



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Efectos de cambio de uso de suelo sobre un
acuífero en una región tectónicamente activa**

Tesis que presenta

Simón Eduardo Carranco Lozada

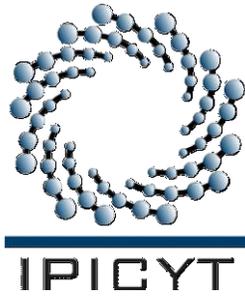
Para obtener el grado de

Maestro en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis:

Dr. José Alfredo Ramos Leal

San Luis Potosí, S.L.P., Octubre de 2012



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “Efectos de cambio de uso de suelo sobre un acuífero en una región tectónicamente activa” presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Simón Eduardo Carranco Lozada** y aprobada el **12 de Octubre de 2012** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Alfredo Ramos Leal
(Director de la tesis)

Dr. José Noel Carbajal Pérez
(Miembro del Comité Tutorial)

Dr. Pablo Dávila Harris
(Miembro del Comité Tutorial)

Dra. María Cristina Noyola Medrano
(Miembro del Comité Tutorial)



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Alfredo Ramos Leal.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. de registro: 088427) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 002 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas en la opción de Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 10 días del mes de octubre del año 2012, se reunió a las 13:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Noel Carbajal Pérez	Presidente	IPICYT
Dr. Pablo Dávila Harris	Secretario	IPICYT
Dr. José Alfredo Ramos Leal	Sinodal	IPICYT
Dra. María Cristian Noyola Medrano	Sinodal externo	UASLP

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS
EN LA OPCIÓN DE GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

Simón Eduardo Carranco Lozada

sobre la Tesis intitulada:

Efectos de cambio de uso de suelo sobre un acuífero en una región tectónicamente activa

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Alfredo Ramos Leal

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 14:05 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 10 días del mes de octubre de 2012.


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico




Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado

A mis padres:

Lina Lozada Sánchez y Simón Carranco Ramírez, porque siempre han sido el pilar fundamental de mi vida, autores de mis logros y por todo su incondicional apoyo y amor.

A mis hermanos, Juan Francisco, Miguel Darío y Lina Marisol por darme ánimos y estar siempre a mi lado.

Agradecimientos

Agradezco al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICyT), por el apoyo brindado durante la maestría.

Al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada.

A la División de Geociencias Aplicadas de la cual soy parte, por todo el apoyo brindado y por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

De manera especial agradezco a mi director de tesis el Dr. José Alfredo Ramos Leal, por compartirme sus conocimientos, por sus ilustres ideas y porque siempre tuvo la disponibilidad de enseñar y ayudarme.

A todo los doctores de la división de Geociencias que me impartieron clase y dejaron en mi una enseñanza.

A mis amigos, Janete, Pablo y Briseida que me brindaron su leal amistad y apoyo.
A mis demás compañeros que durante mi estancia de maestría en el IPICyT tuve la oportunidad de convivir a su lado: Manuel, Ángeles, Oyuki, Sonia, Flor, Adriana, y David

Al técnico Fred Pérez por sus valiosos comentarios en la edición de algunas imágenes.

Contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
I INTRODUCCIÓN	2
I.1 Objetivos	3
I.2 Antecedentes	4
I.3 Área de estudio	5
I.4 Planteamiento del problema	7
I.5 Crecimiento Demográfico	7
II MARCO GEOLOGÍCO	9
II.1 Tectónica regional	9
II.2 Estratigrafía	12
II.3 Geología estructural	17
III HIDROGEOLOGIA	19
III.1 Unidades hidrogeológicas del Valle de Celaya.	19
III.2 Incremento de pozos sobre el acuífero de Celaya	22
III.3 Evolución de Cono de Abatimiento.	24
IV PERCEPCIÓN REMOTA Y CAMBIO DE USO DE SUELO	27
IV.1 Sensores Remotos	27
IV.2 Radiación electromagnética	27
IV.3 Interacción de la energía con la atmosfera y la superficie de la tierra	29
IV.4 Metodología del análisis de las imágenes	30
Tabla 4.1 Escenas Landsat (mss y mt), utilizadas en la investigación.	32
IV.5 Cuantificación del cambio de uso de suelo	33
V RESULTADOS	34
V.1 Perfiles topográficos y nivel piezométrico	34
V.1.1 Secciones topografías y nivel piezométrica.	37
V.2 Evolución de la elevación del nivel estático	42

V.3 Dinámica de cambio de uso de suelo	44
V.3.1 Clasificación de uso de suelo 1976	44
V.3.2 Clasificación de uso de suelo 1989	46
V.3.3 Clasificación de uso de suelo 1999	48
V.3.4 Clasificación de uso de suelo 2000	50
V.3.5 Clasificación de uso de suelo 2009	52
V.3.6 Clasificación de uso de suelo 2011	54
V.3.7 Tasa de cambio de uso de suelo	56
V.3.8 Efectos de actividad antropogénica en la zona de fallas de la ciudad de Celaya	57
CONCLUSIONES	61
Referencias:	63
Anexos	65
Anexo A. Levantamiento topográfico	65
	65
Anexo B. Matrices de transición	71
	71

Lista de tablas

Capítulo IV

Tabla 4.1 Escenas Landsat (mss y mt), utilizadas en la investigación	32
--	----

Capítulo V

Tabla 5.1 Tasa de cambio del uso de suelo	56
---	----

Lista de Figuras

Capítulo I

Figura 1.1 Ubicación del área de estudio y principales vías de acceso	6
---	---

Figura 1.2 Crecimiento demográfico y la tasa de crecimiento en Celaya	9
---	---

Capítulo II

Figura 2.1 Placas tectónicas	10
Figura 2.2 Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende	12
Figura 2.3 Unidades geológicas que afloran dentro del valle de Celaya	16
Figura 2.4 Sección geológica, orientación Este-Oeste	18

Capítulo III

Figura 3.1 Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Celaya	21
Figura 3.2 Densidad de pozos en el año de 1990	23
Figura 3.3 Distribución de piezometría para distintos años	26

Capítulo IV

Figura 4.1 Regiones del espectro electromagnético	28
Figura 4.2 Propiedades de la energía electromagnética	29
Figura 4.3 Metodología para la clasificación de imágenes Satelitales	31
Figura 4.4 Ejemplo del desarrollo del árbol de decisiones	33

Capítulo V

Figura 5.1 Ubicación de las secciones topográficas dentro de la ciudad	36
Figura 5.2 Perfil topográfico y elevación del nivel estático	37
Figura 5.3 Perfil topográfico y elevación del nivel estático	38
Figura 5.4 Perfil topográfico y elevación del nivel estático	39
Figura 5.5 Perfil topográfico y elevación del nivel estático	40
Figura 5.6 Perfil topográfico y elevación del nivel estático	41
Figura 5.7 Evolución del nivel estático	43
Figura 5.8 Distribución del uso de suelo en 1976	45
Figura 5.9 Distribución del uso de suelo en 1989	47
Figura 5.10 Distribución del uso de suelo en 1999	49
Figura 5.11 Distribución del uso de suelo en 2000	51

Figura 5.12 Comparación del uso de suelo 1976-2009	52
Figura 5.13 Distribución del uso de suelo en 2009	53
Figura 5.14 Distribución del uso de suelo en 2011	55
Figura 5.15 Tasa de cambio en (%) por periodo	57
Figura 5.16 Dislocamientos asociados a fallas y abatimiento	60

RESUMEN

El área de estudio se encuentra dentro de la provincia denominada Eje Neovolcánico, dentro del sistema estructural regional conocido como la falla Taxco- San Miguel de Allende. El valle de Celaya se caracteriza por su amplia extensión agrícola y su excesivo número de pozos, los cuales son de uso agrícola en su mayoría, provocando una extracción intensiva. El acuífero de Celaya es considerado uno de los más impactados debido a que tiene el mayor número de pozos de todos los acuíferos de la república. El valle ha tenido cambios muy importantes en el uso de suelo, siendo el cambio más impactante el de agricultura de temporal a agricultura de riego. Aplicando percepción remota se ha calculado que en los años 50's, la zona agrícola era principalmente de temporal, actualmente más del 70% son de riego. Uno de los principales efectos negativos que tiene la extracción intensiva del agua subterránea, se presenta en la zona urbana. Las fallas que atraviesan parte de la ciudad causan daños en casas, red de agua potable, red de drenaje, calles, edificios. Los desplazamientos laterales son imperceptibles; sin embargo, cuando el cono de abatimiento intersecta al sistema de fallas, los desplazamientos verticales (fallamiento normal) se magnifican, alcanzando dislocamientos de hasta 3.5 m en el centro de Celaya.

Palabras claves: uso de suelo, fallas y cono de abatimiento.

ABSTRACT

The study area is located within the called Eje Neovolcánico province, along the trend of a regional fault system known as Taxco-San Miguel de Allende. Celaya Valley is characterized by its wide extension and the excessive number of wells, which are mostly agricultural, causing intensive extraction. The Celaya aquifer is considered one of the most impacted because it has the largest number of wells of all aquifers of Mexico. The valley has had major changes in land use, with the most striking change from rainfed to irrigated agriculture. With the use of remote sensing it has been calculated that in the 50, the area was primarily agriculture rainfed, currently more than 70% is agriculture irrigated. One of the main negative effects of

intensive extraction of groundwater occurs in the urban area. Faults crossing part of the city causes damage to houses, drinking water supply, drainage, streets, buildings. The lateral displacements are imperceptible, but when the cone of depression intersects the fault system, the vertical displacements (normal faulting) are magnified, reaching up to 3.5 m dislocations in downtown Celaya.

Keywords: land use, failure and dejection cone.

I INTRODUCCIÓN

A la ciudad que ahora conocemos como Celaya, se le conocía como *Nat-Tha-Hi*, donde se fundo en un inicio la ciudad *Villa de la Concepción de Zalaya* el 12 de Octubre de 1570. En Zalaya, su principal actividad fue la agrícola, este lugar contaba con tres características fundamentales (cercana a ríos o lagunas, en extensas planicies y tierras fértiles). Por otra parte, este valle fue desde sus inicios la pasada obligatoria de las diligencias de la ruta San Luis Potosí, Zacatecas, y Querétaro de los subordinados de la Nueva España, quienes por seguridad construyeron una guarnición cerca de lo que ahora es la ciudad de Celaya para la protección de los bienes de la corona y abastecimiento de provisiones. Por estas razones, en el valle de Celaya se fundo y se desarrollo rápidamente la actividad agrícola.

La actividad agrícola en el valle de Celaya, inicio en su totalidad con cultivos de temporal, esto implicaba dos situaciones favorables para el valle; 1) solo se sembraba para tiempos de lluvia y se aprovechaba este recurso. 2) No se hacia uso de agua subterránea. La agricultura de temporal se extendió en casi todo el valle, pero debido a la demanda de alimentos por el crecimiento poblacional en la ciudad de Celaya y ciudades vecinas, fue necesario acelerar y aumentar la producción agrícola, fue por este suceso que se detonó la irrigación con agua subterránea. Con la perforación de pozos para el uso agrícola cambió el panorama de la agricultura en el valle de Celaya, este cambio trajo consigo alteraciones al medio. Para la década de los 50's, en la mayoría de las parcelas se seguía

cultivando solo en la temporada de lluvia y en muy pocas parcelas se hacia uso de agua extraída del subsuelo. El incremento desmedido de la perforación de nuevos pozos y la extracción intensiva del agua subterránea hizo resaltar su primer efecto negativo en el terreno. En los años 70's, con un total de 1032 pozos, se presentó sobre el suelo, un agrietamiento como resultado de la sobre explotación del agua subterránea. Estudios posteriores, sobre geología regional, revelaron que una porción del valle de Celaya es afectado por el sistema de fallas llamado Taxco-San Miguel de Allende, (Demant 1978). Este sistema de fallas con orientación NNW-SSE atraviesa las ciudades de Taxco, Toluca, Celaya, Querétaro y San Luis Potosí.

La actividad agrícola de riego a crecido año con año junto con el número de pozos, se tiene conocimiento que para el 2009 se regaba un total de 633 km² y su número de pozos es del orden de 3360 (Trujillo, 2009). La evolución del cambio de uso de suelo, ha sido evaluado con técnicas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En este trabajo, además de la percepción remota y SIG, se utilizaron otros elementos como la evolución piezométrica, geología estructural y levantamiento topográfico para establecer los efectos de las actividades antropogénicas en una zona tectónicamente activa.

I.1 Objetivos

Objetivo general:

- Es analizar los efectos que causa el cambio de uso de suelo de agrícola de temporal a riego sobre el acuífero del valle de Celaya que se encuentra a su vez dentro de una zona tectónicamente activa.

Objetivos particulares:

- Identificar por medio de imágenes satelitales los cambios de uso de suelo durante los últimos 40 años.
- Establecer los efectos del cambio de uso de suelo en el acuífero de Celaya.

I.2 Antecedentes

- Actualización del Estudio Hidrogeológico del valle de Celaya, Guanajuato (1982). Este estudio desarrollado sobre el valle de Celaya tenía básicamente tres objetivos; A) Determinar el número de captaciones subterráneas y determinar el grado de explotación. B) Definir la relación del retorno de riego con el acuífero dentro del distrito de riego N° 85. C) Cuantificar el grado de explotación del agua subterránea y dar las medidas necesarias para su suministro. En este estudio se realizó una actualización del censo de aprovechamientos y se determinaron los volúmenes de extracción.
- Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de las fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México (Garduño, 2001). Este artículo trata sobre los desplazamientos verticales (hundimientos) debido a la sobreexplotación de un acuífero. También muestra los efectos y la problemática que se presenta dentro de la ciudad de Morelia a causa de la sobreexplotación.
- Riesgo asociado a fallamiento geológico en la ciudad de Celaya, Guanajuato (Valero, 2002): Las fallas que afectan a la ciudad de Celaya se consideran algunas veces de origen tectónico, este fenómeno de tectonismo ya existía mucho antes que se llevara a cabo la extracción intensiva del agua en el acuífero del valle de Celaya. Este trabajo de tesis

muestra la metodología desarrollada para la detección de fallas en la ciudad de Celaya con Radón-222, este se asocia principalmente con vulcanismo activo, monitoreo de agua subterránea y fallamiento activo.

- Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México (Pacheco 2007). Este artículo muestra una metodología para determinar las deformaciones y el hundimiento el valle de Querétaro a causa de la subsidencia.

-

I.3 Área de estudio

El área de estudio, se localiza en el estado de Guanajuato dentro del corredor industrial del Bajío, su ubicación geográfica se encuentra delimitada por las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) superior izquierdo en X: 280 000 Y: 2 300 000 y el limite inferior derecho corresponde a las coordenadas X: 320 000 Y: 2 250 000 (Figura 1.1). El valle de Celaya colinda al Norte con el municipio de Juventino Rosas, al Suroeste con Cortázar y al Sureste con Apaseo el Alto. El área de estudio considerada para este trabajo es aproximadamente de 1999.269 Km², quedando dentro las cabeceras municipales de Villagrán, Cortázar. A pesar que el acuífero del área de estudio lleve por nombre acuífero de Celaya este subyace sobre los municipios de Celaya en principio, Cortázar, Villagrán, Juventino Rosas, Comonfort, Apaseo El Grande y Apaseo el Alto.

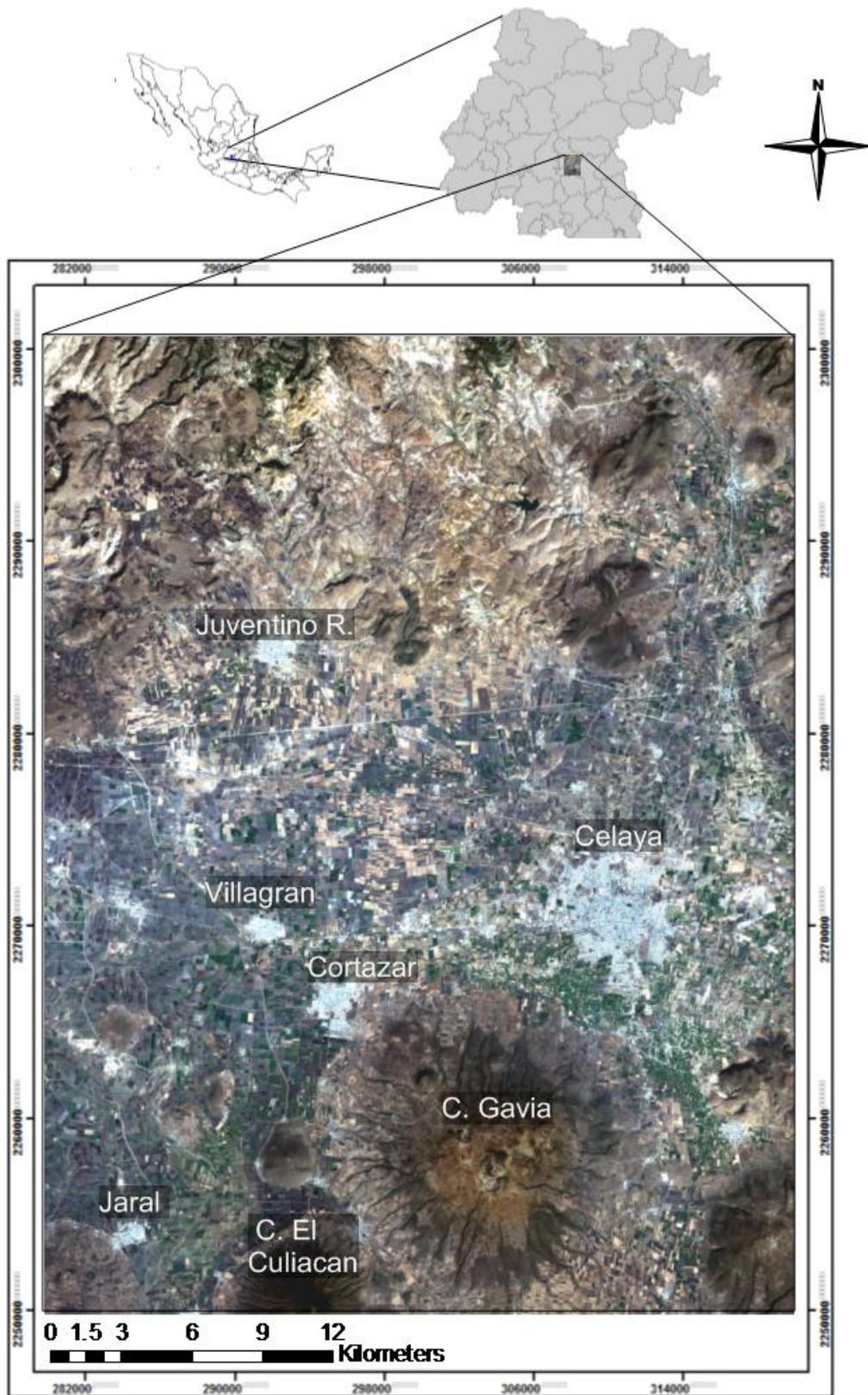


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio.

1.4 Planteamiento del problema

En los últimos 50 años se ha dado un crecimiento poblacional en muchas regiones de la Republica Mexicana y la ciudad de Celaya no es la excepción, aquí el crecimiento ha ocasionado una extracción intensiva del acuífero del Valle de Celaya.

El valle se encuentra dentro de la provincia denominada Eje Neovolcánico, debido a esto el valle presenta alineamientos geológicos como la falla Taxco-Allende. El área de estudio, se caracteriza por su amplia extensión agrícola, y su excesivo numero de pozos, los cuales son de uso agrícola en su mayoría, provocando una extracción intensiva. Uno de los principales efectos negativos que tiene la extracción intensiva del agua subterránea, se presenta en la zona urbana. Las fallas que atraviesan parte de la ciudad causan daños en casas, red de agua potable, red de drenaje, calles, edificios. Este fenómeno se ha acelerado con el desarrollo de un gran cono de abatimiento. El cambio de uso de suelo va de uso agrícola a urbano, pero no es el principal problema que ocasiona los conos de abatimiento, también el cambio de uso de suelo agrícola de temporal a riego contribuye en gran medida con este fenómeno. En los años 50's, la zona agrícola era principalmente de temporal, actualmente mas del 70% son de riego.

1.5 Crecimiento Demográfico

México ocupa el onceavo lugar a nivel mundial en población y el tercer lugar en todo América (INEGI, 2010). En 1940 México contaba con casi 20 millones de habitantes de los cuales casi el 70% vivía en poblaciones rurales, para comienzos de 1970 en México ya había 48 millones de habitantes y el 50% de esta población vivía ya en las ciudades. Algunas de las principales causas del crecimiento acelerado fueron la mejora en las condiciones de vida, como la alimentación, el acceso a los servicios de salud y la recomendación de los gobiernos de poblar el país.

En el estado de Guanajuato en el año de 1960 había una población total de 1.735 millones de habitantes, con una tasa de crecimiento del 2.8% en diez años después ya había un total de 2.270 millones de habitantes, con una tasa de crecimiento del 1.6%, la población aumento hasta 4.663 millones (CONAPO, 2003). Una de las explicaciones por las que se dio este crecimiento, fue la migración de habitantes de otros estados. Las tendencias demográficas de migración influyen en el crecimiento poblacional del Estado de Guanajuato, la causa es un crecimiento de la población de un 4.55%, en el periodo de 1970 a 1996 (COESPO, 1998).

El crecimiento demográfico en Celaya, se dio al mismo tiempo que el crecimiento estatal, solo que su tasa de variación difiere, por ejemplo, en el periodo de 1950 a 1960 la tasa de crecimiento fue de 4.67%, de 1960 al 1970 su tasa fue de 4.09%, de 1970 a 1980 se tuvo una tasa de 4.04%, en 1980 a 1990 su tasa fue de 3.55%, de 1990 al 2000 la tasa descendió hasta 2.11% y del 2000 al 2010 de 1.96%, (Figura 1.2).

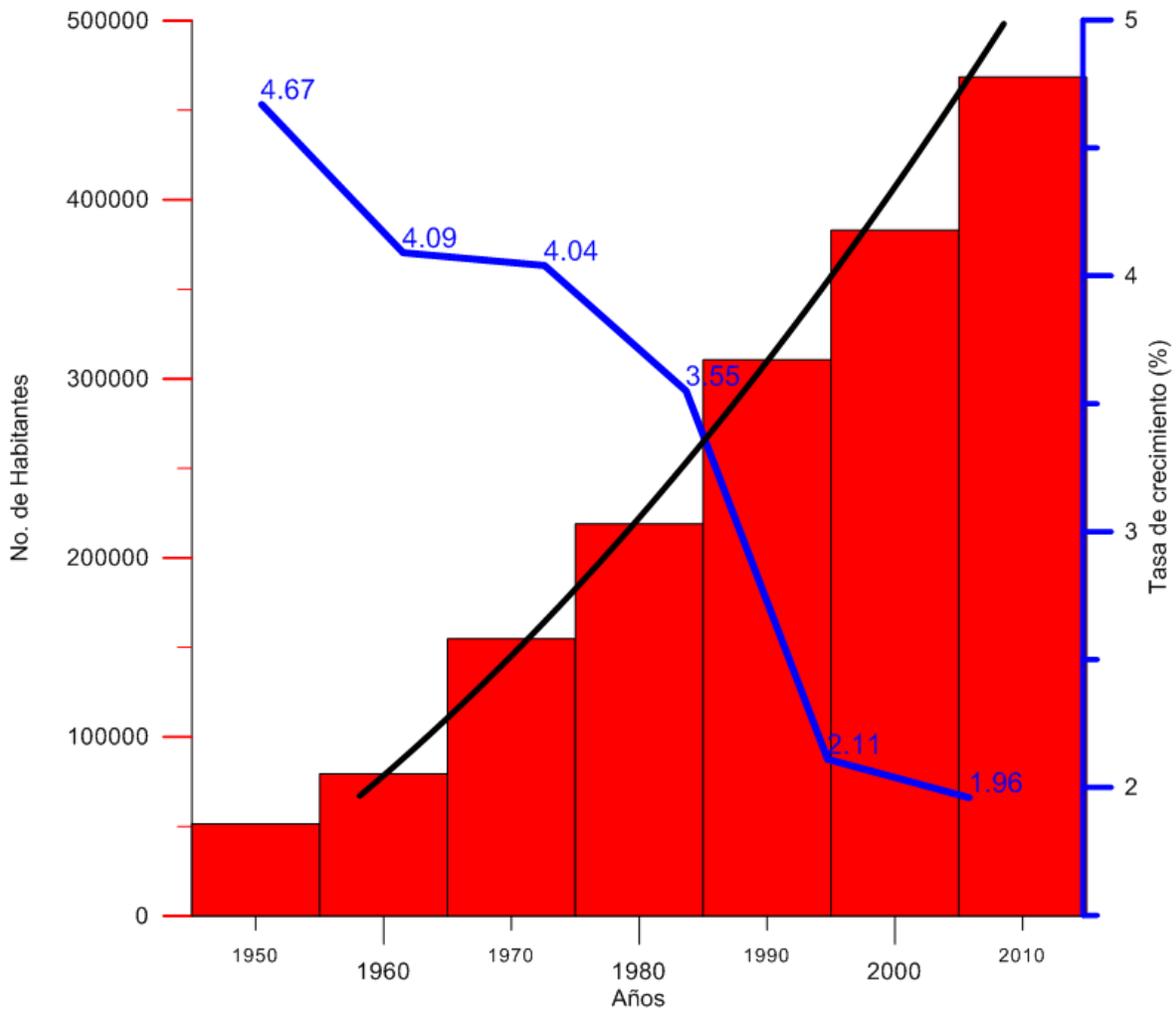


Figura 1.2 Crecimiento demográfico y la tasa de crecimiento en Celaya.

II MARCO GEOLOGÍCO

II.1 Tectónica regional

En los límites de placas se generan movimientos tectónicos que afectan a la corteza terrestre y que a su vez contribuyen a la deformación de las capas estratigráficas y otros movimientos superficiales en el terreno a este fenómeno se le definen como tectonismo.

El termino tectonismo dentro del área de estudio implica una visión a gran escala, para poder obtener una idea mas clara de la región y poder explicar el origen del tectonismo activo dentro del área de estudio. Las deformaciones de la corteza terrestre y parte superior del manto, se originan por el movimiento de las grandes placas litosféricas (Vergely, 1999). En México, la Placa Norteamericana que es en la que descansa el territorio mexicano, se encuentra en interacción con la Placa del Pacífico y la Placa de cocos (Figura 2.1), estas dos últimas, contribuyen a la formación de la zona de subducción, que es la trinchera centroamericana. La subducción origina al terreno una serie de perturbaciones y en algunos casos sismos de alta frecuencia.

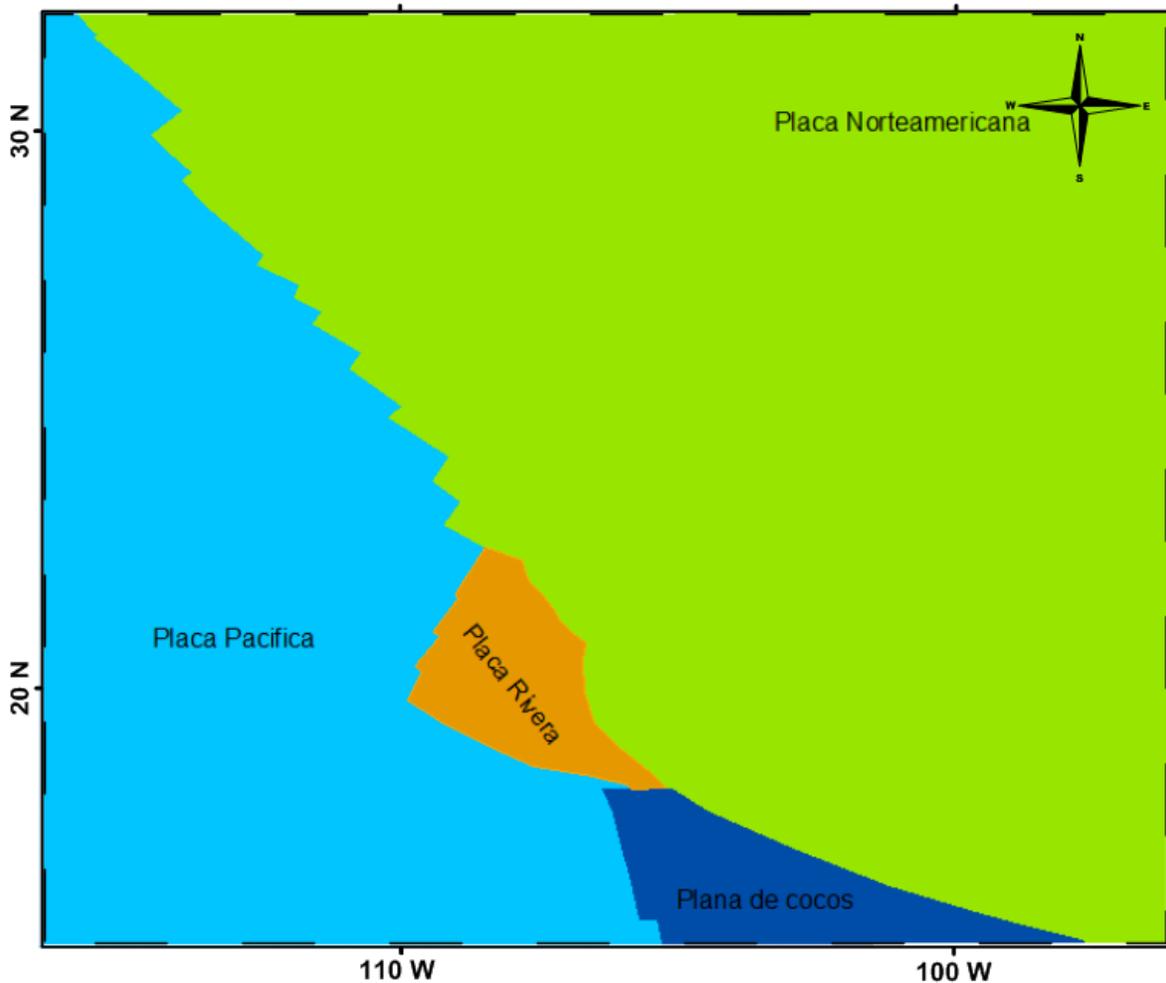


Figura 2.1 Placas tectónicas que movimientos sísmicos a México.

El área de estudio se encuentra dentro de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, esta provincia colinda al norte con la Falla del Bajío que es el límite septentrional, donde empieza la provincia Mesa Central, al Este se encuentra la Sierra Madre Oriental y al Oeste la Sierra Madre Occidental. El Eje Neovolcánico es característico del tectonismo en México (Figura 2.2), se caracteriza por una cadena volcánica de edad plio-cuaternaria, la cadena volcánica se extiende desde el Océano Pacífico al Oeste del país, hasta el Golfo de México en el Este. Este Eje Neovolcánico Transmexicano se puede dividir en tres sectores:

La parte Occidental del Eje (fosa tectónica de Tepic-Chapala) de composición calci-alcalina con basaltos, andesitas dacitas (Demant, 1982).

La fosa tectónica de Colima con orientación N-S y una composición volcánica calci-alcalina (Demant, 1982).

El vulcanismo en la parte central y oriental del Eje, está relacionado con la subducción de la placa de Cocos, aunque se encuentran algunas variaciones geoquímicas que al parecer están relacionadas con cambios de espesor sobre la Placa de Cocos, (Demant, 1982).

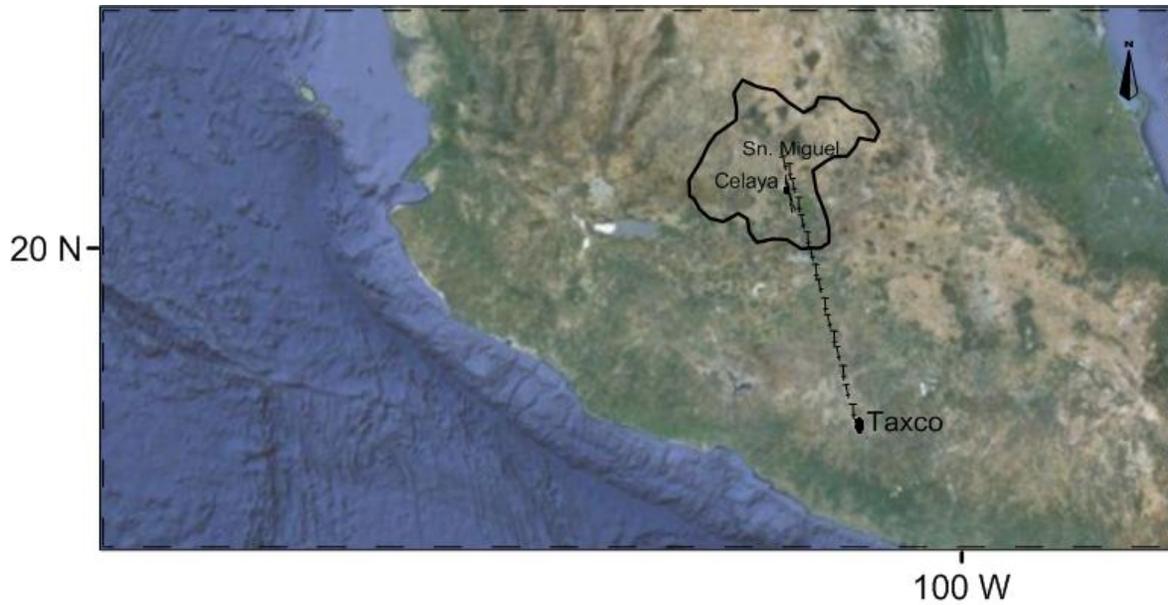


Figura 2.2 El área de estudio se encuentra en la dentro de la provincia fisiográfica Taxco-San Miguel de Allende, (imagen tomada de Google maps).

II.2 Estratigrafía

Periodo Cretácico:

Interior

Se conforma por rocas mesozoicas que se agrupan en dos conjuntos litológicos: Conjunto interior Meta-Andesitas, filitas y algunos pedernales. Esta fonación compuesta por Meta-Andesitas aflora en la parte norte del valle.

Formación Soyatal-Mezcala (KCz):

Esta formación se le denomina Formación Soyatal (Figura 2.3), debido a los afloramientos que se encuentran en un pequeño campo minero de antimonio que lleva ese mismo nombre, este esta ubicado al Noreste de Zimapan, Hidalgo. Está integrada por caliza arcillosa de color gris, en capas de espesor mediano a delgado y sin pedernal.

Periodo Terciario:

Eoceno

La litología del Eoceno en la zona, se conforma por una secuencia estratigráfica de rocas ígneas extrusivas, en el área de estudio su composición es riolítica a dacítica, también esta conformada por lavas fracturadas y alteradas hidrotermalmente, con una matriz afanítica y fenocristales de cuarzo y plagioclasas.

Oligoceno- Mioceno

Paquete estratigráfico compuesto por rocas ígneas extrusivas de composición ácida, se compone de ignimbritas y tobas riolíticas, con espesor de 200m (CEASG, 1998)

Formación Riolita Chichíndaro:

Esta formación toma su nombre del cerro ubicado cerca de la ciudad de Guanajuato. Está formado por domos y derrames de composición acida formando un campo muy extenso. Este campo cubre gran parte de la Mesa Central (Nieto-Samaniego et al., 1996, 1999a). Los domos tienen cuellos volcánicos, que fueron el centro de la emisión de lava y tobas. Los derrames de lava, tienen estructuras de flujo bien definidas donde presentan un arreglo hacia el centro del cuello de la estructura. Los derrames de lava de composición riolítica y de color blanco a rosa; son porfiríticos; con fenocristales de cuarzo, dentro de una matriz cripto o microcristalina de composición ácida (Nieto Samaniego, 1990). Asociados a las lavas se observan ignimbritas, tobas, vitrófidos y brechas, los cuales comúnmente forman parte de las estructuras dómicas (Alaníz-Alvarez, 2001). El espesor observado varía típicamente entre 100 y 150 m, pero llega a alcanzar hasta 400 m.

Secuencia ignimbrítica del Oligoceno-Mioceno (Tom)

Las ignimbritas forman parte de las rocas que afloran en el bloque levantado de la falla de San Miguel de Allende, el conjunto de tobas e ignimbritas que se ubican en la Cañada de la Virgen, y las ignimbritas que afloran en la Sierra de los Cuarzos y al sur de San José Iturbide (Alaníz-Alvarez, 2001). Las ignimbritas se intercalan con depósitos tobáceos y con vitrificados, su espesor máximo es de 200 m, pero comúnmente no supera los 100m (Alaníz-Alvarez, 2001). Las ignimbritas yacen discordantemente sobre el basamento Mesozoico, o bien sobre la Riolita Chichíndaro (Alaníz-Alvarez, 2001). En la región de la Cañada de la Virgen se les observa intercaladas con la Andesita El Cedro y son cubiertas por derrames y domos de la Riolita Romero. Su edad se ubica en el Oligoceno tardío (Nieto-Samaniego et al. 1996).

Andesita Allende

La andesita Allende aflora al noreste del área de estudio, es una roca microporfídica y una característica distintiva es que solo contiene microfenocristales de minerales ferromagnesianos, estando la plagioclasa confinada a una matriz, donde es muy abundante y se presenta como microlitos orientados en derrames (Pérez-Venzor, 1996). Esta formación se encuentra expuesta en el cañón del río Laja, justo en la boquilla de la presa Ignacio Allende, donde se le estimó un espesor mínimo de 100m (Pérez-Venzor, 1996). La andesita Allende descansa sobre un depósito epiclástico volcánico burdamente estratificado, de 5 a 7 metros de espesor, constituido aproximadamente por clastos angulares a subangulares de andesita dentro de una matriz deleznable, con textura arenosa de la misma composición (Pérez-Venzor, 1996).

Secuencia volcánica Palo Huérano

Esta secuencia se encuentra formada principalmente por derrames de andesita de piroxeno en forma de lengüetas con terminaciones lobulares. Su espesor promedio de estas coladas es de entre 20 y 30 metros (Pérez-Venzor, 1996).

Periodo Cuaternario

Este periodo está representado en el área por los volcanes monogenéticos, estos volcanes se encuentran a lo largo del Eje Neovolcánico y se componen por basaltos, en coladas acordonadas y en bloques, con algunas intercalaciones de ceniza volcánica. Su espesor máximo es de 200 m aunque queda restringida su distribución a las cercanías de los volcanes (Lesser, 2000).

Los depósitos aluviales rellenan las fosas tectónicas (Figura 2.2), este material aluvial esta constituido por sedimentos fluviales erosionados, estos depósitos son el aporte del Río Laja, los depósitos son heterogéneos. El tamaño de material aluvial y lacustre en el valle varia desde 0.002mm que corresponden a las arcillas hasta encontrar algunas gravas y cantos rodados, su espesor en algunas fosas es de 150m (Valero, 2002).

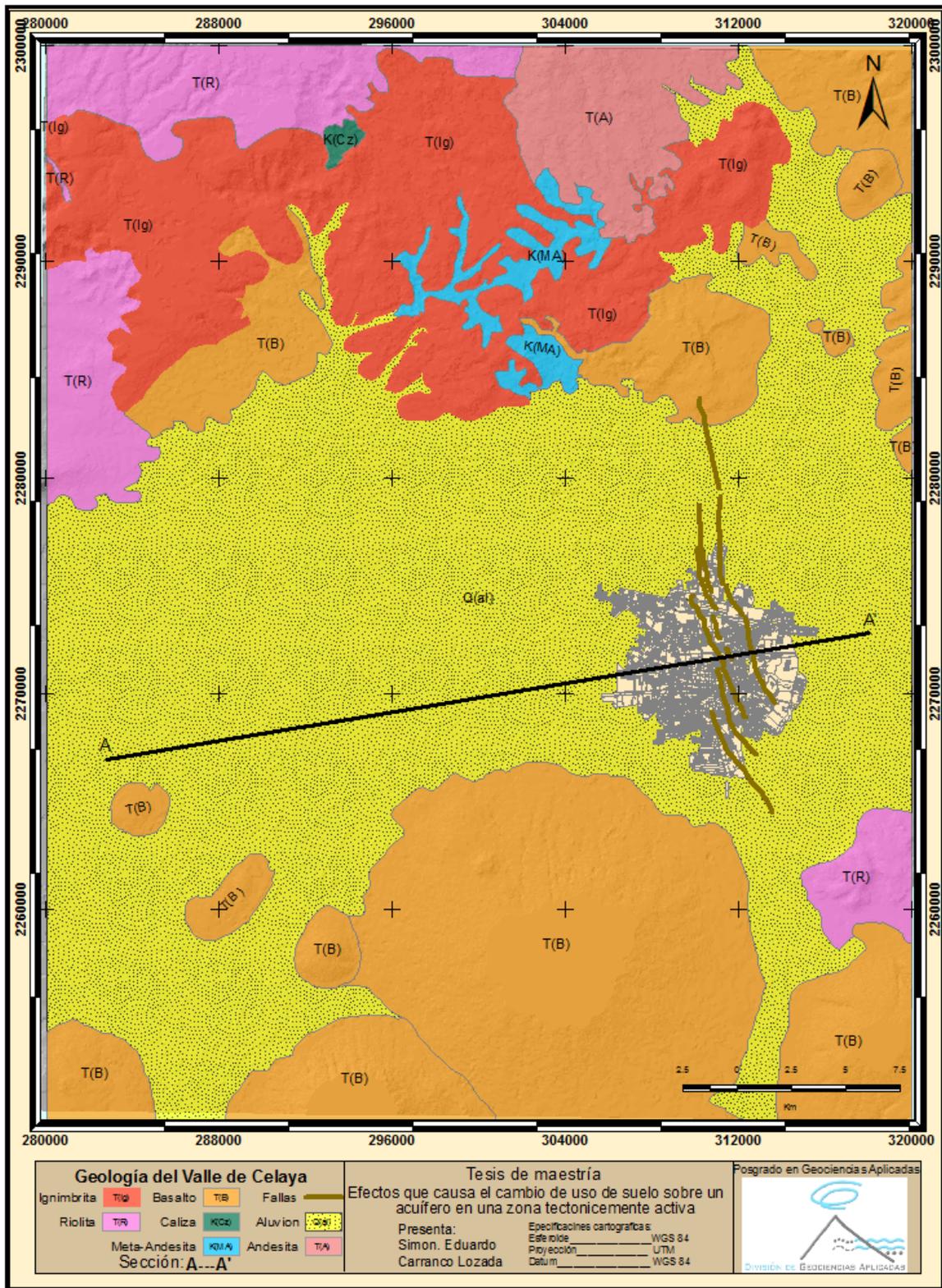


Figura 2.3 El mapa muestra la distribución de las diferentes unidades geológicas en el valle de Celaya, con rocas que van desde el período Cretácico al Cuaternario.

II.3 Geología estructural

Los esfuerzos verticales que causan fracturamiento a la roca se deben a los movimientos internos de la corteza terrestre que a su vez causan deformación en la roca, estos movimientos causan deformaciones de diferentes tipos. Cuando en el terreno presentan fracturas, fisuras y se ha efectuado un desplazamiento apreciable, se le conoce como falla geológica.

El área de estudio, es afectada por varios sistemas de fallamiento, uno pertenecen al sistema Taxco-San Miguel de Allende (Deman 1978) de orientación NNW-SSE, que atraviesan el centro de México, el otro sistema de fallas con orientación E-W se asocia al Eje Neovolcánico.

En el área de estudio se presentan fallas de tipo normales (Figura 2.4), estas son movimientos verticales respecto al plano de falla el cual algunas veces tiene un ángulo aproximado de 60° respecto con la horizontal, en el movimiento se presenta un bloque que se desliza hacia abajo al que se le denomina piso mientras que al bloque que se eleva se le denomina techo.

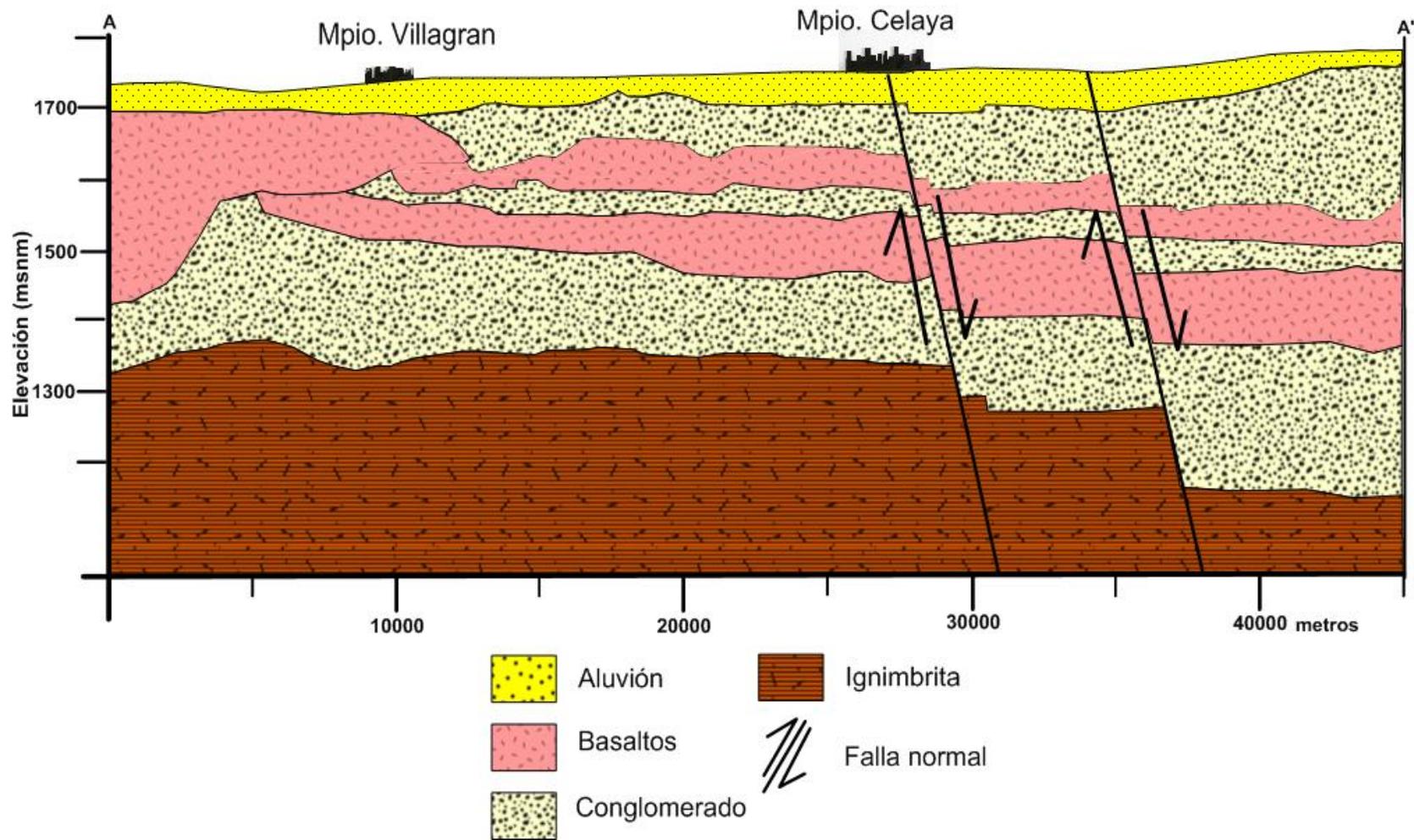


Figura 2.4 Secci3n geol3gica, esta secci3n atraviesa el valle del Celaya de Este a Oeste (modificada de SGM, 1999).

En la ciudad de Celaya a finales de los 70's, se apreció por primera vez grietas y hundimientos, que afectaron la infraestructura urbana, principalmente, fue en estos años que se comenzó un estudio para determinar la causa del agrietamiento, dentro de los resultados, se determinó que en la ciudad, el mayor movimiento diferencial fue de 60 cm; en la actualidad el desplazamiento es de 3.5 m, estas fallas siguen activas y se deslizan a una velocidad de 15 cm al año (Trujillo 2009).

Las principales fallas de las que se tiene registro son seis: Falla Pradera de la Hacienda, Falla la Corona, Falla Gobernadores, Falla Universidad Pedagógica, Falla Insurgente y Falla Mercado de Abastos, estas seis mencionadas solo son visibles dentro de la zona urbana, la continuación que tienen estas fallas al norte y sur de la ciudad sobre la zona agrícola es evidente, aunque, debido a que el suelo es removido constantemente para nivelar el terreno agrícola, no se puede precisar una razón de desplazamiento, como el dato que se tiene dentro de la ciudad.

III HIDROGEOLOGIA

El crecimiento considerable de la población dentro de la zona urbana de Celaya; así como, el incremento de áreas agrícolas de riego y el desarrollo industrial, ha provocado un desequilibrio hidrológico en el acuífero del Valle de Celaya. Este acuífero, está ubicado dentro de la Región Hidrológica N°VIII y que a su vez forma parte de la cuenca Lerma-Santiago. La cuenca Lerma-Santiago, contribuye a una quinta parte del agua a nivel nacional (CONAGUA, 2006).

III.1 Unidades hidrogeológicas del Valle de Celaya.

De acuerdo a la estratigrafía del Valle de Celaya, el sistema acuífero de Celaya, está compuesto por una capa somera depósitos aluviales y conglomerados polimícticos que funcionan como un acuífero libre con poco espesor; así como, por una secuencia de basaltos que abarcan gran parte del área de estudio y

representa el acuífero principal (Figura 3.1). Estos basaltos en ocasiones se encuentran soportando a un paquete del Cuaternario constituido por material aluvial y lacustre, que en algunos sitios el espesor supera los 300 m (Trujillo, 2009). Los basaltos son visibles en los cerros de la Gavia y el Culiacán. Estos cerros de basalto, con morfología de cono volcánico, delimitan al valle de Celaya, son favorables porque se comportan como zona de recarga y debido a su fracturamiento, permiten la rápida infiltración; otra unidad es la Andesita Allende que también funciona como un acuífero libre. La secuencia ignimbrítica de Oligoceno-Mioceno también funciona como acuífero semiconfinado debido a su alteración y fracturamiento, esta secuencia ignimbrítica se encuentra cubriendo la Formación Soyatal.

Las formaciones geológicas que funcionan como acuitardos por su baja permeabilidad son; la Formación Soyatal-Mezcala formada por calizas arcillosas, la secuencia volcánica del Terciario Temprano (CONAGUA, 2002), y la Riolita Chichíndaro, la cual no está fracturada.

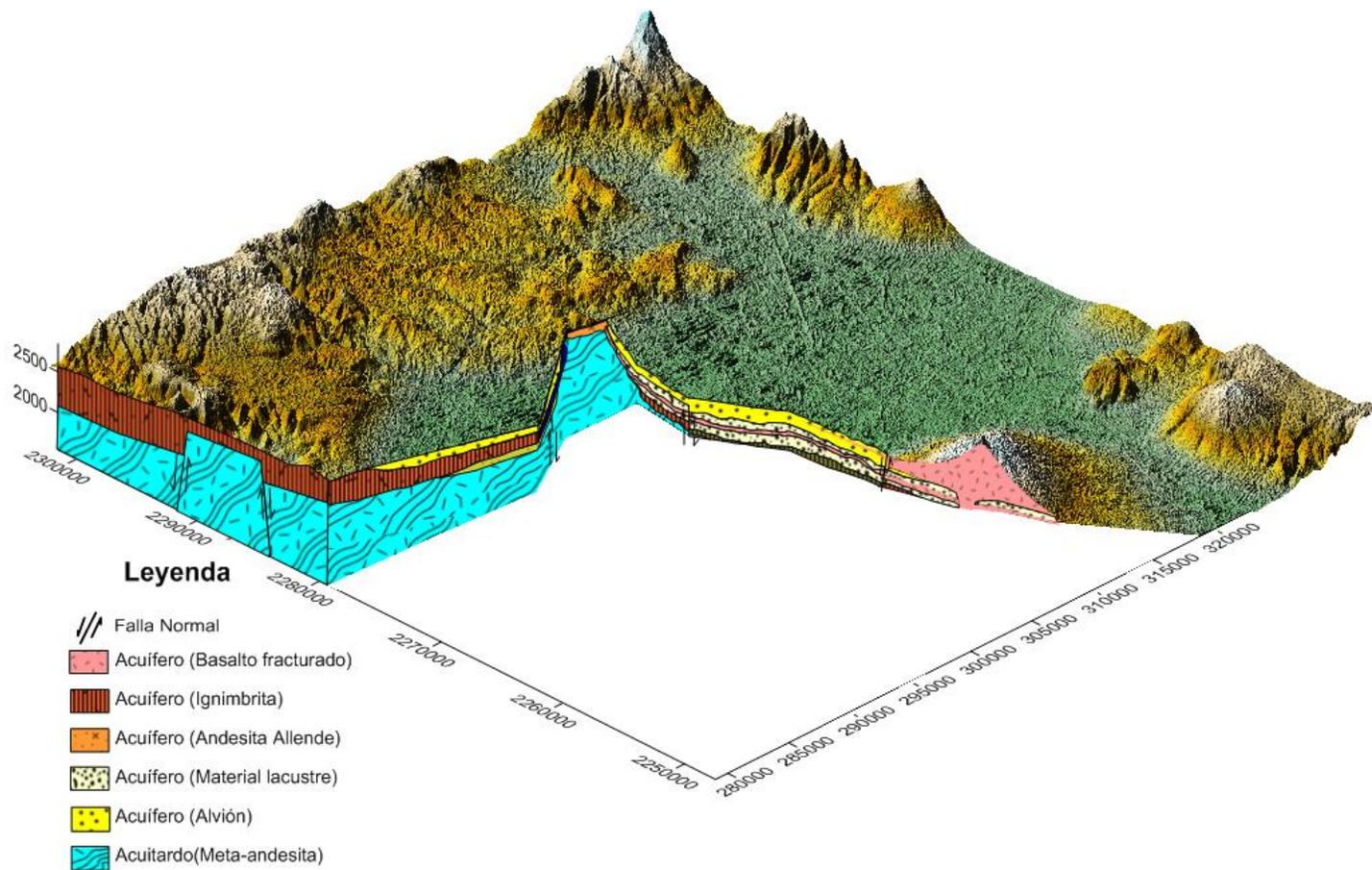


Figura 3.1 Modelo hidrogeol3gico conceptual del acuífero de Celaya, muestra las unidades que funcionan como acuíferos (Basaltos, dep3sitos aluviales y lacustres, Andesita Allende e Ignimbritas), las unidades que funcionan como acuitardo (Riolita Chichindaro y la Meta-Andesita).

III.2 Incremento de pozos sobre el acuífero de Celaya

El acuífero del Valle de Celaya, es uno de los más grandes que se encuentran en el Estado de Guanajuato y se considera como uno de los más importantes acuíferos por su número de pozos. El pozo mas antiguo reportado en el valle de Celaya, se le conoce como la Bola de Agua, fue uno de los primeros pozos que se perforaron para abastecer a la población de Celaya, este pozo se perforo en el año de 1910 y el agua broto 2 m, sobre el nivel del suelo. La densidad de pozos fue creciendo a lo largo de los años, tan solo en 1970 había aproximadamente 1032 pozos, para el año de 1990 en el Estudio de Planeación del uso sustentable del acuífero del Valle de Celaya, se reportaba un total de 1897 pozos (Figura 3.2), de los cuales el 0.26% estaban abandonados, el 0.42% se utilizaban para abrevaderos, el 94.80% para uso agrícola, el 2.37% era para el uso domestico y finalmente el 2.11% era utilizado en agua potable para la ciudad (CEASG, 1990); para 1999, el Estudio Hidrológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Celaya se censaron 2162 pozos, en este mismo estudio se determinó que el 1.99% estaba abandonado, el 1.06% se utilizaba aun como abrevadero, el 84.18% era para la agricultura de riego, el 2.08% se utilizó para el uso domestico, el 7.59% era de agua potable, el 2.59% de los pozos se destinaban para uso industrial y finalmente el 0.51% de los pozos se destinaba para uso recreativo (CEAS 1999). En el 2003, la Comisión Nacional del Agua (CNA), realizó un estudio de actualización del censo, en el que determinó la existencia de 2948 pozos y sólo 2441 se encontraban activos, se clasificaron estos en tres categorías, agropecuario con un total de 1830, abastecimiento publico 540 e industrial con 71 pozos. Para el 2009 la cifra se incremento a 3360 pozos y la profundidad del nivel estático ya era de 110 m (Trujillo, 2009). Para dimensionar esta cifra, lo podríamos comparar con los 2598 pozos que existen en todo el estado de San Luis Potosí (INEGI 2007). En términos de densidad, el valle de Celaya tiene en promedio 1 pozo cada km^2 , en tanto que en San Luis Potosí habría 1 pozo cada 24.5 km^2 . Esta densidad puede ser aun mayor en Celaya si consideramos solo el área del valle.

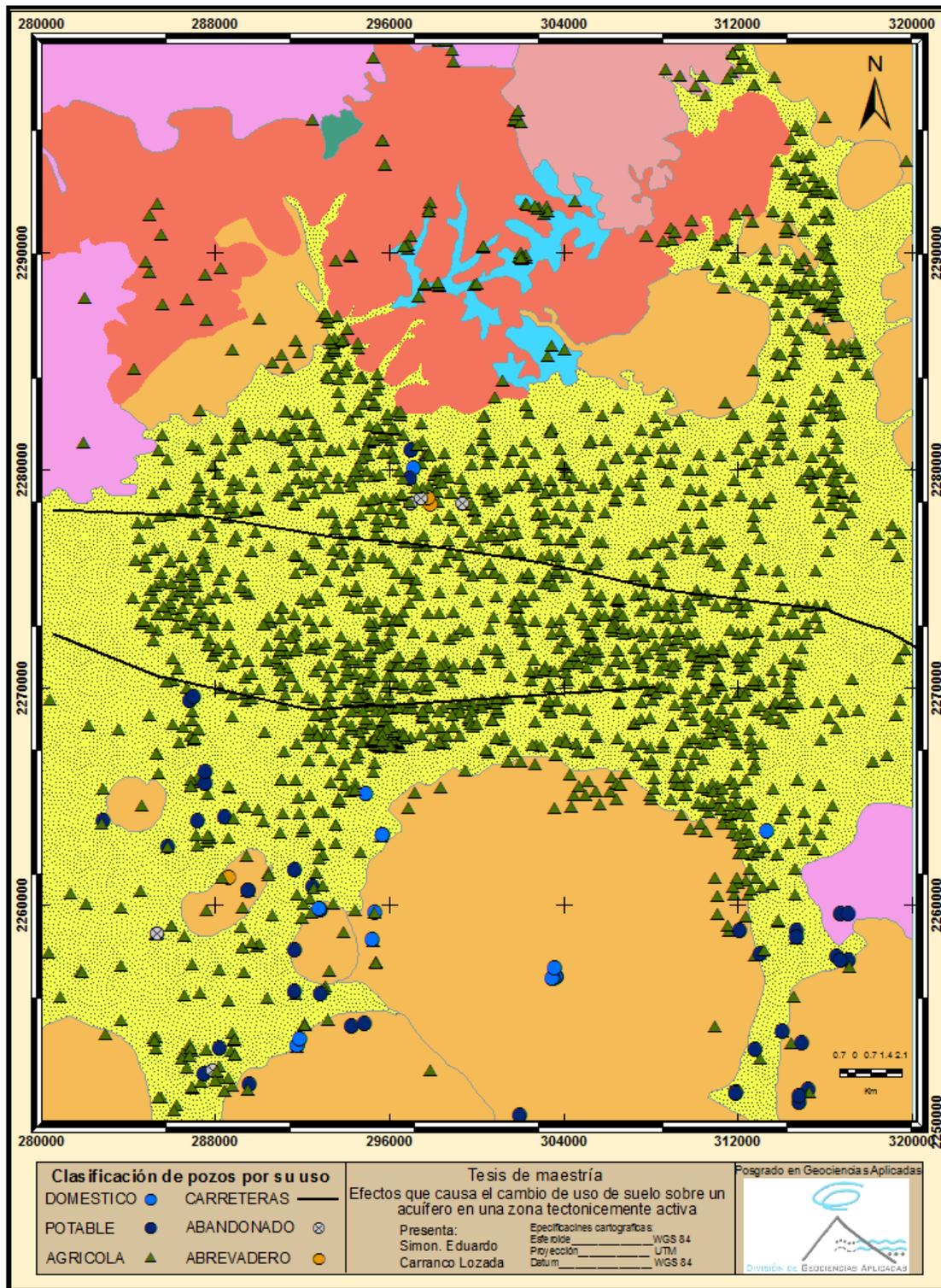


Figura 3.2 Plano que muestra la densidad de pozos sobre el área de estudio, la densidad es del orden de 1 km²/pozo.

III.3 Evolución de Cono de Abatimiento.

El considerar la elevación del nivel estático, es de suma importancia, cuando se quiere conocer la dinámica del acuífero. Con respecto a la elevación del nivel estático, en el año de 1956, se puede observar que no había tantas alteraciones al acuífero (Figura 3.3). En este año el número de pozos no rebasa los 100. La actividad agrícola y el desarrollo del acuífero se ubicaban principalmente en el valle donde se encuentran los municipios Cortázar, Jaral del Progreso y Valle de Santiago otra zona donde hubo este mismo desarrollo fue al Oeste de la ciudad de Celaya. Con la extracción del agua subterránea en el valle, se inició la formación de un pequeño cono de abatimiento alargado de orientación NW a SE. La figura (Figura 3.3) muestra que al Noreste del área de estudio y cerca del poblado de Escobedo se encuentran los altos piezométricos (1760 msnmm), que indicaban una importante zona de recarga.

El censo de 1990, la CEASG reporta una piezometría muestra una mayor extensión del cono de abatimiento que llega hasta la ciudad de Celaya (Figura 3.3), con un nivel piezométrico bajo (1678.45 msnmm) y además, un descenso generalizado de los niveles piezométricos en el valle. En este periodo, aun se muestra un alto piezométrico hacia el poblado de Escobedo (1740.74 msnmm).

Para el año de 1998, el cono de abatimiento se definió hacia el centro del valle, tomando una forma alargada en las direcciones NW-SE y pasa por la ciudad de Celaya.

En el censo del 2000, el número de pozos no tuvo importantes variaciones y el cono de abatimiento muestra una recuperación de sus niveles hacia Celaya; sin embargo, hacia Villagrán, el cono de abatimiento tuvo importantes descensos.

Tomando en cuenta la información disponible, se realiza el cálculo de la evolución del nivel estático entre 1956 al 2000. El procedimiento para el cálculo de la evolución del nivel estático, es la sustracción entre la elevación del nivel estático inicial (se refiere a los datos de piezometría de fecha más antigua) menos la elevación del nivel estático final (los datos de piezometría del último año). El resultado de la sustracción entre estos dos periodos muestra el cambio en los niveles, si el resultado es positivo, quiere decir que el acuífero presenta un abatimiento en ese período y si el resultado es negativo quiere decir que el acuífero tuvo una recarga.

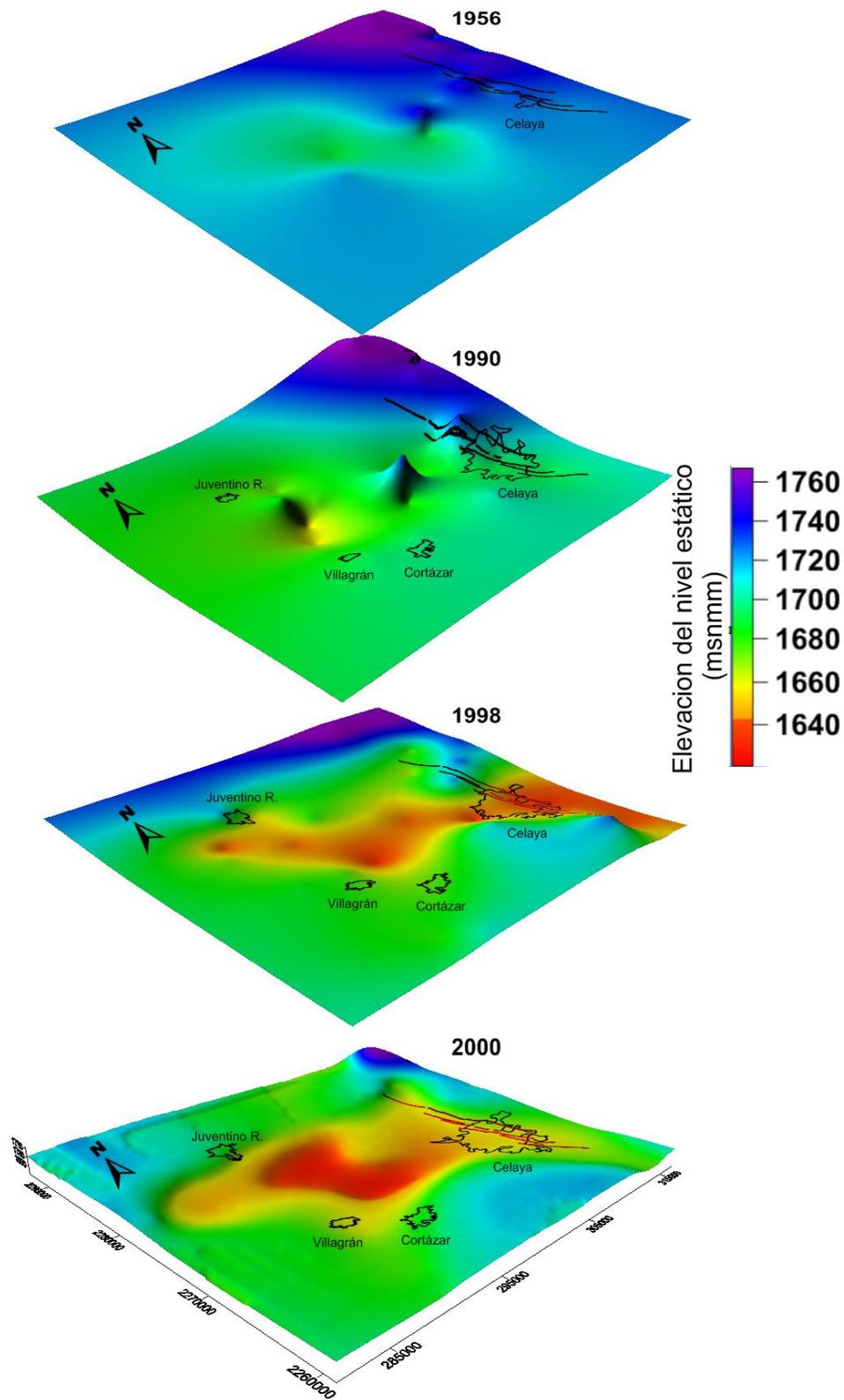


Figura 3.3 Evolución de piezometría de 1956 a 2000, a finales de los 50's, las zonas de recarga se presentan donde la elevación del nivel estático es mayor.

IV PERCEPCIÓN REMOTA Y CAMBIO DE USO DE SUELO

IV.1 Sensores Remotos

En la actualidad el uso de nuevas tecnologías, facilita la elaboración y desarrollo de técnicas que antes eran imposibles ó se consideraban tediosas por la cantidad de parámetros que se manejaban y por la gran extensión de terreno que se consideraba en un área estudio. Actualmente, se utiliza una nueva herramienta para desarrollar proyectos que cuantifican el cambio de cobertura vegetal y uso de suelo, esta nueva herramienta se denomina percepción remota. *La Percepción Remota (Teledetección) se define como la ciencia y arte de obtener información acerca de la superficie de la tierra, sin estar en contacto con ella,* (Chuvienco, 1996).

Los sensores remotos permiten la integración de un amplio conjunto de técnicas, conocimientos y tecnologías para la observación, el análisis, y la interpretación de los fenómenos que suceden sobre la superficie del planeta. Los sensores remotos se apoyan de las plataformas espaciales, donde están colocados estos sensores y como una herramienta para varias ciencias de la Tierra, que hacen uso de imágenes de satélite.

IV.2 Radiación electromagnética

Sobre la tierra y sin excepción, todos los objetos emiten radiación electromagnética, algunas veces, los objetos reflejan la radiación que ha sido emitida por otros objetos. Con el registro de la radiación emitida o reflejada, y aplicando el conocimiento de su comportamiento cuando pasa a través de la atmósfera e interactúa con los objetos, la percepción remota muestra las propiedades de distintos objetos, tales como la vegetación, estructuras, suelo, rocas, o cuerpos de agua sobre la superficie de la tierra (Campbell, 2007).

El espectro electromagnético está relacionado con el conjunto de ondas electromagnéticas, en el no existen divisiones o líneas que delimiten exactamente una región de otra. En los sensores remotos, las regiones de interés van desde 0.4 micras que es la región del visible hasta la región del infrarrojo térmico de 100 micras (Figura 4.1). La región del visible, que es el espectro que puede percibir el ojo humano, es la mas pequeña y abarca desde 0.4 micras hasta 0.7 micras. La región del visible se subdivide en tres partes según su longitud, azul (0.4 a 0.5micras), verde (0.5 a 0.6 micras) y rojo (0.6 a 0.7 micras). La región del infrarrojo (IR), también esta dividida en tres categorías; IR cercano (0.7 a 1.3 micras), IR medio (1.3 a 3 micras) e IR térmico (3 a 100 micras). La región de microondas, es la que presenta más largas longitudes de ondas utilizadas en los sensores remotos y van desde 1 mm a 1m.

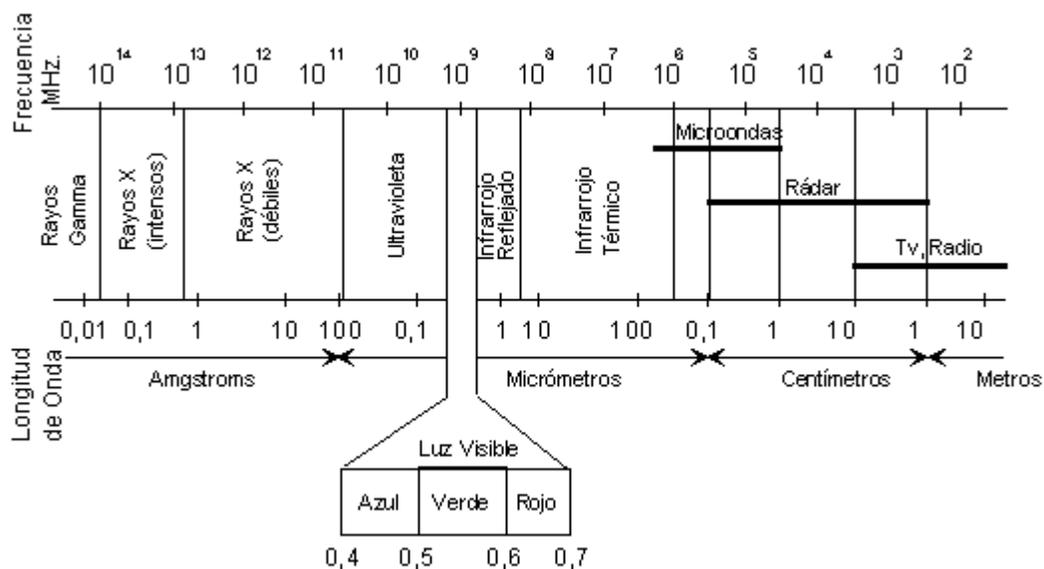


Figura 4.1 Frecuencias y longitudes de onda del espectro electromagnético.

La energía electromagnética cuenta con tres propiedades:

Longitud de onda (λ) es la distancia desde una cresta de una onda hasta la siguiente cresta (Figura 4.2).

Frecuencia es el número de crestas que pasan por un punto fijo en periodo determinado. La unidad más común en la que se mide la frecuencia es el Hertz (1/seg).

Amplitud (A) es la altura máxima de la cresta, a menudo la amplitud se mide en niveles de energía (watts/m²).

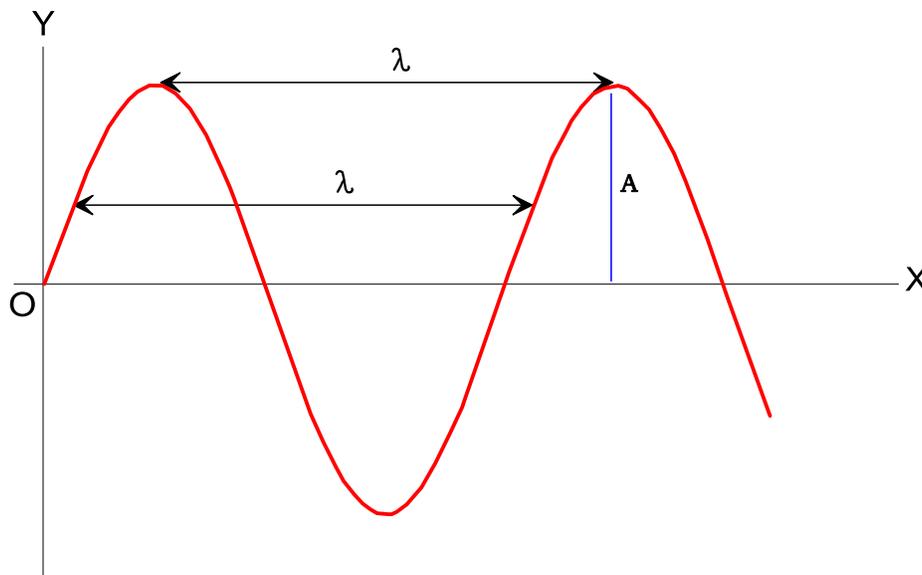


Figura 4.2 Propiedades de la energía electromagnética

IV.3 Interacción de la energía con la atmósfera y la superficie de la tierra

Independientemente del origen, la radiación que es detectada por los sensores remotos tuvo que atravesar la atmósfera de la Tierra. Bajo estas condiciones, los efectos atmosféricos pueden tener impactos en la calidad de los datos captados por el sensor. La teledetección implica el conocimiento de la interacción de la energía electromagnética con la atmósfera. Debido a sus altas concentraciones, algunos deben considerar los efectos que causan el polvo, humo, niebla y otras impurezas atmosféricas. Cuando es fácil apreciar los efectos sobre el ambiente, estos efectos son visibles al ojo humano, pero hay casos que aun en el aire claro, existen partículas que provocan ruido en la imagen. En estos casos, como la

energía solar pasa a través de la atmósfera, esta sujeta a modificaciones por parte de varios procesos físicos como lo son la dispersión, absorción y la refracción.

La dispersión es el desvío de la energía electromagnética por las partículas en la atmósfera. La *dispersión Rayleigh* es común cuando la radiación interacciona con las moléculas de la atmósfera y otras partículas de diámetro mas pequeño, (Lillesand, 2007).

La absorción de la radiación ocurre cuando la atmósfera evita o atenúa la transmisión de la radiación de su energía (Campbell, 2007). Los principales absorbentes de la radiación solar son el vapor de agua, dióxido de carbono y el ozono.

La refracción es la desviación de los rayos de luz en un área de contacto entre dos medios que trasmiten la luz, esta también se presenta en la atmosfera, cuando la luz pasa a través de sus capas con variaciones de humedad y temperatura, estas variaciones dependen de la densidad de la capa de la atmosfera (Campbell, 2007).

IV.4 Metodología del análisis de las imágenes

El desarrollo de esta metodología consta de la etapa de pre-procesamiento y la etapa de procesamiento (Figura 4.3). La primera consiste en aplicar a las imágenes los procesos necesarios para la rectificación y calibración de la imagen. Los principales procesos que se llevan acabo en esta etapa son; corrección geométrica, arreglo de los modelos digitales de elevación (interpolación de valores faltantes sobre el DEM), la banda del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), cálculo de radiancia, y cálculo de la reflectancia con corrección atmosférica. En la segunda etapa se realizan procesos más específicos, como el análisis de firmas espectrales.

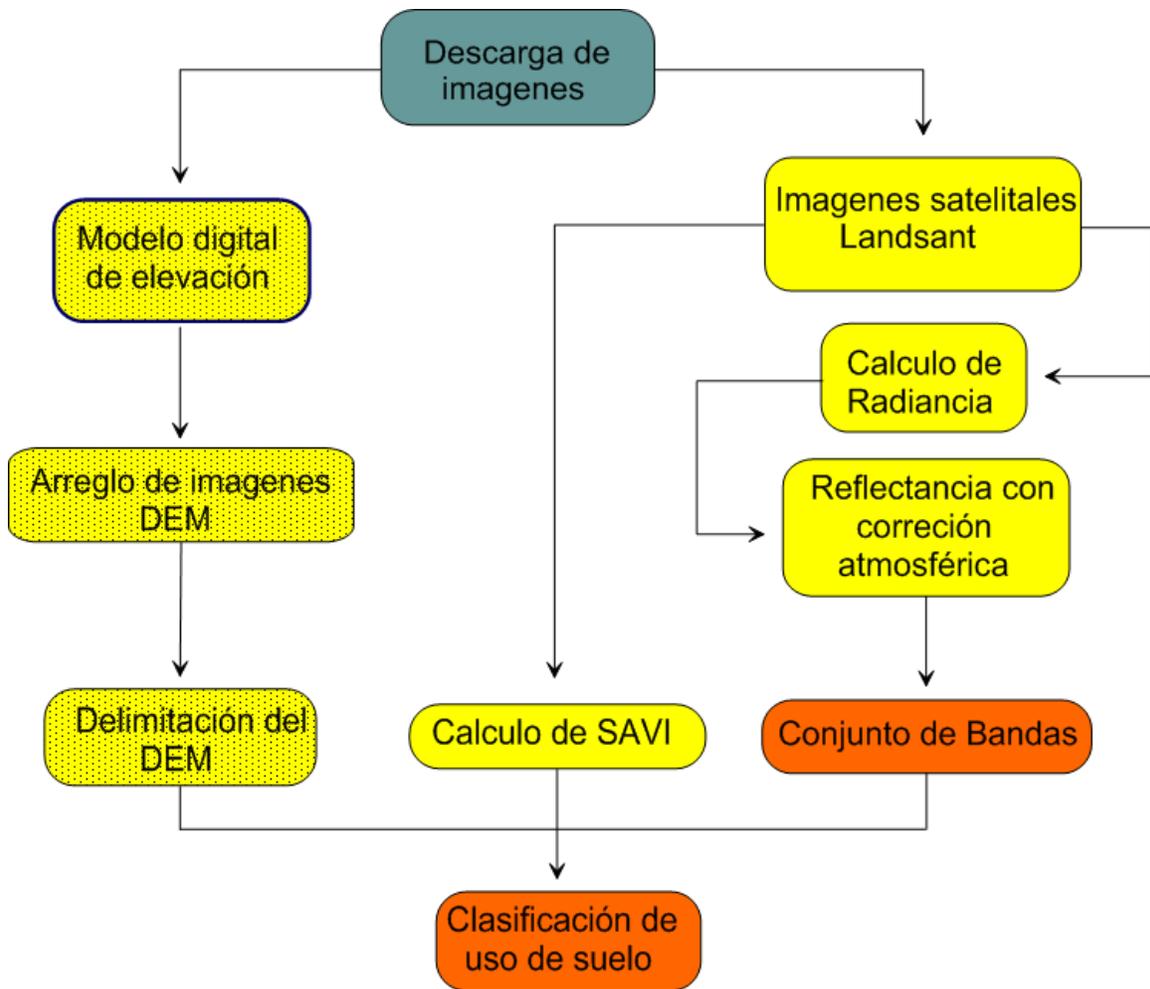


Figura 4.3 Metodología para la clasificación de imágenes Satelitales

Los insumos digitales para evaluar el cambio de uso de suelo se descargaron del sitio *glovis.usgs.gov*, la escena que se tomo como base para clasificar el uso de suelo es la imagen **LM10290461976079AAA02** del 19 de marzo del 1976, esta imagen es una landsat mss (Multispectral Scanner) con path 29 y row 46, con una resolución espacial de 60 metros. La imagen final para la evaluación de la dinámica de cambio fue la escena **LT50270462009328CHM00** del 29 de Mayo del 2009 esta imagen es una landsat tm (Tematical Mapper) con path 27 y row 46, con una resolución espacial de 30 metros. Se descargaron otras escenas dentro de este periodo con el fin de visualizar la dinámica del Valle de Celaya (Tabla 4.4), se

descargó una imagen extra **LT50270462011078CHM00** del 19 de marzo del 2011, para mostrar el estado actual del área de estudio.

Tabla 4.1 Escenas Landsat (mss y mt), utilizadas en esta investigación.

ID	Día	Mes	Año	Sensor	Path	Row	Calidad	N° de canales
LM10290461976079AAA02	19	3	1976	1-3 mss	29	46	9	4
LT40270461989361XXX03	27	12	1989	4-5 tm	27	46	9	7
LT50270461999013AAA02	13	1	1999	4-5 tm	27	46	9	7
LT50270462000096XXX02	6	4	2000	4-5 tm	27	46	9	7
LT50270462009328CHM00	29	5	2009	4-5 tm	27	46	9	7
LT50270462011078CHM00	19	3	2011	4-5 tm	27	46	9	7

Una vez descargada la imagen, es necesario calcular el valor de radiancia para cada pixel (ND). La radiancia es la medida radiométrica que describe la cantidad de energía radiada por un cuerpo, en una determinada dirección, las unidades de la radiancia en el sistema internacional (SI) es el watt.

La reflectancia, se refiere a la relación entre la potencia electromagnética incidente con respecto a la potencia que es reflejada en una interface.

La corrección atmosférica, evalúa y elimina las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie de la tierra.

La clasificación de las escenas, se realiza con la técnica de árbol de decisiones, esta técnica permite clasificar de una manera más específica y a su vez permite resaltar las características de nuestro interés. La manera en que se desarrolla la clasificación por árbol de decisiones es por el principio de matemático binomial (Figura 4.4).

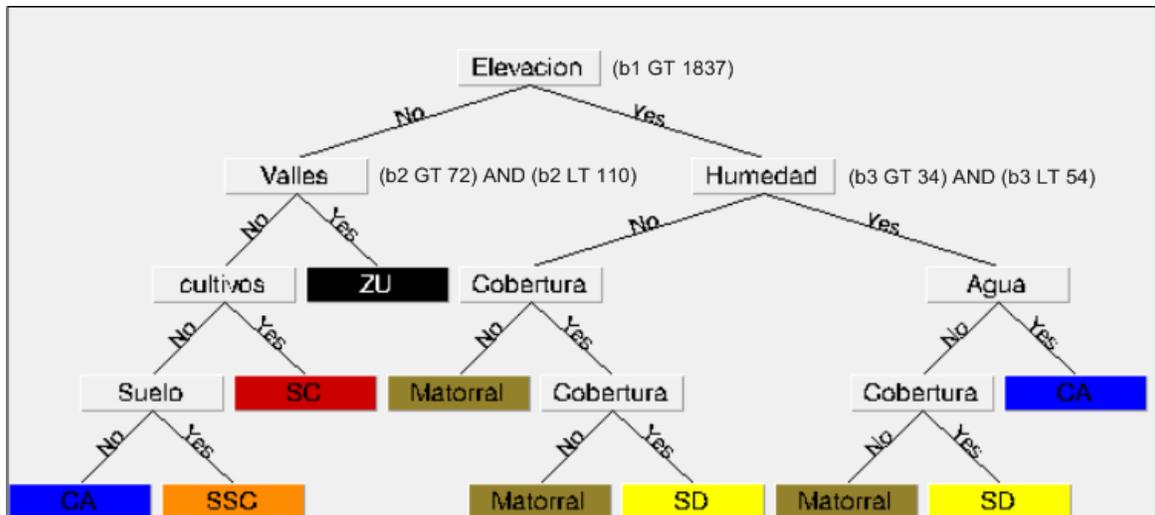


Figura 4.4 Ejemplo del desarrollo del árbol de decisiones, las condiciones se encuentran anidadas en el punto donde se bifurca. Cobertura

Donde:

b1= Banda del modelo digital de elevación

b2= Banda 1 utilizada para resaltar la zona urbana.

b3= Banda 4 utilizada para resaltar cuerpos de agua.

GT= Se refiere a la condición de mayor que

LT= Se refiere a la condición menor que

Nota: los números que vienen después de los parámetros se refieren a los valores considerados en la condición.

IV.5 Cuantificación del cambio de uso de suelo

Se tiene como objetivo cuantificar y comparar los cambios de uso de suelo en los últimos 33 años, por medio de imágenes satelitales. La clasificación de las imágenes fue mediante el método de clasificación supervisada con una interpolación bilineal, la cual es utilizada para la agrupación de píxeles por medio de los números digitales (ND), que se encuentren dentro del rango de valores de una categoría. El método de interpolación bilineal, es el más utilizado para la

clasificación de imágenes, debido a que éste añade un pixel mediante el cálculo de la media de los valores de color de los pixeles adyacentes. La cuantificación del cambio de uso de suelo, se obtiene con la matriz de transición. Se construye con un arreglo simétrico de dos ejes y cada eje contiene las mismas clases a evaluar. En uno de los ejes (abscisas) se encuentran las áreas correspondientes al año base y en otro eje (ordenadas) se encontraran las áreas a las cuales cambió cada clase en el año final. La matriz se genera con dos propósitos: 1) Identificar la diagonal principal. La diagonal principal contiene el área de cada clase que no cambia en el periodo evaluado; 2) Identificar el área de la clase que cambio. Posteriormente, con las áreas que se obtiene de la matriz mencionada sirven para cuantificar el cambio de uso de suelo, la tasa de cambio se calcula con la siguiente ecuación (Puyravaud, 2002).

$$T = [(A_2/A_1)^{(1/(t_2 - t_1))}] - 1$$

Donde:

T= Tasa de cambio

A₁= Area de fecha inicial del tiempo t₁

A₂= Area de fecha inicial del tiempo t₂

t₂. t₁= El numero de años en el período considerado

V RESULTADOS

V.1 Perfiles topográficos y nivel piezométrico

Se realizó un levantamiento topográfico dentro de la ciudad de Celaya en dirección Este-Oeste, casi perpendicular al tren de falla de orientación NNW-SSE, perteneciente al sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende. Con este

levantamiento se midieron los movimientos diferenciales dentro de la ciudad y el desplazamiento vertical. El trazo de las secciones se realizó al Este de la ciudad donde pasan las fallas (Figura 5.1). El límite al sur fue la sección topográfica que se trazó sobre las fallas Mercado de Abastos y la Corona, al Norte se trazó sobre la falla la Corona y la falla Universidad Pedagógica, dentro de estas dos se encuentran tres secciones más con la misma dirección.

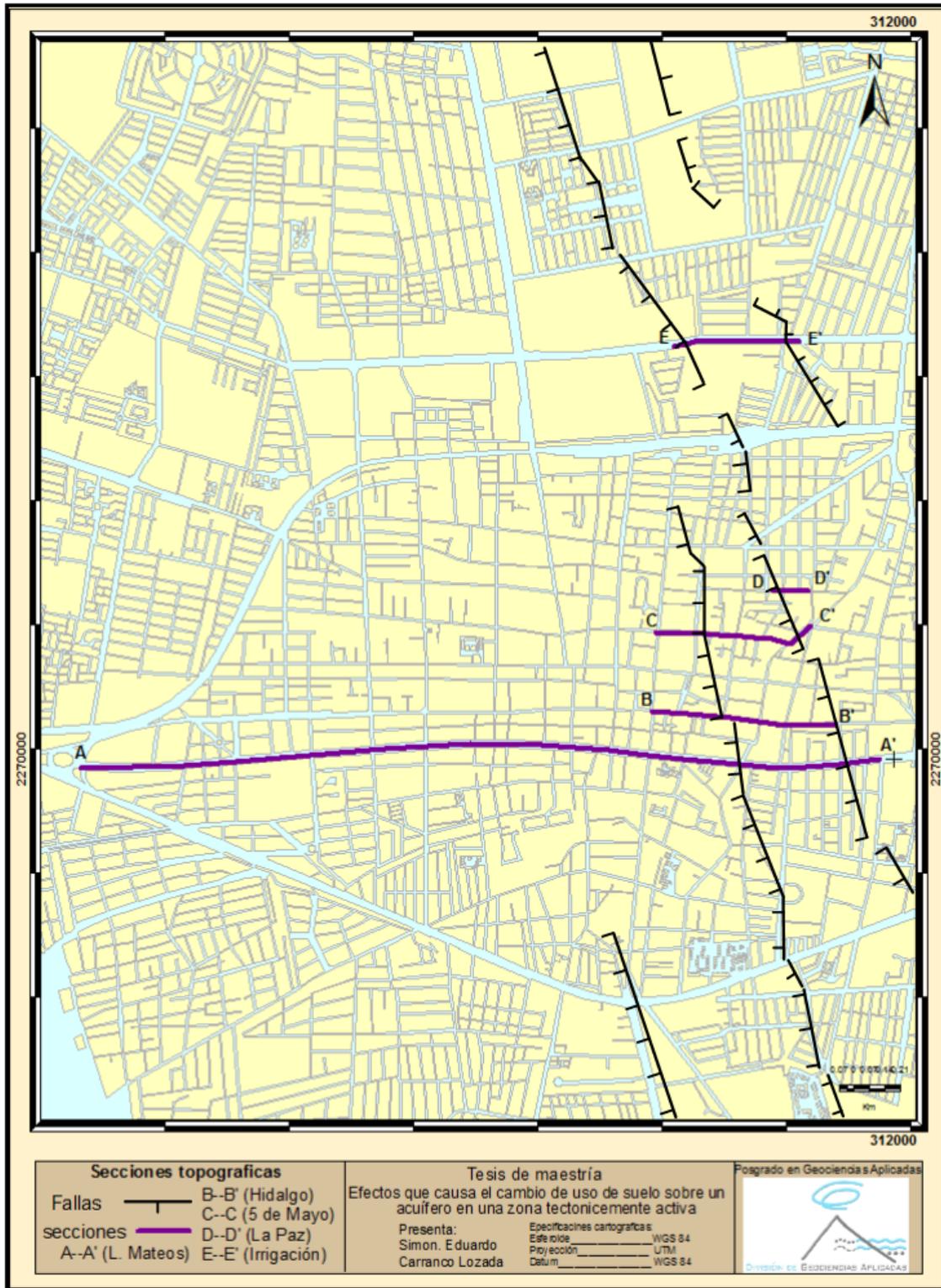


Figura 5.1 Ubicación de las secciones topográficas (línea morada) en la zona de fallas dentro de la ciudad.

V.1.1 Secciones topográficas y nivel piezométrica

La sección topográfica (A—A'), se levantó sobre el Boulevard principal López Mateos, que corre en dirección Este-Oeste, su punto inicial tiene como coordenadas X: 3111,59.38, Y: 2,269,972.4 y una elevación Z: 1,774.18, su punto final X: 311,1978.98, Y: 2,269,972.39 y en Z: 1,776.29 con una longitud de 3626.17m. Esta sección atraviesa la falla Mercado de Abastos y la falla de la Corona, estas dos fallas escalonadas de tipo normal, presentan el techo caído hacia el Este, en la falla, el desplazamiento fue de 1.03 m, (Figura 5.2). Un punto relevante de esta sección es que su cota inicial es menor que la final aun considerando el desnivel de las fallas, con esto se puede inferir que la elevación del terreno crece de Oeste a Este. Posterior a la sección topográfica se adjunta la gráfica de elevación del nivel estático. La diferencia de elevación del nivel estático entre el punto inicial y el final para esta sección fue de 44 metros, Como puede observarse (Figura 5.2), la sección se encuentra en un borde del cono de abatimiento.

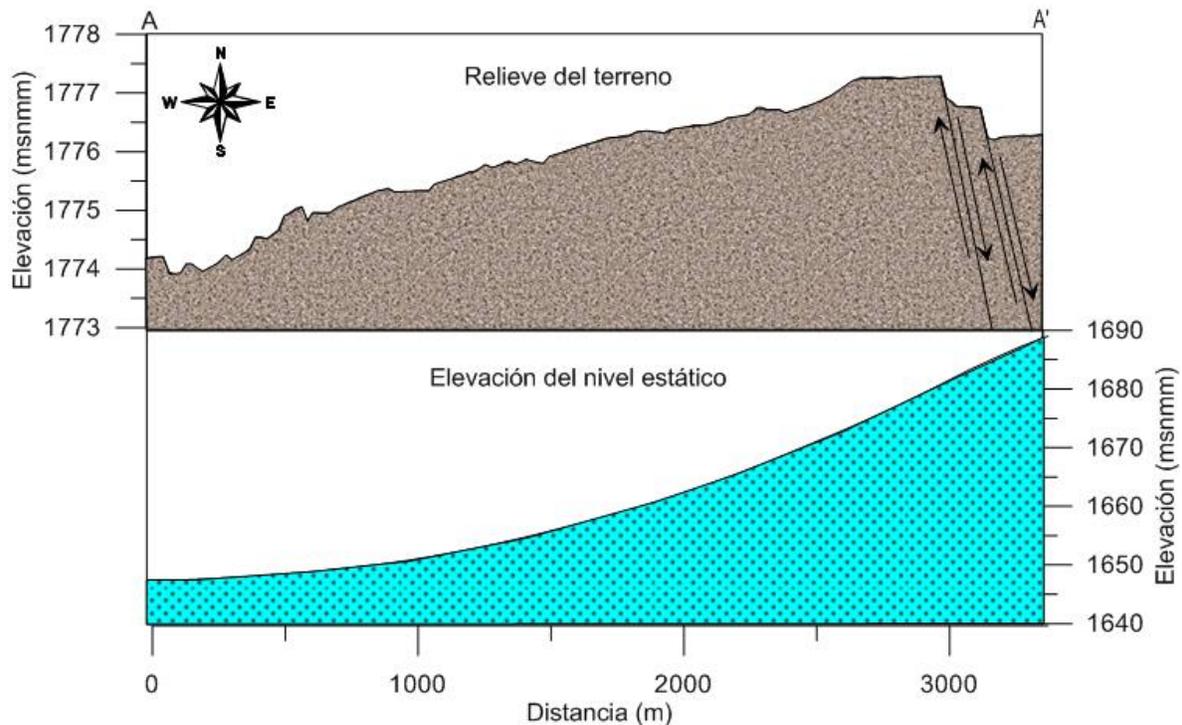


Figura 5.2 En la parte superior se encuentra el perfil del relieve topográfico y en la parte inferior se encuentra la elevación del nivel estático para la sección A—A'.

La sección topográfica (B—B',) se trazó sobre la calle Hidalgo, su punto inicial tiene como coordenadas X: 310,888.477, Y: 2,270,332.37 y una elevación Z: 1,762.89, su punto final X: 311,625.88, Y: 2,270,321.16 y en Z: 1,759.51 tiene una longitud de 842.8 m. Como referencia, esta sección se encuentra al Norte de la sección A—A', atraviesa las fallas Mercado de Abastos y la Corona, estas fallas escalonadas tienen el techo caído al Este. En la falla el desplazamiento fue de 3.5 m (Figura 5.3), el nivel de la cota descende visiblemente en dos escalones. Posteriormente, se pone en el mismo contexto de comparación del nivel piezométrica con la sección topográfica. La elevación del nivel estático para el mismo tramo de esta sección topográfica B—B', presenta una diferencia de 18 m.

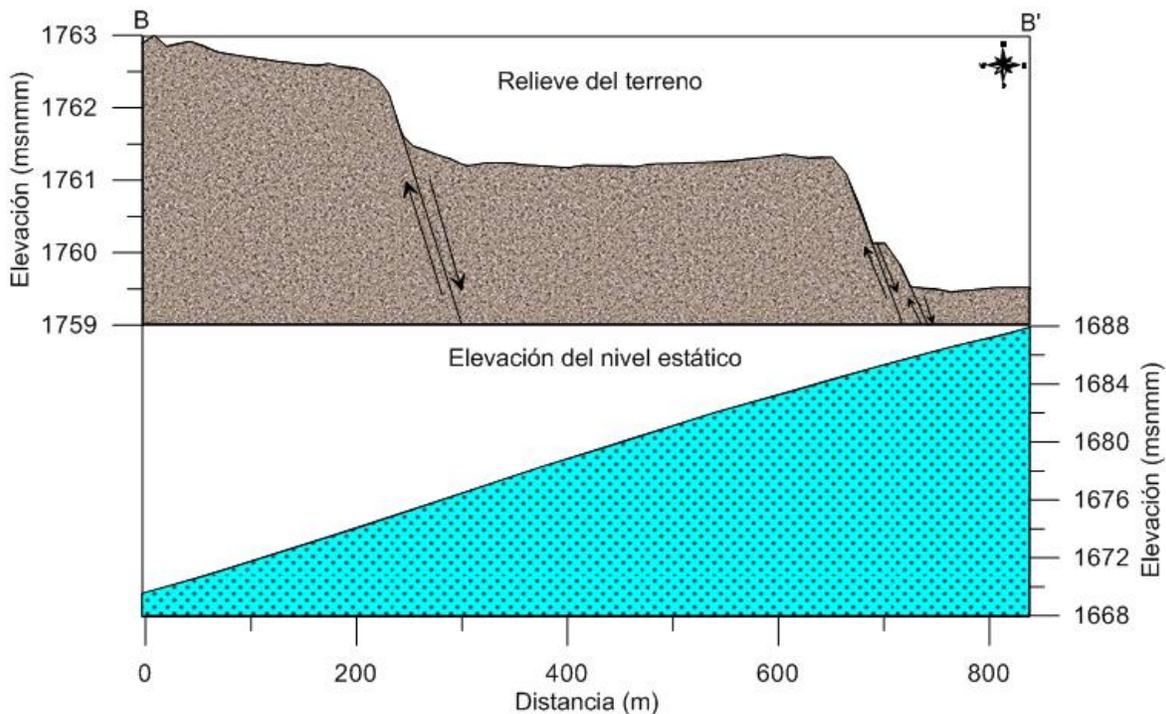


Figura 5.3 En la imagen se muestran dos secciones, en la parte superior se muestra la sección topográfica B—B' que se trazó sobre la calle Hidalgo. En la parte inferior de la imagen se muestra el perfil piezométrico correspondiente a la misma sección.

La sección topográfica (C—C',) se trazó sobre la calle 5 de mayo y una parte sobre la calle Río Bravo, esta ultima tiene una orientación hacia el Noreste, el punto inicial de esta sección se tomó sobre la calle 5 de Mayo con coordenadas X: 310,910.05, Y: 2,270,590.37 y en Z: 1,763.13, su punto final se encuentra sobre la calle Río Bravo con coordenadas X: 311,620.14, Y: 2,270,4899.9 y en Z: 1,759.9 con una longitud de 733.56 m. Esta sección se levanto en la dirección Oeste-Este, pero como la calle 5 de Mayo, intersecta a la calle Río Bravo se continuó el levantamiento sobre esta ultima, hasta cortar una de las fallas. En la falla, el desplazamiento fue 2.76 m (Figura 5.4), las secciones A—A' y B—B,' son las que presentan mayor movimiento diferencial. En el perfil piezométrico, correspondiente a esta sección, existe una diferencia de elevación del nivel de 16 m.

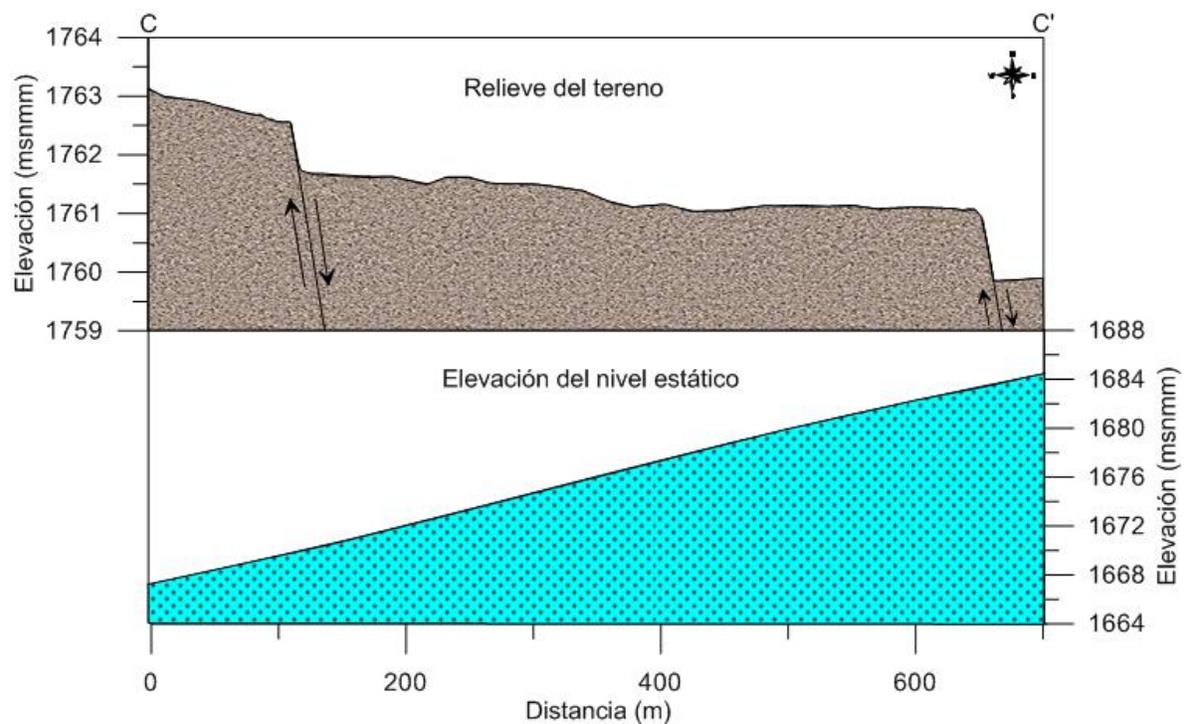


Figura 5.4 La imagen muestra en la parte superior la sección de relieve del terreno, y en la parte inferior la sección piezométrica. La sección topografía se trazó empezando en la calle 5 de Mayo y finalizando en la calle Río Bravo.

La sección topográfica (D—D',) se trazó sobre la calle La Paz, fue la sección más corta, su punto inicial con coordenadas X: 311,415.9, Y: 2,707,79.42 y en Z: 1,761.09 m, su punto final con coordenadas en X: 311691.87, Y: 2270773.77 y en Z: 1759.74 m con una longitud de 195.53 m. Esta sección solo corta a la Falla La Corona, en la falla el desplazamiento fue de 1.09 m (Figura 5.5). En esta sección se muestra el escalón de falla con menor desplazamiento en comparación con las secciones B—B' y C—C'. Su perfil piezométrico muestra una diferencia de elevación del nivel estático de 5m.

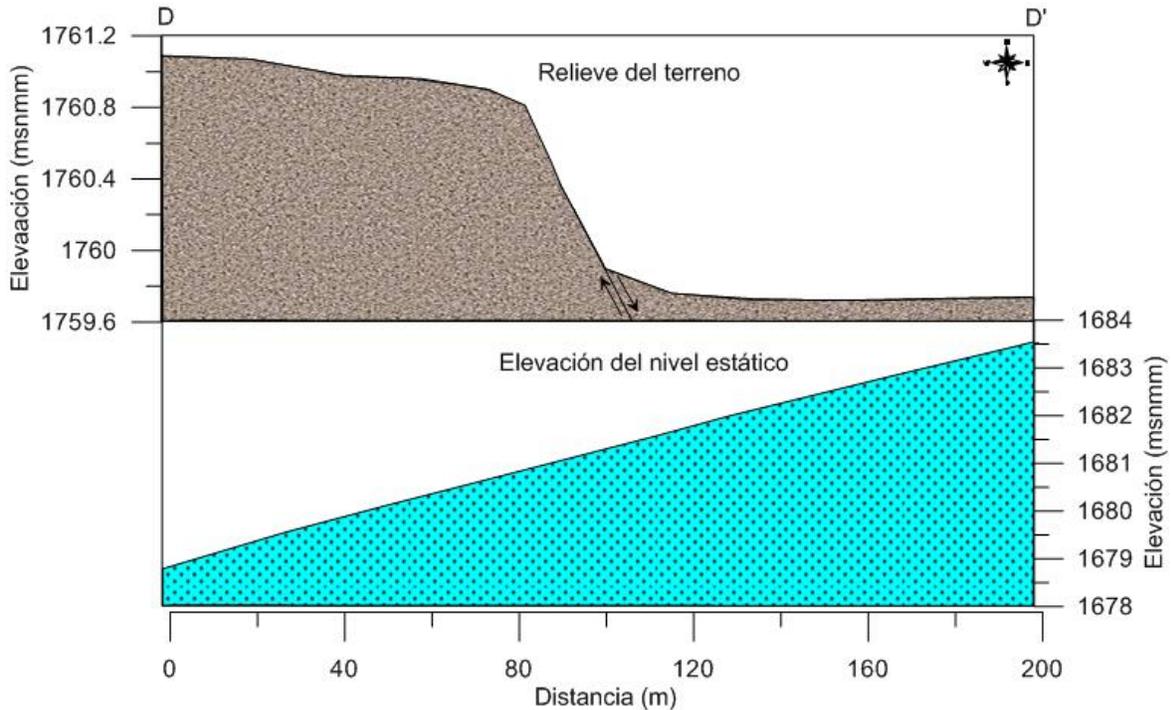


Figura 5.5 El gradiente topográfico disminuye a 1.09 m sobre el relieve del terreno (perfil superior), el perfil de piezometría al igual disminuye a 5m.

La sección topográfica (E—E',) en su mayoría se trazó sobre la calle Irrigación, se comenzó el trazo de esta sección en las coordenadas X: 310,998.2, Y: 2,271,881.78 y en Z: 1,756.68 m, y su punto final con coordenadas X: 311,595.89, Y: 2,271,907.03 y en Z: 1,756.25 m, con una longitud de 580.5 m. Esta sección corta dos fallas, la Falla La Corona que tiene el techo caído hacia el Este y la Falla Universidad Pedagógica con techo caído al Oeste, esta serie de fallas forman un graben (Figura 5.6). El desplazamiento medido en la Falla La Corona, es de 2.26 m y el desplazamiento en la Falla Universidad es de 2.06 m. Sobre el perfil se aprecian diferentes fallas que son el resultado de la formación del graben. El perfil piezométrico correspondiente para esta sección tiene una diferencia de elevación del nivel estático de 25 m.

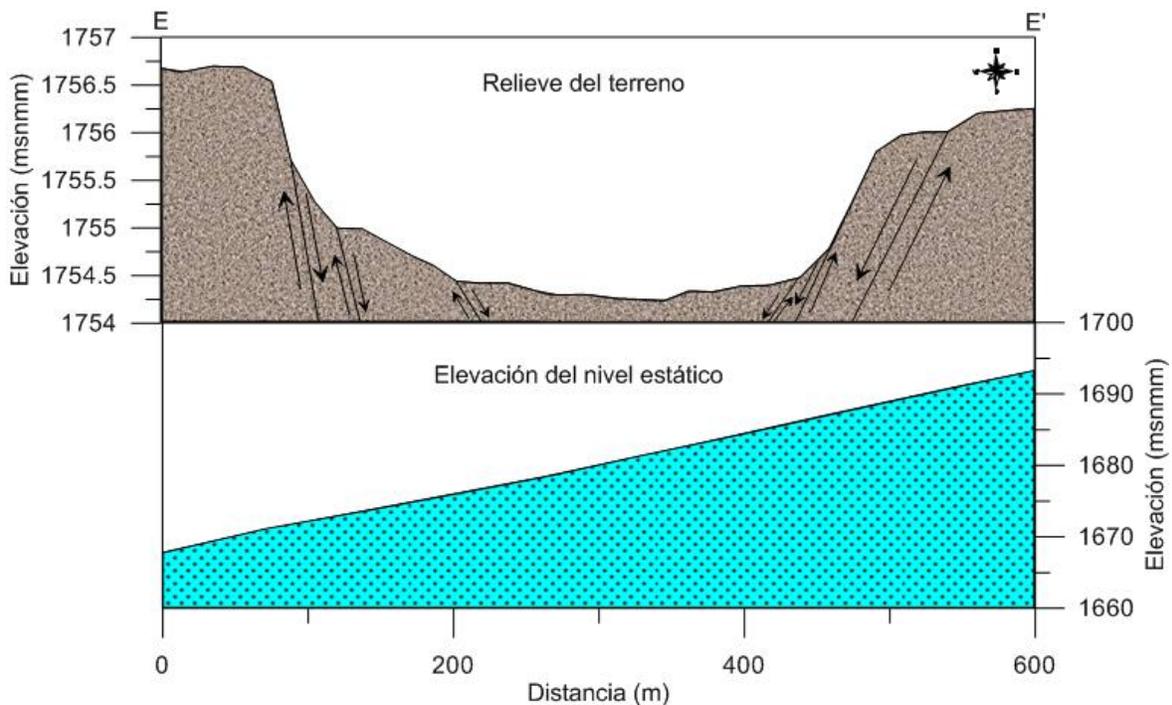


Figura 5.6 Sección E-É, sobre la calle Irrigación, el perfil corto el graben.

V.2 Evolución de la elevación del nivel estático

Tomando en cuenta la información disponible se construyó el mapa de evolución del nivel estático, para la elaboración de éste mapa se considero los datos de piezometría de 1956 como reseña inicial y como datos finales la piezometría del 2000. El mapa de evolución se generó con la piezometría del 2000 menos la piezometría de 1956, éste acomodo permitió visualizar desde una mejor perspectiva la evolución en términos de descensos de la elevación del nivel estático.

La evolución del nivel estático para el acuífero de Celaya (Figura 5.7), muestra las partes menos evolucionadas en color azul, estas zonas dentro de un rango de profundidad de 0 a -25 m, corresponden a las serranías que encierran al valle de Celaya. Las partes que van de un color azul claro a un color verde claro tiene un rango de valores de -35 a -55 m, estas zonas corresponden al margen cercano a las serranías. Las zonas que van del color amarillo al anaranjado corresponden a valores de -65 a -75 m, estas zona se relaciona con la forma del valle. Las zonas que van del anaranjado al rojo son las mas profundas con valores de -85 a -115 m, estas zonas corresponden a la parte profunda del cono de abatimiento.

En la porción occidental de la ciudad de Celaya, es donde se encuentran los valores de evolución más significativos, esta zona tiene valores que van desde -75 a -85 m.

La evolución sobre el valle, para el municipio de Villagrán muestra que se encuentra dentro de un rango de valores de -55 a -65 m, para el municipio de Juventino Rosas puesto que queda muy cercano a la sierra norte del valle no presenta evolución relevante, en el municipio de Cortázar tampoco existe una evolución con valores de profundidad significativos.

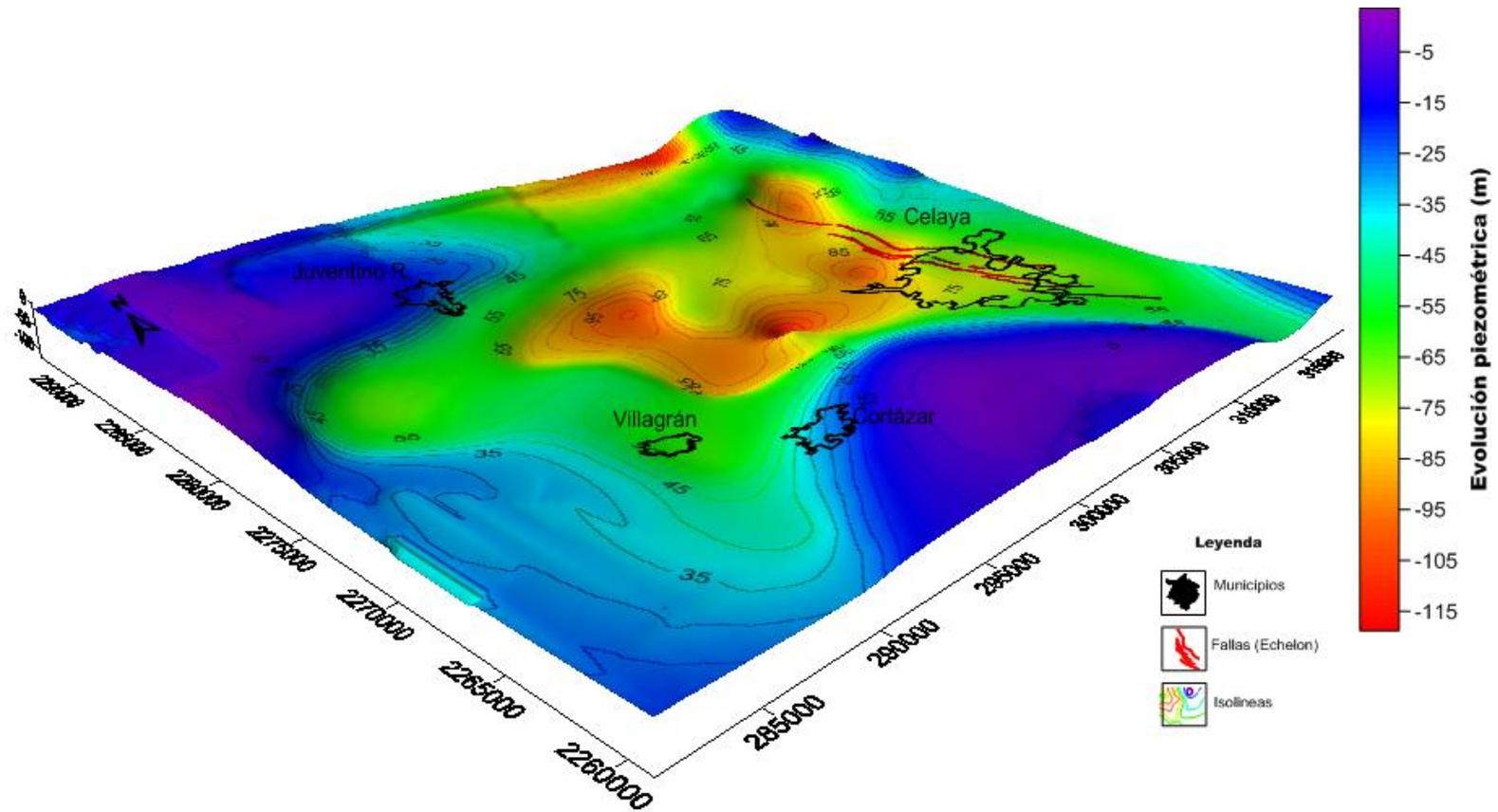


Figura 5.7 Evolución del nivel estático dentro del área de estudio, los valores con mayor profundidad en el cono se presentan al centro del valle, conforme a la evolución Celaya se encuentra sobre el borde del cono de abatimiento.

V.3 Dinámica de cambio de uso de suelo

V.3.1 Clasificación de uso de suelo 1976

Sobre el área de estudio se elaboró los mapas de cambio de uso de suelo con imágenes Landsat (MSS y MT).

La actividad principal que se realizaba sobre el valle en el año de 1976 era la agricultura de temporal, solo se preparaba la tierra para ser regada en la temporada de lluvia. Para este año base, las áreas que ocupaban la clases suelo desnudo (SD) 41,137,200 m², suelo sin cultivar (SSC) 918,828,900 m², Matorral 991,274,400 m², zona urbana (ZU) 19,352,700 m², suelo cultivado (SC) 35,892,000 m² y cuerpo de agua (CA) 320,400 m². Quiere decir que de las clases que se desarrollan en el valle el 87.3% es ocupado por la clase SSC y solo el 3.5% es ocupado la clase SC. Sobre la imagen (Figura 5.8), de 1976 se aprecia sobre el valle en colores naranja las zonas agrícolas que son productivas solo en temporada de lluvia y en rojo las zonas agrícolas que se abastecen por sistemas de riego.

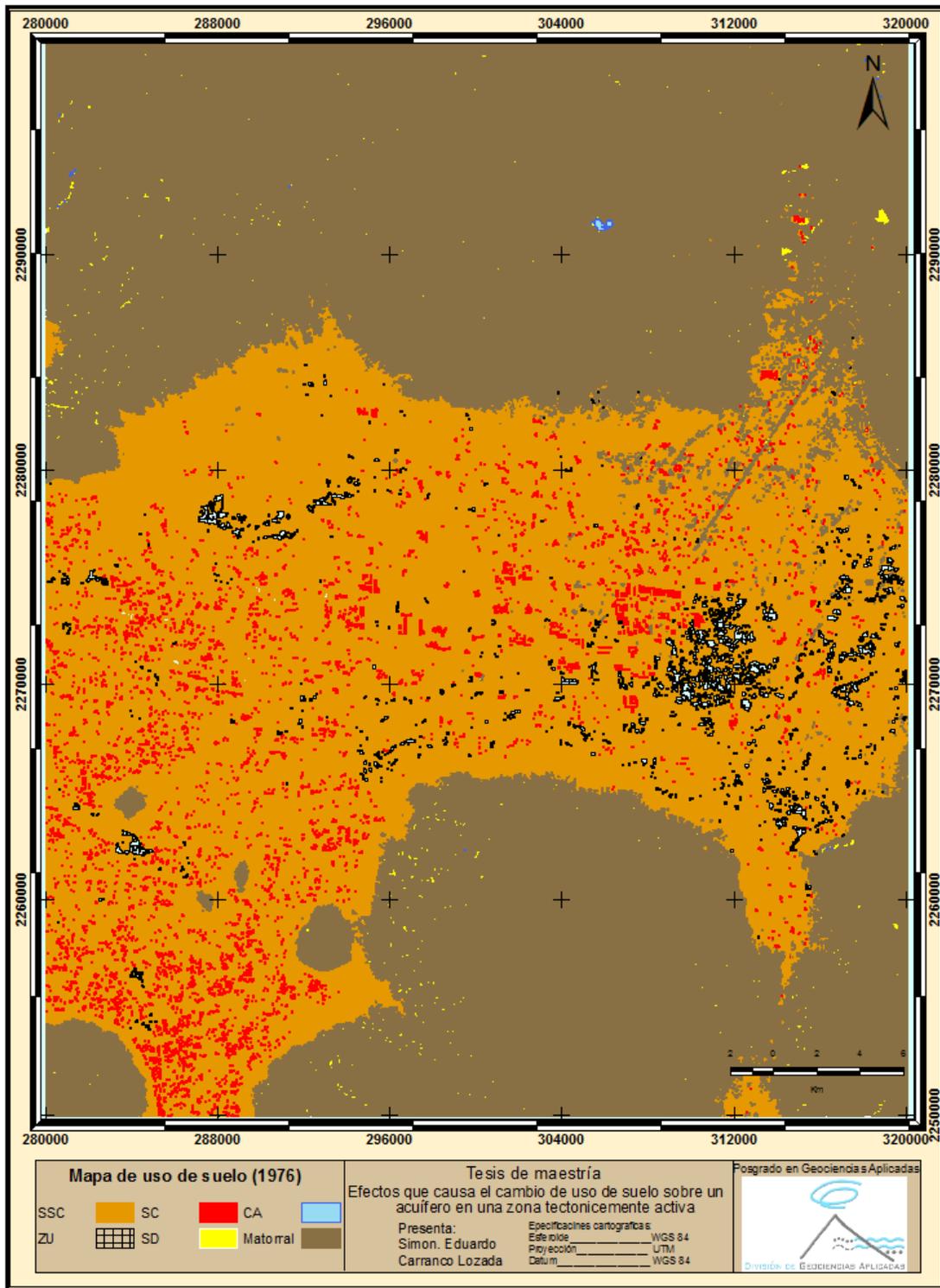


Figura 5.8 Distribución del uso de suelo en 1976, tomado como año base y sus clases: cuerpos de agua (CA), Matorral (Matorral), suelo cultivado (SC), suelo sin cultivar (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU).

V.3.2 Clasificación de uso de suelo 1989

En la clasificación de la escena para 1989 (Figura 5.9), la actividad agrícola tuvo un visible cambio. Se presentaron cambios en todas las clases, la clase SD se redujo a 904, 500 m², la clase SSC aumento su área a 1,083,947,400 m², en la clase Matorral tuvo una disminución en su área a 746,663,400 m², la clase ZU solo es posible que aumente y su área fue de 35,716,500 m², la clase SC tuvo un importante crecimiento al Este del área de estudio con un área de 103,658,400 m² y la clase CA presento un incremento a 451,800 m². Es hasta éste año que los municipios de Juventino Rosas, Villagrán, Cortázar tomaron forma y se pudieron identificar en el mapa.

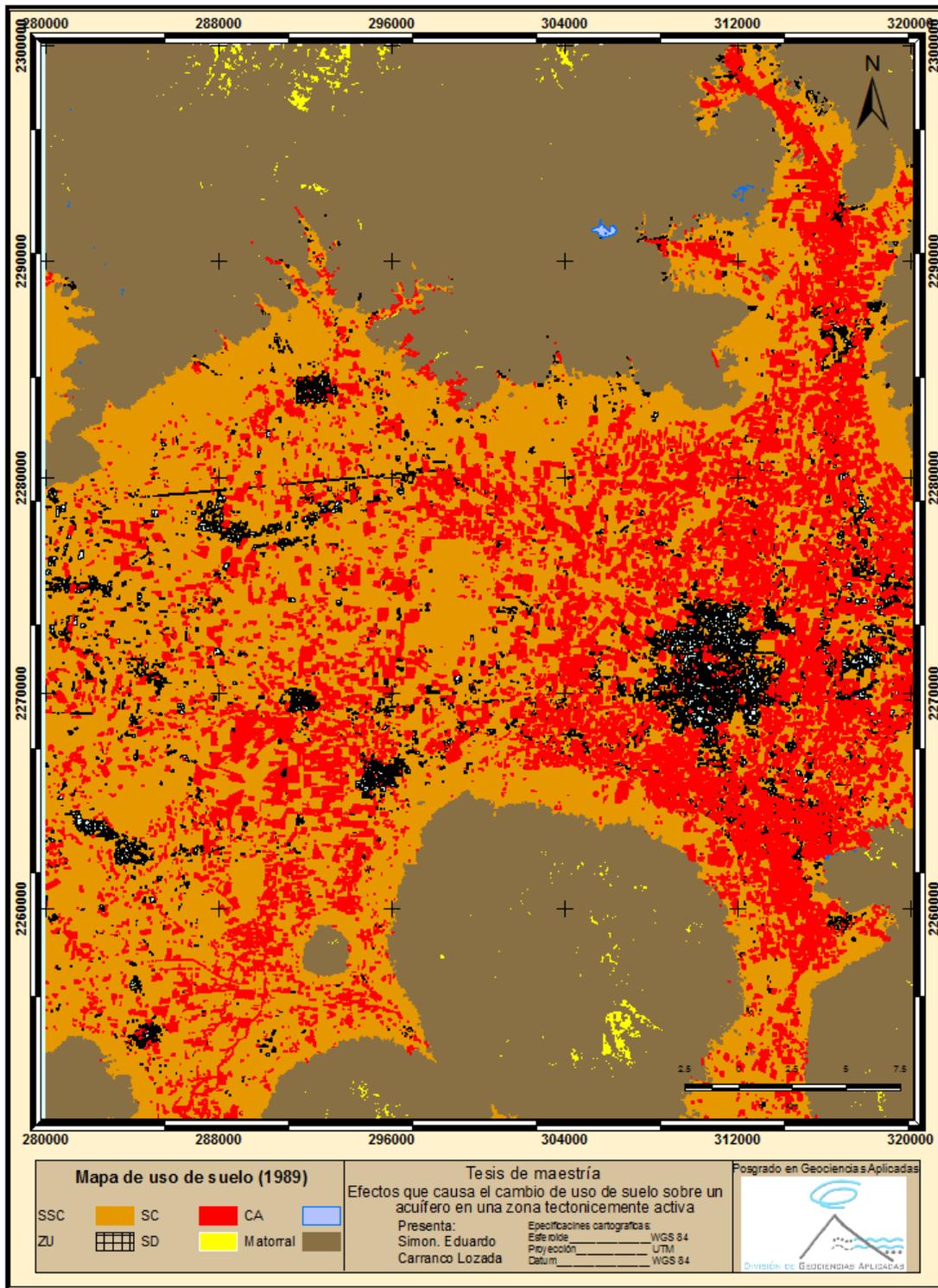


Figura 5.9 Distribución del uso de suelo en 1989, presenta notables aumentos diferentes clases, las clases: cuerpos de agua (CA), Matorral (Matorral), suelo cultivado (SC), suelo sin cultivar (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU)

V.3.3 Clasificación de uso de suelo 1999

La clasificación de uso de suelo para 1999 (Figura 5.10), sobre el valle principalmente se noto la perdida de área en la clase SSC reduciendose a 986,958,000 m², la clase ZU tuvo un incremento a 40,008,600 m², la clase SC fue la que presentó el mayor incremento, su área ocupo 196,355,700 m² dentro del valle. La clase SD tuvo una notable pérdida quedando un área de 24,642,000 m², los cambios de área en las demás clases no fueron relevantes por permanecer casi con la misma área.

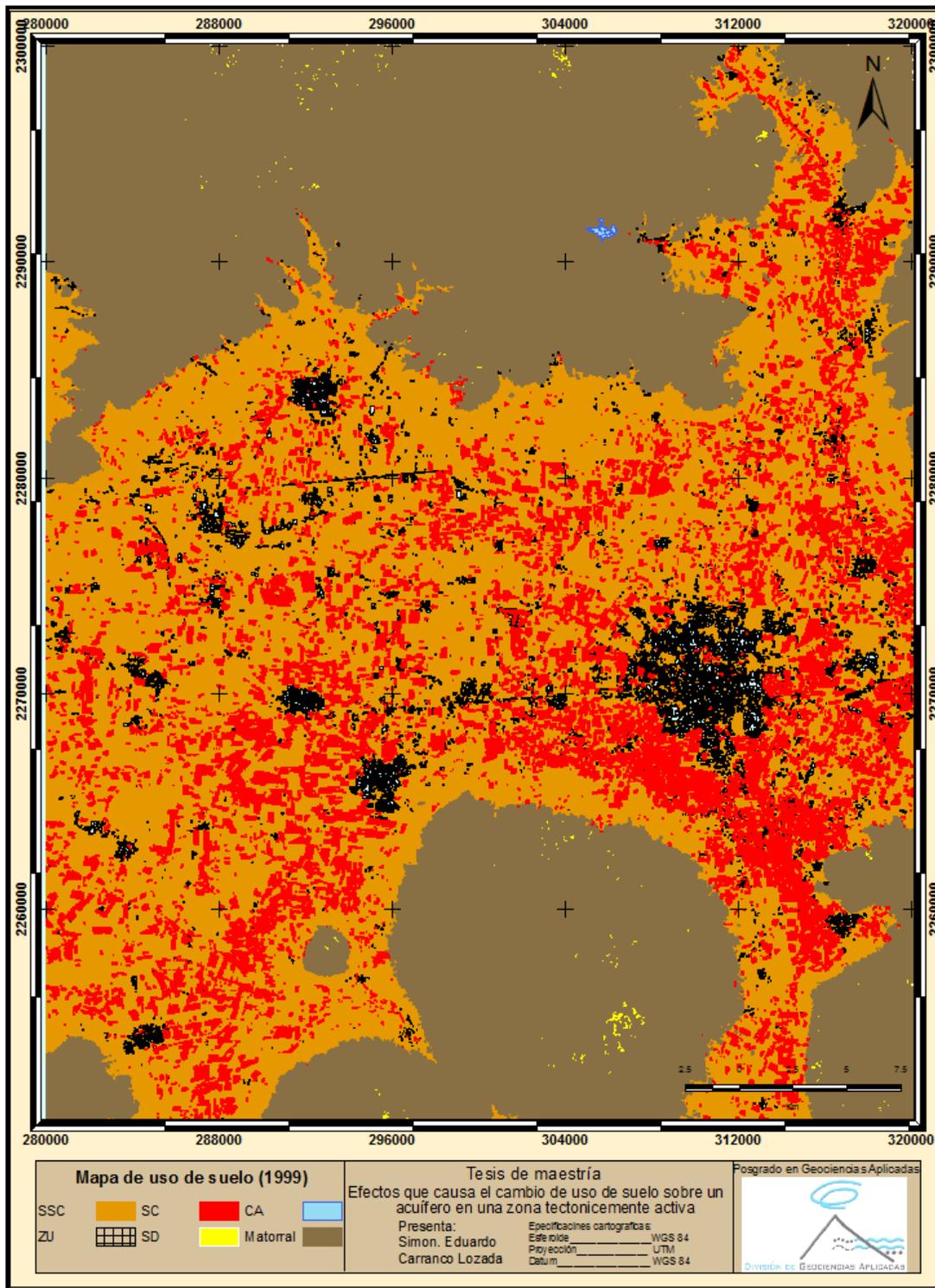


Figura 5.10 La distribución del uso de suelo en 1999, presenta dos principales crecimientos en las clases ZU y SC, esta última se masifico al sur de la Celaya. Las clases: cuerpos de agua (CA), Matorral (Matorral), suelo cultivado (SC), suelo sin cultivar (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU).

V.3.4 Clasificación de uso de suelo 2000

Con tan solo un año transcurrido la clasificación de uso de suelo para el año 2000 (Figura 5.11), mostró variaciones por ejemplo para la clase SD tuvo una pérdida en su área a 11,885,400 m², también en la clase SSC se redujo su área a 948,263,400 m², la clase Matorral tuvo incremento aunque nada significativo, la clase ZU siguió expandiéndose ahora con un área de 47,671,200 m², la actividad agrícola por riego continuó creciendo, es así que su área fue de 227,387,700 m² y la clase CA presentó una pérdida de área no relevante.

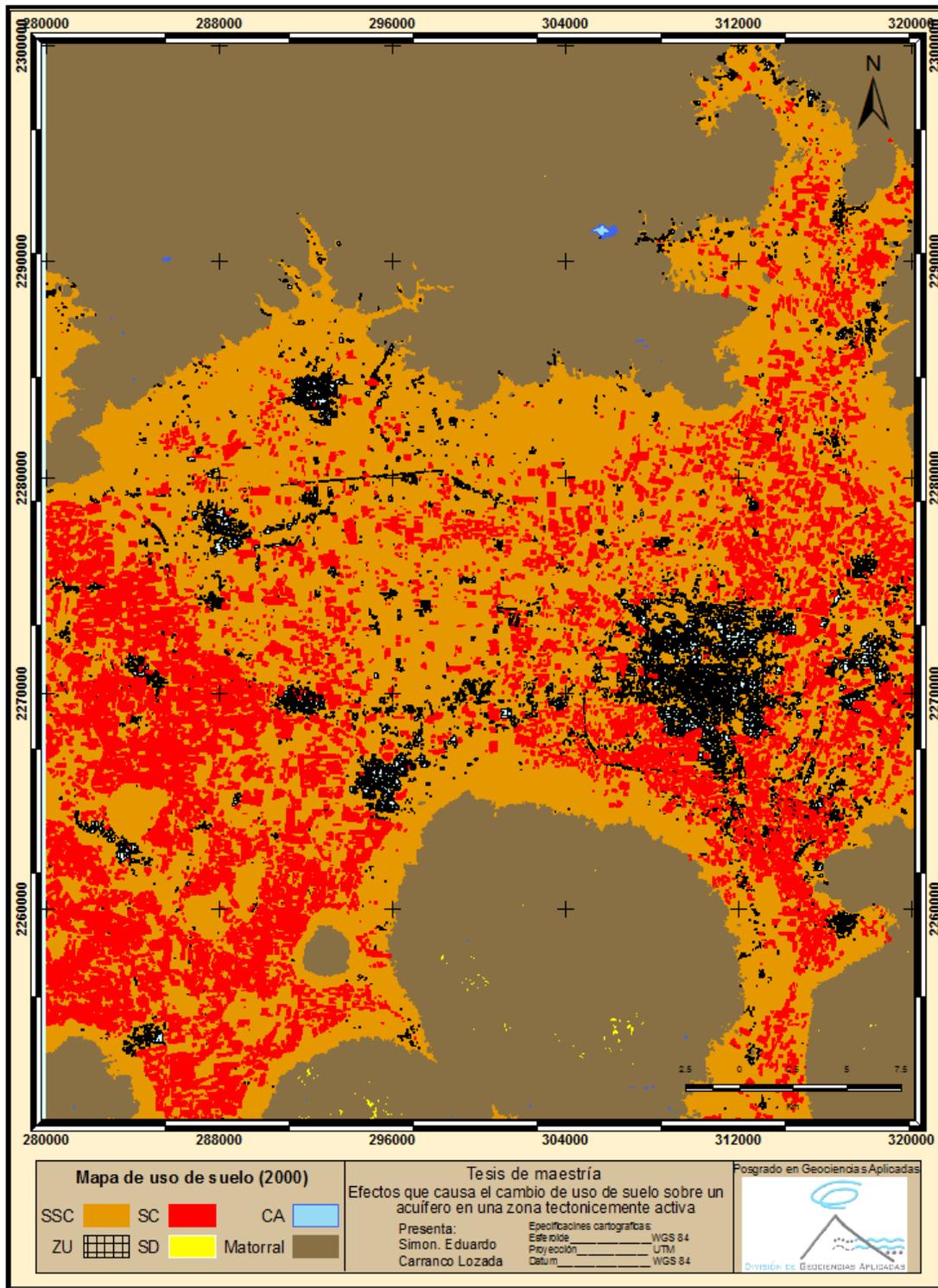


Figura 5.11 Variación que se presenta en el año 2000, se incrementó el área de las clases ZU y SC. La clase SC se muestra en la imagen que tuvo un desarrollo al Este y Oeste dentro del área de estudio. Las clases: cuerpos de agua (CA), Matorral (Matorral), suelo cultivado (SC), suelo sin cultivar (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU).

V.3.5 Clasificación de uso de suelo 2009

La situación cambió drásticamente en la clasificación de uso de suelo en el 2009 (Figura 5.12), las clase SD incrementó su área a 29,899,800 m², siguiendo con la misma tendencia de años pasados la clase SSC tuvo una perdida de área reduciéndose a 409,663,800 m², en la clase Matorral también tuvo un perdida pero no se considera relevante, es aquí donde la clase ZU se dispara alcanzando un área de 179,859,600 m², la clase SC también tuvo incremento de área a 633,273,300 m², para la clase CA se noto la aparición de algunos abrevaderos cercanos a el municipio de Juventino Rosas, estos abrevaderos son la explicación de que el área halla aumentado a 1,110,600 m². En el mapa de uso de suelos para éste año es sorprendente como la clase SC ocupo por primera vez más área que la clase SSC, que es la que predominaba años atrás, realizando una comparación (Figura 5.13) del área que ocupaba cada clase en 1976 al 2009 se ve las perdidas significativas de área (km²), que tuvieron las clases de SD, SSC y Matorral. Las clases que tuvieron un incremento de área fueron SC, ZU y CA.

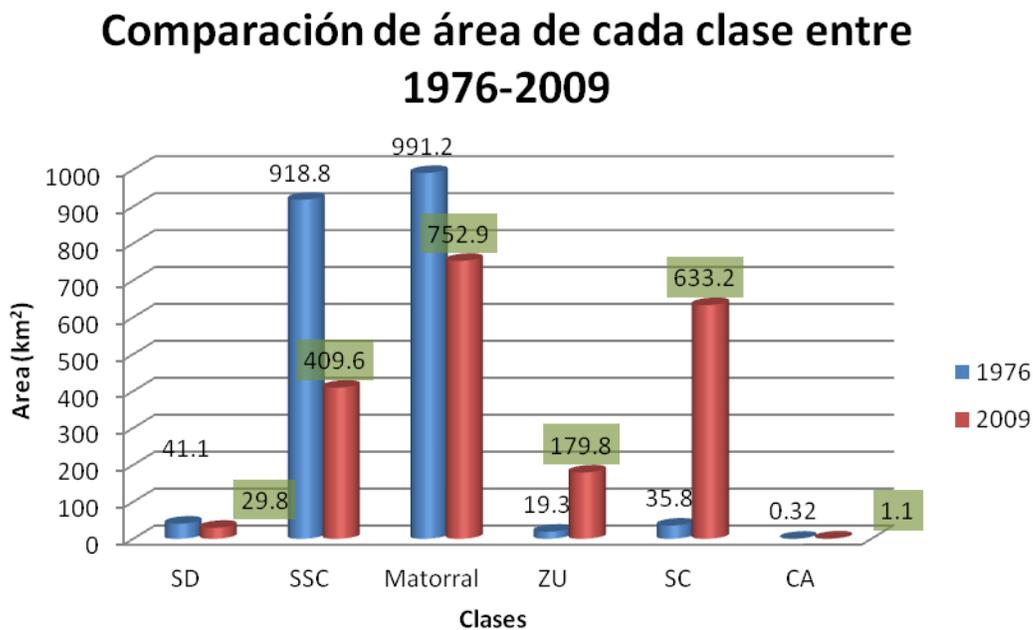


Figura 5.12 En la grafica se representa la variación del área que tuvo cada clase en un periodo de 33 años.

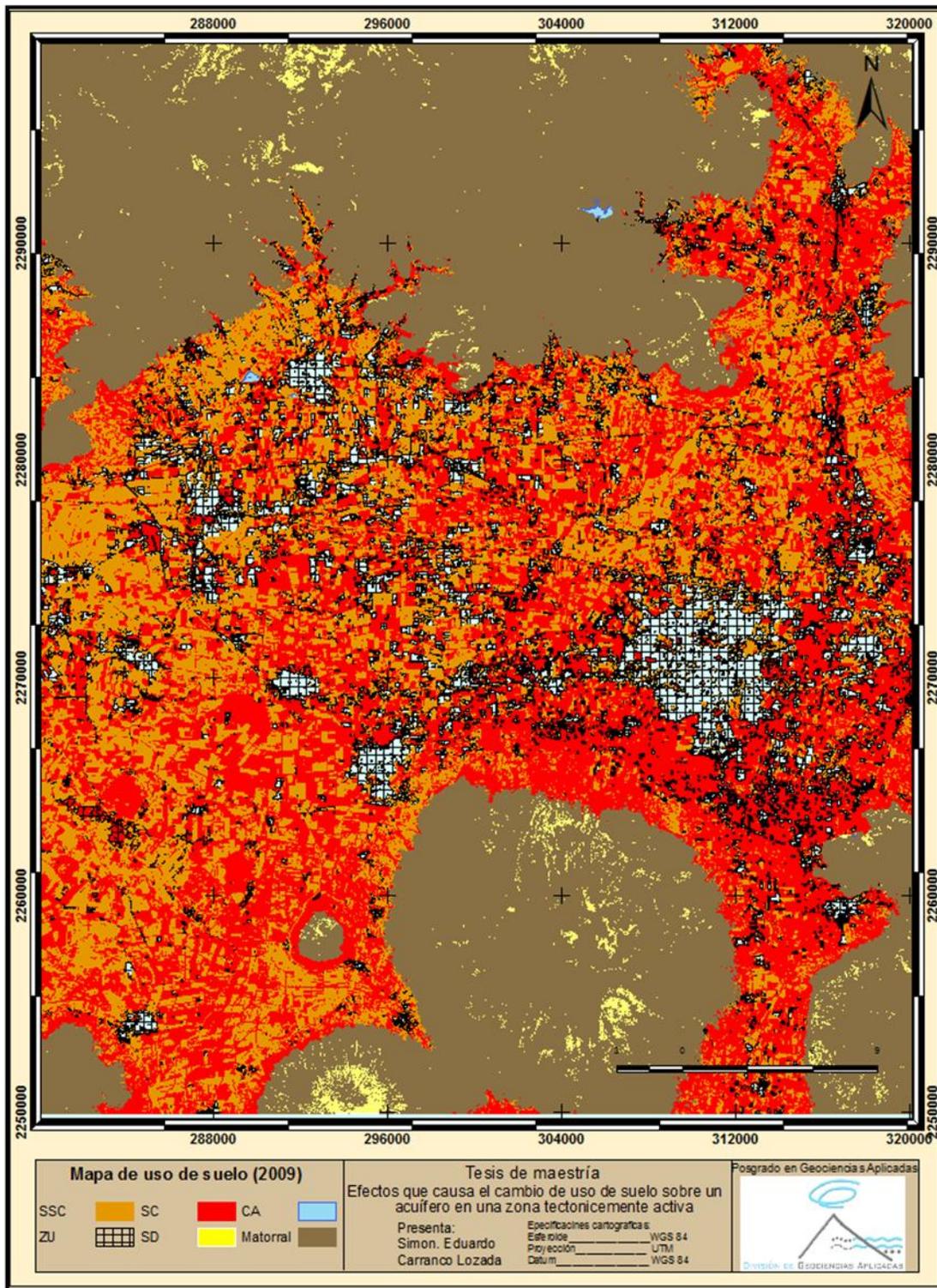


Figura 5.13 Mapa de uso de suelos del año 2009, se observa que la clase SC, es la que predomina sobre el valle de Celaya. Las clases: cuerpos de agua (CA), Matorral (Matorral), suelo cultivado (SC), suelo sin cultivar (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU).

V.3.6 Clasificación de uso de suelo 2011

Finalmente se realizó la clasificación para el año 2011 (Figura 5.14). Con la finalidad de mostrar el estado casi actual de la distribución que ocupa cada clase en el área de estudio. La clase de SD cuenta con un área de 23,283,000 m², La clase SSC terminó teniendo hasta este año un área de 413,343,900 m², La clase Matorral también tuvo pérdidas reduciendo su área a 759,756,600 m², la clase ZU ocupa un área de 21,3321,600 m², la clase SC es la que predomina en todo el valle ocupando un área de 596,288,700 m², la clase CA tuvo una pérdida para este último año reduciéndose a un área de 811,800 m².

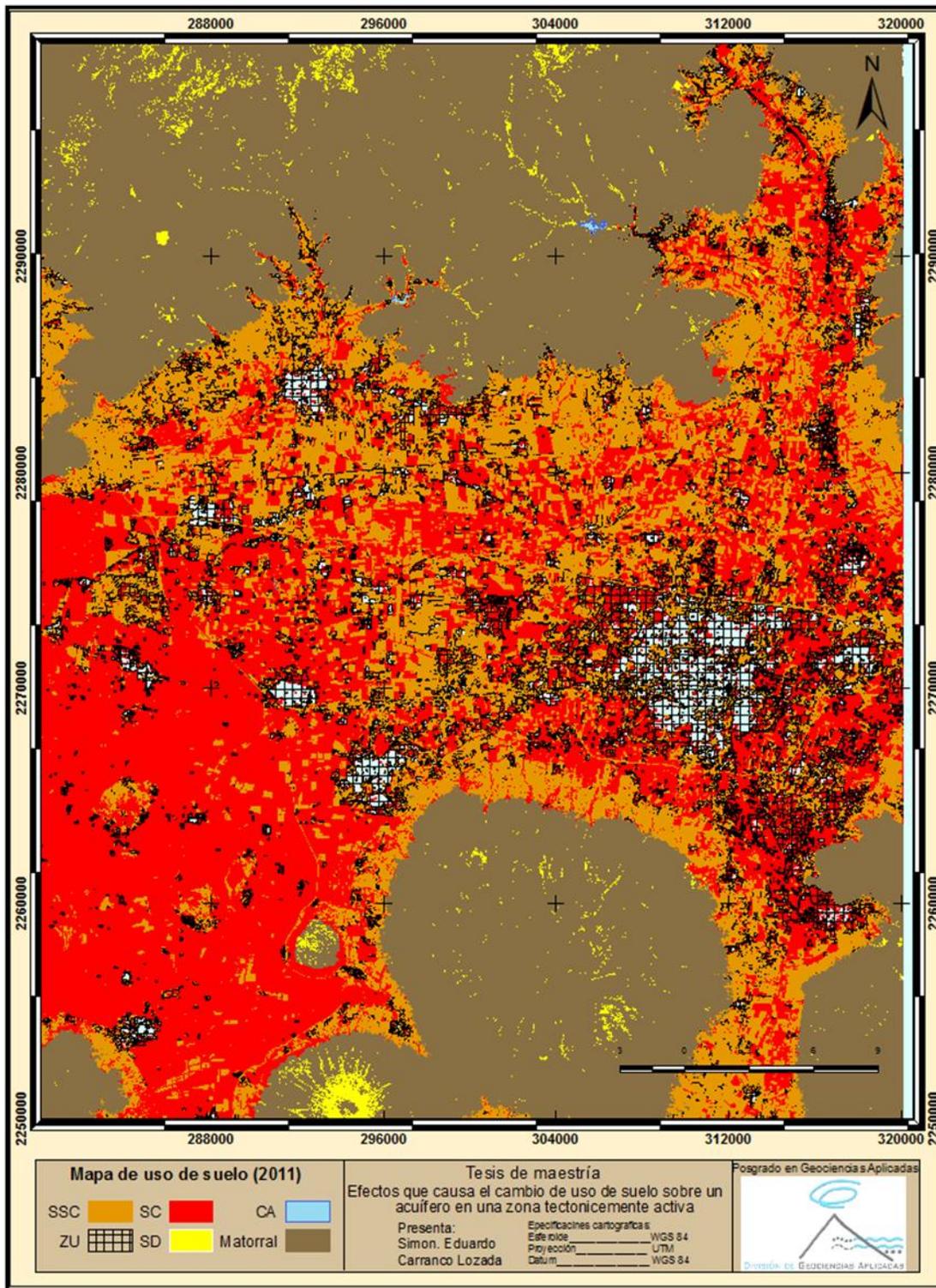


Figura 5.14 Esta imagen muestra la distribución mas reciente del uso de suelo del año 2011. Las clases: cuerpos de agua (CA), Matorral (Matorral), cultivo de riego (SC), cultivo de temporal (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU).

V.3.7 Tasa de cambio de uso de suelo

La tasa de cambio muestra las pérdidas o incrementos en términos de porcentaje que tuvieron lugar en cada período considerado. La tasa de cambio se calculó con la ecuación (Puyravaud, 2002) ya mencionada anteriormente. En la tabla (Tabla 5.1) se muestran números de color rojo indicando la pérdida de área y en números de color azul indicando el incremento de área. Estos resultados, a su vez, pueden ser representados en un gráfico comparativo (Figura 5.15) para visualizar en una sola imagen la tasa de cambio.

Tabla 5.1 Los números negativos indican que esa clase en ese determinado período tuvo una pérdida de área, los números positivos son el indicativo que esa clase tuvo una ganancia de área para ese período.

Clases	Años				Tasa de cambio (Puyravaud)		
	1976	1989	2000	2009	1976-1989	1989-2000	2000-2009
SD	41137200	36368100	11885400	29899800	-0.009	-0.097	0.108
SSC	918828900	1083947400	948263400	409663800	0.013	-0.012	-0.089
Matorral	991274400	746663400	771192000	752998500	-0.022	0.003	-0.003
ZU	19352700	35716500	47671200	179859600	0.048	0.027	0.159
SC	35892000	103658400	227387700	633273300	0.085	0.074	0.121
CA	320400	451800	435900	1110600	0.027	-0.003	0.110

Área de clase por año (Km²)

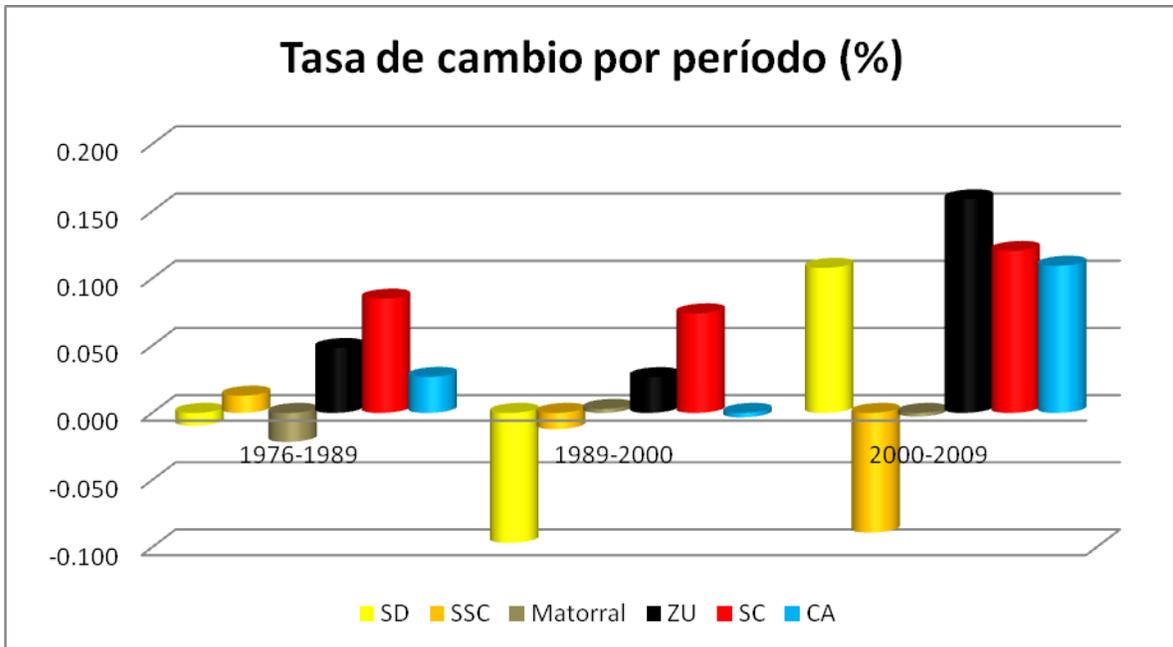


Figura 5.15 En la grafica se muestran las variaciones de las clases en los periodos considerados. Las clases: cuerpos de agua (CA), Matorral (Matorral), cultivo de riego (SC), cultivo de temporal (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU)

V.3.8 Efectos de actividad antropogénica en la zona de fallas de la ciudad de Celaya

El fallamiento de Celaya, como en otras regiones de México, ha sido asociado a la extracción intensiva de los acuíferos (Huizar 200113, Trujillo 2009). Sin embargo, existen algunos elementos que no coinciden con esta hipótesis.

- 1) En las zonas con mayor evolución del nivel estático y las de mayor profundidad del cono de abatimiento no se reportan evidencias de fallas o agrietamientos del terreno.
- 2) De existir subsidencia las fallas se desarrollarían en polígonos cerrados en torno a los conos de abatimiento; sin embargo, el problema de fallamiento en Celaya se presenta a lo largo de un tren de fallas con orientación NNW-SSE.

- 3) La distribución de las fallas en Celaya tiene un arreglo en echelón, este tipo de arreglo tiene origen tectónico con fallas de desplazamiento lateral.
- 4) El sistema de fallas de Celaya presenta anomalías de radiación α y radiación γ y que se relacionan con la actividad tectónica de la región (Valero 2002).

Considerando estas observaciones, en el presente trabajo, se considera que las fallas que afectan la ciudad de Celaya tienen origen tectónico.

Los suelos del valle de Celaya están formados por material aluvial y lacustre, que son favorables para el cultivo, debido a que proveen de humedad cuando están hidratados. La agricultura se desarrollo durante los primeros siglos después de la fundación de la ciudad de Celaya con riego de temporal. Con la perforación de los primeros pozos y debido a que el agua se localizaba a poca profundidad a principios del siglo pasado, la actividad agrícola de riego inicio su desarrollo y posteriormente desplazo al riego de temporal.

La agricultura de temporal fue la primera técnica que se utilizo para el cultivo, con base al resultado de análisis de imágenes satelitales, se determino que en 1976, el área de cultivo de temporal (SSC) ocupaba el 94.3% del área del valle, el área de cultivo por riego era tan sólo de 3.6%, esta ultima se desarrollaba cerca de la parte occidental de la ciudad de Celaya, para ese período el numero de pozos era de 1037 y estaba dentro y a la periferia de la Ciudad de Celaya, para este tiempo dos factores intervinieron para que se presentaran las primeras grietas sobre Celaya.

Para la clasificación de uso de suelo de 1989, el área de cultivo por temporal ocupo el 88.6% del área total del valle, el área de cultivo de riego se acrecentó a 8.5%, para estos años se sabe que el volumen de extracción fue de 530 Mm³/año y la profundidad del nivel estático era de aproximadamente 50 m con un abatimiento de 1.6 m/año.

En la clasificación del 2000, el cultivo por temporal ocupo 77.5% del área total del valle, el cultivo de riego ocupo el 18.6%, en este año la zona urbana (ZU) tomo

forma ocupando el 3.9%. En este mismo año el número de pozos sobrepasaba 2162, con una extracción 593 Mm³/año y un nivel estático que fue de 115 m con un abatimiento de hasta 5.7 m/año. En este período fue muy notorio, que el incremento en el número de pozos y de volumen de extracción se ve reflejado en el abatimiento del acuífero y en superficie se proyecta este fenómeno con el aumento de área agrícola de riego.

La clasificación de uso de riego para el 2009, presenta un panorama diferente de lo que se tenía anteriormente, el área de agricultura de temporal solo ocupó 33.5% del área total del valle, en contraste con el área de cultivo por riego que ocupó 51.8%, el área de zona urbana tuvo un incremento a 14.7%. En este año el número de pozos aumentó a 3360, considerando la recarga que es de 380 Mm³/año y la extracción que es de 595 Mm³/año, se tiene un déficit de 215 Mm³/año (Trujillo, 2009), déficit que se ve reflejado en el abatimiento del nivel piezométrico.

Las fallas en echelón tienen un desplazamiento lateral izquierdo menores a 1 mm (Valero 2002); sin embargo, cuando el cono de abatimiento intersecta a este sistema de fallas, los desplazamientos laterales son imperceptibles y los desplazamientos verticales (fallamiento normal) se magnifican. De tal manera que con la extracción intensiva del agua subterránea en el valle de Celaya se genera un gran cono de abatimiento y cuando este alcanza la zona de falla en la zona urbana, se producen dislocamientos de hasta 3.5 m. Los mayores dislocamientos se presentan en la parte centro de la ciudad donde la evolución del cono tiene valores de hasta -75 m. Por otro lado, los dislocamientos disminuyen conforme se aleja del cono de abatimiento (Figura 5.16).

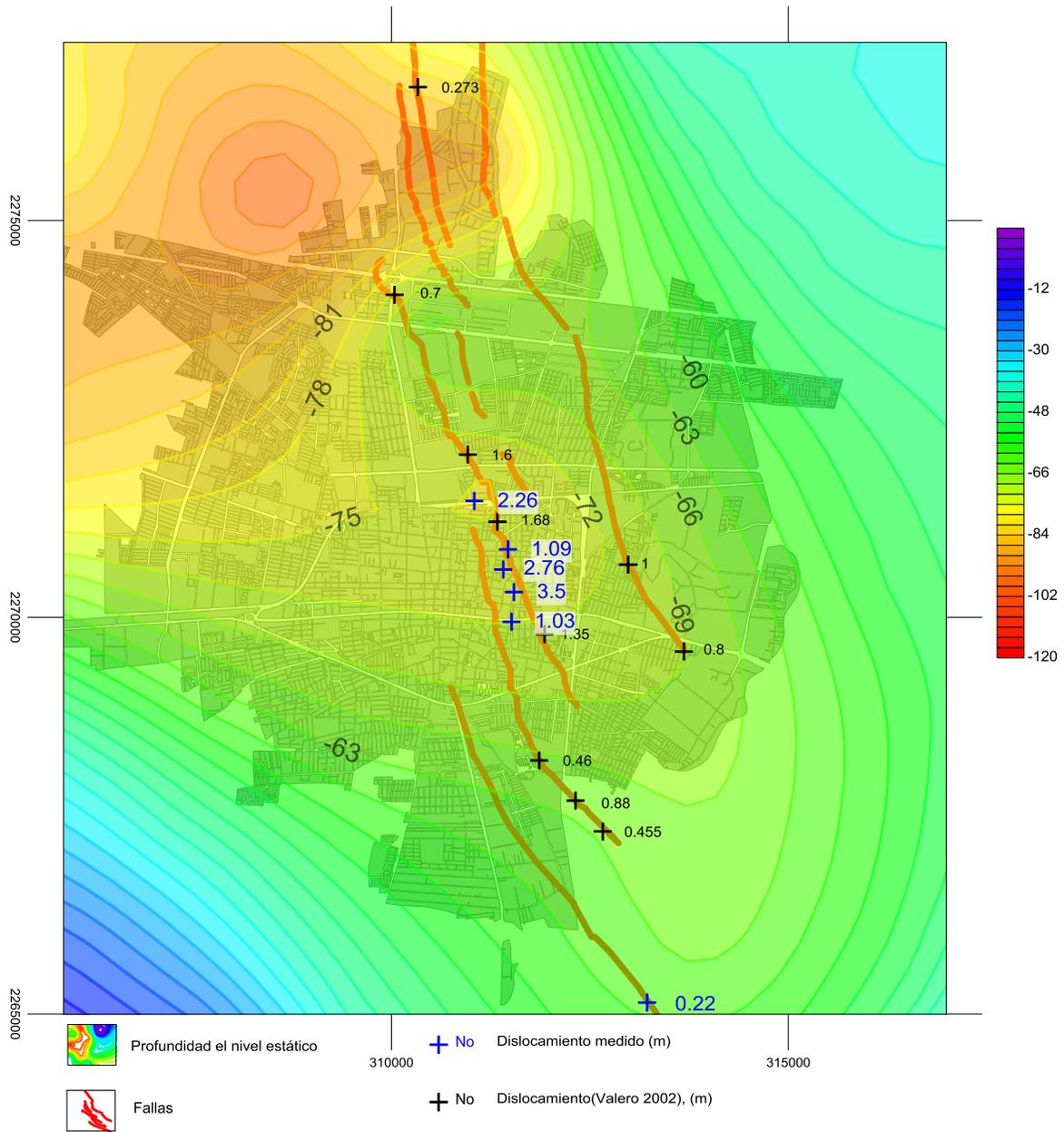


Figura 5.16 En las zonas de donde convergen las fallas con el cono de abatimiento es donde se presenta los mayores desplazamientos dentro de la zona urbana.

CONCLUSIONES

Tomando como base los resultados de este trabajo se concluye lo siguiente:

El sistema de fallas en Celaya tiene un origen tectónico, que pudiese estar asociado al sistema de falla Taxco-San Miguel de Allende.

El área de estudio ha sufrido cambios muy importantes en el uso de suelo, siendo el cambio más impactante el de agricultura de temporal a agricultura de riego.

En los años 70's el uso de suelo agrícola de temporal ocupaba el 94.3% del área del valle y el de riego utilizaba el 3.6%, en la actualidad la primera utiliza el 33.8% y la segunda ocupa un 48.7%.

De 1956 al 2000, el cono de abatimiento presenta una tasa de crecimiento de 3.5 m/año y se ha profundizado hasta -115m.

En los últimos años, el cono de abatimiento evolucionado con una forma de Z que alargada que va de Juventino Rosas a Celaya. En este cono de abatimiento, las mayores depresiones se localizan al centro del área de estudio.

Cuando el cono de abatimiento intersecta a este sistema de fallas, los desplazamientos laterales son imperceptibles y los desplazamientos verticales (fallamiento normal) se magnifican, alcanzando dislocamientos de hasta 3.5 m.

Los efectos de fallamiento normal en Celaya se aceleraron con extracción intensiva en el acuífero debido al cambio de uso de suelo de agricultura de temporal a riego.

Recomendaciones

En general el acuífero presenta un gran cono de abatimiento debido a su extracción intensiva, de seguir con este ritmo de extracción en algunos años se tendrían que perforar pozos más profundos para seguirse abasteciendo lo que se vera reflejado en la aceleración de los desplazamientos verticales dentro de zona urbana.

Si la actividad agrícola de riego es la principal causante del abatimiento del acuífero, es necesario crear nuevas técnicas de riego para hacer más eficiente el uso del agua; así como, la creación de plantas de tratamiento que contribuirían para reducir los volúmenes de extracción.

Si bien es cierto que el problema de fallamiento es irreversible, también es cierto que éste se podría retardar si se hiciera un uso más eficiente del agua extraída.

Debido a los problemas inherentes que tiene el fallamiento, con daños a redes de agua potable y drenaje es necesario realizar monitorios periódicos para evitar la contaminación del agua en el subsuelo.

Es necesario crear una legislación en materia de riesgo Geológico, que tome en cuenta las áreas que son afectadas por fenómenos naturales como el fallamiento y así poder regular el plan de desarrollo urbano de Celaya.

Bajo el mismo esquema legislativo, debe restringirse el uso de suelo para la edificación de gaseras, gasolineras y demás actividades de riesgo explosivo en zonas afectadas por el fallamiento

Considerar dentro de la nueva legislación que las zonas correspondientes en superficie a los mayores niveles de profundidad del cono de abatimiento traerán implicaciones negativas en el futuro

Referencias:

Alaniz-Alvarez, S.S., 2001. Estratigráfica y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Revista Mexicana de ciencias Geológicas. Paginas 129-148.

Aranda, 2011. Active sinking at bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya. Universidad Nacional Autónoma de México

Bierzchudek, P. 1999. Looking backwaeds: assessing the projections of transition matrix model. Ecological Application, Vol. 9, No 4. Paginas 1278-1287.

Campbell J. B. 2007. Introduction to remote sensing. Cuerta edicion. The Guilford Press. NewYork- London. Paginas 626.

CEAS de Guanajuato 1999. Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya, Ingeniería Geológica computarizada S.A. de C.V.

CEASG, 1990. Estudio de Planeación del uso del acuífero del valle de Celaya, realizado por el ingeniero Jesús Manuel Ham Chi. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.

Chuvioco, E. 1996. Fundamentos de teledetección 3^a edición revisada ed. Ediciones RIALP, Madrid. Paginas 415.

CONAGUA, 2000-2006. Programa Hidráulico Regional: Lerma-Santiago-Pacífico.

CONAGUA, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Celaya, estado de Guanajuato.

COESPO, 1996. Consejo Estatal de Población de Guanajuato, Índice de desarrollo de capital humano.

COESPO, 1998. Consejo Estatal de Población de Guanajuato, Boletín semanal.

CONAPO, 2003, Retos y desafíos de la dinámica demográfica, Consejo Nacional de Población.

Chander G, Markham B. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, N°11.

Demant, A. 1982. Interpretación geoquímica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano. Revista Vol. 5 numero 2. Paginas 217-222.

Huizar, R.2009. Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extration and the neotectonic regime. Geofísica Internacional, Vol. 50 No. 3. Paginas 255-270.

INEGI, 2010. Archivo Histórico de población. Instituto Nacional de Estadística y Geográfica. Censo de Población y Vivienda 2010. Paginas1147.

INEGI, 2007. Instituto Nacional de Estadística y Geográfica. Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí paginas 117.

INEGI, 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geográfica. Censo de Población y Vivienda 2010.

Lillesand Thomas, Kiefer R., Chimman W. 2007. Remote sensing, and imagen interpretation. Editorial Wiley, sexta edición. Paginas 756.

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

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. Paginas 117-122.

Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S.A., Labarthe-Hernández, G., Rosas-Elguera, J., 1999a. Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental Volcanic Province, México: Geological Society of America Bulletin, 111. Paginas 347-363.

Pérez-Venzor, J.A., Aranda- Gómez J.J., McDowell F., Solorio-Munguía J.G., 1996, Geología del volcán Palo Huérano, Guanajuato, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paginas 174-183.

Puyravaud, J.P. 2002. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*. Páginas 593-596.

Trujillo J. 2009, Fallamiento de terrenos por sobreexplotación de acuíferos en Celaya Guanajuato. *Boletín aquaforum* No. 52, Páginas 25-28.

Valero A. 2002. Riesgo Geológico asociado a fallamiento en la ciudad de Celaya, Guanajuato: Utilizando la detección de Radon-222. Instituto Politécnico Nacional. Páginas 98.

Vergely M. 1999. Tectónica. Primera edición. Editorial Noriega-Limusa. Mexico D. F. Páginas 259.

Anexos

Anexo A. Levantamiento topográfico

Tabla 1. Puntos de la sección topográfica (A—A') trazada sobre la calle López Mateos

Sección A--A'				Sección A--A'			
ID	X	Y	Z	ID	X	Y	Z
1	308283.06	2269952.08	1774.21	21	308693.34	2269949.88	1774.59
2	308283.06	2269952.08	1774.21	22	308722.06	2269947.99	1774.67
3	308313.61	2269954.76	1773.95	23	308752.48	2269956.09	1774.9
4	308342.72	2269957.27	1773.91	24	308786.61	2269953.66	1774.96
5	308377.36	2269961.21	1773.92	25	308813.56	2269952.25	1775.03
6	308389.04	2269974	1774.08	26	308839.49	2269950.73	1775.06
7	308389.04	2269974	1774.08	27	308848.03	2269960.07	1774.82
8	308389.43	2269972	1774	28	308849.05	2269970.12	1774.96
9	308400.61	2269963.15	1773.96	29	308849.05	2269970.12	1774.96
10	308423.5	2269964.38	1774.02	30	308849.05	2269970.13	1774.96
11	308446.72	2269965.46	1774.06	31	308860.97	2269959.72	1774.96
12	308473.14	2269965.82	1774.15	32	308886.82	2269960.86	1775.03
13	308505.79	2269964.7	1774.24	33	308913.69	2269961.4	1775.06
14	308527.81	2269954.24	1774.15	34	308934.61	2269961.37	1775.13
15	308554.41	2269954.4	1774.21	35	308962.54	2269962.32	1775.16
16	308580.12	2269954.12	1774.27	36	308991.32	2269962.91	1775.21
17	308608.1	2269953.63	1774.35	37	309012.63	2269962.65	1775.25
18	308640.79	2269950.85	1774.54	38	309040.22	2269963.91	1775.28
19	308640.79	2269950.85	1774.54	39	309066.57	2269964.44	1775.32

20	308665.92	2269951.34	1774.52	40	309093.98	2269964.94	1775.33
----	-----------	------------	---------	----	-----------	------------	---------

Sección A--A'			
ID	X	Y	Z
41	309118.16	2269965.36	1775.38
42	309160.37	2269954.73	1775.32
43	309160.37	2269954.73	1775.31
44	309160.37	2269954.73	1775.32
45	309160.37	2269954.73	1775.31
46	309166.85	2269954.7	1775.33
47	309166.85	2269954.7	1775.33
48	309166.86	2269954.7	1775.33
49	309167.1	2269966.34	1775.44
50	309189.26	2269966.77	1775.46
51	309211.41	2269967.22	1775.5
52	309235.42	2269967.58	1775.53
53	309256.34	2269968	1775.58
54	309281.2	2269968.51	1775.6
55	309305.39	2269968.81	1775.65
56	309330.7	2269969.28	1775.66
57	309345.73	2269969.61	1775.72
58	309371.65	2269970.08	1775.77
59	309372.25	2269970.08	1775.72
60	309396.48	2269970.45	1775.75
61	309421.72	2269970.88	1775.8
62	309447.92	2269971.33	1775.84
63	309469.29	2269981.5	1775.78
64	309469.3	2269981.51	1775.79
65	309472.44	2269971.75	1775.88
66	309474.98	2269981.83	1775.8
67	309474.98	2269981.83	1775.8
68	309474.98	2269981.84	1775.8
69	309497.45	2269972.19	1775.91
70	309522.54	2269972.74	1775.94
71	309549.19	2269973.18	1775.96
72	309575.14	2269973.64	1776.01
73	309600.8	2269974	1776.04
74	309620.4	2269974.46	1776.08
75	309646.34	2269974.85	1776.11
76	309670.06	2269975.3	1776.13
77	309697.68	2269975.78	1776.16

Sección A--A'			
ID	X	Y	Z
81	309798.57	2269977.58	1776.25
82	309821.78	2269988.19	1776.27
83	309821.78	2269988.2	1776.28
84	309823.46	2269991.48	1776.57
85	309823.47	2269991.48	1776.57
86	309823.8	2269991.46	1776.57
87	309825.78	2269978.03	1776.28
88	309849.08	2269978.89	1776.33
89	309868.71	2269979.45	1776.32
90	309894.33	2269980.38	1776.38
91	309919.96	2269981.26	1776.39
92	309946.15	2269982.51	1776.4
93	309971.52	2269983.87	1776.42
94	309997.72	2269985.43	1776.45
95	310022.8	2269987.1	1776.45
96	310047.38	2269988.72	1776.45
97	310073.19	2269990.7	1776.46
98	310098.63	2269992.68	1776.5
99	310124.21	2269994.85	1776.52
100	310149.98	2269997.29	1776.57
101	310175.23	2269999.9	1776.58
102	310201.57	2270002.52	1776.59
103	310222.56	2270004.96	1776.62
104	310241.89	2270007.05	1776.64
105	310250.82	2270022.85	1776.75
106	310250.82	2270022.85	1776.75
107	310251.51	2270020.1	1776.71
108	310251.54	2270020.1	1776.72
109	310251.54	2270020.1	1776.72
110	310263.7	2270009.71	1776.65
111	310282.41	2270012.09	1776.69
112	310306.69	2270015.17	1776.7
113	310331.73	2270018.51	1776.76
114	310357.59	2270022.29	1776.78
115	310381.68	2270025.69	1776.81
116	310407.1	2270029.6	1776.85
117	310432.59	2270033.53	1776.91

78	309731.26	2269976.21	1776.2
79	309754.98	2269976.64	1776.23
80	309771.58	2269976.95	1776.23

118	310458.16	2270037.65	1776.95
119	310482.79	2270041.83	1777.01
120	310507.41	2270046.11	1777.08

Sección A--A'			
ID	X	Y	Z
121	310532.12	2270050.04	1777.15
122	310556.48	2270055.14	1777.21
123	310581.06	2270060.13	1777.26
124	310585.12	2270073.46	1777.26
125	310585.6	2270070.87	1777.26
126	310673.56	2270054.98	1777.26
127	310691.15	2270054.23	1777.27
128	310718.31	2270049.48	1777.27
129	310738.24	2270047.64	1777.26
130	310786.23	2270042.51	1777.25
131	310828.13	2270037.41	1777.26
132	310868.42	2270034.84	1777.25
133	310915.51	2270028.62	1777.28
134	310978.42	2270023.45	1777.33
135	311021.42	2270018.7	1777.36
136	311123.45	2270007.94	1777.41
137	311200.48	2270000.74	1777.48
138	311259.78	2269994.45	1776.91
139	311291.74	2269991.78	1776.85
140	311318.54	2269988.19	1776.76
141	311334.21	2269986.79	1776.76
142	311398.02	2269979.7	1776.77
143	311484.46	2269972.72	1776.76
144	311564.43	2269972.81	1776.75
145	311647.38	2269972.38	1776.23
146	31159.38	2269972.4	1776.18
147	31173.45	2269972.39	1776.2
148	311811.32	2269972.38	1776.2
149	311825.56	2269972.39	1776.24
150	311836.48	2269972.4	1776.252
151	311852.23	2269972.41	1776.25
152	311876.56	2269972.4	1776.27
153	311896.63	2269972.39	1776.28
154	311921.74	2269972.39	1776.27
155	311946.31	2269972.39	1776.28
156	311978.98	2269972.39	1776.29

Tabla 1. Puntos de la sección topográfica (B—B') trazada sobre la calle Hidalgo

Sección B--B'			
ID	X	Y	Z
1	311726.18	2270318.7	1760.02
2	311653.17	2270320.48	1759.8
3	311625.88	2270321.16	1759.68
4	311607.54	2270321.59	1759.56
5	311587.64	2270322.07	1759.48
6	311568.11	2270322.49	1759.48
7	311548.7	2270323.02	1759.46
8	311534.97	2270323.27	1759.5
9	311526.47	2270323.5	1759.51
10	311521.12	2270323.72	1759.53
11	311514.19	2270324.38	1759.85
12	311510.25	2270323.99	1760.13
13	311510.25	2270323.99	1760.13
14	311504.21	2270324.71	1760.68
15	311501.02	2270324.57	1761.11
16	311497.47	2270324.86	1761.31
17	311494.11	2270324.83	1761.32
18	311490.23	2270324.8	1761.31
19	311487.16	2270324.97	1761.33
20	311483.32	2270324.99	1761.35
21	311478.56	2270325.11	1761.32
22	311472.77	2270325.27	1761.3
23	311455.96	2270325.77	1761.29
24	311438.47	2270326.1	1761.27
25	311421.23	2270326.55	1761.26
26	311403.25	2270326.14	1761.24
27	311379.49	2270326.39	1761.22
28	311379.52	2270325.33	1761.43
29	311379.5	2270326.39	1761.22
30	311379.52	2270325.32	1761.43
31	311373.41	2270325.42	1761.21
32	311348.3	2270325.14	1761.18

Sección B--B'			
ID	X	Y	Z
37	311220.23	2270327.57	1761.18
38	311196.06	2270328.49	1761.17
39	311170.42	2270329.53	1761.19
40	311144.89	2270330.64	1761.2
41	311118.78	2270333.35	1761.24
42	311118.6	2270331.17	1761.44
43	311118.78	2270333.35	1761.24
44	311118.6	2270331.17	1761.44
45	311108.04	2270331.24	1761.2
46	311093.8	2270331.09	1761.21
47	311074.26	2270330.8	1761.3
48	311057.34	2270330.43	1761.34
49	311035.07	2270329.78	1761.42
50	311025.64	2270329.52	1761.47
51	311019.81	2270329.43	1761.65
52	311015.86	2270329.33	1762.02
53	311013.21	2270329.27	1762.41
54	311009.22	2270329.36	1762.52
55	311005.32	2270329.23	1762.56
56	311001.54	2270329.24	1762.57
57	310998.06	2270329.19	1762.59
58	310995.35	2270329.19	1762.6
59	310992.39	2270329.17	1762.62
60	310989.64	2270329.18	1762.64
61	310981.88	2270329.14	1762.67
62	310978.47	2270329.15	1762.69
63	310972.5	2270329.13	1762.71
64	310966.15	2270329.22	1762.74
65	310958.75	2270329.13	1762.78
66	310946.15	2270329.04	1762.86
67	310934.51	2270329.03	1762.91
68	310920.45	2270329.23	1762.89

33	311322.18	2270324.79	1761.2
34	311296.77	2270324.78	1761.2
35	311272.07	2270325.65	1761.2
36	311246.8	2270326.62	1761.21

69	310905.87	2270330.05	1762.83
70	310892.88	2270332.37	1762.84
71	310893	2270330	1763
72	311000.38	2270337.9	1762.79

Tabla 1. Puntos de la sección topográfica (C—C') trazada sobre la calle 5 de Mayo

Sección C--C'			
ID	X	Y	Z
1	311571.52	2270472.34	1759.16
2	311563.06	2270466.58	1759.18
3	311555.65	2270462.01	1759.21
4	311547.15	2270456.82	1759.56
5	311536.88	2270450.73	1760.48
6	311529.91	2270446.35	1760.95
7	311523.94	2270442.61	1761.07
8	311517.77	2270438.82	1761.08
9	311507.42	2270432.49	1761.06
10	311498.61	2270424.66	1761.23
11	311499.62	2270427.61	1761.23
12	311499.62	2270427.61	1761.23
13	311498.61	2270424.66	1761.23
14	311491.44	2270425.78	1761.08
15	311480.25	2270431.11	1761.14
16	311469.26	2270435.9	1761.12
17	311459.46	2270440.42	1761.14
18	311450.44	2270444.64	1761.13
19	311441.43	2270449.4	1761.11
20	311422.84	2270457.47	1761.05
21	311390.82	2270467.44	1761.04
22	311365.44	2270475.46	1761.15
23	311340.9	2270483.21	1761.11
24	311312.92	2270490.9	1761.21
25	311287.86	2270498.12	1761.38
26	311270.33	2270503.2	1761.45
27	311252.03	2270509.4	1761.51
28	311252.07	2270509.39	1761.5
29	311251.65	2270507.72	1761.62
30	311252.07	2270509.39	1761.5
31	311251.65	2270507.72	1761.62
32	311247.01	2270508.97	1761.5

Sección C--C'			
ID	X	Y	Z
34	311213.6	2270516.98	1761.63
35	311196.63	2270521.01	1761.63
36	311180.58	2270524.79	1761.64
37	311170.87	2270527.17	1761.66
38	311157.42	2270530.32	1761.68
39	311145.98	2270533.23	1761.68
40	311137.81	2270535.1	1761.7
41	311130.56	2270536.97	1761.73
42	311126.43	2270538.09	1761.9
43	311123.06	2270538.96	1762.12
44	311120.79	2270539.32	1762.51
45	311118.89	2270539.79	1762.56
46	311115.37	2270540.64	1762.55
47	311112.03	2270541.46	1762.57
48	311108.58	2270542.35	1762.57
49	311104.75	2270543.22	1762.61
50	311098.95	2270544.62	1762.6
51	311094.51	2270545.7	1762.62
52	311088.91	2270547.03	1762.66
53	311085.15	2270547.94	1762.69
54	311079.03	2270549.79	1762.68
55	311067.66	2270552.62	1762.72
56	311053.76	2270555.9	1762.79
57	311033.66	2270560.59	1762.83
58	311012	2270565.63	1762.91
59	310978.8	2270573.42	1762.93
60	310943.85	2270582.04	1762.97
61	310911	2270594	1763
62	310910.05	2270590.37	1763.13
63	311119.73	2270548.52	1762.76

33	311230.74	2270512.89	1761.56
----	-----------	------------	---------

Tabla 1. Puntos de la sección topográfica (D—D') trazada sobre la calle La paz

Sección D--D'			
ID	X	Y	Z
1	311415.9	2270779.42	1761.09
2	311449.34	2270778.09	1761.07
3	311478.19	2270777.95	1760.98
4	311487.47	2270776.75	1760.96
5	311502.18	2270776.15	1760.9
6	311532.37	2270775.25	1760.81
7	311550.5	2270775.44	1760.37
8	311611.09	2270773.79	1759.9
9	311631.05	2270773.78	1759.76
10	311647.98	2270773.78	1759.73
11	311663.87	2270773.79	1759.72
12	311675.64	2270773.78	1759.73
13	311691.87	2270773.77	1759.74

Tabla 1. Puntos de la sección topográfica (E—E') trazada sobre la calle Irrigación

Sección E--E'			
ID	X	Y	Z
1	310998.2	2271881.78	1756.68
2	311016.16	2271885.5	1756.64
3	311032.02	2271888.98	1756.7
4	311042.3	2271891.19	1756.69
5	311051.15	2271892.84	1756.54
6	311061.83	2271895.19	1755.69
7	311072.56	2271898.45	1755.27
8	311090.33	2271902.83	1754.99
9	311104.51	2271905.15	1754.99
10	311119.43	2271906.34	1754.85
11	311144.03	2271906.7	1754.72
12	311170.64	2271906.8	1754.61
13	311194.89	2271907.03	1754.44
14	311219.88	2271906.95	1754.42

Sección E--E'			
ID	X	Y	Z
18	311315.43	2271906.8	1754.3
19	311332.38	2271906.44	1754.26
20	311347.17	2271906.49	1754.25
21	311369.25	2271906.5	1754.24
22	311386.17	2271906.59	1754.34
23	311394.81	2271906.61	1754.33
24	311406.62	2271906.67	1754.39
25	311414.06	2271906.72	1754.4
26	311432.64	2271906.77	1754.48
27	311447.12	2271906.88	1754.79
28	311461.04	2271907.02	1755.29
29	311477.84	2271906.52	1755.8
30	311497.01	2271907.09	1755.97
31	311516.74	2271907.2	1756.01

15	311244.25	2271906.94	1754.42
16	311271.72	2271907.03	1754.34
17	311297.26	2271906.78	1754.29

32	311523.08	2271907.28	1756.01
33	311570.5	2271907.04	1756.2
34	311595.89	2271907.03	1756.25

Anexo B. Matrices de transición

Tabla 1. A continuación se muestra la matriz de transición 1976-1989, para la clasificación del uso de suelo del Valle de Celaya. (Cada unidad equivale a un m²)

1976	1989					
	SD	SSC	Matorral	ZU	SC	CA
SD	904500	0	35317800	0	0	2700
SSC	12845700	803362500	222948900	12617100	32701500	3600
Matorral	26265600	0	719730900	0	0	72000
ZU	68400	27255600	2304000	5636700	475200	0
SC	915300	88210800	10900800	1098900	2715300	0
CA	137700	0	72000	0	0	242100
Total de clase	41137200	918828900	991274400	19352700	35892000	320400
Cambio de Clase	40232700	115466400	271543500	13716000	33176700	78300

Tabla 2. A continuación se muestra la matriz de transición 1989-2000, para la clasificación del uso de suelo del Valle de Celaya. (Cada unidad equivale a un m²)

1989	1999					
	SD	SSC	Matorral	ZU	SC	CA
SD	13818600	0	10823400	0	0	0
SSC	0	904855500	0	21845700	60256800	0
Matorral	22549500	0	735735600	0	0	119700
ZU	0	27389700	0	11627100	991800	0
SC	0	151702200	0	2243700	42409800	0
CA	0	0	104400	0	0	332100
Total de clase	36368100	1083947400	746663400	35716500	103658400	451800
Cambio de Clase	22549500	179091900	10927800	24089400	61248600	119700

Tabla 3. A continuación se muestra la matriz de transición 1999-2000, para la clasificación del uso de suelo del Valle de Celaya. (Cada unidad equivale a un m²)

1999	2000					
	SD	SSC	Matorral	ZU	SC	CA
SD	3298500	0	8583300	0	0	3600
SSC	0	817425900	0	14923800	115913700	0
Matorral	21342600	0	749734200	0	0	115200
ZU	0	22555800	0	24469200	646200	0
SC	0	146976300	0	615600	79795800	0
CA	900	0	87300	0	0	317700
Total de clase	24642000	986958000	758404800	40008600	196355700	436500
Cambio de Clase	21343500	169532100	8670600	15539400	116559900	118800

Tabla 4. A continuación se muestra la matriz de transición 2000-2009, para la clasificación del uso de suelo del Valle de Celaya. (Cada unidad equivale a un m²)

2000	2009					
	SD	SSC	Matorral	ZU	SC	CA
SD	4518900	0	25380000	0	0	900
SSC	0	320688900	0	2502900	86472000	0
Matorral	7362000	0	745578900	0	0	57600
ZU	0	129576600	0	42010200	8272800	0
SC	0	497488500	0	3142800	132642000	0
CA	4500	509400	233100	15300	900	347400
Total de clase	11885400	948263400	771192000	47671200	227387700	405900
Cambio de Clase	7366500	627574500	25613100	5661000	94745700	58500