



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Relación de subsidencia y
fallamiento en la Cd. de Celaya y su
evaluación de riesgo

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Ana Laura Nila Fonseca

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Enrique Cabral Cano



Ciudad Universitaria, CD.MX., 2017



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.

Contenido

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
AGRADECIMIENTOS.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. ENTORNO GEOLÓGICO E HIDROLÓGICO	14
2.1. Localización	14
2.2. Contexto geológico.....	15
2.3. Estratigrafía	15
2.3.1. Mesozoico	16
Mesozoico Inferior (KiMA-Mar).....	17
Mesozoico Superior (KiMCz-Mar)	17
2.3.2. Cenozoico.....	17
Paleógeno.....	17
Eoceno.....	17
Oligoceno	17
Andesita El Cedro (ToA)	18
Riolita Chichíndaro (ToR-TR)	18
Neógeno	18
Mioceno	18
Ignimbritas Oligo-Miocénicas (Tmlg)	18
Riolita Romero(TmR)	19
Andesita y Basalto la Joya (TmA-B)	19
Areniscas y Conglomerados cenozoicos (TplQptAr-Cgp)	19
Plioceno.....	20
Andesita y basalto pliocénicos (TplA-B)	20
Cuaternario	20
Pleistoceno	20
Andesitas y basaltos pleistocénicos (QptA-B)	20
Sedimentos lacustres (Qptla)	20

Holoceno	21
Aluvión (Qhoal)	21
2.4. Geología estructural	24
2.4.1. Fallas Regionales	24
2.4.1.1. Falla San Miguel de Allende	24
2.4.1.2. Sistema de fallas de Querétaro	24
2.4.1.3. Sistema NE-SW	24
2.4.1.4. Sistema de fallas del Bajío	25
2.4.2. Fallas en el municipio de Celaya	27
2.4.2.1. Falla Oriente	27
2.4.2.2. Falla Poniente	27
2.4.2.3. Falla Universidad Pedagógica	27
2.4.2.4. Falla Insurgentes	28
2.4.2.5. Falla Praderas	28
2.4.2.6. Falla Gobernadores	28
2.5. Hidrografía	30
2.5.1. Unidades hidrogeológicas	30
Acuitardo	30
Acuífero	30
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	32
3.1. Interferometría de Radar de Apertura Sintética	32
3.1.1. RADAR y SAR	32
3.1.2. El principio de InSAR	34
3.2. Análisis espacial	37
3.2.1. Álgebra de mapas	38
4. DATOS UTILIZADOS	40
4.1. Mapa de velocidad de subsidencia	40
4.2. Áreas de Geoestadística Básica urbana	43
5. DETERMINACIÓN DEL RIESGO	44
5.1. Metodología	45
5.2. Resultados	48
5.3. Evolución temporal	53

6.	RELACIÓN DE SUBSIDENCIA CON EL ABATIMIENTO EN POZOS	58
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
9.	REFERENCIAS	71
10.	Anexos	76

RESUMEN

El fenómeno de subsidencia y el fallamiento superficial asociado afecta diversas ciudades del centro de México, entre ellas Celaya. En Celaya, este fenómeno ha sido reconocido desde los años 50 y comenzó a estudiarse hasta los años 80. La presencia de subsidencia diferencial debido a la intensa extracción de agua subterránea, así como la contrastante estratigrafía superficial, ha tenido gran impacto en la infraestructura urbana, esto debido al desarrollo de un sistema activo de fallas normales que representan una amenaza para la población y para la infraestructura urbana.

Es primordial el análisis de este fenómeno para determinar zonas de riesgo e implementar medidas preventivas para reducir la vulnerabilidad de los habitantes. Con este objetivo, se desarrolló un mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia para el año 2010 a partir de un mapa de velocidades de subsidencia (obtenido mediante InSAR), así como de información geoestadística poblacional de INEGI, además de los mapas correspondientes a los años 2000 y 2005 para determinar la evolución temporal del riesgo. En base a estos mapas, en el año 2000, 3% del área urbanizada de Celaya se encontraba clasificada como de alto y muy alto riesgo, lo que representaba el 4.3% de su población. Para el año 2005, el área de las zonas de alto y muy alto riesgo creció a 4.3% y la población creció a 5.2%. Finalmente, para el año 2010, el porcentaje de área urbana en riesgo alto y muy alto corresponde con el 5.0% y la población en estas zonas representa el 6.3% de la población total. De estos datos es evidente que hay un aumento considerable en una década tanto en la extensión como en el número de habitantes de las zonas de alto y muy alto riesgo, lo que refleja la falta de una mejor planeación urbana.

A su vez, pudo determinarse mediante gráficas de tasa de abatimiento del nivel estático vs. tasa de subsidencia que existe una relación entre ambas variables. Se determinó, que en general en la ciudad de Celaya aquellas zonas que presentan mayores valores de subsidencia, están asociados a mayores valores de tasas de abatimiento. Además de existir una correlación espacial entre las zonas con mayor abatimiento y menor capacidad específica con las ubicaciones de las fallas ya reconocidas en superficie.

ABSTRACT

Ground subsidence and related shallow faulting affects different cities in central Mexico, Celaya being one of them. In Celaya, this process has been recognized since the 50's and it was first studied in the 80's. The developing of differential subsidence due to intense groundwater withdrawal, and its contrasting stratigraphy, has had a great impact in the urban infrastructure due to the development of an active fault system that is a hazard for its inhabitants.

It is thus important to analyze the subsidence process and determine hazard zones and implement precautionary measures to reduce the vulnerability of Celaya's inhabitants. With this in mind, a fault risk map associated to subsidence for the year 2010 was developed. A subsidence velocity map (derived from InSAR), and population data from INEGI were used to develop a faulting hazard map associated to ground subsidence. Furthermore, maps for the years 2000 and 2005 were developed to determine the temporal evolution of this hazard. This analysis shows that in year 2000, 3% from the urbanized area was classified as a High and Very High risk Zone, and 4.3% of the habitats lived within these zones. For the year 2005, the High and Very High risk urbanized area grew to 4.3%, and the number of inhabitants in this zone grew to 5.2%. Finally, for the year 2010, the percentage of the urban area within the High and Very High zones increased to 5% of the total area, and the population living within these zones 6.3%. It is clear that the area and the number of inhabitants living within the High and Very High Risk Zones has steadily increased in time, as a result of a lack of an effective urban planning.

On the other side, the relationship between the decreasing rate of water level vs subsidence rate was determined. In general, those zones that undergo rapid subsidence are the zones where the water table shows the larger decrease. Additionally, there is a spatial correlation between the zones with larger water level decreasing rates and less specific capacity that correlates very well to the location of the faults

AGRADECIMIENTOS

A mi Universidad, mi alma máter por darme más de lo que pude pedir. A mi Facultad y profesores.

Al programa Intelligent Systems in Geosciences y al apoyo de 100,000 Strong porque gracias a ellos se inició el proyecto del cual nació esta tesis.

A cada uno de mis sinodales Ing. Alberto Arias, Dr. Enrique González, Lic. Sergio Macías e Ing. Gabriel Salinas por su apoyo, amabilidad, dedicación y consideraciones. En especial a ti Sergio por abrirme las puertas de tu espacio de trabajo, por darme la confianza de estar ahí y por las horas de brindadas y de guía a mi trabajo. A usted Dr. Enrique González, porque más que un guía es un amigo dispuesto a tender una mano de ayuda con una sonrisa, cariño y sinceridad.

A mi tutor, Dr. Enrique Cabral Cano, por el tiempo dedicado, por la paciencia y la ayuda aun cuando estaba lejos y las condiciones no fueron las más óptimas. Gracias por creer en mí y en mi trabajo.

A Dr. Vladimir Kostoglodov, por creer en mí cuando nadie más lo hizo, por dedicarme tiempo, espacio y por ser más familia que asesor. Mis más sinceros agradecimientos por su paciencia y por ayudarme siempre.

Al Ing. Arturo Gómez Villegas y al Ing. Juan Antonio Blanco Figueroa por abrirme las puertas de la sección de Planeación y Proyectos de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Gto. (JUMAPA).

A mi familia, por ser ese apoyo incondicional y porque jamás han dejado de creer en mí. Gracias papá por tu amor y por los sacrificios que has hecho por sacarnos adelante. Gracias mamá, por ser mi compañera de aventuras y de tristezas, por los consejos y por el amor inmenso que me has otorgado. Lupita y Marco, por ser los mejores hermanos siempre.

A Fabi y Ana, porque son el mejor ejemplo de que del odio al amor sólo hay un paso. Gracias por su apoyo y su amistad, por siempre estar ahí para mí.

A Mauricio y Pete, por ser las constantes en mi vida. Una de ellas con más antigüedad que la otra, pero ambas irremplazables.

A Hermes y Diego (Colombias), por ser fuente de inspiración a ser mejor geólogo cada día.

A Alí y Guillermo, por creer en mí y siempre alentarme a seguir con mi trabajo.

A Isra, por ser esa luz en la oscuridad que apareció cuando más la necesitaba. Gracias, por tanto.

A Vasco, por ser ese amigo que cualquiera pudiera desear.

A mis amigos de la Facultad y del Cele, por todas las experiencias vividas.

A ti Ray, por tu cariño y tu apoyo. Por ser un apoyo en momentos en los que quise abandonar, por tu guía y dedicación, por creer en mí y lo que puedo ofrecer.

A todas aquellas personas que no he mencionado en estas hojas, pero que fueron clave para mi desarrollo y para la conclusión de esta tesis.

1. INTRODUCCIÓN

La subsidencia del terreno es un acomodo gradual o un hundimiento súbito de la superficie de la Tierra generado por movimientos o disolución de los materiales del subsuelo (Galloway et. al. 1999, Galloway and Burbey 2011). Debido a que como proceso gradual puede tomar hasta años y siglos para ser evidente en la superficie, el ser humano coexiste con el fenómeno hasta que se convierte en una amenaza notable.

De acuerdo a Galloway et. al. (1999) existen diversos mecanismos que generan el proceso de subsidencia:

- ❖ Consolidación por extracción de fluidos
- ❖ Drenaje de suelos orgánicos
- ❖ Minería subterránea
- ❖ Procesos de hidrocompactación
- ❖ Compactación natural de los sedimentos
- ❖ Formación de sumideros y cenotes
- ❖ Deshielo del permafrost
- ❖ Actividad tectónica

En México, la sobreexplotación de los recursos hídricos del subsuelo ha dado lugar a la consolidación de acuíferos y acuitardos, desencadenando subsidencia del terreno con gran impacto social (Chaussard et. al. 2014).

La consolidación de un acuífero es provocada por el abatimiento de la superficie piezométrica debido a una extracción continua en la que la extracción excede la recarga. La sobreexplotación del acuífero genera una reducción de la presión de poro por lo que incrementa el esfuerzo efectivo entre los granos (Galloway et. al. 1999). El aumento del esfuerzo efectivo se traduce en la compactación del medio, la cual será elástica hasta que la carga exceda el esfuerzo de preconsolidación; si la carga excede al esfuerzo, entonces la deformación será inelástica por lo que habrá una reducción permanente en el volumen de vacíos y por lo tanto del paquete de sedimentos (Terzaghi, 1925).

La subsidencia por consolidación de acuíferos tiene como consecuencia el desarrollo de fracturas y fallas geológicas someras, que en algunas circunstancias pueden estar asociadas a antiguas zonas lacustres y/o fluviolacustres. Las fallas geológicas, en un sentido hidrogeológico pueden comportarse como barreras parciales o totales para el flujo del agua, creando niveles piezométricos contrastantes y diferentes espesores de sedimentación entre uno y otro lado de la falla. Debido a lo anterior puede presentarse subsidencia diferencial (Ávila-Olivera 2004, Cigna et. al. 2014).

La subsidencia o consolidación diferencial se relaciona a la presencia de sedimentos compresibles en paquetes de espesor variable en el subsuelo (Huizar-Álvarez, *et. al.*, 2011). El esfuerzo generado por esta consolidación diferencial, resulta en fracturas y fallas en los sedimentos. La consolidación diferencial de los paquetes de sedimentos con espesores contrastantes a uno y otro lado de una falla generan agrietamientos que posteriormente se convierten en fallas visibles en superficie (Ávila-Olivera, 2008a).

En México este fenómeno se presenta en un gran número de zonas en el centro del país (Chaussard et al 2014). Una de estas ciudades en México que ha sido afectada por subsidencia diferencial es Celaya. De acuerdo a información obtenida por Huizar-Álvarez, *et. al.* (2011), en el municipio de Celaya el proceso de consolidación y hundimiento se conoce desde 1950. No obstante, fue hasta que Trujillo-Candelaria (1985) publicó los primeros estudios relacionados a este proceso, en los que señaló la presencia de dos fallas: Oriente y Poniente. En 1991 identificó tres nuevas fallas: Universidad Pedagógica, Praderas e Insurgentes y fue en el 2008 cuando Trujillo-Candelaria describió una nueva falla llamada Gobernadores.

Se considera que la subsidencia de Celaya es debido a la extracción excesiva de agua (Trujillo 1985, Trujillo 1991, Ávila-Olivera 2008a, Aranda-Gómez *et. al.* 2013, Chaussard *et. al.* 2014). La recarga del acuífero es de 400 millones de m³/año y existen aproximadamente 100 pozos activos que extraen 600 millones de m³/año. Lo anterior genera una sobreexplotación de 200 millones de m³/año (Ávila-Olivera 2008a).

También se considera que el desarrollo de fracturas y fallas someras se encuentra relacionado con las características geológicas propias del área, como la presencia de fallas preexistentes que propiciaron diferencias abruptas en los espesores de litología, y que crean cambios en la transmisividad o conductividad hidráulica (Huizar-Álvarez, *et. al.*, 2011).

La subsidencia y el fallamiento superficial en el municipio de Celaya han afectado sustancialmente la zona urbana provocando daños importantes en su infraestructura como vías terrestres, zonas habitacionales, hospitales, gasolineras, que resultan en un impacto económico considerable. Por lo anterior, resulta de gran importancia el estudio de la subsidencia y el fallamiento superficial para mejorar los planes de uso de suelo y de desarrollo urbano, así como un zoneamiento de uso de suelo, de riesgo por subsidencia y planes de mitigación de riesgo que permitan disminuir el impacto económico y el peligro al que se encuentran expuestos los habitantes.

Sin embargo, en el año 2015, Celaya aun no contaba con un mapa de riesgo propio del municipio como se indica en la nota de Zárate (2015) en el periódico *am*:

“La información de los puntos de riesgo en la ciudad es enviada a una base de datos estatal, misma que es actualizada cada mes, sin embargo, el municipio no cuenta con uno propio...Se dijo que se ha buscado tener un sistema a nivel municipal, pero que no se han podido bajar los recursos para poder aplicar un Atlas de Riesgos en el Municipio y que, aún se siguen buscando fondos con la Federación”.

Además de acuerdo a la nota de Zárate (2015) las autoridades garantizaron que en ese año se haría la solicitud para crear el Atlas de Riesgo Municipal, indicando que el riesgo más alto en el municipio es el “Químico-Tecnológico”. Sin embargo, no se han visto grandes resultados al respecto.

En la página de Protección Civil del Estado de Guanajuato (2016a) se tiene acceso a los Atlas de Riesgo de todos los municipios pertenecientes al estado. En la sección correspondiente al Atlas de Riesgo por Fenómeno Químico-Tecnológico de Protección Civil del Estado de Guanajuato (2016b) se puede corroborar para septiembre del 2016 que respecto a Celaya no existe mayor información que los antecedentes y un

pequeño párrafo relacionado a incendios y explosiones, aun cuando ha sido señalado por las autoridades como el riesgo más alto en el municipio. En la sección correspondiente al Atlas de Riesgo de Celaya por Fenómeno Geológico de Protección Civil del Estado de Guanajuato (2016c) se presenta información introductoria sobre orografía y fallas geológicas, mapas de las cuatro zonas urbanas en las que se dividió al municipio y además una tabla en la que sólo se mencionan dos eventos de subsidencia en distintas localidades.

Los mapas mencionados únicamente señalan como puntos de riesgo las trazas de las fallas que afectan las zonas urbanas. Como información adicional incluyen hidrografía y carreteras, sin embargo, ninguno tiene mayor información sobre subsidencia o la susceptibilidad de las zonas a sufrirla.

Objetivos

El presente trabajo tiene como fin analizar la relación de subsidencia y el fallamiento en la ciudad de Celaya, así como la evolución temporal de subsidencia y determinación de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del terreno cuyo resultado sea un mapa zonificado en el que se tomarán en cuenta dos variables para su determinación.

Metodología

Para la determinación de riesgo se utilizó un mapa de velocidades de subsidencia de la región, el cual fue obtenido mediante la técnica InSAR SBAS (Interferometric Synthetic Aperture Radar; Chaussard *et.al*, 2014). Además, se utilizaron las Áreas de Geoestadística Básica (AGEB) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2015).

La técnica InSAR ya ha sido utilizada para obtener mapas de velocidades y gradientes de subsidencia, así como la generación de mapas de riesgo en algunas otras regiones de México como la Ciudad de México y Morelia, Michoacán (Ávila-Olivera *et. al.* 2008b, Cabral-Cano *et. al.* 2008, Cabral-Cano *et. al.* 2010, Cabral-Cano *et. al.* 2011,

Cigna *et. al.* 2011, Cigna *et. al.* 2012, Solano 2013, Chaussard *et. al.* 2014, Cabral-Cano *et. al.* 2015).

En el caso de Celaya únicamente se habían obtenido mapas de velocidades, pero como se mencionó anteriormente no se cuenta con un mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia.

Por lo anterior, para el cálculo del riesgo fue necesario conocer el número de habitantes vulnerables. Por lo que se utilizaron datos de censos y conteos proporcionados por INEGI los cuales se encontraban divididos por AGEB. Los AGEB, de acuerdo a INEGI (2010) se definen como: “Un área geoestadística básica (AGEB) es la extensión territorial que corresponde a la subdivisión de las áreas geoestadísticas municipales”. Esta unidad básica fue utilizada previamente por Solano (2013) para un análisis similar de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia en la Ciudad de México.

Con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (QGIS versión 2.12.3), se procesaron el mapa de velocidad de subsidencia, los AGEB con número de habitantes, así como información adicional (Geología, Hidrografía, Información de pozos, entre otros) para hacer una primera aproximación a la determinación del riesgo por subsidencia.

El presente trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera: descripción del entorno geológico, descripción de los fundamentos teóricos, correlación de datos disponibles, determinación de riesgo y establecimiento de una línea base para futuras investigaciones.

2. ENTORNO GEOLÓGICO E HIDROLÓGICO

2.1. Localización

Celaya es uno de los municipios del Estado de Guanajuato. Se localiza en las coordenadas geográficas $20^{\circ} 31'$ latitud N y $100^{\circ}49'$ longitud W, como se observa en la Figura 2.1. Es la tercera ciudad más grande del estado, después de Irapuato y León. El municipio colinda con otros 7 municipios: Comonfort, Santa Cruz de Juventino Rosas, Villagrán, Apaseo el Grande, Apaseo el Alto, Tarimoro y Cortázar.

Celaya está situada en la extensa planicie del Bajío y se encuentra a una altura promedio de 1,700 m sobre el nivel del mar. Su extensión territorial es de 553 km^2 y su población en 2010 era de 468 mil habitantes (GEG-INFDM, 2005; INEGI, 2011; Celaya.gob.mx, 2017).



Figura 2.1. Localización del municipio de Celaya en el Estado de Guanajuato

2.2. Contexto geológico

Celaya pertenece a la porción este de la planicie del Bajío Guanajuatense. De los 1,170 km² con los que cuenta, 500 km² corresponden con una planicie aluvial y fluviolacustre. Se encuentra limitada por relieves volcánicos al norte (San Pedro y Palo Huérfino) y al sur (Cerro Grande) (Figura 2.2). El relleno de la cuenca consiste en rocas volcánicas intercaladas con sedimentos lacustres. La subprovincia Bajío Guanajuatense pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena et al., 2005). Al norte de Celaya se encuentra la subprovincia Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato que pertenece a la provincia denominada Mesa Central (SGM 1999a, Ávila-Olivera 2008a, Huizar-Álvarez et. al. 2011).

2.3. Estratigrafía

En esta sección se presenta una descripción sintetizada de las litologías presentes en el municipio de Celaya, utilizando como base información de Alaniz-Álvarez, *et. al.* (2001,2002), Huizar-Álvarez, *et. al.* (2011), Aranda-Gómez *et. al.* (2013), así como la carta geológico-minera (1: 50,000) de Celaya del Servicio Geológico Mexicano (SGM 1999a) elaborada por Alaniz-Álvarez, Nieto-Samaniego, et. al y la carta geológico-minera (1:250 000) del Estado de Querétaro del SGM (1999b).

Como resultado del conjunto de los trabajos previamente citados se presenta el mapa geológico de las unidades aflorantes en el municipio de Celaya en la Figura 2.3. La columna estratigráfica puede observarse en las Figura 2.3 y Figura 2.4.

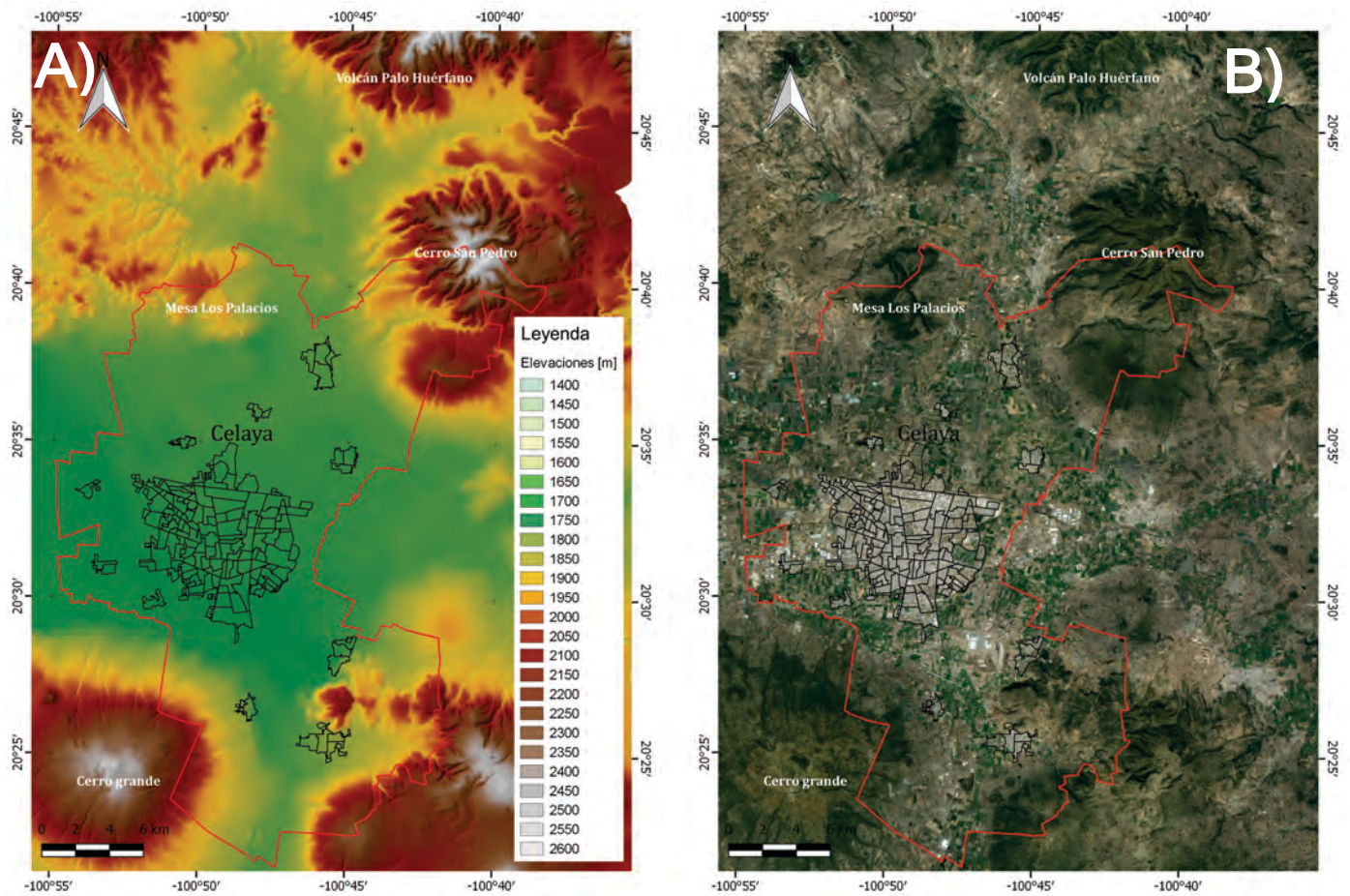


Figura 2.2. A) Relieve de la región circundante a la ciudad de Celaya. El polígono rojo delimita el municipio de Celaya, mientras que los polígonos negros delimitan los AGEBS de la zona urbana de la ciudad de Celaya. Modificado de INEGI 2017. B) Imagen satelital de la región circundante a la ciudad de Celaya. Modificado de Google Earth 2017.

2.3.1. Mesozoico

Son las rocas más antiguas de la secuencia expuesta localmente. Tienen un origen marino y presentan metamorfismo de bajo grado, ya que se clasifican en facies de esquistos verdes por la presencia de filitas ricas en muscovita, pizarras y la paragénesis de albíta-clorita-epidota en metabasaltos (SGM 1999a, Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011). Están cubiertas discordantemente por sedimentos continentales de conglomerados o por rocas volcánicas oligocénicas. Las rocas del Mesozoico se encuentran divididas en dos conjuntos litológicos:

Mesozoico Inferior (KiMA-Mar)

Esta unidad es definida por Alaniz-Álvarez, *et. al.* (2001) como vulcanosedimentaria. Está conformada por meta-areniscas, filitas y pedernales, además de algunos horizontes de radiolaritas. Presenta intercalación con rocas volcánicas principalmente de composición básica, como metatobas y derrames de metabasaltos, algunas estructuras de almohadilla, diques, y capas de material piroclástico. Se le asigna una edad Neocomiana (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). La unidad aflora al NW de la zona como se observa en la Figura 2.3.

Mesozoico Superior (KiMCz-Mar)

Tiene una edad Aptiana-Albiana. Esta unidad está constituida por calizas con intercalaciones de areniscas calcáreas, areniscas metamorfoseadas, margas y lutitas. Aflora al norte de Celaya junto con la unidad inferior (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). La unidad aflora al NW de la zona como se observa en la Figura 2.3.

2.3.2. Cenozoico

Paleógeno

Eoceno (TeCgp)

La unidad del Eoceno yace discordantemente a las rocas del Mesozoico. Está conformada por un conglomerado continental polimíctico y areniscas de color rojo. Se encuentra intercalada con derrames de basalto y en algunas regiones con ignimbritas riolíticas, así como diques y cuerpos intrusivos de composición andesítica y riolítica (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). Esta unidad aflora al NW de la zona comprendida en la Figura 2.3, por lo que no se observa en ésta última.

Oligoceno

Se presentan dos unidades:

Andesita El Cedro (ToA)

Es denominada Andesita El Cedro por Alaniz-Álvarez, *et. al.* (2001, 2002). Su edad asignada es del Oligoceno Medio. Esta unidad está compuesta por lavas cuya composición varía de basalto a andesita y tobas. Sobreyace directamente al basamento Mesozoico o se encuentra intercalada con lavas y rocas piroclásticas de la Riolita Chichíndaro. (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001,2002). De igual forma, la Andesita El Cedro aflora al NW de la zona comprendida en la Figura 2.3.

Riolita Chichíndaro (ToR-TR)

Fecha en 30 Ma (Nieto-Samaniego *et. al.* 1996). Está formada por derrames y domos de composición ácida (riolítica a riodácitica rica en sílice y alta en potasio), tobas, ignimbritas, vitrófidos, brechas y traquitas. Tiene espesores que van de los 100 a los 400m. Esta unidad intrusión al basamento Mesozoico por lo que lo cubre discordantemente, además está intercalada con derrames de la unidad Andesita El Cedro. Se considera que cubre gran parte de la porción sur de la Mesa Central (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). La riolita Chichíndaro aflora en la región NW de la Figura 2.3.

Neógeno

Mioceno

Ignimbritas Oligo-Miocénicas (TmIg)

Las edades reportadas son del Oligoceno Tardío al Mioceno (Nieto Samaniego *et al.*, 1996). Esta unidad está compuesta por ignimbritas de composición riolítica a riodacítica y dispuesta en capas horizontales con espesores que van de menos de 100 m hasta un máximo de 200m. Se encuentra intercalada con tobas y vitrófidos. Yace discordantemente sobre el basamento Mesozoico o la Riolita Chichíndaro (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). Esta litología aflora en la porción NW de la Figura 2.3

Riolita Romero (TmR)

La Riolita Romero fue definida por Alaniz-Álvarez, *et. al.* (2001). Corresponde con un derrame de riolita con una edad inferida entre el Oligoceno y Mioceno Medio. Cubre discordantemente a las ignimbritas y la Riolita Chichíndaro. La riolita presenta esferulitas en gran cantidad y su espesor llega a los 150 m. Además, presenta estructuras volcánicas que posiblemente son domos riolíticos (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). La Riolita Romero aflora en la zona SE de la Figura 2.3, por ende, al SE de la ciudad de Celaya.

Andesita y Basalto la Joya (TmA-B)

La unidad recibe este nombre de Alaniz-Álvarez, *et. al.* (2001). Yace discordantemente sobre las ignimbritas (Tmlg) y es común observarla intercalada con areniscas y conglomerados cenozoicos. Esta unidad está compuesta por derrames fisurales de rocas basálticas y andesíticas y aparatos volcánicos, además de productos volcánicos de composición básica e intermedia provenientes de los estratovolcanes Palo Huérfano, La Joya y San Pedro. Su espesor no supera los 70m. Se le asigna una edad de Mioceno Medio (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). Esta litología aflora tanto en la región NE (Cerro San Pedro), SE y Norte central de la Figura 2.3.

Areniscas y Conglomerados cenozoicos (TplQptAr-Cgp)

Unidad compuesta por sedimentos lacustres y aluviales que rellenan los valles, por lo que son el relleno de cuencas continentales como El Bajío y las cuencas asociadas a las fallas San Miguel de Allende y Querétaro. Su litología está compuesta por areniscas, conglomerados con presencia de algunas margas, lutitas, lentes de pedernal y caliza. Su edad abarca de finales del Oligoceno al Pleistoceno y tiene espesores de hasta 500 m. Presenta intercalamiento con las ignimbritas oligo-miocénicas (Tmlg), Riolita Romero (TmR) y las Andesitas y Basaltos La Joya (TmA-B). Debido a que su depositación ha sido continua está sepultada por sedimentos actuales (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001,

Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011). Es la unidad con afloramiento de mayor extensión en la región, se observa principalmente en la región central de la Figura 2.3.

Plioceno

Andesita y basalto pliocénicos (T_{plA-B})

Unidad compuesta por aparatos volcánicos de rocas basálticas y andesíticas. Se observan emplazados en la falla San Miguel de Allende (Figura 2.3 y Figura 2.5). Presentan intercalación con areniscas y conglomerados cenozoicos (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). Los aparatos volcánicos de esta unidad se observan en la región NE de la Figura 2.3.

Cuaternario

Pleistoceno

Andesitas y basaltos pleistocénicos (Q_{ptA-B})

Debido a la presencia de actividad volcánica de la Faja Volcánica Transmexicana, se presentan aparatos volcánicos tipo escudo, monogenéticos y/o maar y numerosos conos cineríticos. Dan lugar a derrames, brechas, tobas y flujos de composición intermedia a básica (SGM, 1999b). En la Figura 2.3 se observa que esta unidad corresponde con el Cerro Grande ubicado en la región SW del área de estudio.

Sedimentos lacustres (Q_{ptla})

Esta unidad está constituida por sedimentos lacustres que rellenan las depresiones existentes. Corresponden a la continuación de la secuencia sedimentaria de las areniscas y conglomerados cenozoicos (SGM 1999a, Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). Por razones de claridad cartográficas, se agruparon en la misma unidad **T_{pl}Q_{ptAr}-C_{gp}** que se observa en el área central de la Figura 2.3.

Holoceno

Aluvión (Qhoal)

La unidad está conformada por sedimentos aluviales holocénicos que rellenan las depresiones en el área de estudio (Figura 2.3), y evidencian la sedimentación continua que ha sufrido la región (SGM, 1999a). Por las mismas razones que la unidad anterior ha sido agrupada con la unidad **TplQptAr-Cgp**. Se presentan aflorando en mayor parte en la porción central de la Figura 2.3.

La geometría y distribución de las unidades anteriormente descritas puede observarse en la Figura 2.3, así como una columna estratigráfica simple de la zona. En la Figura 2.4 se observa la columna estratigráfica regional propuesta por Nieto-Samaniego *et.al.* (1999a), para el Servicio Geológico Mexicano, la cual muestra las relaciones estratigráficas entre las unidades descritas anteriormente.

Como se observa en la Figura 2.3, en el municipio de Celaya (polígono de color rojo) afloran predominantemente areniscas y conglomerados (**TplQptAr-Cgp**) y en menor proporción andesita y basalto (**TmA-B** y **QptA-B**), ignimbritas (**Tmlg**) y riolitas (**TmR**). El área urbanizada de Celaya (polígono negro) se encuentran prácticamente en su totalidad desarrollada sobre material sedimentario que corresponde con areniscas y conglomerados (**TplQptAr-Cgp**).

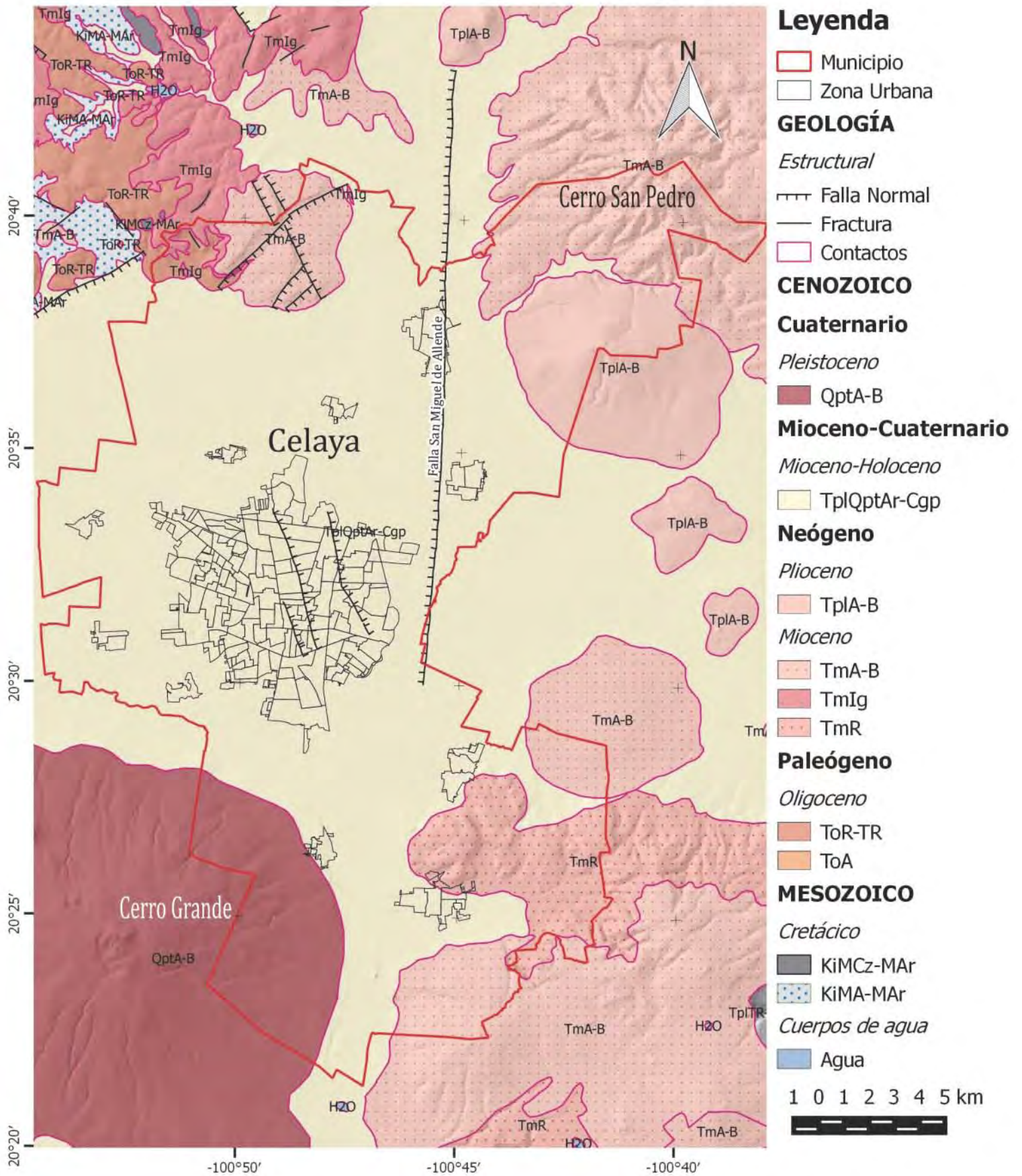


Figura 2.3. Mapa geológico y columna estratigráfica de la región de estudio. Modificado de SGM (1999a, 1999b) y Alaniz-Álvarez (2001). El polígono de color rojo muestra la extensión del municipio de Celaya. Y los polígonos de color negro muestran la extensión de la ciudad de Celaya y sus zonas suburbanas.

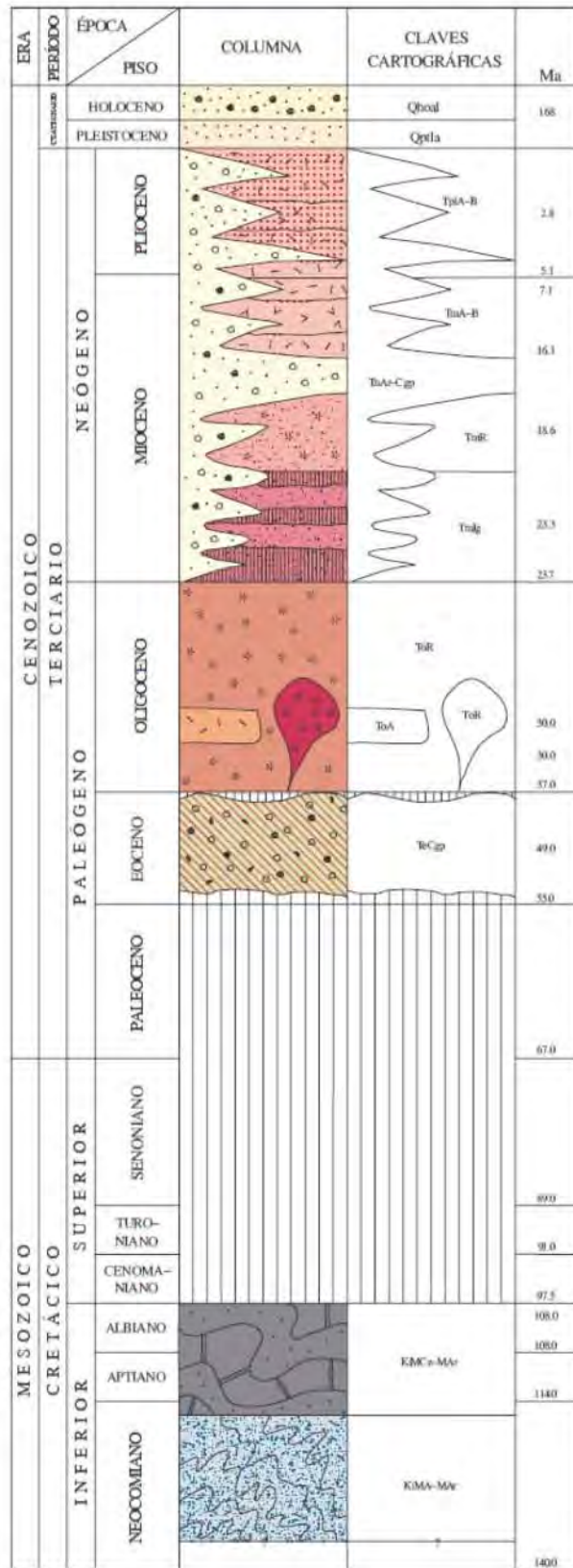


Figura 2.4. Columna estratigráfica de la región. Tomada de SGM (1999a)

2.4. Geología estructural

2.4.1. Fallas Regionales

La zona de estudio se encuentra dentro del graben del Bajío. En la región se presentan cuatro sistemas de fallas regionales, que fueron activados durante el Oligoceno-Mioceno y por ende afectaron prácticamente toda la columna estratigráfica antes descrita. Estos cuatro sistemas son: la falla San Miguel de Allende, el sistema de fallas de Querétaro, el Sistema NE-SW y el sistema de fallas del Bajío (Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). Estos sistemas se encuentran sombreados en color gris en la Figura 2.5. A continuación, se presentan características generales de cada uno de ellos:

2.4.1.1. *Falla San Miguel de Allende*

Esta falla es de tipo normal y está segmentada en tres partes: el segmento norte, central y sur (Figura 5). La porción centro tiene una dirección N-S y limita al sur con el volcán Palo Huérfano, afectando sus rocas del Mioceno Medio. El segmento central tiene una longitud aproximada de 38 km y un desnivel promedio de 200m que sirvió como límite a la cuenca de depósito. A su vez, el segmento sur se encuentra oculto por el material del volcán Palo Huérfano y por sedimentos de la cuenca. Sin embargo, se ha inferido que el curso del Río Laja es resultado de la presencia de esta falla (Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001)

2.4.1.2. *Sistema de fallas de Querétaro*

Lo conforman cuatro fallas de tipo normal cuya orientación es N-S y son paralelas entre sí. Las fallas representativas de este sistema son: Falla Querétaro, Falla 5 de febrero, Falla Tlacote y Falla San Bartolomé. Las fallas presentan longitudes variables con desplazamientos verticales que van de 50 m hasta más de 100 m (Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). El sistema de fallas de Querétaro se muestra en el Este y centro de la Figura 2.5.

2.4.1.3. *Sistema NE-SW*

Al igual que los sistemas anteriores, las estructuras pertenecientes a este sistema son fallas de tipo normal y se le asocian los alineamientos de fuentes de emisión volcánica. Este sistema, como su nombre lo indica, tiene orientación NE-SW y presenta

como característica varios segmentos de fallas normales de ángulo alto, las cuales no rebasan los 15 km de longitud y tienen desplazamientos verticales cuyo rango va de 30 a 100 m. Las estructuras principales de este sistema son: Falla Huimilpan, Falla Sur, Falla Central, Falla Ixtla, Dique El Patol, Falla La Joya y Palo Huérfano (Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). De acuerdo a Huizar-Álvarez, *et. al.* (2011), las estructuras con relevancia para la ciudad de Celaya son: Falla la Joya y Falla Palo Huérfano. La primera afecta los volcanes la Joya y San Pedro, así como la Mesa Los Palacios. Esta falla tiene una orientación N50°E y un desplazamiento vertical de 50 m. La falla Palo Huérfano toma su nombre debido a que corta las lavas del volcán Palo Huérfano con una dirección N60°E con echado hacia el NW. Este sistema se puede observar en el Este central de la Figura 2.5.

2.4.1.4. Sistema de fallas del Bajío

La orientación de este sistema es NW-SE con echado hacia el SW, se considera paralelo a la falla del Bajío cuyo rumbo es N45°W. El sistema presenta desplazamientos mayores a los 500m hacia el oeste, que afectan al basamento, así como rocas oligocénicas (Alaniz-Álvarez, *et. al.* 2001). El sistema se observa en el Oeste central de la Figura 2.5.

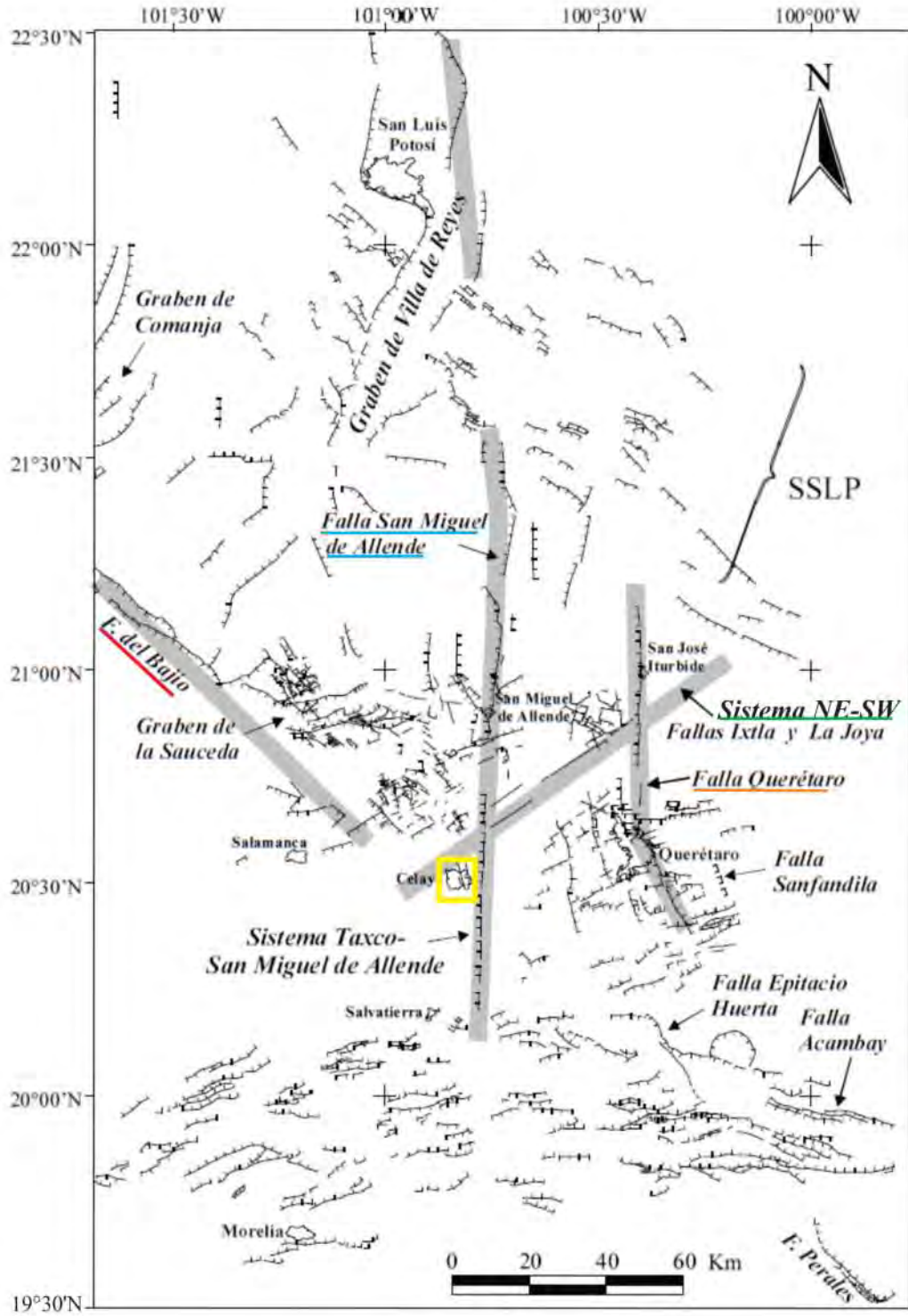


Figura 2.5 Mapa de localización de las fallas regionales circundantes a la zona de estudio (rectángulo amarillo). Modificado de Alaniz-Álvarez (2001).

2.4.2. Fallas en el municipio de Celaya

Las fallas asociadas a la subsidencia del terreno que afectan el municipio de Celaya han sido identificadas a lo largo de los años y a partir de los primeros estudios llevados a cabo por Trujillo-Candelaria en 1985. En la actualidad están identificadas seis fallas cuyas longitudes son variables y presentan desplazamientos verticales variables; sin embargo, todas ellas son de tipo normal. Cada una de las fallas se describe a continuación y puede observarse en la Figura 2.6.

2.4.2.1. *Falla Oriente*

Localizada en la parte oriental de la ciudad, la Falla Oriente tiene una orientación NW30°SE con echado hacia el NE. En 1985, presentaba desplazamientos de hasta 2 m los cuales afectaban zonas agrícolas, así como edificios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y FOVISSSTE. Su traza afecta la carretera Irapuato-Querétaro (45D Federal). De acuerdo a las observaciones publicadas, parece ser la más activa y larga de todas las fallas reconocidas en Celaya, ya que presentaba una longitud de 4km en 1985, mientras que en 2005 ya se reportaba una longitud de 11.2 km (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011, Ávila-Olivera 2008a).

2.4.2.2. *Falla Poniente*

La Falla Poniente comparte la orientación de la falla Oriente. Esta falla afecta oleoductos, tuberías de aguas negras, el Convento de San Francisco, así como la carretera Villagrán-Celaya (45 Federal). Debido a que se extiende a zonas suburbanas y agrícolas no es posible seguir con precisión su traza. Al igual que la falla anterior, su longitud ha ido creciendo con el tiempo, ya que en 1985 era de 7 km, en 1999 fue de 8 km y para el 2005 alcanzó los 9 km. Su salto alcanzaba hasta un 1m en los ochenta (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011, Ávila-Olivera 2008a).

2.4.2.3. *Falla Universidad Pedagógica*

Su orientación es NW-SE, pero a diferencia de las anteriores fallas, su echado es en dirección SW. Debido a lo anterior, forma un graben con la falla Oriente y un horst con la falla Insurgentes. Entre sus afectaciones se encuentra la carretera Irapuato-Querétaro (45D Federal). Su longitud era de 4 km en el 2005 (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011).

2.4.2.4. Falla Insurgentes

Se le da ese nombre, ya que afecta a la colonia Insurgentes. La falla se encuentra aproximadamente a 1500 m al NE de las fallas antes descritas. Presenta una orientación de NW30°SE, similar a las estructuras anteriormente descritas, pero con echado hacia el NE. Su longitud aproximada en 1984 era de 500m, pero en 2005 se calculaba que tenía por lo menos 1200 m (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011, Ávila-Olivera 2008a).

2.4.2.5. Falla Praderas

A diferencia de las estructuras anteriores, ésta se encuentra en la región norte de Celaya. Tiene una orientación aproximada N15°W con dirección de echado al NE. Su longitud en 1985 era de 2 km, pero para el 2008 creció a 3.5 km (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011).

2.4.2.6. Falla Gobernadores

Se encuentra 2 km al noreste de la falla Insurgentes. Presenta una orientación al NW con dirección del echado hacia el SW (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011).

De acuerdo a Huizar-Álvarez *et. al.* (2011) éstas fallas urbanas con orientaciones entre N30°W a N20°W son paralelas a la familia de lineamientos que fue reconocida por ellos con una orientación de N20°-60°W.



Figura 2.6. Mapa de localización de las fallas urbanas de Celaya. La base cartográfica es de OpenStreetMap y la localización de fallas fue modificada de Huizar-Álvarez et.al. (2011)

2.5. Hidrografía

El Río Laja es la corriente hidrológica principal del municipio de Celaya (Protección Civil de Guanajuato, 2016d). El río ingresa al municipio de Celaya por el norte, sigue hacia el oriente del municipio al cruzarlo longitudinalmente de Norte a Sur y posteriormente gira abruptamente hacia el oeste desembocando en el Río Lerma. Por lo anterior se cree que este río se encuentra controlado estructuralmente por la falla San Miguel de Allende (SEMARNAT, 2006) y que la orientación y sus cambios en el cauce podrían estar asociado con la existencia de fallas (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011). La zona pertenece a la región hidrográfica Lerma-Santiago y a su vez a la cuenca Lerma-Chapala. La cuenca Lerma-Chapala tiene una extensión de 47,116 km² (Huizar-Álvarez, *et. al.* 2011; SEMARNAT 2006).

2.5.1. Unidades hidrogeológicas

De acuerdo a Huizar-Álvarez, *et. al.* (2011) se pueden identificar dos unidades hidrogeológicas: un acuitardo y un acuífero mixto (Intergranular-fisurado).

Acuitardo

Es una secuencia heterogénea constituida por capas interestratificadas de arena (30m), tobas de grano fino (20-100m), arcillas (30-130m) y lavas en algunas áreas que corresponden a las Unidades litoestratigráficas **TplQptAr-Cgp**. La secuencia se encuentra en el centro de la planicie. Las características del acuitardo son las siguientes: espesor máximo de 90 m en la zona central y 20 m en las zonas más distales, tiene un valor de conductividad hidráulica (k) de 1×10^{-6} m²/s y un coeficiente de almacenamiento de 0.003 (Huizar-Álvarez, *et. al.*, 2011).

Acuífero

Está conformado principalmente por arenas, conglomerados, arcillas y flujos de lava cuyo espesor es variable y que son parte de las Unidades **TplQptAr-Cgp** y **TmA-B**. Sus características son: Transmisividad de 2.07×10^{-4} m²/s para el acuífero intergranular, mientras que para el fisurado es de 1.65×10^{-3} m²/s. Su coeficiente de almacenamiento es aproximadamente de 0.05 (Huizar-Álvarez, *et. al.*, 2011).

Sin embargo, de acuerdo a Protección Civil de Guanajuato (2016d), en el municipio se explotan dos acuíferos: el inferior formado por depósitos volcánicos tobáceos de tipo riolítico con una temperatura de 40°C y el superior formado por derrames de rocas volcánicas basálticas y sedimentos lacustres estratificados, además de no contar con un acuitardo que los separe en la mayor parte del área.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Interferometría de Radar de Apertura Sintética

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética o bien InSAR, por sus siglas en inglés, es una técnica de percepción remota que permite caracterizar la deformación o desplazamiento de la superficie terrestre en tiempos relativamente cortos y (en el caso de SAR en plataformas satelitales) con resoluciones espaciales submétricas. Su capacidad sinóptica y gran cobertura espacial (Pritchard, 2006; Raucoules, Colesanti, & Carnec, 2007) resulta complementaria con otras técnicas geodésicas satelitales, como el GPS, que es un método de observación espacialmente discreto.

Actualmente, la técnica de InSAR es de gran utilidad para el campo de ciencias de la Tierra. Entre sus aplicaciones se encuentra el monitoreo de vulcanismo (p. ej. abultamientos o deflación en estructuras volcánicas), de creep o deslizamiento lento y de la deformación previa, durante y posterior a un sismo, mediciones en velocidades de flujo de glaciares, cambios de humedad en el suelo, movimientos de masa o deslizamientos de ladera y la caracterización de fenómenos de subsidencia asociados a actividad minera, extracción de agua, entre otros (B. E. Chaussard & Amelung, 2013; Pritchard, 2006; Raucoules, Colesanti, & Carnec, 2007; Zebker, 2000).

Ésta técnica puede jugar un papel importante para la evaluación de riesgo y peligro, así como en la prevención y mitigación de desastres, por lo que resulta conveniente el entendimiento de la técnica InSAR y su uso para la caracterización de la subsidencia.

3.1.1. RADAR y SAR

La técnica RADAR, por su acrónimo en inglés RAdio Detection And Ranging, es una técnica de sensores remotos en la que se transmiten pulsos electromagnéticos de alta energía, en la frecuencia de las microondas, para iluminar un objetivo y se recibe la señal reflejada con el fin de inferir información sobre dicho objetivo (Bürgmann, Rosen, &

Fielding, 2000; Moreira et al., 2013; Pritchard, 2006). Esta técnica emplea el tiempo de viaje, la amplitud y la fase de la señal que ha sido reflejada para determinar la distancia a la que se encuentra el objetivo y además genera una imagen bidimensional conforme el radar ilumina la superficie terrestre. La amplitud contiene información de la energía retrodispersada y depende de las características del terreno como son la pendiente, la rugosidad y sus propiedades dieléctricas (Bürgmann et al., 2000).

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es una técnica para el procesado de la señal o imágenes donde la apertura sintética, o bien simulación de una antena virtualmente más grande, se logra con el desplazamiento de la fuente y receptor (es decir la antena), sobre los múltiples pulsos electromagnéticos (Pritchard, 2006). En este caso el sensor SAR, mientras está en movimiento, se encarga de enviar y recibir los pulsos electromagnéticos que son reflejados por el terreno. La línea en la que se envían los pulsos del radar hacia el objetivo se conoce como *línea de visión* o LOS (Line of Sight, por sus siglas en inglés), y el ángulo formado entre la vertical y la línea de visión se conoce como ángulo de visión o incidencia (Moreira et al., 2013; Pritchard, 2006; Raucoules et al., 2007).

Posterior al barrido del área, se genera una escena en la que cada pixel SAR está asociado a un número complejo. Por lo que, esta escena en realidad, no es más que una matriz o arreglo de números complejos representados en términos de su amplitud y fase (Pritchard, 2006; Raucoules et al., 2007).

De igual manera, que, en los sistemas de RADAR convencional, la amplitud registrada corresponde con la intensidad de la energía retrodispersada por los objetivos iluminados por el instrumento y depende de las propiedades físicas y dieléctricas del terreno.

A su vez, la fase sirve para estimar la distancia entre el radar y el área objetivo comprendida en un pixel. Debido a que se considera el viaje de ida y vuelta de la señal, la fase suele dividirse entre dos. Sin embargo, la fase en una imagen de tipo SAR es aleatoria de un pixel a otro debido a la distribución espacial y orientación aleatorias de los dispersores en el terreno y en consecuencia para poder ser utilizada, se necesita hacer

uso de las técnicas de tipo InSAR (Bürgmann et al., 2000; Pritchard, 2006; Raucoules et al., 2007).

3.1.2. El principio de InSAR

Esta técnica consiste en la comparación de dos o más imágenes SAR en la que la diferencia de fase resultante posibilita la elaboración de un modelo digital de elevación o inferir cambios en la distancia medida entre el terreno y la antena del receptor. Siendo estos cambios el resultado de la deformación del terreno ocurrida entre dos adquisiciones de tipo SAR, se facilita identificar cualquier desplazamiento asociado a la subsidencia del terreno.

El sensor SAR ilumina dos o más veces , de forma periódica, una región con pulsos electromagnéticos, en el rango de las microondas. Posteriormente se analiza la señal retrodispersada hacia el radar y se expresa en forma de una matriz de números complejos para formar una escena de tipo SAR. La primer imagen obtenida es llamada *máster* y la siguiente imagen obtenida, en tiempos distintos y/o posiciones ligeramentes distintas, de la misma área o escena es llamada *slave* (Raucoules et al., 2007; Zebker, 2000). El intervalo de tiempo transcurrido entre adquisiciones se llama *línea de base temporal* (B_t) y se expresa en días. La *línea base* es la separación de la posición del satélite entre las dos adquisiciones y la *línea base perpendicular* (B^+) se refiere al vector perpendicular a la dirección de la línea de visión (LOS) entre las dos trayectorias. Éstas dos últimas son medidas de qué tan diferentes son las geometrías de adquisición *máster* y *slave* (Raucoules et al., 2007). Estos términos serán utilizados en los párrafos siguientes y en el capítulo 4 para profundizar brevemente en la explicación y uso de la técnica InSAR.

Una vez adquirida la segunda imagen, o *slave (esclava)*, de la misma área desde una geometría de observación muy parecida a la original y después de cierto periodo, el proceso interferométrico evalúa la diferencia de fase pixel por pixel entre la imagen *máster* y la *slave*. Como la fase es relacionada directamente con la distancia que viaja la

señal, la diferencia de fase se traduce como cambios o desplazamientos de terreno de precisión milimétrica durante el periodo entre la adquisición de ambas imágenes. La imagen resultante de la diferencia de fases, es decir fase interferométrica, es conocida como *Interferograma* (Bürgmann et al., 2000; Moreira et al., 2013; Raucoules et al., 2007; Zebker, 2000).

De acuerdo a Bürgmann et. al. (2000), si la fase relativa entre dos imágenes SAR es tomada desde puntos de vista ligeramente diferentes se obtiene información de la topografía, esto simulando la visión estereoscópica. Por otro lado, si la diferencia de fase se toma prácticamente desde el mismo punto de vista, pero en tiempos diferentes se puede observar entonces los desplazamientos de fase de la señal, es decir los desplazamientos del terreno.

Sin embargo, un interferograma no sólo tiene variaciones de fase dependientes de la topografía y la deformación de superficie, puede tener contribuciones de otras variables como son: efectos orbitales, topográficos, atmosféricos, etc. Los cuales deben ser tratados o eliminados dependiendo de la información que se desee adquirir del interferograma (Bürgmann et al., 2000; Pritchard, 2006; Raucoules et al., 2007; Zebker, 2000). López Quiroz et. al. (2009) expone que la fase interferométrica (φ_{igf}) puede expresarse de la siguiente forma:

$$\varphi_{igf} = \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{orb} + \varphi_{DEM} + n.$$

Donde φ_{def} es el cambio de fase debido al desplazamiento del terreno en la dirección de la línea de vista (LOS) del satélite, φ_{atm} es la fase debido al retraso diferencial atmosférico entre dos adquisiciones, φ_{orb} es la fase residual debido a inexactitudes en las órbitas, φ_{DEM} representa los errores residuales del DEM (Modelo Digital de Elevación, por sus siglas en inglés) y n es el ruido de decorrelación de la fase. Por lo que para caracterizar únicamente la deformación, los demás efectos deben ser eliminados. Este tipo de correcciones pueden observarse en el capítulo 4 donde se describen los datos utilizados en esta tesis.

En el caso de las variaciones de fase dependientes de la topografía o del DEM, éstas pueden ser eliminadas si existe un modelo digital de elevación preexistente o si se cuenta con un segundo interferograma en el que se asume que únicamente contiene la señal topográfica. Se hace la sustracción de este segundo interferograma pixel por pixel para obtener únicamente la firma de la deformación, considerando que no existe aporte de las demás variables antes mencionadas (Bürgmann et al., 2000; Zebker, 2000).

La técnica InSAR ha sido aplicada exitosamente para la cartografía de subsidencia del terreno, pudiendo usarse diferentes metodologías como puede ser la de *Small Baseline (SBAS)*, línea base pequeña, o la de *Persistent Scatterer (PS)*, *retrodispersores permanentes* con los cuales se obtienen series de tiempo (e.g. Chaussard & Amelung, 2013; López-quiroz, Doin, Tupin, Briole, & Nicolas, 2009; Raucoules et al., 2007).

La metodología SBAS, calcula interferogramas con líneas de base perpendicular y temporal limitadas o cortas con el fin de reducir el efecto de la decorrelación espacial y temporal. Es por ello que su ventaja es que genera interferogramas altamente coherentes. Esta metodología es especialmente apropiada para registrar la deformación en la línea de vista ya que tiene una reducida sensibilidad a la topografía, además de que la contribución del ruido de decorrelación dependiente de la geometría es muy pequeña (López-quiroz et al., 2009; Raucoules et al., 2007).

En cambio, la metodología de PS emplea todas las imágenes disponibles para obtener interferogramas con respecto a la imagen máster y se usa la amplitud o la amplitud y fase para elegir aquellos pixeles que no presentan decorrelaciones espaciales y temporales. Esto tiene como resultado una información de fase confiable (López-quiroz et al., 2009).

En este trabajo se utilizó, el mapa de desplazamiento de Chaussard (2014) generado a partir de datos provenientes del sensor Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) a bordo del satélite Advanced Land Observing Satellite

(ALOS), en series de tiempo analizados mediante el método Small Baseline como se explica en el Capítulo 4 de esta tesis.

3.2. Análisis espacial

En la actualidad el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha cobrado gran relevancia al ser utilizado no sólo con fines cartográficos relacionados a las Ciencias de la Tierra, si no también relacionados con problemas sociales como son los mapas que muestran zonas con altos índices de crimen o mapas de crisis como el elaborado durante días posteriores al sismo ocurrido en Haití en 2010, reportado por Meier en 2012, que incluso ayudó a salvar vidas. Es por ello, que los SIG son ya una herramienta indispensable para el análisis espacial de cualquier tipo de información susceptible de ser georeferenciada.

De acuerdo a Longley et. al (2005) existen diversas definiciones de Sistema de Información Geográfica dependiendo del enfoque. Sin embargo, un SIG puede ser definido como una herramienta computarizada que sirve de apoyo para ejecutar operaciones en información geográfica, tomar decisiones espaciales y resolver problemas geográficos. Esto podría desarrollarse a mano, pero la tarea podría resultar tediosa, cara o inexacta por lo que el uso de sistemas computarizados permite generar resultados de forma rápida, relativamente accesible y con la posibilidad de ser repetida cuantas veces el usuario lo requiera .

Longley et. al. (2005) considera a su vez, que el análisis espacial es la esencia en sí del GIS. Esto debido a que conlleva las transformaciones, manipulaciones y métodos a los que puede ser sometida información de tipo geográfica para agregarle un valor, para tomar decisiones y determinar patrones que no son obvios a simple vista. Es decir, que el análisis espacial es aquél proceso mediante el cual se transforman datos a información útil para hacer una toma de decisiones más efectiva.

El análisis espacial puede llevarse a cabo mediante seis métodos: *queries* o preguntas en el que el GIS ayuda a responder simples preguntas propuestas por el usuario, *mediciones* que son valores numéricos que describen aspectos de la información geográfica, *transformaciones* en las que los conjuntos de datos se modifican, combinándolos o comparándolos para tener nuevos conjuntos de datos, *resúmenes descriptivos* en el que se captura la esencia de un conjunto de datos en uno o dos números, *técnicas de optimización* para seleccionar ubicaciones ideales para objetos utilizando un criterio bien definido y *evaluación de hipótesis* en el que a partir de una muestra limitada se busca hacer una generalización para una población entera (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2005).

Un SIG representa la información geográfica con dos modelos principales de datos: ráster y vectorial. Un archivo de tipo Ráster es aquél que utiliza el pixel como unidad espacial estándar, así que consta de una matriz de pixeles en el que cada uno tiene asociado un valor alfanumérico que representa información como sería la elevación del terreno, valores de reflectancia, temperatura, etc. Por lo que, un ráster puede ser una fotografía aérea digital, imágenes de satélites, imágenes digitales, un arreglo matricial, o cualquier observación georeferenciada con la que se pueda asociar un valor al pixel. Por otro lado, la representación vectorial se hace mediante puntos, líneas o polígonos (áreas).

3.2.1. Álgebra de mapas

Puede definirse como un lenguaje de modelado ráster en GIS que brinda gran flexibilidad al comparar un mapa con otro. Esto debido a que el álgebra de mapas simplifica el álgebra de matrices de forma que las posiciones X y Y de los pixeles no se mueven al comparar los mapas (Demers, 2009).

Se considera que el concepto de modelado cartográfico o álgebra de mapas fue propuesto por Tomlin en los ochenta y publicado en su libro *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling* en 1990 (Longley et al., 2005). Tomlin reconoció que los valores de X y Y no eran únicamente posiciones en una matriz, sino que

representan posiciones en la superficie de la Tierra, por lo que la posición (renglón y columna en la matriz) de cada pixel debe corresponder exactamente con sus contrapartes en otras capas.

Tomlin clasifica todas las transformaciones de archivos de tipo ráster en un GIS en cuatro clases básicas de operaciones:

- Local: Donde las operaciones examinan los ráster celda por celda, comparando el valor en cada celda en una capa con los valores de la misma celda en otras capas;
- Focal: compara el valor de cada celda con los valores en las celdas circundantes y por lo general toma 8 celdas vecinas;
- Global: generan resultados que son reales o válidos para la capa completa;
- Zonal: calculan resultados para bloques de celdas contiguas que comparten el mismo valor, por ejemplo: la determinación de la forma de áreas contiguas que tienen el mismo uso de suelo, y les da un valor a todas las celdas en cada bloque contiguo.

El álgebra de mapas permite entonces definir análisis geográficos como expresiones algebraicas. Estas expresiones algebraicas pueden ser operaciones aritméticas, estadísticas, trigonométricas, geométricas, lógicas, entre otras (Demers, 2009). La única restricción que presenta esta modelación es que los archivos de entrada (inputs) y los resultados (outputs) serán archivos de tipo ráster.

4. DATOS UTILIZADOS

Como fue mencionado en la Introducción, para la finalidad de este estudio se utilizaron principalmente dos sets de entrada. El primero corresponde con el mapa de velocidades de subsidencia en la región de Celaya que fue publicado por Chaussard *et.al* (2014). El segundo set corresponde con el conjunto de AGEBs (Áreas de Geoestadística Básicas) generadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía y disponibles en la red (INEGI 2015). Por lo que en este capítulo se presentan las principales características de cada uno de los sets utilizados.

4.1. Mapa de velocidad de subsidencia

Chaussard *et.al* (2014) llevaron a cabo un estudio de series de tiempo InSAR SBAS que abarca la región central de México con la finalidad de determinar la subsidencia a la que se encuentra sujeta esta región. Como parte de sus resultados obtuvieron un mapa de velocidad de subsidencia correspondiente a la región de Celaya, que fue utilizado en esta tesis. El mapa presenta un rango de velocidad de subsidencia de -21 cm/año a 9 cm/año. A continuación, se describen las características y procesamiento de los datos utilizados por Chaussard *et.al* (2014) para la obtención de los mapas de velocidad de subsidencia promedio (2007-2011) del centro de México, incluida la ciudad de Celaya.

Se emplearon 15 tracks ascendentes que contenían más de 600 escenas, adquiridas con el sensor ALOS-PALSAR durante el periodo 2007-2011, con la finalidad de estudiar 200 mil km² de la región central de la República Mexicana. La técnica InSAR (como fue discutida en el capítulo 3) permite calcular el desplazamiento del terreno entre dos adquisiciones de SAR en la dirección de la línea de vista del radar (LOS).

El procesamiento de las imágenes se hizo mediante el software ROI_PAC, desarrollado en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA. Con él se obtuvieron más de 3,000 interferogramas. Por otro lado, el método de SBAS fue utilizado para obtener las series de tiempo InSAR. El método antes mencionado, se basa en la repetición de

múltiples imágenes de SAR para evaluar el desplazamiento del terreno a lo largo del tiempo.

Además, para conservar una alta coherencia y crear una red interconectada de interferogramas, se eligieron y utilizaron únicamente aquellos que cumplían con la característica de tener líneas base de referencia espaciales pequeñas menores a 1.5 km y temporales menor a 12 meses. Esto debido a que una red interconectada hace posible el cálculo del desplazamiento entre dos adquisiciones cualesquiera, independientemente de contar con la posibilidad de generar un interferograma en específico.

Como siguiente paso aplicaron un umbral de coherencia temporal para así eliminar tendencias existentes al desenvolver la fase. Este umbral consistió en seleccionar pixeles con valores de coherencia temporal mayor a 0.7, que es el valor típico en aplicaciones de InSAR.

Finalmente, hicieron una corrección por MDE (modelos digitales de elevación) después de la inversión de la red de interferogramas. Esto con la finalidad de eliminar la dependencia de la historia de desplazamiento de la línea base perpendicular. No se aplicaron filtros espacio-temporales para eliminar posibles efectos de la atmósfera, debido a que éstos eran muy pequeños comparados con las altas tasas de deformación registradas y a que el número de escenas en las series de tiempo era pequeño.

Como resultado de la adquisición InSAR y el procesado anteriormente descrito, se obtuvo la Figura 4.1 publicada en el material adicional de Chaussard *et.al* (2014) que corresponde con la ciudad de Celaya.

La Figura 4.1, se encuentra dividida en 4 secciones que serán descritas a continuación:

a) Muestra el mapa de velocidad promedio (periodo 2007-2011), contactos geológicos superficiales (identificada con contornos cafés y números (1,2,3) que corresponden a material principalmente incompresible, compresible y sedimentos intermedios, respectivamente) y las trazas de fallas (líneas de color rojo) basadas en las cartas 1:250 000 del SGM. La Ciudad de Celaya está marcada con un rombo color blanco. A su vez

los recuadros negros muestran la localización de las imágenes obtenidas de Google Earth mostradas en c). Los círculos negros corresponden con la localización de los pixeles cuya serie de tiempo de desplazamiento vertical se muestra en b).

b) Presenta la serie de tiempo del desplazamiento vertical, en sitios con subsidencia rápida, y las correspondientes tasas lineales de subsidencia.

c) Son imágenes de sensores ópticos tomadas de Google Earth en las que se diferencia el uso de suelo en la zona con los siguientes criterios: Patrones geométricos de color verde denotan usos agrícolas, mientras que pequeños recuadros de color café o gris indican uso urbano. Por lo que corresponden A) Uso agrícola, B) Uso mixto urbano y agrícola.

d) Corresponde con perfiles de velocidad [líneas discontinuas de color azul y rosa en a)] transversales a las fallas geológicas [líneas de color rojo en a)] en la vecindad de áreas subsidentes. La posición de las fallas intersectando los perfiles se identifica con el mismo color.

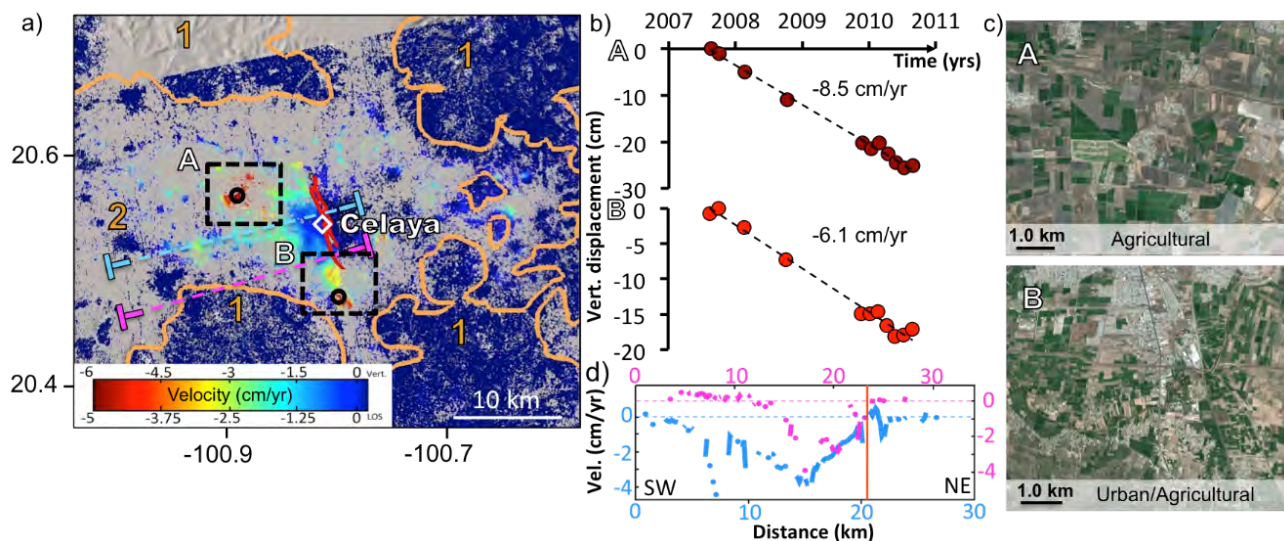


Figura 4.1 Mapa de velocidad de subsidencia promedio (2007-2011) en la región circundante a Celaya. Tomado de Chaussard et. al. (2014)

El mapa de velocidad que se observa en la Figura 4.1a) fue uno de los archivos de entrada procesado para el desarrollo de esta tesis.

4.2. Áreas de Geoestadística Básica urbana

En lo que se refiere a los AGEB, de acuerdo a INEGI (2010): “Un área geoestadística básica (AGEB) es la extensión territorial que corresponde a la subdivisión de las áreas geoestadísticas municipales. Dependiendo de sus características, se clasifican en dos tipos: AGEB urbana o AGEB rural.” A su vez, una AGEB urbana se define como: “AGEB urbana es un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas que generalmente va de 1 a 50, perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso de suelo sea principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, sólo se le asignan al interior de las localidades urbanas. Una localidad urbana es aquella que tiene una población mayor o igual a 2 500 habitantes o que es cabecera municipal, independientemente del número de habitantes.” Esta unidad básica fue utilizada previamente por Solano (2013) para su análisis de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia en la Ciudad de México, por lo que, para cumplir con el objetivo de la elaboración de un mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia en la ciudad de Celaya, se utilizaron las AGEBS urbanas del estado de Guanajuato y en específico de la ciudad de Celaya del año 2010 contenidas en el Cierre de los Censos Económicos 2014, DENU 01/2015 de Guanajuato (INEGI, 2015b). De acuerdo a INEGI (2015b) el material antes citado contiene la representación vectorial de los atributos urbanos primordiales como son el polígono de Localidad Urbana, AGEB, manzanas, ejes de vialidad, frentes de manzana, entre otros más.

Del archivo descargable, únicamente se utilizó el correspondiente a los AGEBS para el desarrollo de este estudio. El archivo contiene las geometrías de las AGEBS en formato shape (.shp), además en la tabla de atributos se encuentran los metadatos de población correspondientes de cada AGEB, los cuales fueron procesados de acuerdo a la metodología descrita en el capítulo 5 de este trabajo.

Para determinar la evolución del riesgo con respecto del tiempo, se utilizó además la información de los AGEBS correspondientes al censo de población del año 2000 y al conteo de población del año 2005.

5. DETERMINACIÓN DEL RIESGO

Como fue mencionado en la introducción, la ciudad de Celaya no cuenta con un mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia aun cuando el proceso de subsidencia ha sido identificado desde mediados del siglo XX.

En la sección correspondiente al Atlas de Riesgo de Celaya por Fenómeno Geológico de Protección Civil del Estado de Guanajuato (2016c) se presentan cuatro mapas (Figura 5.1) de las cuatro zonas urbanas en las que se dividió al municipio. Sin embargo, en realidad tres de estos mapas son acercamientos a las fallas presentes en el cuarto mapa que presenta las fallas en general.

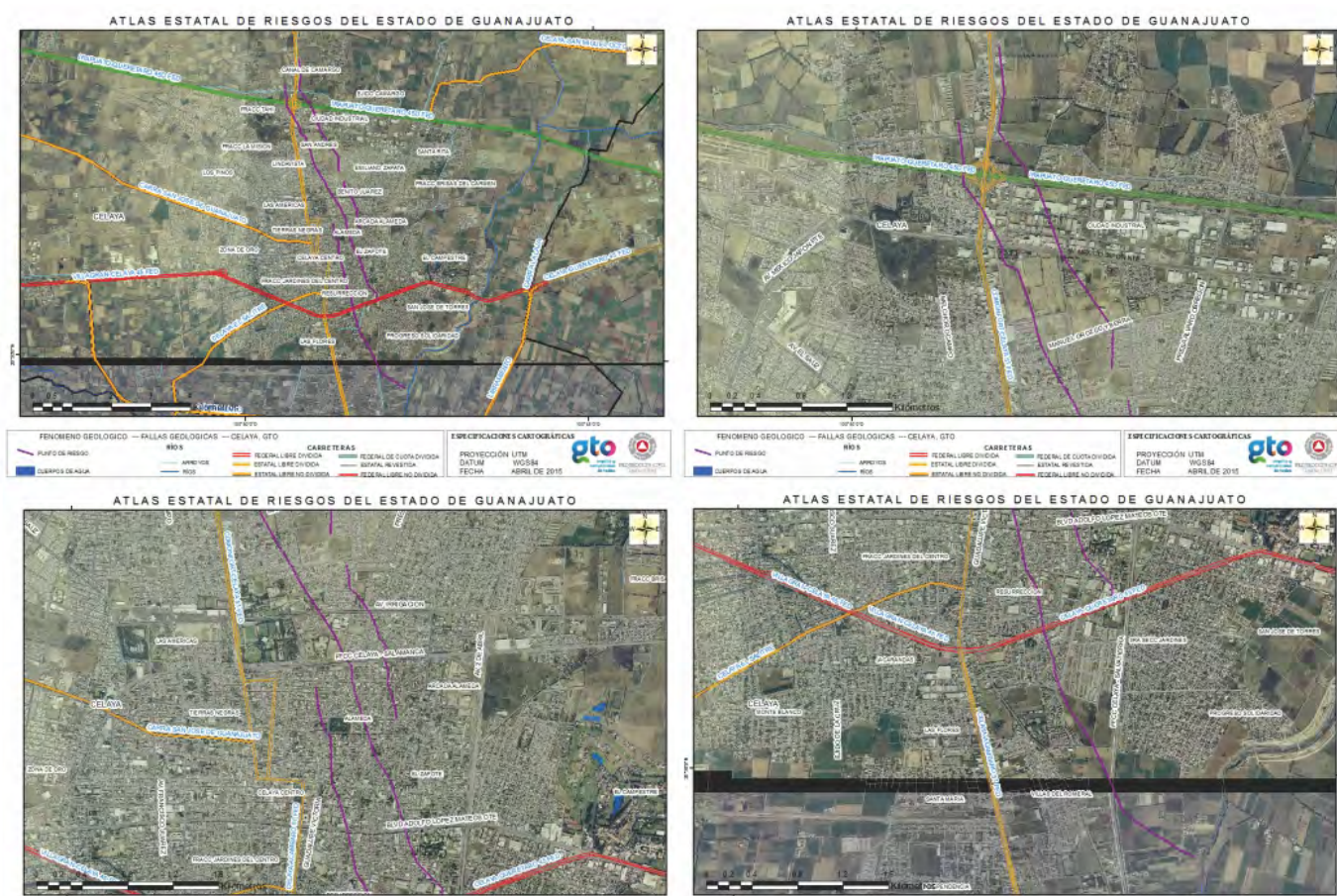


Figura 5.1. Mapas de fallas geológicas en Celaya. Tomado y modificado de Protección Civil Guanajuato (2016c).

Como se observa en la Figura 5.1, los mapas exclusivamente muestran las trazas de las fallas que afectan las zonas urbanas como puntos de riesgo por lo que surge la

necesidad de generar un mapa que determine zonas de riesgo mediante una clasificación más visual.

5.1. Metodología

En Geología Ambiental suele definirse, de manera sencilla al Riesgo como la posibilidad de que ocurra un daño. Sin embargo, para que esto suceda es necesaria una amenaza y un receptor (área, personas, etc.) que pueda ser dañado.

Entonces riesgo puede ser definido como:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} * \text{Vulnerabilidad}.$$

Donde peligro se entiende como un nivel de la amenaza a la que se tiene exposición y vulnerabilidad se entiende como aquellas características que determinan la susceptibilidad de un receptor a ser dañado (Keller, 2011).

Esta definición fue utilizada para evaluar el riesgo por fallamiento asociado a subsidencia en la ciudad de Celaya, con el fin de elaborar un mapa de riesgo. Por lo que para representar la variable Peligro se utilizó como archivo de entrada un mapa de velocidades de subsidencia de la zona determinado por técnicas de InSAR (Chaussard *et. al.*,2014) y la densidad de población determinada a partir de la información de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para 2010 (INEGI, 2015) tuvo como función representar la variable Vulnerabilidad. Ambos archivos fueron manipulados mediante un Sistema de Información Geográfica (GIS) siguiendo el proceso descrito a continuación (modificado de Solano 2013) el cual puede observarse en la Figura 5.2.

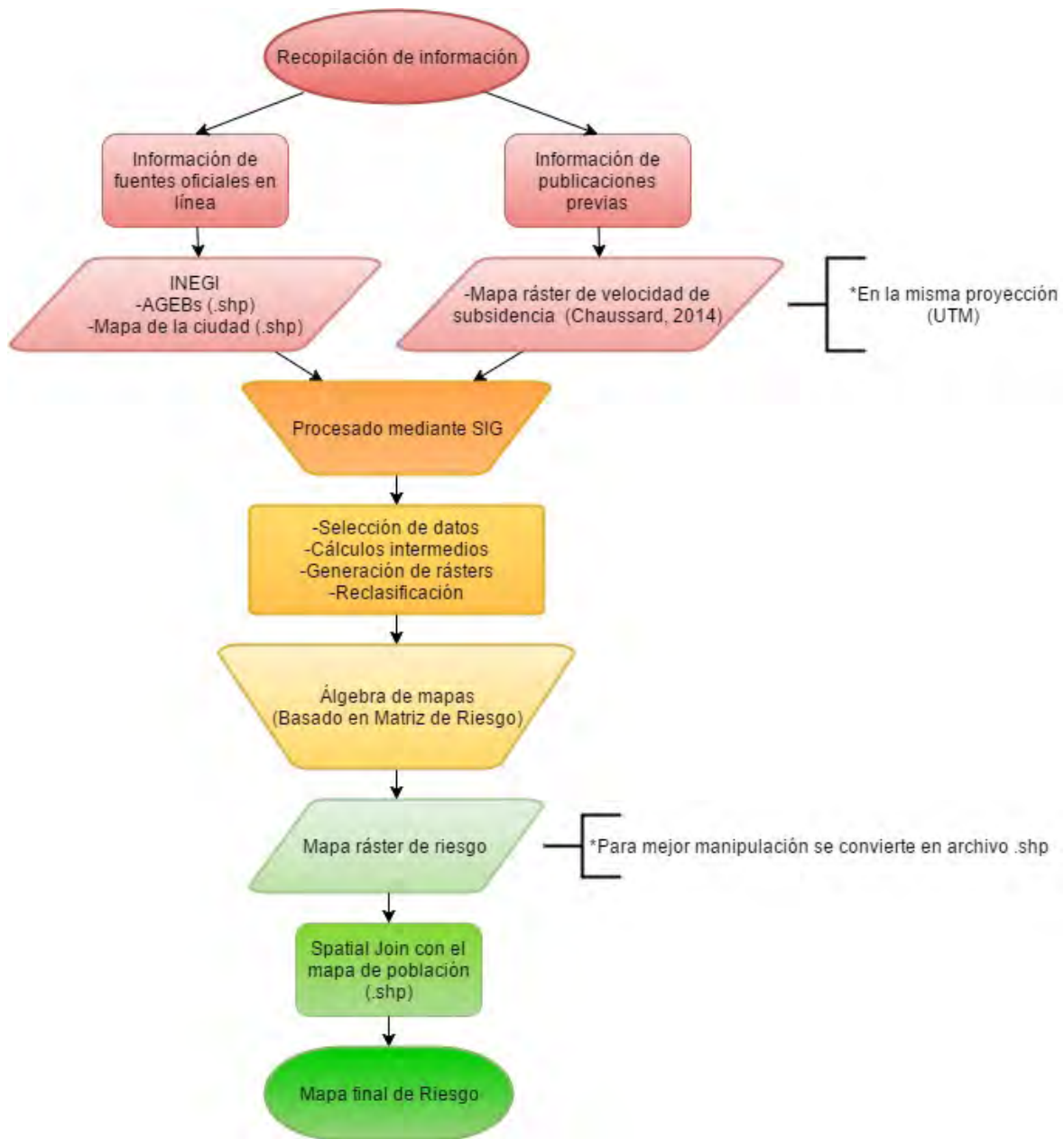


Figura 5.2 Flujo de trabajo resumido para la generación de mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia. Modificado de Solano (2013)

El mapa de velocidades de subsidencia, publicado por Chaussard et. al. (2014) descrito ya en el Capítulo 4, de inicio era una malla que fue manipulada como archivo ráster con una resolución espacial de 30x30m/píxel. Debido a que el mapa tenía una extensión mayor a la ciudad de Celaya, fue cortado con la herramienta *Clipper* de QGIS (v2.12.13) usando como base un archivo vectorial con la extensión de la ciudad.

Posteriormente se generó una capa de gradiente horizontal de subsidencia utilizando la herramienta *Pendiente*. Debido a que el mapa de salida o resultado representa la pendiente en grados hay que transformarla a porcentaje con la *Calculadora Ráster*.

El mapa de gradiente horizontal de subsidencia es el cálculo entre los valores de magnitud de subsidencia entre celdas adyacentes, que se interpreta como aquellas zonas donde la subsidencia diferencial del terreno representa un mayor potencial de fallamiento. (Cabral-Cano et al, 2011; Cigna et al., 2011; Solano, 2013; Cabral-Cano et al, 2015).

El mapa de densidad de población se desarrolló a partir de los AGEB Urbanos de INEGI obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2015 de INEGI, que son archivos vectoriales de origen. Estos archivos contienen como metadato el número de habitantes por AGEB. Se calculó el área de cada AGEB con la *calculadora de campos* para así poder obtener la densidad de población por unidades de área de 900 m² (30x30 m) que corresponde a la misma resolución espacial del mapa de subsidencia. Por lo anterior se utilizó la herramienta *Rasterizar* de QGIS (2.12.13) para generar un archivo de tipo ráster con valores de densidad de población con una resolución de 30x30m.

Una vez obtenidos el mapa de gradiente horizontal y el mapa de densidad de población en archivos de tipo ráster, se establecieron 3 clases en cada uno de los mapas tomando en cuenta la distribución de los datos observada en los histogramas desplegados por (2.12.13). Esto para poder aplicar una matriz de riesgo similar a la utilizada por Cabral-Cano et. al. (2012) y Solano (2013) que se observa en la Figura 5.3.

La reclasificación consistió en asignar valores de 1,2,3 (bajo, moderado y alto) a cada una de las clases tanto para el ráster de gradiente horizontal como para el de densidad de población. Una vez reclasificados, se aplicó álgebra de mapas utilizando la ecuación anteriormente descrita al principio de este capítulo. Por lo cual el ráster de salida presenta valores 1,2,3-4,6 y 9 que representan respectivamente las regiones R0, R1, R2, R3 y R4 de la matriz de riesgo (Figura 5.3).

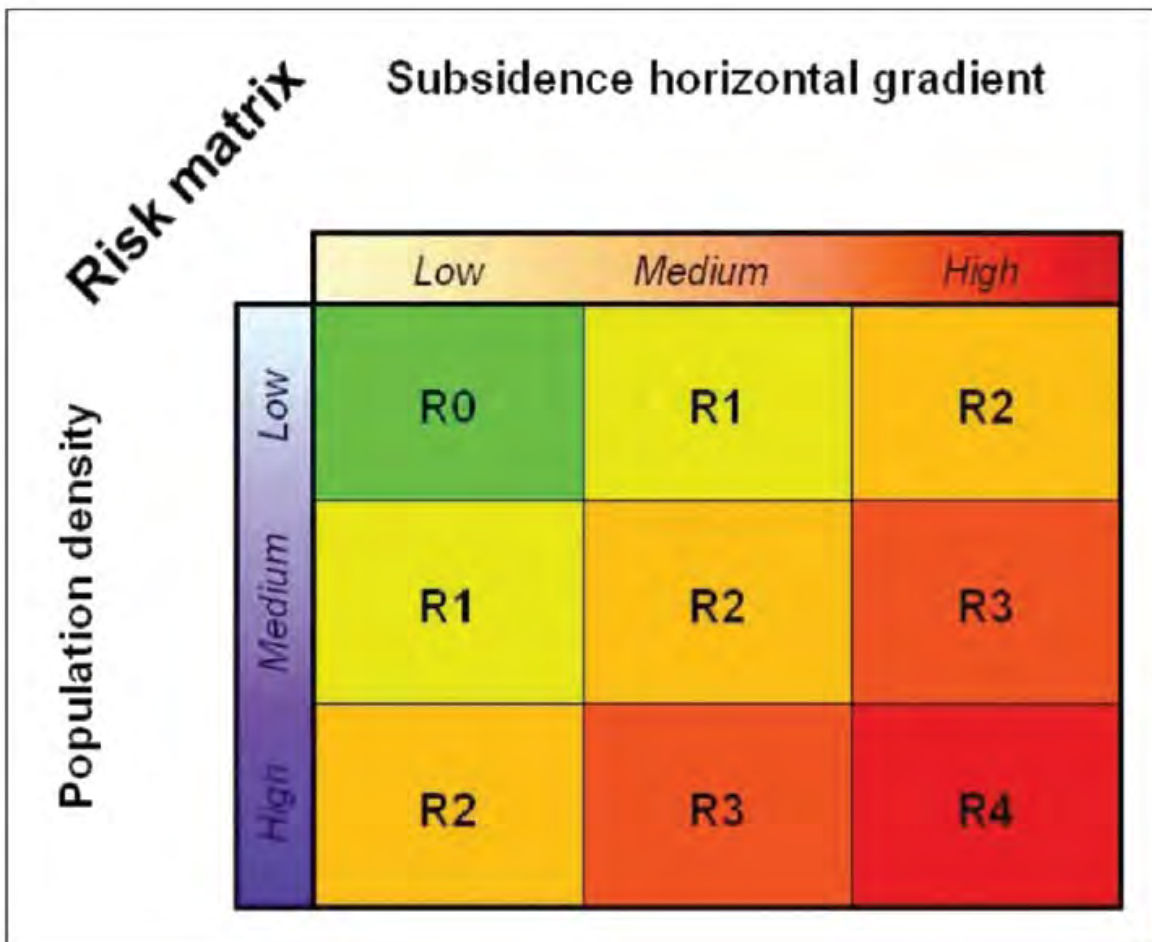


Figura 5.3 Matriz de riesgo modelo. Tomada de Solano (2013).

Con lo anterior se asignaron las siguientes etiquetas de riesgo a cada una de las regiones: R0= muy bajo, R1= bajo, R2= moderado, R3= alto y R4= muy alto. Por último, se asociaron estos valores con una tabla de colores siendo verdes las zonas de menor riesgo y de color rojo aquellas las que presentan un riesgo mayor.

5.2. Resultados

Derivado del proceso anteriormente descrito se obtuvo el mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia que se puede observar en la Figura 5.4:

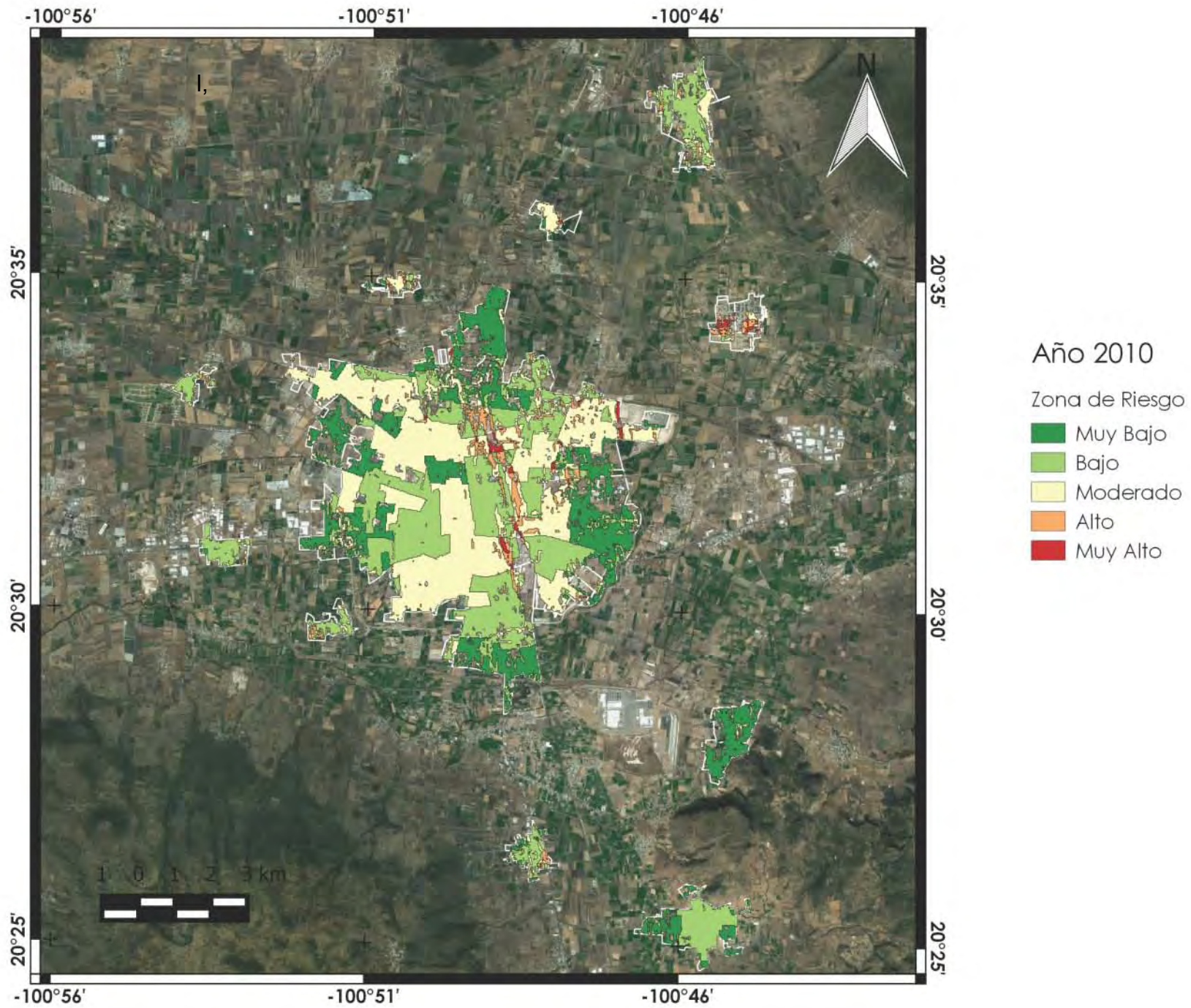


Figura 5.4 Mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del municipio de Celaya, correspondiente al año 2010.

Del análisis de la Figura 5.4 es evidente que las zonas de mayor riesgo (alto y muy alto) se encuentran preferentemente en tres regiones que serán descritas a continuación:

- a) Región Central de la ciudad: Se observa una geometría alargada con dirección preferente NW-SE que corresponde con la localización de las Fallas Poniente, Oriente y Pedagógica observadas en la Figura 2.3 y la Figura 2.6 en el Capítulo 2. En esta región se combinan altos valores de gradiente de subsidencia del terreno, y valores de mediana a alta densidad de población.

- b) Región NE Central de la Ciudad: Se observa una geometría alargada discontinua cuya dirección preferente es NW-SE, y corresponde con la ubicación de la Falla Insurgentes. Se observa una combinación de bajos y altos valores de gradiente de subsidencia del terreno y valores de mediana a alta densidad de población lo que da como resultado la geometría discontinua de las zonas de alto riesgo. Aproximadamente a 2 km en dirección NE se observa un lineamiento alargado que comparte la dirección NW-SE con las regiones anteriores. Puede asociarse con la presencia de la Falla Gobernadores y es resultado de la combinación de altos valores de gradiente de subsidencia del terreno, así como altos valores de densidad de población.

- c) AGEB NE: Cerca de las coordenadas $20^{\circ} 35'N$ $100^{\circ}46'W$ en la comunidad de San Miguel Actopan, se presenta alto gradiente de subsidencia, así como un valor de densidad de población alto.

A partir del mapa observado en la Figura 5.4, se obtuvieron áreas y población correspondiente a cada zona de riesgo (Tabla 1).

Zona de Riesgo	Área[km ²]	Área [%]	Población [hab.]	Población [%]
R0- Muy Bajo	13.08	21.6	17436	4.92
R1-Bajo	22.02	36.4	93740	26.43
R2-Moderado	22.34	36.9	221214	62.37
R3-Alto	2.6	4.3	17980	5.1
R4-Muy Alto	0.464	0.767	4295	1.211

Tabla 1 valores de área y población por Zona de Riesgo para el año 2010.

En la Tabla 1 puede observarse que un 5% del área urbana se encuentra en zonas de alto y muy alto riesgo las cuales representan 3 km². La población vulnerable en estas zonas corresponde con un 6.3% de la población total de Celaya en el año 2010, es decir más de 22,000 habitantes.

Si bien el mapa de la Figura 5.4, tiene como representación por píxel el valor de riesgo, se decidió hacer un mapa en el que cada AGEB tuviera un valor promedio de riesgo. Esto para tener una clasificación visual más rápida. Este último paso se realizó mediante la herramienta vectorial de gestión de datos llamada *Unir atributos por localización* de QGIS (2.12.13). Los resultados de este proceso se pueden observar en la Figura 5.5.

Es evidente en la Figura 5.5 que debido a que se hace un promedio por AGEB, la distribución de las zonas de riesgo resulta considerablemente diferente. Esto debido a que en este mapa de riesgo la densidad de población toma una ponderación mayor al momento del hacer la unión por localización por AGEB. Se observa también, la pérdida del lineamiento ya mencionado correspondiente con las fallas. Por lo que, finalmente se prefirió el uso del mapa de la Figura 5.4. Sin embargo, es importante mencionar que el mapa no debe tomarse para la determinación de riesgo a detalle (p. ej. casa por casa) debido a que la menor unidad geográfica a la que se le asocia un número de habitantes es el AGEB en el que las áreas y geometrías no son constantes, además de no conocer cómo es la variabilidad en la distribución de población dentro de él. Es necesario entonces para estudios con mayor detalle, es decir con escalas mayores, el uso de una unidad geométrica regular o de menor tamaño como podrían ser las manzanas que tenga asociado un conteo de población con mayor resolución espacial.

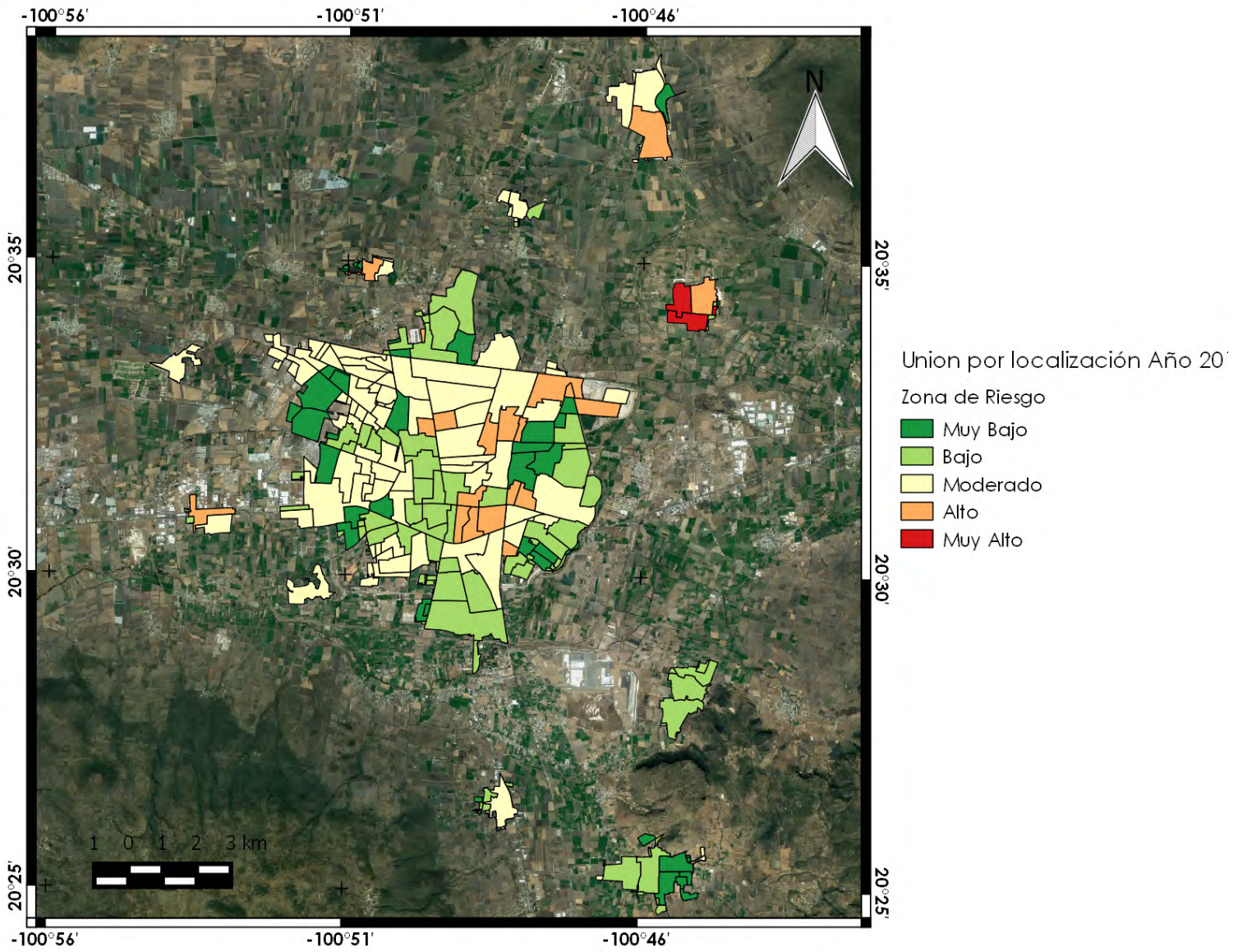


Figura 5.5 Mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del municipio de Celaya, correspondiente al año 2010 haciendo unió espacial con los AGEb.

5.3. Evolución temporal

Una vez obtenido el mapa de riesgo correspondiente a la población de 2010, resulta de gran relevancia el estudio de la evolución temporal de las zonas de riesgo dependiendo de la población, ya que nos permite entender cómo es que se ha ido distribuyendo el asentamiento de habitantes. Bajo la consideración de que la deformación registrada por el mapa InSAR de velocidades de subsidencia del terreno de los años 2007-2011 es lineal y su comportamiento se mantuvo en el pasado, se utilizaron los AGEBs correspondientes al censo de población del año 2000 y el conteo de población del año 2005 para la elaboración de mapas de riesgo pertinentes a los años ya mencionados.

Derivado del proceso anteriormente descrito en el punto 5.1 se obtuvieron los mapas de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del año 2005 (Figura 5.6) y 2000 (Figura 5.7), además de sus respectivas tablas en las que se encuentran los conteos de área y población correspondientes a cada zona de riesgo para el 2005 (Tabla 2) y el 2000 (Tabla 3). El mapa de riesgo para el 2015 no se calculó debido a la falta de conteo de población por AGEB para este periodo, ya que se únicamente se realizó una estimación poblacional. En ambos mapas se observan polígonos de color blanco que representan la distribución por AGEBs del año 2010 con el fin de comparar visualmente la distribución espacial de la población y su crecimiento a lo largo de los años.

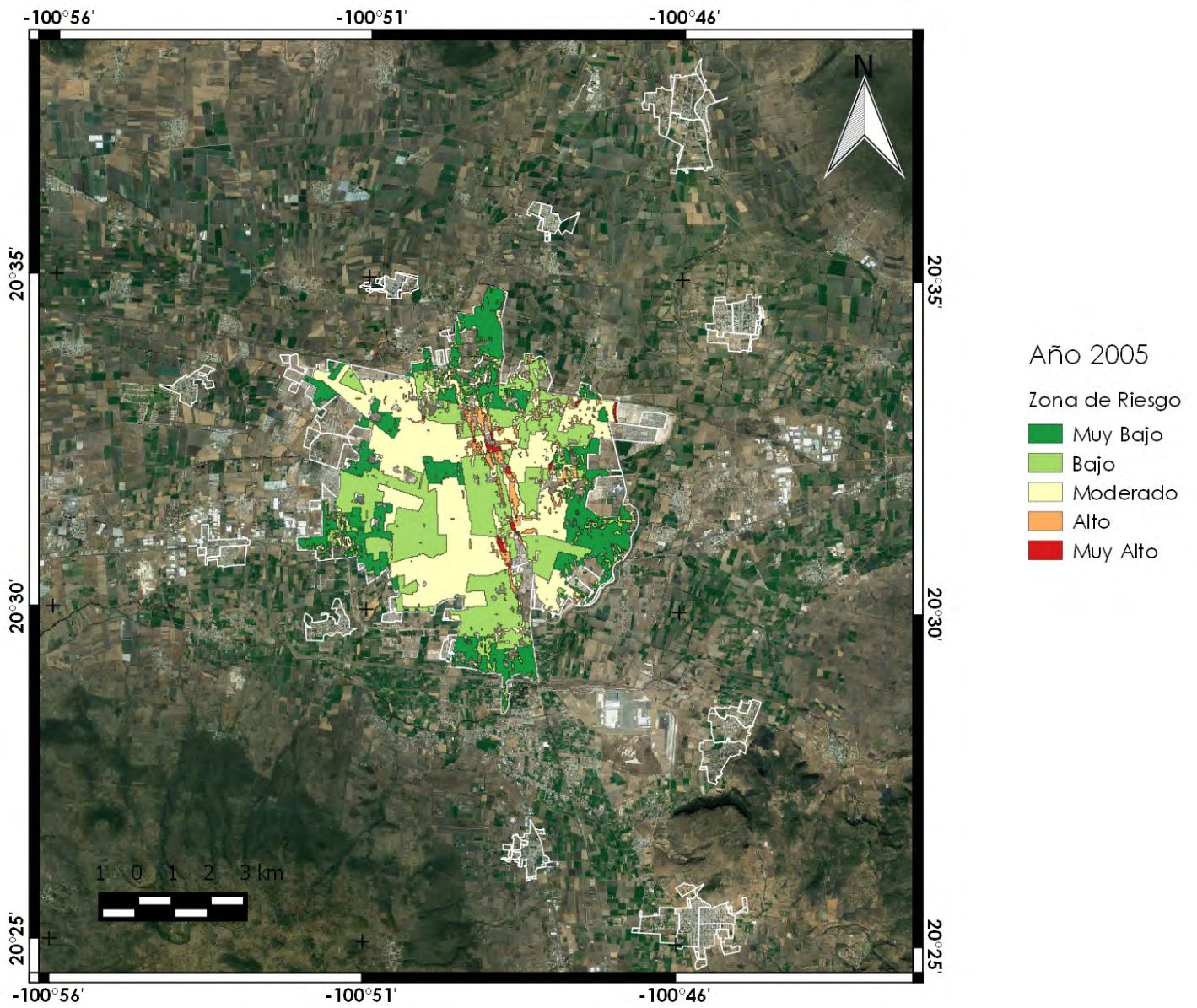


Figura 5.6 Mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del municipio de Celaya, correspondiente al año 2005.

Zona de Riesgo	Área[km ²]	Área [%]	Población [hab.]	Población [%]
R0- Muy Bajo	10.51	22.3	14370	4.98
R1-Bajo	16.83	35.7	75013	26.01
R2-Moderado	17.76	37.7	183705	63.69
R3-Alto	1.8	3.8	12766	4.4
R4-Muy Alto	0.268	0.569	2583	0.895

Tabla 2 Valores de área y población por Zona de Riesgo para el año 2005.

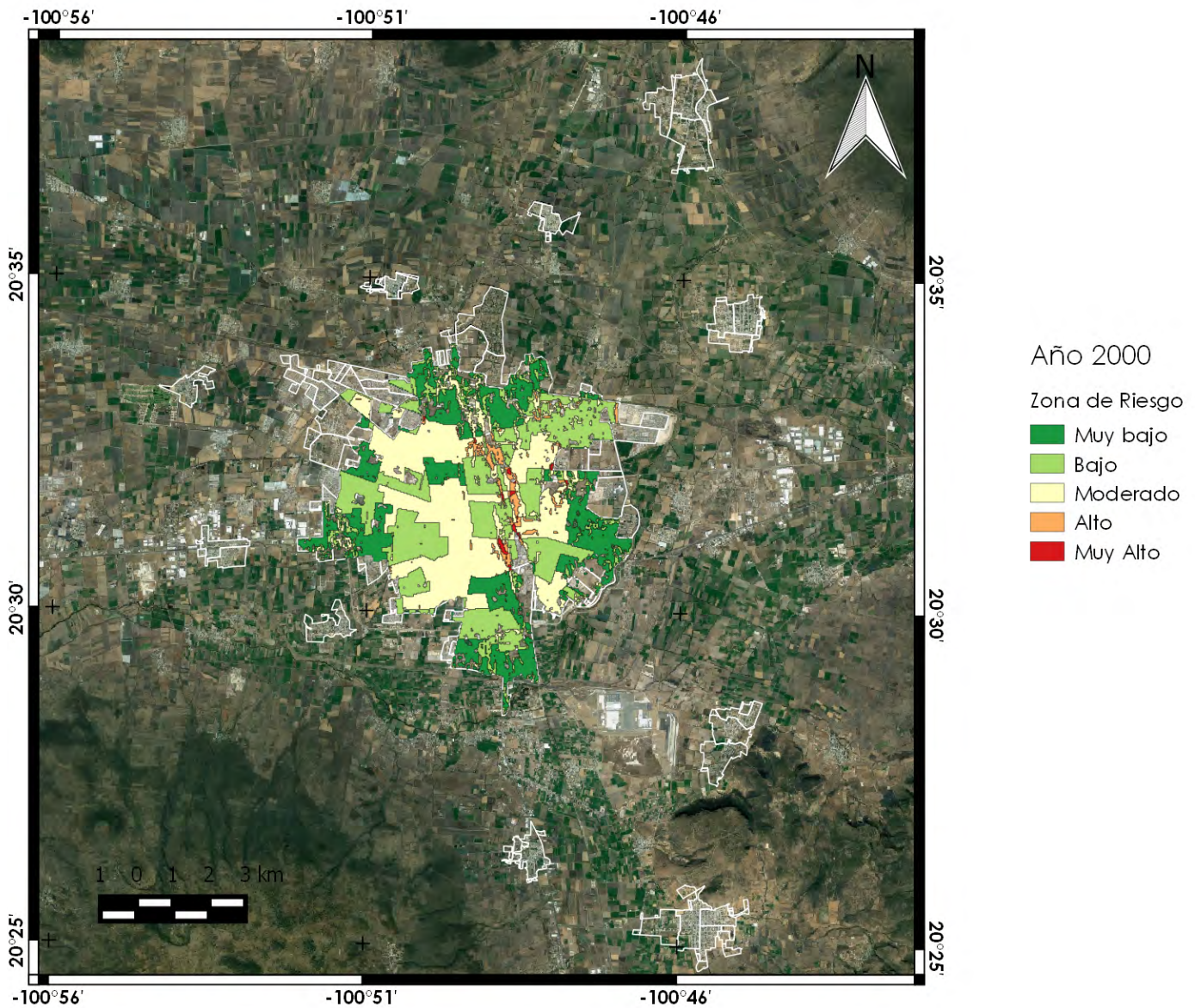


Figura 5.7 Mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del municipio de Celaya, correspondiente al año 2000.

Zona de Riesgo	Área[km ²]	Área [%]	Población [hab.]	Población [%]
R0- Muy Bajo	10.51	25.2	15955	6.14
R1-Bajo	15.08	36.2	67663	26.03
R2-Moderado	14.72	35.4	165073	63.50
R3-Alto	1.1	2.7	9328	3.6
R4-Muy Alto	0.183	0.439	1930	0.743

Tabla 3 Valores de área y población por Zona de Riesgo para el año 2000.

De la Figura 5.6 puede observarse que, en el año 2005, aun no se determinaban los AGEBS en las zonas suburbanas de la Ciudad de Celaya y que para ese periodo esa región se consideraba aun de tipo rural. Por esta razón, las únicas áreas que se encuentran en zonas de riesgo alto y muy alto son las correspondientes a las expresiones de las Fallas Poniente, Oriente y Pedagógica. Sin embargo, se observa que la distribución de estas zonas de riesgo se muestra discontinua ya que a diferencia del año 2010 la distribución de densidad de población en esta región era de moderada a baja en el año 2005. Así mismo, de la Tabla 2 puede observarse que el porcentaje en área de las zonas con alto y muy alto riesgo representaban el 4.3% con un área de 2 km², mientras que la población vulnerable en estas zonas representa el 5.2% del total, es decir aproximadamente 15000 habitantes. Lo que quiere decir que del 2005 al 2010 que el valor de población afectada se multiplicó 1.5 veces.

En la Figura 5.7 puede observarse el mapa de riesgo correspondiente al año 2000. De igual forma que en el mapa de la Figura 13, los polígonos de color blanco corresponden con los AGEBS obtenidos del censo de población 2010. Se puede observar que la distribución de la población se encuentra mucho más centralizada y que al compararlo con la distribución del 2005, en la porción Norte de la ciudad de Celaya en el año 2000 no se tenían registrados AGEBS y no se consideraba un área urbana. Además, se observa únicamente un lineamiento de zonas de peligro moderado a alto, de forma discontinua en la región central de la ciudad correspondiente a las Fallas Poniente, Oriente y Pedagógica. Este lineamiento es resultado de la combinación de un gradiente alto con una densidad de población moderada a baja. De la tabla 3 se observa que la zona de riesgo alto y muy alto representan el 3.1% del área total, es decir 1.3 km² y 4.3% de la población total que corresponde aproximadamente a 11,000 habitantes

Estos son indicadores de crecimiento y migración poblacional, ya que del año 2000 al año 2005, la gente migró hacia zonas de mayor amenaza (porción central de la ciudad) o a zonas en las que puede seguirse el lineamiento de las fallas lo que da lugar a la determinación de nuevos AGEBS en la zona norte de la ciudad. A su vez del año 2005 al 2010 se observa un crecimiento poblacional en general y hacia las zonas suburbanas de la ciudad, lo que representa un incremento aproximado de 1.5 veces el número de

pobladores y un 15% de área en riesgo alto y muy alto. Lo cual es evidencia de la falta de planeación urbana cuando menos en los últimos diez años en donde, aunque ya se tenía conocimiento de este fenómeno no se evitó el crecimiento poblacional dentro de estas zonas.

6. RELACIÓN DE SUBSIDENCIA CON EL ABATIMIENTO EN POZOS

Como ya fue discutido en la introducción se considera que el proceso de subsidencia del terreno en Celaya está asociado a la intensa explotación del acuífero (Chaussard, *et. al*, 2014; Huizar-álvarez, *et. al.* 2011; Trujillo-Candelaria 1985; Trujillo-Candelaria 1991). La respuesta natural del acuífero ante la sobreexplotación es el decremento anual de sus niveles estáticos y dinámicos, por lo que, en este capítulo se presenta la relación observada entre el abatimiento del nivel freático y la subsidencia.

Actualmente la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Gto. (JUMAPA) administra 117 pozos de los cuales se encuentran activos 88 de ellos para para el abastecimiento de agua potable (Consultores y Constructores, S.A. de C.V. 2013). Sin embargo, según fuentes en JUMAPA (Ing. Juan Antonio Blanco, JUMAPA, comunicación personal, abril 2017) se tienen ya en proceso títulos de concesión para el desarrollo de nuevos pozos.

Para el desarrollo de este análisis se utilizaron datos proporcionados por JUMAPA sobre el nivel estático y dinámico de 85 pozos de los años 2011 al 2016. En la Figura 6.1 se observa la distribución espacial de estos pozos en la ciudad de Celaya, dichos pozos se encuentran etiquetados con la tasa de abatimiento promedio por año del nivel estático. La tasa de abatimiento fue calculada con datos de nivel estático correspondientes al mes de mayo durante los años antes mencionados (Anexo 1), con el fin de conocer el comportamiento del acuífero en la época de estiaje en la cual el acuífero se ve sometido a mayor estrés en el año por el volumen de extracción de agua subterránea y su mínima recarga.

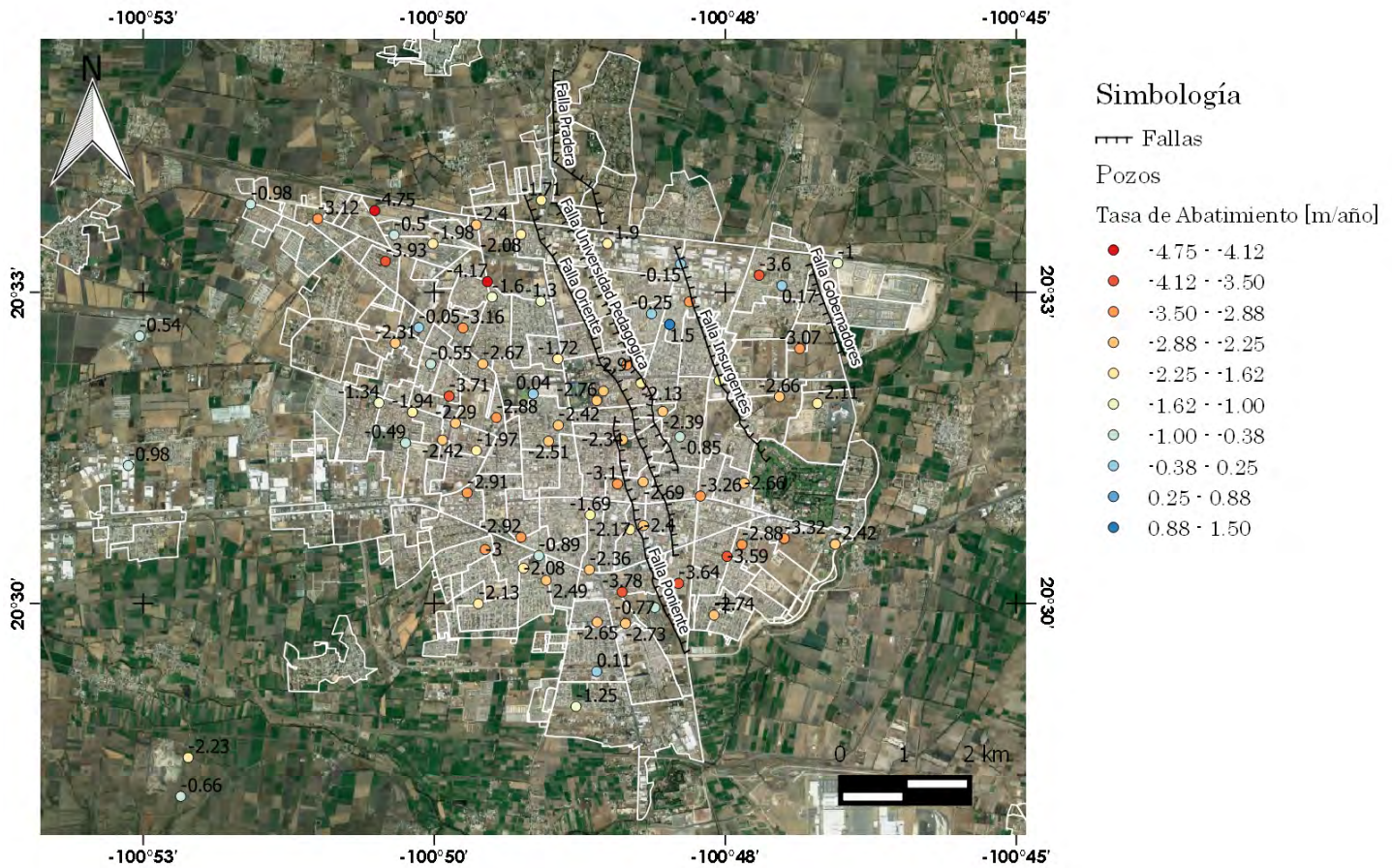


Figura 6.1 Ubicación de pozos JUMAPA con tasa de abatimiento [m/año]. Elaborado con datos proporcionados por JUMAPA.

Como se puede observar en la Figura 6.1, a lo largo de las fallas previamente descritas se encuentran pozos que presentan tasas de abatimiento que van de -0.77 hasta -3.78 m/año por lo que se puede vislumbrar una relación espacial entre la posición de las fallas y la distribución de pozos donde la mayoría de los pozos que presentan mayores abatimientos se localizan en las inmediaciones de las fallas.

Por otro lado, se hizo una correlación entre la subsidencia y el abatimiento del nivel estático. Se consideró que la deformación registrada por el mapa InSAR de velocidades de subsidencia de los años 2007-2011 es un proceso lineal y se puede extrapolar al pasado y al presente. Bajo estas consideraciones se elaboró una gráfica (Figura 6.2) en el que el eje de las abscisas corresponde con la tasa de abatimiento de los niveles de agua y el eje de las ordenadas representa la tasa de subsidencia del terreno para cada uno de los sitios en los que se localizan los pozos de los que se tiene información. La tasa de subsidencia correspondiente a cada pozo fue tomada del mapa de velocidades de subsidencia de Chaussard et. al. (2014).

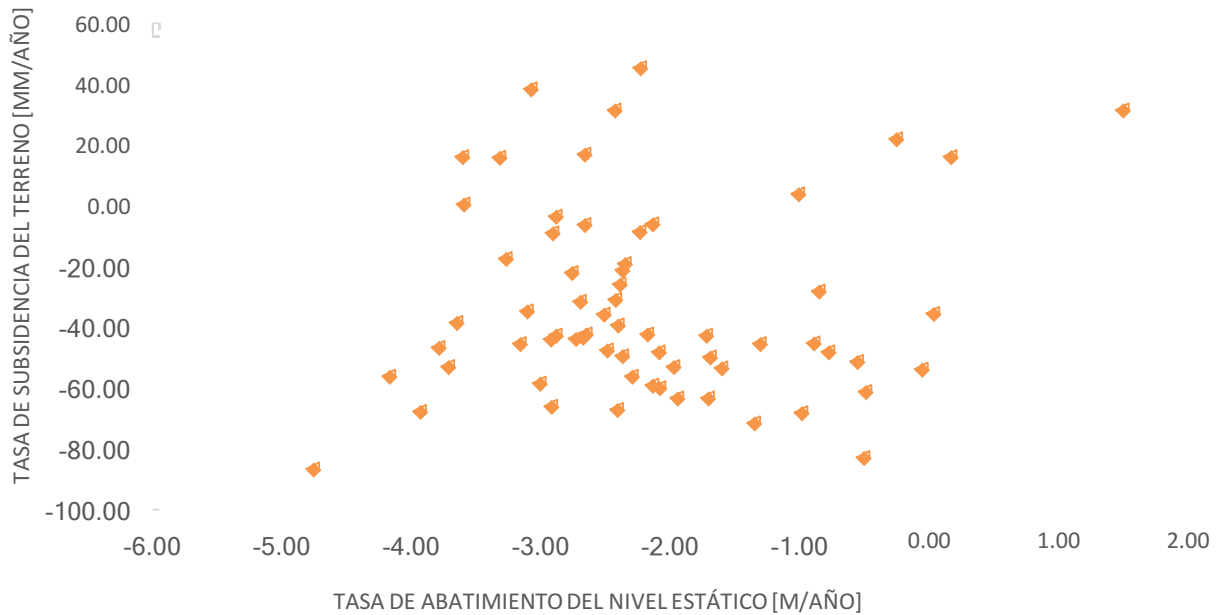


Figura 6.2 Comparativo de tasas de abatimiento con tasas de subsidencias en los 85 pozos proporcionados por JUMAPA.

De la Figura 6.2, lo primero que se observa es que, salvo tres casos, todos los pozos muestran una caída en su nivel. También se observa que existe cierta agrupación en los valores negativos de los ejes, lo que indica que a mayor tasa de abatimiento del nivel estático se tiene mayor tasa de subsidencia. Esta tendencia se observa prácticamente en todos los pozos, sin importar su posición geográfica; sin embargo, puede observarse que hay pozos en los que aun cuando existe abatimiento del nivel estático presentan levantamiento relativo del terreno. Esto último puede ser consecuencia de haber seleccionado un punto semilla en el análisis InSAR que no sea realmente un punto estable, lo que ocasiona que las velocidades de subsidencia estén ligeramente subestimadas y por lo tanto partes del mapa de velocidades presenten velocidades positivas cuando en realidad no lo son o debido a que el acuífero es mixto ya que está conformado por aluvión, tobas, ignimbritas y basaltos fracturados, la respuesta

anómala de la gráfica anterior podría deberse a una contribución variable debido al comportamiento incompresible de los basaltos con respecto al comportamiento mayormente compresible de los restantes materiales geológicos que conforman el acuífero. Para tratar de evitar esta situación, se seleccionaron aquellos pozos en los cuales los valores de sus niveles estáticos y dinámicos estuvieran completamente en medios granulares, tobáceos o ignimbríticos o aquellos en el que el nivel dinámico lograra desplazarse hacia esos materiales. Esto para descartar la contribución de los basaltos al comportamiento del acuífero. Una vez seleccionados estos pozos, se realizó la gráfica de tasa de subsidencia contra tasa de abatimiento obteniendo la siguiente figura:

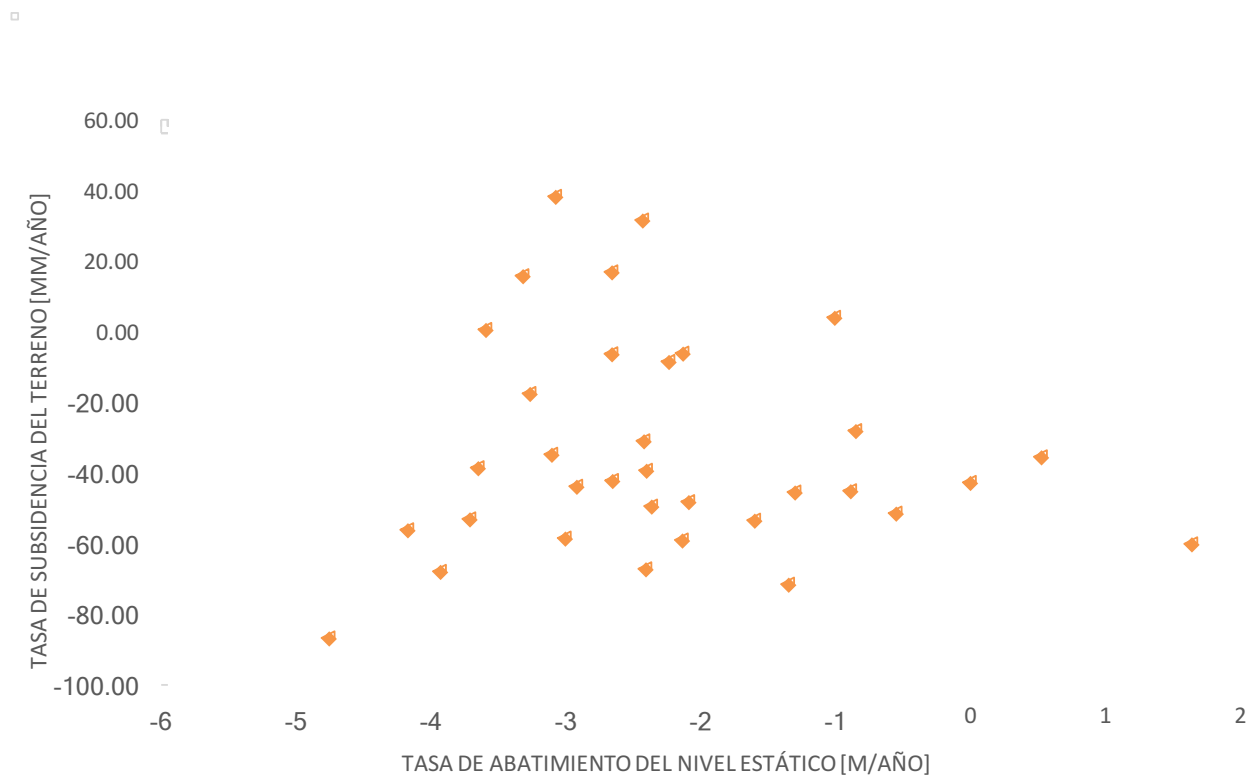


Figura 6.3 Comparativo tasas de subsidencia con tasas de abatimiento de pozos en medios granulares, tobáceos o ignimbríticos.

Como puede observarse en la Figura 6.3, se conserva la tendencia general en la que a mayor tasa de abatimiento se presenta mayor tasa de subsidencia; sin embargo,

de igual forma se conservan algunos puntos que están sufriendo levantamiento aparente e incluso existen captaciones que revelan una recuperación de niveles, lo cual podría estar relacionado a la posición geográfica o al uso y/o capacidad de captación.

Adicionalmente, se calculó la capacidad específica (QE) correspondiente a cada pozo para conocer el caudal (lps) que es capaz de brindar el acuífero por cada metro de abatimiento. Esto puede observarse en la Figura 6.4.

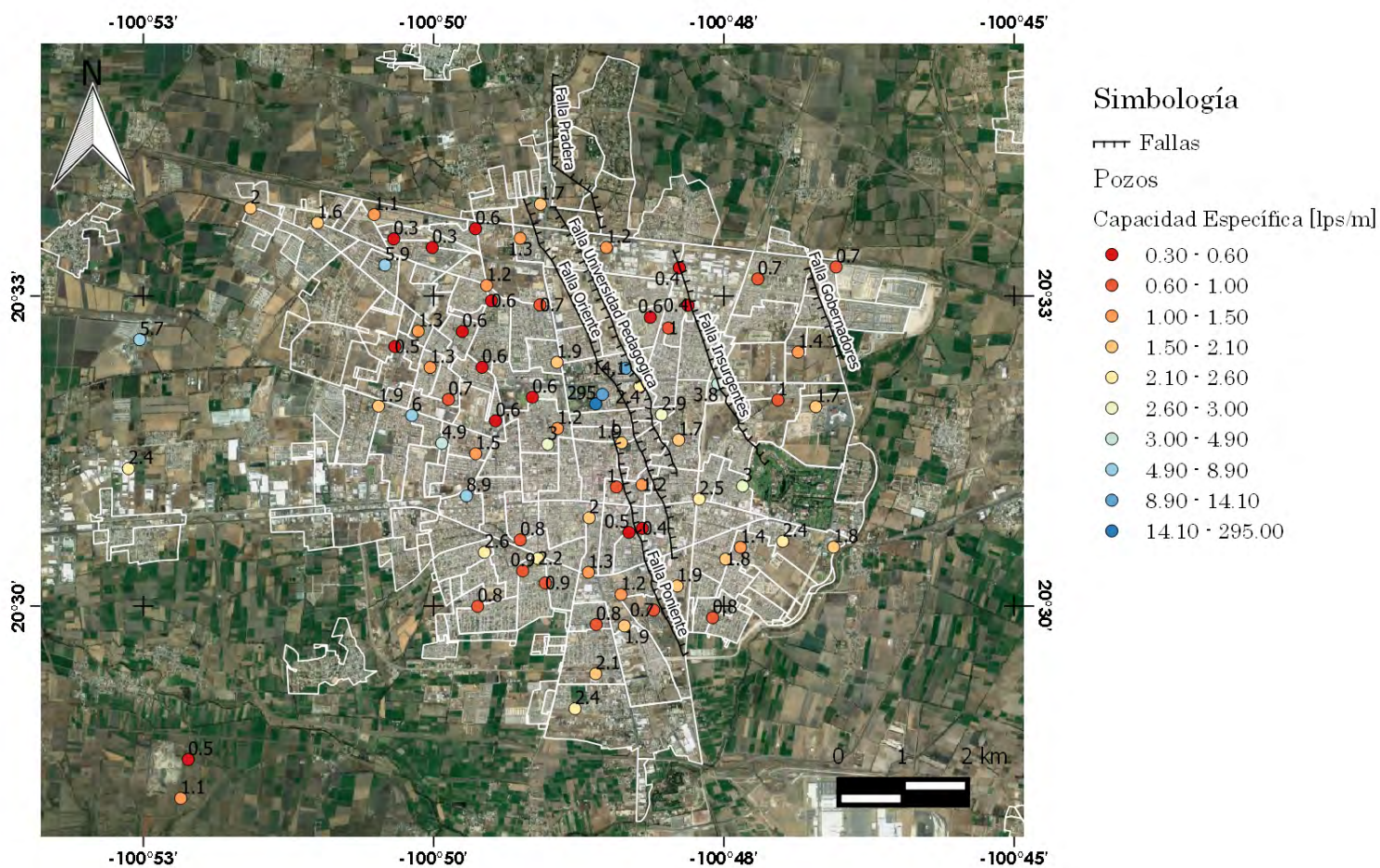


Figura 6.4 Capacidad específica por pozo calculada con los datos proporcionados por JUMAPA

De la Figura 6.4 puede observarse que los pozos cercanos a las fallas presentan en su mayoría valores de capacidad específica que van de 0.4 a 1.9 lps/m de abatimiento con algunas excepciones de pozos con mayor QE. Se observa también que en la región oriental de Celaya las capacidades específicas de los pozos tienden a ser mucho menores que aquellas en el poniente, lo cual es consistente con la distribución general de fallas en la ciudad de Celaya y del proceso de fallamiento asociado a la subsidencia del terreno.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como objetivo de este estudio se tenía el desarrollo de un mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia, el cual puede observarse en la Figura 5.4 del Capítulo 5. Este mapa fue elaborado a partir de dos insumos básicos: un mapa de velocidades de subsidencia publicado por Chaussard et. al. (2014) y las Áreas Geoestadísticas Básicas correspondientes al censo poblacional del 2010. Estos sets de datos se integraron a un sistema de información geográfica, en el que fueron procesados mediante álgebra de mapas. El álgebra de mapas se basó en una matriz de riesgo la cual relaciona gradiente de subsidencia del terreno con densidad de población. Finalmente se obtuvo un mapa con la zonificación de la ciudad de Celaya en regiones de muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto riesgo.

Este mapa, como ya fue mencionado en el capítulo anterior, expresa tres zonas principales de alto y muy alto riesgo, de las cuales dos tienen una geometría alargada con direcciones preferentes NW-SE. Tanto la dirección de estas zonas de alto gradiente de subsidencia de terreno como su ubicación corresponden casi en su totalidad con las Fallas Poniente, Oriente, Universidad Pedagógica, Insurgentes y Gobernadores estudiadas por Huizar-Álvarez (2011). El mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia que se muestra en la Figura 5.4 responde de manera confiable a la presencia de fallamiento superficial y que se presume están originadas por el proceso de subsidencia diferencial determinado por el alto valor de gradientes de subsidencia. El mapa permite entonces la determinación de aquellas zonas vulnerables a fallamiento asociado a subsidencia, de manera que es una herramienta para la detección oportuna de nuevas fallas, así como para la determinación de uso de suelo que permita mitigar la vulnerabilidad de la población.

Este análisis de la evolución temporal de riesgo permite observar los desplazamientos, crecimientos poblacionales y cambios de zonas rurales a suburbanas. Es evidente que al comparar el mapa de riesgo del 2000 con el de 2010 existen desplazamientos poblacionales hacia las afueras de la ciudad de Celaya por lo que existe una expansión de los AGEBs, además de un crecimiento poblacional reflejado en

el incremento de área y pobladores en zonas de mayor riesgo. Las zonas en riesgo bajo mantienen un porcentaje estable a través de los años, así como las zonas en riesgo moderado. Sin embargo, se observa que hay una disminución en aquellas zonas de riesgo muy bajo cuyo porcentaje ha sido acumulado en zonas de alto y muy alto riesgo.

El aumento sustancial de áreas y pobladores en zonas de mayor riesgo comparadas con aquellas de menor riesgo, expresa la ausencia de planeación urbana por lo menos en el periodo de 10 años que toma en cuenta este estudio. Así pues, la planificación del crecimiento urbano y el uso de suelo siguiendo criterios definidos es crítica ya que la presencia de la amenaza, es decir las fallas, es latente y lo que debe controlarse es el asentamiento de la población para reducir la vulnerabilidad.

A pesar de que los datos obtenidos a partir de los mapas de riesgo generados son confiables, se puede aumentar la calidad y resolución de los mismos si se utiliza una unidad geoestadística de geometría regular de menor dimensión. Sin embargo, actualmente no se cuenta con unidades de este tipo.

El fenómeno de subsidencia en Celaya ha sido explicado por Chaussard et. al. (2014), Huizar-Álvarez (2011), Trujillo Candelaria (1991,1985), entre otros, como resultado de la sobreexplotación de agua subterránea en la región.

En general puede observarse en la Figura 6.1 una relación espacial entre la ubicación de pozos con mayores tasas de abatimiento y su distancia con las fallas. Además, de acuerdo a la Figura 6.2 se presenta en la mayoría de los pozos una disminución del nivel estático con el tiempo, por lo que presentan valores de tasa de abatimiento negativos. Lo que indica que en general que el volumen de descarga del acuífero supera al volumen de recarga, teniendo como consecuencia la extensión longitudinal de las fallas y la continua afectación de las estructuras construidas sobre éstas.

Se observa de igual manera en la Figura 6.2, que en general existe una relación directamente proporcional entre la tasa de abatimiento y la tasa de subsidencia. Es decir, aquellas zonas que son altamente subsidentes presentan abatimientos del nivel estático mucho mayores. Con lo que se comprueba que el abatimiento del nivel estático es el

responsable de la subsidencia en la ciudad de Celaya y por ende en la generación de las fallas presentes en la zona.

De la Figura 6.4 puede observarse que en la vecindad de las Fallas hay valores de capacidad específica bajos, así como altos. Aquellos valores de capacidad específica altos pueden explicarse a que las fallas pueden servir como medio de conducto de agua subterránea en el que incrementa el volumen de extracción con un menor abatimiento. Los valores de capacidad específica bajos pueden estar relacionados con mineralizaciones o alteraciones en la misma zona de falla que no permitan el paso de agua a través de ellas. Estas relaciones se han reportado en otras ciudades como Morelia, Michoacán (Cigna, et. al 2012).

Además, en la región oriente las capacidades específicas de los pozos tienden a ser mucho menores que aquellas en el poniente, lo cual puede ser explicado por la distribución general de las fallas en la ciudad de Celaya relacionadas con subsidencia diferencial y posiblemente con paquetes de sedimentos susceptibles de ser compactados de distintos espesores.

Por lo anterior, se confirma que el fenómeno de subsidencia presente en esta zona se encuentra intensamente relacionado con la sobreexplotación del acuífero.

Es entonces de vital importancia un mejor manejo del acuífero para mitigar las expresiones de subsidencia diferencial en la zona de Celaya e implementar un mejor uso de suelo, así como evitar el desarrollo urbano y densificación de población en áreas con potencial desarrollo de fallas.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ❖ En México el fenómeno de subsidencia de terreno tiene presencia en gran número de zonas del centro del país como son Toluca, Querétaro, Irapuato, León, San Luis Potosí, Ciudad de México y por su puesto Celaya (Chaussard, et. al. 2014). Es entonces de gran importancia el desarrollo de herramientas y metodologías para evaluar el riesgo asociado a la subsidencia del terreno al que se encuentran expuestos los habitantes de estas zonas urbanas.
- ❖ El valle de Celaya se encuentra situado en la planicie del Bajío la cual se encuentra rellena por sedimentos lacustres y depósitos vulcano-sedimentarios intercalados con basaltos, andesitas y tobas. Esta intercalación entre materiales compresibles e incompresibles, o su espesor contrastante da lugar a subsidencia diferencial y el desarrollo fallas, en ocasiones coincidentes con fallas preexistentes.
- ❖ La técnica InSAR es de gran utilidad en el campo de Ciencias de la Tierra, específicamente para el estudio de problemas de subsidencia ya que permite obtener series de tiempo de las velocidades de subsidencia del terreno con precisión milimétrica. El gradiente de subsidencia obtenido a partir de los mapas de velocidad permite identificar aquellas zonas que presentan o son propensas al fallamiento aun cuando a la fecha no presentan expresiones en superficie.
- ❖ El mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia que se conforma con el álgebra de mapas de gradiente con datos de población provenientes del AGEBS de INEGI es una herramienta que permite vislumbrar el comportamiento y distribución de población en relación con aquellas zonas de mayor amenaza, por lo que es de utilidad para hacer proyecciones a futuro de los nuevos asentamientos urbanos o migración urbana y el riesgo al que estarán asociados. Este producto permite desarrollar una mejor planeación urbana que disminuya los daños y costos asociados al fallamiento superficial.
- ❖ Del mapa de velocidades de subsidencia se observa que en general la ciudad de Celaya se encuentra subsidiendo casi en su totalidad. Sin embargo, la variación de los valores de subsidencia se refleja en el gradiente que es indicador de la

presencia de fallas. La falta de políticas sensatas de uso de suelo ha provocado que exista un aumento en el porcentaje de habitantes expuestos a riesgos altos y muy altos, así como el porcentaje de áreas en las que residen. En 10 años el porcentaje de áreas que presentaban alto y muy alto riesgo aumentaron prácticamente en un 50% y el porcentaje de habitantes residentes de éstas áreas aumentó un 45%

- ❖ Las gráficas de tasa de abatimiento en pozos operados por JUMAPA vs tasa de subsidencia son evidencia de la sobreexplotación a la que se encuentra sometido el acuífero. La mayoría de los pozos refleja disminución del nivel estático con los años, lo que indica un manejo inadecuado del acuífero.
- ❖ En Celaya existe una correlación espacial y temporal entre tasa de abatimiento en pozos y tasa de subsidencia, puesto que aquellas zonas altamente subsidentes presentan en general abatimientos del nivel estático mayores.
- ❖ Con la información presentada con anterioridad, se puede determinar que la administración del acuífero no es la más adecuada y que esta situación no es sostenible a largo plazo, por lo que es necesario revertir esta situación. Resulta necesario implementar técnicas de mitigación del abatimiento de nivel estático y que eventualmente se reflejen en una disminución de la tasa de subsidencia asociada. La infiltración inducida para la recuperación del acuífero puede ser una solución que a mediano o largo plazo disminuya la velocidad de extensión longitudinal y velocidad de dislocamiento de las fallas y por ende reduzca los daños por fallamiento en la ciudad.

Se proponen entonces los siguientes planteamientos como recomendaciones y trabajos futuros para tener una mejor evaluación del riesgo no sólo en Celaya, sino también en otras ciudades con situaciones similares de sobreexplotación del acuífero y subsidencia del terreno, además reducir la vulnerabilidad de sus habitantes.

- Mejor manejo del acuífero: De los históricos de nivel estático proporcionados por JUMAPA pudo observarse que para distintos meses se presentan datos omisos que no son justificados, por ejemplo, con mal funcionamiento de las bombas,

colapso de ademes, etc. como son justificados en algunos otros pozos en diferentes años. Es de vital importancia la toma de datos confiables mes con mes para poder determinar de manera más confiable el comportamiento del acuífero ante las condiciones de explotación. Así mismo, debe considerarse el valor de subsidencia anual del brocal de referencia del pozo para el cálculo de nivel estático y corregir el valor real de altitud del nivel estático. Además, el desarrollo de nuevos pozos no debe obedecer únicamente a la mayor demanda de agua potable por el incremento de densidad de población, sino también al comportamiento del acuífero, las zonas de recarga y descarga y aquellas zonas en las que ya se observa fallamiento o se está propenso a él.

- La generación de mapas de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia se debe realizar de manera rutinaria y ser utilizados en la toma de decisiones e incorporar esta información a la administración del acuífero
- La adecuada planeación urbana es crítica para evitar zonas de alta densidad de población en zonas de mayor amenaza. Por lo que es necesario definir políticas de uso de suelo, monitoreo de migración de la población y la detección oportuna de aquellas zonas susceptibles a desarrollar fallas asociadas a subsidencia.
- Sería de utilidad generar el mapa de velocidades correspondiente al periodo 2012-2016 para observar la variación de la velocidad de subsidencia y posible desarrollo de nuevas fallas. Así como mapas de velocidades posteriores que permitan identificar si las acciones de mitigación del abatimiento del agua subterránea están teniendo efecto sobre la subsidencia.
- Es recomendable la generación de nuevas unidades geoestadísticas poblacionales que reflejen con mayor resolución espacial la distribución de la población y que permitan hacer análisis con escalas mayores, o bien, la realización de conteos poblacionales a nivel manzana, por lo menos en las zonas de mayor índice de riesgo.
- Desarrollo de leyes para planificación urbana que beneficien y den certeza al ciudadano. Es decir, que toda aquella obra o terreno susceptible a ser comprado tenga sus debidos análisis geotécnicos que aseguren la seguridad de los posibles

habitantes o que indiquen claramente que se encuentran en zonas con subsidencia y susceptibles a fallamiento asociado a ésta.

El desarrollo de estos mapas de riesgo puede hacerse prácticamente en cualquier otra área urbana en la que se cuente con un mapa de velocidad de subsidencia y una capa de unidades geoestadísticas a relacionar. El desarrollo de un sistema automatizado permitirá el desarrollo y respuesta a preguntas aún más complejas. El criterio para evaluar el riesgo puede ser subjetivo, por lo que es necesario crear un criterio general basado en reglas o determinar si cada región debe tener su propio criterio.

Es evidente que de seguirse ignorando este fenómeno y no se toman acciones para su mitigación, las zonas de mayor riesgo seguirán su tendencia a incrementarse y por lo tanto un mayor número de habitantes se establecerá en regiones vulnerables y los costos de remediación y reparación aumentarán.

9. REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Reyes-Zaragoza, M.A., Orozco-Esquivel, M. T., Ojeda-García, A. C., Vassallo, L. F., (2001), Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, núm. 2, p. 129-148.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., M.A., Orozco-Esquivel, M. T., Vassallo, L. F., Shunshan Xu, (2002), El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicación en la deformación post-eocénica del centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LV, Tomo núm. 1, p. 12-29.
- Aranda-Gómez, J.J., Levresse, G., Pacheco-Martínez, J., Ramos-Leal, J. A., Carrasco-Núñez, G., Chacón-Baca, E., González-Naranjo, G., Chávez-Cabello, G., Vega-González, M., Origel, G., Noyola-Medrano, C., (2013), Active sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya., *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65, 1, p. 169-188
- Ávila-Olivera J.A., (2004), Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, caso: la Ciudad de Morelia, Michoacán, México: Querétaro, Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro, Tesis de Maestría, 234 p.
- Ávila-Olivera, J.A., (2008a) Evolución de los procesos de subsidencia-creep-falla, casos: Morelia, Mich. y Celaya, Gto. Tesis doctoral. UNAM. Posgrado de Ciencias de la Tierra. 249 p.
- Ávila-Olivera, J.A., Farina, P., y Garduño-Monroy, V. H., (2008b), Integration of InSAR and GIS in the Study of Surface Faults Caused by Subsidence-Creep-Fault Processes in Celaya, Guanajuato, Mexico. *AIP Conference Proceedings* 1009, 200; doi: 10.1063/1.2937287
- Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 169-209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Celaya.gob.mx. (2017). Nuestro Municipio. [online] Disponible en: <http://celaya.gob.mx/cly/index.php/ayuntamiento/nuestro-municipio> [Consultada en 28 de Mayo del 2017].
- Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Sánchez-Zamora, O., Díaz-Molina, O., Carande, R. E., (2008). Space Geodetic Imaging of Rapid Ground Subsidence in Mexico City. *Bulletin of the Geological Society of America* (ISSN: 0016-7606). V. 120, No. 11/12, p.1556-1566; DOI: 10.1130/B26001.1.

- Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Demets, C., Cigna, F. y Díaz-Molina, O., (2010). Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in central Mexico. *International Association of Hydrological Sciences, Publication Series (ISBN 978-1-907161-12-4)*, v. 339, p, 255-259.
- Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Hernández-Espriú, A., Cigna, F., Wdowinski, S., Osmanoglu, B., et. al. (2012). Subsidence induced faulting hazard risk maps in Mexico City and Morelia, central Mexico. *EOS Trans. AGU, Fall Meet. Supl.* (Abstract 1494986)
- Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Chaussard, E., Salazar-Tlaczani, L., Cigna, F., Demets, C. y Pachecho-Martínez, J., (2015). Satellite geodesy tools for ground subsidence and associated shallow faulting hazard assessment in central Mexico. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (ISSN 2199-8981, eISSN 2199-899X)*. v. 371, p. 355-360. DOI:10.5194/piahs-372-255-2015.
- Chaussard, B. E., & Amelung, F. (2013). Characterization of Geological Hazards Using a Globally Observing Spaceborne SAR. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 79(11), 982-986.
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral, E., Amelung, F., (2014), Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106.
- Cigna, F., Cabral-Cano E., Osmanoglu B., Dixon T.H., Wdowinski S., (2011). Detecting subsidence-induced faulting in Mexican urban areas by means of Persistent Scatterer Interferometry and subsidence horizontal gradient mapping. In: 2011 IEEE International, Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS 2011) (ISSN: 2153-6996, ISBN: 978-1-4577-1003-2), Vancouver, Canada. pp. 2125-2128. DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049585.
- Cigna, F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E., Dixon T.H., Ávila-Olivera J.A., Garduño-Monroy V.H., DeMets C., Wdowinski S., (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: a case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment (ISSN 0034-4257)*, v. 117, p. 146-161. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.005.
- Consultores y Constructores, S.A. de C.V. (2013) Diagnóstico de los aprovechamientos de aguas subterráneas administrados por la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarilado de Celaya, Gto.
- DeMers, M. N., (2009), *GIS For Dummies*, Estados Unidos, Wiley Publishing, Inc., pp. 384.

- Galloway, D. L., Jones, D. R., e Ingebritsen, S. E., (1999), Land subsidence in the United States: U. S Geological Survey Circular 1182, 175p.
- Galloway, D. L., and Burbey, T. J., (2011), Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction: Hydrogeology Journal, 19(8), 1459-1486.
- GEG-INFDM (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo municipal) (2005). Enciclopedia de los municipios de México. Estado de Guanajuato, Celaya. [En línea]: Consultada en septiembre 2016 <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/guanajuato/municipios/11007a.htm>
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., (2005), Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana, Boletín de la Sociedad Geológica mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, LVII-3, 227-283.
- Huizar-Álvarez, R., Mitre-Salazar, L., Marín-Córdova, S., Trujillo-Candelaria, J., Martínez-Reyes, J., (2011), Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime. Geofísica Internacional, 50-3, 255-270.
- INEGI (2010) Manual de cartografía estadística, Censo Nacional de Población, 2010, México: Instituto Nacional de Estadística. [En línea]: Consultada en septiembre del 2016 http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/doc/manual_cartogrcart_censal.pdf
- INEGI (2011) Censo de población y vivienda 2010. Disponible en: www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx?c=27329&s=est.
- INEGI (2015a) Censo Nacional de Población, 2015, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [En línea]: Consultada en septiembre del 2016 <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/default.aspx>
- INEGI (2015b) Cartografía geoestadística urbana, Cierre de los Censos Económicos 2014, DENU 01/2015, Guanajuato. [En línea]: Consultada en septiembre del 2016 <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825004422>
- Keller, J., (2011), Introduction to Environmental Geology, (5th Ed.), Estados Unidos, Prentice Hall, pp. 661.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographical Information Systems and Science* (2nd ed.), Inglaterra, John Wiley and Sons, Ltd. ,

- López-Quiroz, P., Doin, M., Tupin, F., Briole, P., & Nicolas, J., (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.006>
- Meier, Patrick, (2012, 2 Julio), How Crisis Mapping Saved Lives in Haití [en línea]. *National Geographic*. Consultado en Abril 2017 <http://voices.nationalgeographic.com/2012/07/02/crisis-mapping-haiti/>
- Moreira, A., Prats-iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE GEoscience And Remote Sensing Magazine*, 1(1). <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
- Nieto-Samaniego, A.F., Macías-Romo, C., 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.
- Pritchard, M. E. (2006). InSAR, A Tool for Measuring Earth's Surface Deformation. *Phys. Today*, 59(7), 68-69. <https://doi.org/10.1063/1.2337843>
- Protección Civil Guanajuato, (2016a), [En línea]: Consultada en septiembre del 2016 <http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/>
- Protección Civil Guanajuato, (2016b), [En línea]: Consultada en septiembre del 2016 https://dga-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/qt/qt_celaya.pdf
- Protección Civil Guanajuato, (2016c), [En línea]: Consultada en septiembre del 2016 https://dga-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/ge/ge_celaya.pdf
- Protección Civil Guanajuato, (2016d), [En línea]: Consultada en septiembre del 2016 https://dga-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/hm/hm_celaya.pdf
- Raucoules, D., Colesanti, C., & Carnec, C. (2007). Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *C. R. Geoscience*, 339, 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.002>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2006), *Diario Oficial del lunes 24 de Julio de 2006*. [En línea]: Consultada en octubre del 2016 <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EstTeclermaChapalar.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano (1999a), *Carta Geológico-Minera Celaya F14-C64 Guanajuato*. 1:50 000, 1ra Ed. México.

- Servicio Geológico Mexicano (1999b), Carta Geológico-Minera Querétaro F14-10 QRO., GTO., MICH., JAL. Y EDO. MÉX. 1:250 000, 1ra Ed. México.
- Solano, D., (2013), Evaluaciones de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia derivadas de InSAR. Tesis de licenciatura. UNAM, Facultad de Ingeniería, 147 p.
- Terzaghi K., (1925), Erdbaumechanik (introduction to soil mechanics). Vienna: Franz Deuticke, 1943-1944.
- Trujillo-Candelaria J.A., (1985), Subsidencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto., Reunión sobre Asentamientos Regionales, México, D.F., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Asociación Geohidrológica Mexicana, 1, 35-42.
- Trujillo-Candelaria, J.A., (1991), Fallamiento de terrenos por efecto de la sobreexplotación de acuíferos en Celaya Gto. XXIII AIH-Congreso Internacional de Sobreexplotación de acuíferos. Canarias, España. T.I, p,175-178
- Zárate, L., (2015, 31 de enero), Celaya no tiene Atlas de Riesgo [en línea]. *am* Celaya: Consultado en septiembre de 2016. <https://www.am.com.mx/celaya/local/celaya-no-tiene-atlas-de-riesgo-177358.html>
- Zebker, H. A. (2000). Studying the Earth with Interferometric Radar. *Computing in Science & Engineering*, 2(3), 52-60. <https://doi.org/10.1109/5992.841796>

10. Anexos

Anexo 1. Datos de niveles estáticos (en profundidad en metros) proporcionados por JUMAPA para los meses de Mayo del periodo 2011-2016.

No. POZO	NOMBRE DE POZO	01/05/2011	01/05/2012	01/05/2013	01/05/2014	01/05/2015	01/05/2016
1	CAÑITOS	116.5	118.5	118	118		130.3
2	LA BOLA	114	118	117	118	127.55	129.78
8	ZONA DE ORO 1	115	117.5	115	114	126.6	
9	ZONA DE ORO 2	116.23	117	116	115	128.7	
11	LATINOAMERICANA	118	118	119	118	133.8	
12	JACARANDAS	111	113.15	113.5	113	120	124.4
13	ESTACIÓN	116	118	125	124	127.4	129.87
16	INSPECCIÓN	111.5	112	122	117	119.1	120.05
17	LINDAVISTA	119	129	118	127		
18	LAS FLORES 2	112.8	122	123	115	125.25	131
19	ARBOLEDAS 1	113	112	120	115	122.3	128.25
20	COLONIA DEL BOSQUE 2	111.72	108	112.5	112	121.1	123.18
21	OLIMPIA	110.5	114	114	113	125.1	124.2
26	ALAMEDA	113.43	116	116.5	116	125.15	
27	ANTONIO PLAZA	107	112	113	112.00	119.85	119.30
28	EL ZAPOTE	112.18	116	116	115		
30	JARDINES	112	102	112.5	112	124.48	123.76
33	VALLE DEL REAL	113.21	116.5	116	115		
34	PINOS 2	118	118.5	119	118		
42	PINOS 1	118	118.5	118	117		
43	EXELARIS	116.38	118	125.8	116.5	127.45	129.14
44	LEANDRO VALLE 1	115	117	117.5	117.5	126.85	
45	EMILIANO ZAPATA	112.4		116	120		
46	LAURELES 2 A	116.2	122	115	118		
48	VALLE HERMOSO	118	118	118	118		
50	INSURGENTES 1	111.72	112	110	110	126.39	125.95
51	LAGOS	110	116.96	120	119		
52	MONTE BLANCO	115	114.26	117.8	125	119.8	125.19
53	ALFREDO VÁZQUEZ BONFIL	111	116.37	122	120	125.95	126
54	LÁZARO CÁRDENAS	118.23	122.76	116	115		
55	CD. INDUSTRIAL 1	117	121.33	117	110		
58	QUINTA ARBOLEDAS	43.8	38	47	37	47.65	46.23

59	PROV. BUGAMBILIAS	F/S	F/S	116	116		
61	NUEVO CELAYA	113.84	101	117	117	124.4	
63	NAT-THA-HI	115.41	119.73	119	119	125.2	127.74
64	INDEPENDENCIA	116	111.36	115	114	118	120.94
65	SAN JOSÉ DE TORRES	110	117.2	118	118	122	124.1
66	SANTA CECILIA	108.5	F/S	120	114		
68	EL VERGEL	111.5	126.33	120	119.5	119.8	
78	SAN FRANCISCO	119.5	117	113	109		
79	ARBOLEDAS DEL PEDREGAL	116.25	123.97	129	124	130.47	139.85
82	LOS NARANJOS	116	TUBERIA TAPADA	127	127		
83	SAN JUANICO 2	116.5	117	118	118		
85	RESIDENCIAL TECNOLÓGICO	119.5	121	122	120		
86	GIRASOLES 1A	F/S	116	116	116		
87	LOS VEINTES 1A	114	116	114.5	114.5	123.85	126
88	CD. INDUSTRIAL 2A	119	117.54	116	120		
89	PROV. QUINTA BUGAMBILIAS 1A	112.11	109	123.5	113	123.1	126.17
91	BOSQUES DE LA ALAMEDA 1A	113.14	115	115	115	123.8	
92	10 DE ABRIL	114		114	111		
93	EMETERIA VALENCIA 1A	109	111	118	105	121	122.15
94	TRESGUERRAS 1A	110	110	116.3	116.3	124.5	124.53
95	XOCHIPILLI 1A	117.1	118	116	116		
96	LA HERRADURA	66	69.6	67	115	60.9	68.65
97	LAURELES 1A	116.4	108	109.5	109.5		
98	INSURGENTES 3	111	116.8	115	115	125.14	124.61
99	LA EJIDAL 1A	113.5	117.96	116	119.5	115.45	128.9
100	LA GAVIA 3		TUBERIA TAPADA	122	122		
101	LA GAVIA 4	99	100.35	101	101		
103	LA GAVIA 7	80	82.65	84	87		
106	EL CAMPANARIO	120.5	124.57	120	120	130.8	133.6
107	PROL. EMILIANO ZAPATA	113	121.04	115	110		
108	SAN AGUSTÍN 1A	111.6	118	117.5	117.5	125.3	126.06
109	ÁLAMOS 1	112	118.56	117	117		
110	RESURRECCIÓN	110	115	112	112.00	123.80	119.95
113	ÁLAMOS 2	F/S	118.5	118	118		
114	ZONA DE ORO DEL BAJÍO 2	126	125	118	117		

115	COL. MÉXICO	123.5	122	130.5	126		
116	EL CANTAR	110.5	113	115	115.00	123.38	129.80
117	VILLAS DEL ROMERAL	114.2	120	124.5	114	128.74	130.15
118	CD. INDUSTRIAL 4	117	122.16	118	129		
119	VALLE DE LOS NARANJOS 2	120	120.8	128	128		
120	LA MISIÓN	116	123.81	129.5	128		
121	SAN GABRIEL DON GÚ	120	123	123	126.6		
122	LA CALESA	F/S	117	117	118		
123	STA. RITA	69	65	62.5	61	70.15	
124	BRISAS DEL CARMEN	112.43	110	114	114	122.4	126.5
127	LOS MEZQUITES	F/S	121	114.1	121		
128	SANTA CECILIA 2	109	115.65	120	114	109.9	112.86
129	LOS OLIVOS	114.62	118.55	119	119	127.25	128
130	COMPUERTAS DEL CAMPESTRE		118.04	119.5	119.5	124.1	126.31
131	VILLAS DEL BAJÍO	119	123.24	122.5	122.5		
132	CAMINO REAL	108	113	110.6	110.6		
133	GALAXIAS DEL PARQUE	116.64	109	122.5	128		
134	POTABILIZADORA STA. RITA II		119.8	119.4	127		