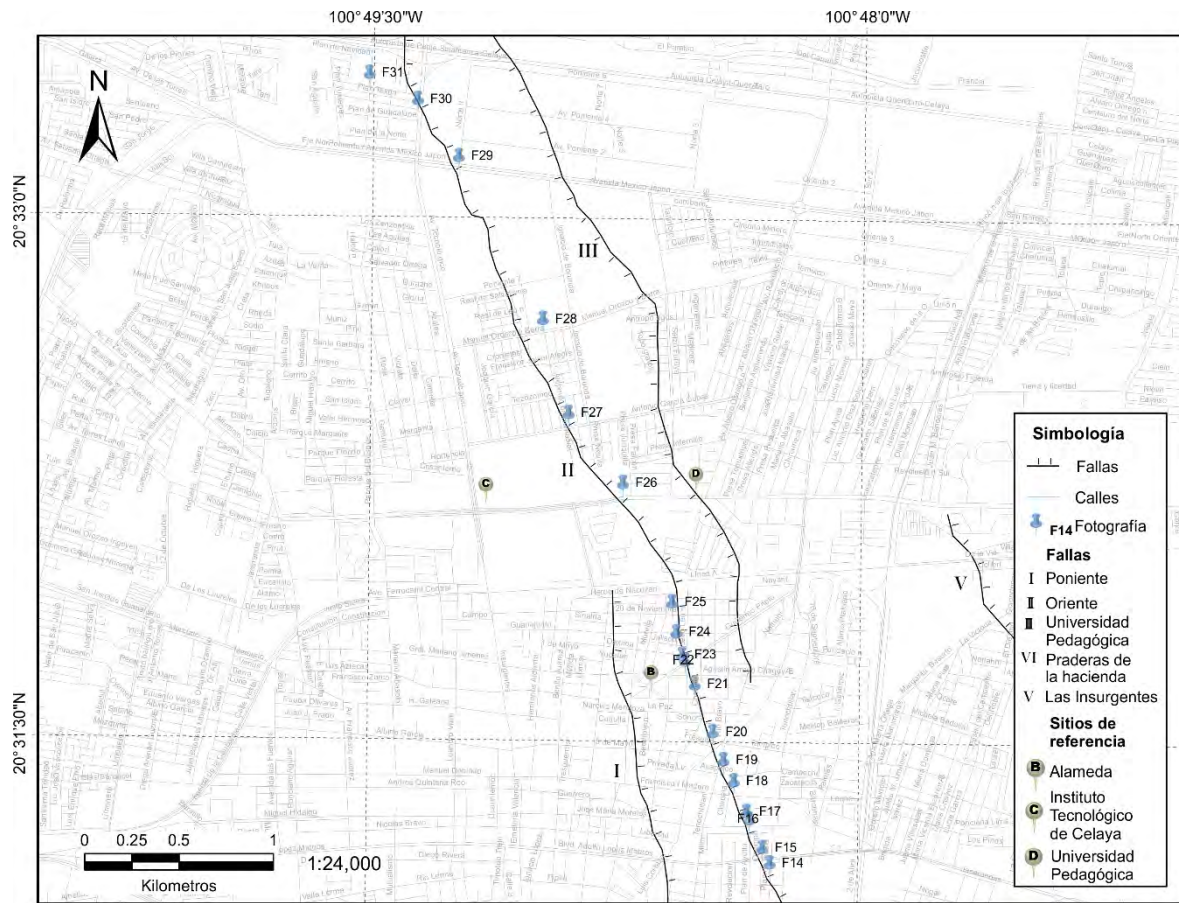


Figura 2 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura de Celaya generados por la Falla Oriente.



Fotografía 15 Esquina de la Blvd. Adolfo López Mateos y Calle Ocio y Ocampo se observa un desnivel de aproximadamente un metro que ha afectado la banqueta donde se han colocado cuatro escalones.



Fotografía 16 Esquina de las calles Plan de Ayutla norte, Avenallanal y Dolores María, desnivel de aproximadamente un metro con afectación en la carpeta asfáltica, banqueta y se observa también la afectación en ese edificio que se utiliza como hotel.



Fotografía 17 Calle José María Morelos se observa un claro desnivel de 1.50 m y se observan claros daños en las construcciones y la construcción de escalones en las banquetas.



Fotografía 18 En la calle Francisco I. Madero se observa un desnivel más pronunciado de alrededor de 1.50 m se observan daños significativos en las bardas de las casa y la construcción de dos conjuntos de escalones.



Fotografía 19 En la calle Acapulco se puede observar un desnivel de casi dos metros. Se ven al menos cuatro casas afectadas, una totalmente partida por la mitad, otra que sólo queda la barda de la construcción original y al parecer se encuentran ya deshabitadas.



Fotografía 20 Calle Río Bravo se observa un desnivel aproximado de 1.60 m podemos ver dos casa afectadas en la esquina de la cuchilla un terreno baldío y la construcción de escalones en las banquetas



Fotografía 21 Calle Ignacio Manuel Altamirano se observa un desnivel de más de un metro, afectaciones tanto en el pavimento como en las casas.



Fotografía 22 Esquina de las calles Agustín Arroyo Chagoyán y Nuevo León, en la fotografía se observa el caro desnivel en ambas calles y hay hasta un señalamiento vehicular de rampa y hay una gran escalinata en la banqueta.



Fotografía 23 Sobre la calle Guillermo Prieto se observa negocios que fueron separados por el desnivel. Además de otros con grietas y la construcción de varios escalones.



Fotografía 24 Sobre la calle Jalisco se encontraron serias afectaciones en las bardas y banquetas, y un desnivel aproximado de 1.50 m.



Fotografía 25 Calle 20 de noviembre esquina con Primo de Verdad y Ramos se distinguen daños sobre el pavimento de la calle Primo de verdad y en 20 de noviembre se observa un desnivel de 1.50 m. Además de agrietamientos que afectan las viviendas y bardas.



Fotografía 26 En la Av. Irrigación se observa un cambio de nivel y afectaciones sobre un enrejado, personas de Tecnológico de Celaya nos informaron que antes el terreno era una secundaria pero debido a los daños en la estructura fue cerrada.



Fotografía 27 Desnivel en la calle Antonio García Cubas.



Fotografía 28 Se observa un desnivel sobre la calle Manuel Orozco y Berra donde se observa la banqueta destruida, además de una barda construida de forma escalonada.



Fotografía 29 Avenida México Japón, se observa un pequeño desnivel sobre el pavimento además de daños en la barda.



Fotografía 30 Sobre la Av. Tecnológico se observa un desnivel muy marcado al cruzar entre las calles Plan de Cuernavaca y Plan de Agua Prieta, se ven además daños en la acera, los escalones y las bardas de las propiedades de la zona.



Fotografía 31 En la calle Plan de Cuernavaca se observa daños en las casa de la zona así con la un desnivel de menos de un metro sobre el pavimento.

3.-Falla Universidad Pedagógica

Secuencia fotográfica de los daños sobre Falla Universidad Pedagógicas se muestra el mapa con la localización de la zona afectada seguida de las fotografías (Figura 3). En importante mencionar que en la parte norte la falla se localiza en grandes campos y zonas industriales donde o no era evidente los efectos de la subsidencia o no se pudo entrar. En otras zonas no se observaron daños en estructuras a simple vista pero al hacer las mediciones GPS se registró el desnivel.

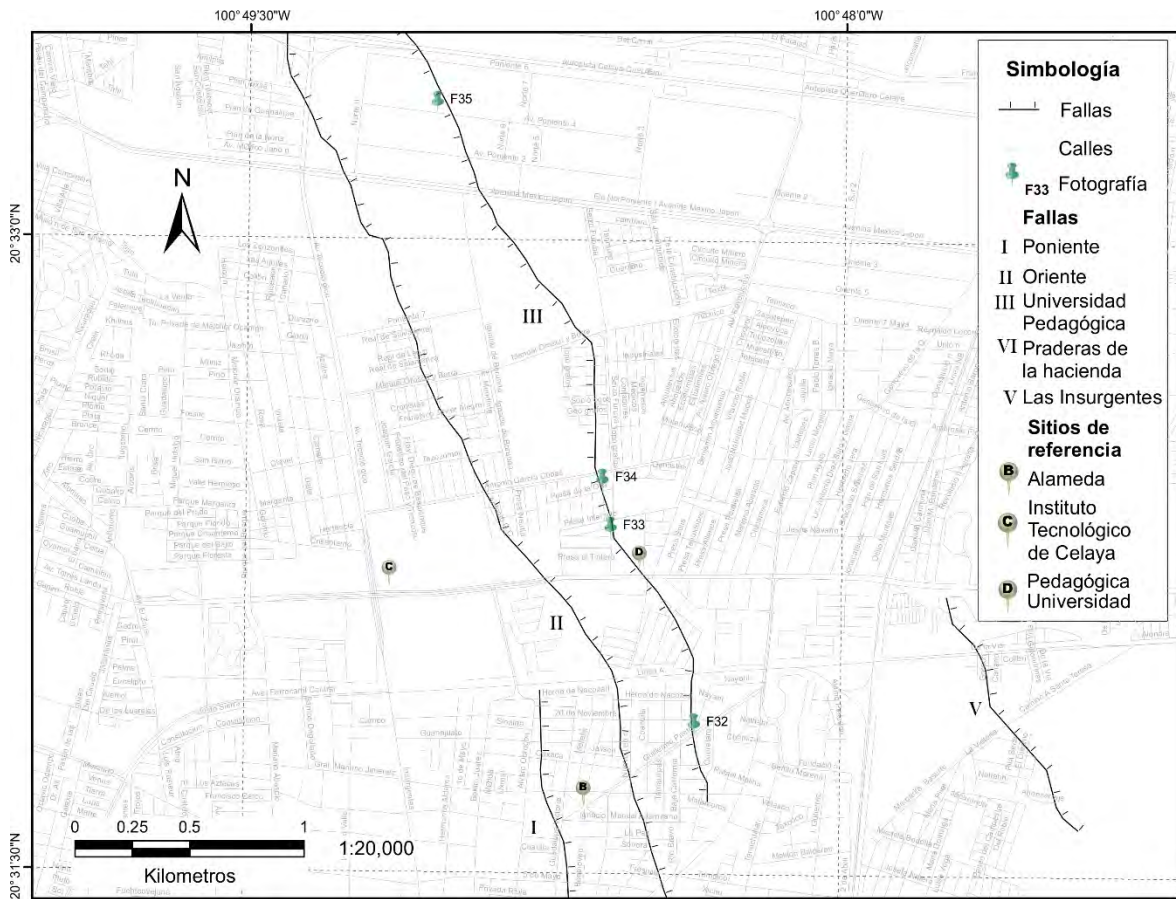


Figura 3 Mapa de la localización de los lugares donde se tomaron las fotografías de los daños en la infraestructura e Celaya generados por la Falla Universidad Pedagógica



Fotografía 32 Sobre la calle Guillermo Prieto se observaron agrietamientos en las bardas y un pequeño desnivel en el pavimento y algunas pequeñas afectaciones sobre la acera.



Fotografía 33 Se observa los daños sobre la calle Presa de la amistad el asfalto esta levantado del nivel de la acera de lado este de la calle y se observan daños sobre las casas en especial en la carpintería evidente en el zaguán.



Fotografía 34 Daños sobre la calle Presa de la Olla se observa más que nada un desnivel en la calle de terracería y ser ha evitado construir en los terrenos por donde cruza la falla.



Fotografía 35 Sobre la calle Poniente 4 se distinguió a penas un desnivel sobre la acera frente a un centro de entrega de trasportistas de alrededor de 50 cm.