



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

**GEOMETRÍA Y MONITOREO CON GPS DE LOS
PROCESOS DE SUBSIDENCIA-CREEP-FALLA
(PSCF), EN LA CIUDAD DE CELAYA,
GUANAJUATO, MÉXICO**

TESIS

DE MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y
PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA:
JOSÉ EDMUNDO DÍAZ SALMERÓN

ASESOR:
DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL

COASESOR:
DR. VÍCTOR HUGO GARDUÑO MONROY

COASESOR EXTERNO:
DR. ENRIQUE CABRAL CANO

MORELIA, MICHOACÁN, FEBRERO 2010

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Alicia, mis hijos Edmundo y Alicia Danae, y familia en general, por su apoyo y estímulo para concluir este proyecto de vida.

Al Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, al Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, asesor y coasesor respectivamente, y a mis maestros en general del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de la UNAM.

A mi compañero y amigo, Geol. Niccolò Giordano, quien ha sido un apoyo muy importante en esta maestría.

Al Dr. Enrique Cabral Cano, coasesor externo, y el Ing. Oscar Díaz Molina, del Instituto de Geofísica de la UNAM, por su valiosa colaboración en la instalación y operación de la base GPS fija de “La Gavia”.

A la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de la Ciudad de Celaya, Gto. (JUMAPA), en particular al Ing. Geol. Vicente Arturo Camargo Valencia, sin cuya colaboración no podría haberse llevado a cabo este proyecto.

Al Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera, por su amistad y apoyo incondicional durante el presente trabajo.

A todos...¡GRACIAS!

RESUMEN

A partir de la década de los 50's, la extracción de agua del subsuelo de forma excesiva y sin planificación, en zonas agrícolas y urbanas desarrolladas sobre terrenos lacustres, comienza a provocar serios problemas de carácter mundial, generando fenómenos que se manifiestan a través de hundimientos diferenciales y agrietamientos del terreno; que en combinación con fallas geológicas sin-sedimentarias en el basamento que subyace a los sedimentos, desarrolla un tipo de subsidencia conocida como Procesos de Subsidencia-Creep-Falla (PSCF). Con repercusiones destructivas en la propiedad privada, infraestructura urbana, industria y otros elementos urbanos. En México esta problemática se reconoce a partir de la década del los 80's, en algunas ciudades como Celaya, Aguascalientes, Morelia, Querétaro y Salamanca, entre otras, asentadas en depresiones rellenas con sedimentos lacustres y/o fluvio-lacustres. Pertenecientes a antiguos lagos de la zona norte de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), en el centro y centro occidente de la República Mexicana.

La ciudad de Celaya, debido a que ha presentado las tasas de hundimiento más altas del conjunto de ciudades afectadas por este fenómeno, es de gran interés para el estudio de los PSCF, pues sus niveles de deformación permiten predecir el comportamiento futuro de la subsidencia en otras zonas en donde el fenómeno comienza a manifestarse. Para entender el comportamiento de estos procesos en la ciudad de Celaya, se han llevado a cabo una serie de trabajos y análisis enfocados a entender su geometría y dinámica. Se inició con la actualización cartográfica de la trayectoria en las 6 fallas superficiales presentes en la ciudad; posteriormente, se hizo el análisis geológico para conocer las características estructurales del basamento, logrando identificar tres coladas basálticas que no habían sido reportadas previamente, intercaladas en los sedimentos fluvio lacustres; finalmente, se estableció una red de monitoreo GPS con 32 puntos de control, ubicados de forma estratégica en las zonas urbanas de Celaya con afectaciones por fallamiento superficial; dicha red de monitoreo fue ocupada para medición de las coordenadas geodésicas de cada uno de sus puntos en cuatro campañas entre Dic/2008 y Ago/2009, corregidas con la estación UGTO de la RGNA del INEGI y con una base GPS fija colocada con apoyo del Instituto de Geofísica de la UNAM, en la cisterna del pozo "La Gavia" propiedad de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya (JUMAPA), esto último con la finalidad de comparar los resultados, que conjuntamente con los datos de abatimiento del nivel piezométrico influyen en la ubicación de la deformación superficial y en las tasas de hundimiento de la superficie en Celaya, Gto.

Los resultados muestran que actualmente, en la ciudad de Celaya la subsidencia continúa desarrollándose tanto en dirección vertical como en la horizontal. En la dirección vertical el hundimiento es espacialmente heterogéneo con tasas oscilantes de entre 12 y 14 cm/año, semejantes a las reportadas anteriormente con máximas anuales de 15 cm hacia el oriente de la Alameda en la falla Oriente, con salto en la superficie de 2.5 m (Trujillo-Candelaria, 1985 y 1991), solo que ahora la zonas de tasas de hundimiento máximo se localizan al norte de la ciudad, en la denominada Cd. Industrial y a la salida a San Miguel de Allende, Gto.; algunos puntos monitoreados registran ligeros ascensos que deberán ser verificados en posteriores mediciones. En lo que respecta a la dirección horizontal, no es posible establecer una tasa de crecimiento longitudinal confiable de las fallas, ya que la cartografía histórica de fallas en Celaya señala, que las fallas identificadas como Universidad Pedagógica y Tecnológico se unen al norte de la ciudad, lo que no es verificable en el terreno. Se detectó la aparición de dos nuevas fallas superficiales adicionales a las ya reconocidas para totalizar seis fallas superficiales (Poniente, Oriente, Universidad Pedagógica, Tecnológico, Insurgentes y Santa Teresita), que afectan a la ciudad de Celaya, las cuales tienen en común el hecho de ser normales y de dirección NNO-SSE, paralelas al sistema de fallas regionales conocido como Taxco-San Miguel de Allende.

Por otra parte, con base en los datos del monitoreo del nivel freático realizado por la JUMAPA, se tiene que existe correspondencia entre el abatimiento del nivel freático y las tasas de hundimiento reportadas por el monitoreo GPS en la zona norte de la ciudad, donde se presentan abatimientos de hasta 40 m en la zona industrial durante el periodo 2002-2008, y tasas de hundimiento entre 10 y 12 cm durante el periodo de monitoreo GPS del presente estudio. Por lo que de continuar la extracción de agua del subsuelo en Celaya, los PSCF seguirán su desarrollo principalmente al norte de Celaya, de acuerdo a la influencia que en ellos tienen las coladas intercaladas en los sedimentos, que regulan su presencia morfológica en la superficie.

Palabras clave: Procesos de Subsidencia-Creep-Falla (PSCF), Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), sedimentos lacustres y/o fluviolacustres, hundimientos diferenciales, agrietamientos, fallas superficiales, abatimiento del nivel piezométrico, GPS.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN	9
I.1 INTRODUCCIÓN	9
I.2 JUSTIFICACIÓN.....	10
I.3 OBJETIVOS.....	12
I.4 HIPÓTESIS.....	12
CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO	13
II.1 GPS	13
ANTECEDENTES	13
SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE.....	13
EL SISTEMA GPS.....	16
COMPONENTES DEL SISTEMA GPS.....	16
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA GPS	21
SEÑAL GPS	23
FUENTES DE ERROR DEL SISTEMA GPS	24
APLICACIONES DE LOS SISTEMAS GPS.....	25
EL FUTURO DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.....	27
II.2 RGNA-INEGI.....	28
II.3 MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO CON GPS.....	34
II.4 MÉTODOS DE CORRECCIÓN DIFERENCIAL, RESTRICCIONES.	35
CAPÍTULO III.- ANTECEDENTES	38
III.1 SUBSIDENCIA, CREEP, FALLA	38
SUBSIDENCIA.....	38
CREEP	38
FALLA.....	39
PSCF	41
III.2 ANTECEDENTES DE LOS PSCF	43
III.3 MÉTODOS DE MONITOREO DE LOS PSCF	45
CAPÍTULO IV.- ÁREA DE ESTUDIO	46
IV.1 LOCALIZACIÓN	46

IV.2 HIDROGRAFÍA Y CLIMA	47
IV.3 GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL.....	48
IV.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y DEL SUBSUELO.....	50
IV.5 CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO.....	52
IV.6 ABATIMIENTO DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO	54
CAPÍTULO V.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
CAPÍTULO VI.- RESULTADOS Y ANÁLISIS	64
VI.1 ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA DE LAS FALLAS SUPERFICIALES DE CELAYA.	64
VI.2 HUNDIMIENTO DEL TERRENO EN LOS PUNTOS MEDIDOS.	71
VI.3 DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL DE LOS PUNTOS MEDIDOS.	77
VI.4 RELACIÓN FALLAS DEL BASAMENTO-COLADAS BASÁLTICAS-FALLAS SUPERFICIALES.....	79
VI.5 RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ABATIMIENTO-HUNDIMIENTO.....	87
VI.6 RELACIÓN NIVEL FREÁTICO-ESPESOR DE SEDIMENTOS-COLADAS-HUNDIMIENTO.....	93
CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Fig. 1.- Obras civiles riesgosas debido a los PSCF en Morelia, Mich. y Celaya, Gto. _____	10
Fig. 2.- Convivencia con los PSCF _____	11
Fig. 3.- Segmento Espacial de los Sistemas GPS, GLONASS Y Galileo _____	17
Fig. 4.- Segmento de Control del Sistema GPS _____	18
Fig. 5.- GPS Navegador _____	19
Fig. 6.- GPS Submétrico y/o Monofrecuencia de Código y Fase _____	20
Fig. 7.- GPS Doble Frecuencia _____	20
Fig. 8.- Funcionamiento del sistema GPS (Pozo-Ruz, et. al.) _____	21
Fig. 9.- Sincronización del Código Pseudo-aleatorio GPS _____	22
Fig. 10.- Señales Transmitidas por los Satélites GPS _____	23
Fig. 11.- Sistemas EGNOS y WAAS _____	28
Fig. 12.- Red Geodésica Nacional Activa del INEGI _____	29
Fig. 13.- Placas Tectónicas en que se Ubica el Territorio Mexicano (Gráfico USGS) _____	31
Fig. 14.- Altura Geodésica de la Estación RGNA-INEGI-INEG _____	33
Fig. 15.- Corrección Diferencial de Datos GPS _____	36
Fig. 16.- Modelo Conceptual de la Formación y Desarrollo de una Falla Sinsedimentaria (Ávila-Olivera, 2008) _____	40
Fig. 17.- Etapas de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (Ávila-Olivera, 2008) _____	42
Fig. 18.- Daños por PSCF en: Irapuato, Querétaro, Salamanca _____	44
Fig. 19.- Croquis de localización de la ciudad de Celaya, Gto. _____	46
Fig. 20.- Crecimiento Poblacional de la Ciudad de Celaya, Gto. (INEGI) _____	47
Fig. 21.- Distribución Anual de la Precipitación en la Ciudad de Celaya, Gto. (1921-2005) (INEGI) _____	47
Fig. 22.- Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). 1. Placa de Norteamérica; 2. Bloque Jalisco; 3. Terrenos Estratotectónicos de Arcos volcánicos del Sur de México; 4. Planicie Costera del Golfo; 5. FVTM; 6. Movimiento Relativo de Placas; 7. Distensión en la FVTM; 8. Zona de Subducción; 9. Subducción en la Placa de Rivera. (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2002) _____	48
Fig. 23.- MDE de Celaya, Gto. con sus Elevaciones Principales _____	49
Fig. 24.- Mapa Geológico del Estado de Guanajuato _____	49
Fig. 25.- Columna Estratigráfica Representativa del Subsuelo de la Ciudad de Celaya _____	51
Fig. 26.- Depósitos Fluviolacustres al Sur de la Ciudad de Celaya _____	51
Fig. 27.- Piezometría de la Ciudad de Celaya _____	53
Fig. 28.- Falla Superficiales en Celaya, Gto. y sus Consecuencias _____	55
Fig. 29.- Elementos del Equipo GPS 500, a) Antena Microstrip L1/L2 AT502, b) Batería Externa, c) Receptor GPS RS500 y Terminal GPS TR500 _____	56
Fig. 30.- Redes GPS y Cartografía de Fallas Superficiales en Celaya, Gto. _____	58
Fig. 31.- Punto de la Red GPS 2002 de la JUMAPA _____	59
Fig. 32.- Punto Complementario de la Red GPS de Estudio _____	60

Fig. 33.- Trabajos de Excavación en la Base GPS Fija de “La Gavia”	61
Fig. 34.- Trabajos de Montaje de la Base GPS Fija de “La Gavia”	61
Fig. 35.- Vista de la Ciudad de Celaya desde la Base GPS de “La Gavia”	61
Fig. 36.- Red GPS de la Ciudad de Celaya y Base de “La Gavia”	62
Fig. 37.- Proceso de Monitoreo de la Red de Estudio GPS	62
Fig. 38.- Mapa de Fallas Geológicas en Celaya, Gto.	64
Fig. 39.- Falla Poniente	65
Fig. 40.- Falla Oriente	66
Fig. 41.- Falla Universidad Pedagógica	67
Fig. 42.- Monitoreo de la Falla Insurgentes	68
Fig. 43.- Falla Tecnológico	69
Fig. 44.- Falla Santa Teresita	70
Fig. 45.- Coordenada “Z” de los Puntos GPS Corregidos con “La Gavia”	72
Fig. 46.- Modelo Digital de Hundimientos en Celaya, Gto.	73
Fig. 47.- InSAR 2006-GPS 2009	74
Fig. 48.- Coordenada “Z” de puntos GPS Corregidos con INEGI-UGTO	75
Fig. 49.- Desplazamientos Horizontales en Celaya, Gto.	78
Fig. 50.- Secciones Geológicas y su Relación con las Coladas Basálticas	80
Fig. 51.- Secciones Geológicas NO-NE y SO-SE	81
Fig. 52.- Pozos Profundos y Coladas	82
Fig. 53.- Origen de las Coladas Basálticas en Celaya, Gto.	83
Fig. 54.- Fallas del Basamento y Superficiales en Celaya, Gto.	84
Fig. 55.- Precipitación Total Anual del Período 1940-1997 en la ciudad de Celaya, Gto.	87
Fig. 56.- Abatimiento del Nivel Freático de Celaya 1977-2008	88
Fig. 57.- Abatimiento del Nivel Freático en Celaya, Gto. 2002-2008	89
Fig. 58.- Piezometría de Celaya, Gto.	90

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.- Resumen comparativo con las principales características técnicas de los sistemas globales de navegación por satélite	16
Tabla 2.- Clasificación de los equipos GPS	19
Tabla 3.- Coordenadas Geodésicas de las Estaciones de la RGNA del INEGI	30
Tabla 4.- Relación Longitud de Línea Base-Tiempo de Medición	35
Tabla 5.- Campañas GPS y Base de Corrección	63

CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN

I.1 INTRODUCCIÓN

La excesiva extracción de agua de un sistema acuífero, es un problema de carácter mundial en zonas agrícolas y urbanas desarrolladas sobre terrenos lacustres, cuyo suministro de agua se da mayoritariamente mediante la perforación de pozos profundos, generando fenómenos conocidos como Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF) (Garduño-Monroy *et al.*, 1999 y Lermo-Samaniego *et al.*, 1996). Este tipo de fenómenos presenta repercusiones en las obras civiles (casas, edificios, carreteras, líneas de conducción subterráneas, drenajes, etc.), a lo largo de trazas definidas que responden a los sistemas de fallamiento regional de cada caso en particular (Aranda Gómez, 1985; Oliver, 1985; Trujillo-Candelaria, 1985, 1991; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Lermo-Samaniego *et al.*, 1996; Álvarez-Manilla y Pérez-Rea, 1996; Garduño-Monroy *et al.*, 1998, 1999; Carreón-Freyre *et al.*, 2002).

En México esta problemática se hace visible a partir de la década del los 80's en algunas ciudades del centro del País (Celaya, Aguascalientes, Morelia, Querétaro, etc.) asentadas en depresiones rellenas con depósitos lacustres y/o fluvio-lacustres, localizadas en la zona norte de la Provincia Geológica conocida como Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM).

Desde principios de los años 80's en la ciudad de Celaya, Guanajuato, se empezaron a apreciar problemas de hundimientos diferenciales a lo largo de dos trazas lineales denominadas las fallas Oriente y Poniente. Aunque algunos habitantes aseguran que las han observado desde finales de la década de los 50's (Trujillo-Candelaria, 1985).

Estas discontinuidades superficiales están asociadas con fallas geológicas en el basamento, así como también con antiguas zonas lacustres y /o fluvio-lacustres, cuya combinación con la extracción de agua del subsuelo, da lugar a una consolidación diferencial de los sedimentos que sobreyacen a dichas fallas, las cuales controlan su depósito.

Las fallas estructurales, siendo sin-sedimentarias, hacen que los sedimentos lacustres sobreyacentes al bloque de techo, tengan espesores más importantes con respecto a los que se depositan sobre el bloque de piso. La diferencia de espesor deformable se

traduce en un hundimiento diferencial que origina fallas superficiales, representando la evidencia morfológica de las correspondientes fallas en el basamento.

En este trabajo se describen los estudios realizados sobre las fallas superficiales que afectan las obras civiles en la ciudad de Celaya, poniendo en relación los datos geológicos e hidrogeológicos de superficie y del subsuelo, anteriores y actuales. Además, por medio de una red de monitoreo GPS y de una actualización en el estudio piezométrico del sistema acuífero, se actualizan las tasas de hundimiento superficial, relacionándolas con las coladas basálticas intercaladas en los sedimentos y el abatimiento del nivel freático. Los monitoreos GPS llevados a cabo fueron corregidos con la RGNA del INEGI, y se comparó su estabilidad con la base fija de “La Gavia”, mostrando la conveniencia de referenciar los levantamientos geodésicos de alta precisión con bases estables.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Celaya presentó en décadas anteriores tasas de hundimiento superiores a los 10 cm/año, que causaron daños considerables a las obras civiles (Trujillo-Candelaria, 1985 y 1991). Estos daños representan cuantiosas pérdidas materiales, dado que las obras civiles afectadas se vuelven inútiles e incluso peligrosas (*Fig. 1*).



Fig. 1.- Obras civiles riesgosas debido a los PSCF en Morelia, Mich. y Celaya, Gto.

La creciente aparición de este tipo de problemas en zonas urbanas estimula su estudio en ciudades donde ya han ocurrido o están en proceso, con la finalidad de entender

estos procesos y aplicar técnicas que atenúen las consecuencias en ciudades donde recién comienza su aparición; además de que existe todavía gran pugna sobre su origen y forma.

Para hacer frente a este tipo de problemática, cada vez con mayor frecuencia investigadores del área de Ciencias de la Tierra de todo el país, en especial de las ciudades de Morelia y Querétaro, entre otras, se dan a la tarea de estudiar el origen, formación y desarrollo de este tipo de procesos, para tratar de enfrentarlos o en su defecto prevenirlos y así aprender a convivir con ellos (*Fig. 2*), como se lleva a cabo con los demás riesgos naturales (deslizamientos, sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, huracanes, tsunamis, tornados, deshielos, etc.).



Fig. 2.- Convivencia con los PSCF

Los PSCF por su desarrollo superficial lento, requieren de ser estudiados en su geometría y desarrollo con instrumentación de alta precisión, como el GPS geodésico, capaz de detectar variaciones del orden de milímetros en las coordenadas de un punto sobre la superficie terrestre, a mediano y largo plazo, apoyado en tecnología de punta disponible. Tal nivel de precisión se justifica en la necesidad de delimitar el efecto de estos procesos en las obras civiles, ya que regularmente se presentan en franjas de afectación bien definidas y en ocasiones, con tendencias geométricas correspondientes con los sistemas de fallamiento regionales (Ávila-Olivera, 2009).

1.3 OBJETIVOS

El objetivo central del presente estudio es:

- ✓ Conocer la geometría y distribución de los PSCF en Celaya, Gto., mediante monitoreo con GPS.

De donde se desprenden los siguientes objetivos parciales:

- ✓ Identificar el patrón actual de las fallas superficiales que afectan a la ciudad de Celaya, Gto.
- ✓ Determinar la distribución espacial de los PSCF y su relación con la litología y la dinámica del acuífero de la ciudad de Celaya, Gto.
- ✓ Buscar relación entre la cinemática regional y los movimientos por monitoreo con GPS.
- ✓ Obtener herramientas que sirvan de insumo en la planificación del territorio de la ciudad de Celaya, Gto. y otras.

1.4 HIPÓTESIS

En la ciudad de Celaya, Gto., se presentan las condiciones necesarias para que se desarrollen los PSCF, es decir encontramos:

- ✓ Una cuenca rellena por sedimentos lacustres y/o fluviolacustres.
- ✓ Presencia de fallas geológicas en el basamento rocoso.
- ✓ Abatimiento del nivel piezométrico por extracción de agua subterránea.

Se plantea la hipótesis de que dada la precisión requerida, la magnitud de los PSCF presentes en la ciudad de Celaya, Gto., permite ser medida y monitoreada mediante estudios geodésicos con GPS.

CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO

II.1 GPS

ANTECEDENTES

Antiguamente los geodestas se veían limitados a distancias no superiores a 200 Km. debido a la visibilidad entre puntos, por lo que utilizaban observaciones a las estrellas para obtener una posición absoluta de un punto, cuando por razones de visibilidad no se podía realizar diferencialmente.

Uno de los más brillantes intentos de observaciones de redes no visibles se realizó para la unión de las redes geodésicas de Escandinavia y la Británica. En los vértices costeros de ambas redes se estacionaban y orientaban teodolitos, desde un barco entre las dos estaciones se soltaba un globo visible desde ambas redes, el cual emitía destellos periódicos desde un sistema de flash, mientras se observaba continuamente el globo, una central de radiocontrol iba disparando simultáneamente con intervalos regulares el registro angular fotográfico, lo que permitía establecer entre ambas redes puntos comunes de coordenadas en el sistema de cada red, pudiéndose enlazar con suficiente precisión ambas redes.

En un simposium científico celebrado en Toronto en septiembre de 1957, se presentó la posibilidad de utilizar unos hipotéticos satélites artificiales con aplicaciones geodésicas, lo que fue visto con escepticismo e ironía, dado lo absurdo de la idea en aquella época. El 4 de octubre del mismo año la URSS pone en órbita el primer satélite artificial: el SPUTNIK I, comenzando así la historia de la geodesia espacial. Desde ese momento se han lanzado más de 11,000 satélites artificiales, de los que se ha sacado provecho aunque no estuviese prevista su utilización para fines geodésicos (Peñafiel y Zayas, 2004).

SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

Los sistemas globales de navegación por satélite, suponen uno de los más importantes avances tecnológicos de las últimas décadas, están conformados por una constelación de satélites que conjuntamente con una red de ordenadores determinan por triangulación, la altitud, longitud y latitud de cualquier objeto en la superficie terrestre, el mar o el aire. Pudiendo alcanzar diferentes rangos de precisión en función del tipo de

receptor, antena, método de levantamiento y condiciones geográficas y ambientales. Actualmente se cuenta con tres sistemas de este tipo, el NAVSTAR GPS estadounidense, el GLONASS ruso y, el Galileo europeo.

➤ **Sistema NAVSTAR GPS.** En 1964, la marina de los Estados Unidos de América implantó un sistema denominado “Transit”, con el fin de proporcionar a los sistemas de navegación de sus flotas, observaciones de posicionamiento actualizadas y precisas. Sin embargo, dichas actualizaciones de posición únicamente se encontraban disponibles cada 40 minutos y además, el observador debía permanecer prácticamente estático si se deseaba obtener una información precisa. Posteriormente, y gracias al desarrollo de los relojes atómicos, se diseñó una constelación de satélites portando, cada uno de ellos, uno de estos relojes con el fin de mantener la sincronización de los mismos en base a una determinada referencia de tiempo. Así en 1973, surgió el programa “Navigation Technology Program” y que más adelante pasaría a ser llamado “NAVSTAR GPS” (Global Position System). De este modo, entre 1978 y 1985, fueron desarrollados y lanzados 11 satélites experimentales del “NAVSTAR GPS”, a los que siguieron otras generaciones de satélites, hasta completar la constelación actual de 24 satélites operativos. Esta constelación fue declarada en capacidad operacional inicial en 1993 y con capacidad operacional total en 1995.

El sistema de navegación GPS funciona mediante una red de 24 satélites orbitando a una altura de, aproximadamente 26,560 Km. y con trayectorias sincronizadas con el fin de cubrir toda la superficie terrestre. Concretamente, los 24 satélites operativos se distribuyen 6 planos orbitales con 4 satélites por plano orbital. Por otro lado, existen estaciones terrestres encargadas de enviar información de control a los satélites y así, controlar las órbitas de los mismos y llevar a cabo el mantenimiento de toda la constelación.

➤ **Sistema GLONASS.** En 1982 fueron colocados en órbita los 3 primeros satélites del sistema de navegación “GLONASS” (Global Orbiting Navigation Satellite). Inicialmente, dicho sistema fue concebido para estar totalmente operativo en 1991; sin embargo, se produjeron retrasos en el despliegue de la constelación, debido a recortes presupuestarios, por lo que ésta no fue terminada hasta finales de 1995, pasando a ser operativa a comienzos de 1996. Sin embargo, en 2002, y como consecuencia de la situación económica de la ya Federación Rusa, únicamente 8 satélites de la constelación se encontraban totalmente operativos. Esta situación fue mejorada en 2004, cuando pasaron a estar operativos 11 satélites, y en 2007, con 14. No obstante, son requeridos, como mínimo, 18 satélites para proporcionar una cobertura total en todo el territorio ruso y 24 para garantizar el alcance mundial.

El sistema GLONASS está formado por una constelación de 24 satélites, distribuidos en 3 planos orbitales con 8 satélites cada uno, orbitando a una altura aproximada, de 25,510 Km.

➤ **Sistema Galileo.** Es una iniciativa propuesta en 1999 por la Unión Europea con el apoyo de la “Agencia Espacial Europea” y un grupo de inversiones privadas. Inicialmente, estaba previsto que el sistema “Galileo” estuviera disponible en 2008; sin embargo, este proyecto acumula ya 3 años de retraso y no se podrá comenzar a comercializar sus servicios hasta 2011. Además, y debido a diferencias entre los distintos países participantes en el proyecto, existen temores que apuntan a que este retraso podría verse alargado hasta 2014. A finales de 2005, fue puesto en órbita el satélite “Giove – A” (Galileo in – orbit validation element), el primero de este sistema global de navegación. El segundo satélite de prueba, el “Giove – B”, debería haber sido lanzado a comienzos de 2006, pero este fue retrasado hasta mediados o finales de 2007 debido a problemas detectados en su computador de a bordo. Así la hoja de ruta actual para la implantación de “Galileo” consta de las siguientes fases:

1. Definición (2000–2003).
2. Desarrollo y validación en órbita (2004–2008).
3. Despliegue (2008–2010).
4. Explotación comercial (2010 – 2015).

Una vez el sistema global de navegación por satélite “Galileo” se encuentre totalmente operativo, estará compuesto por 30 satélites situados en 3 planos orbitales, a una altura de aproximadamente 23,616 Km. sobre la superficie terrestre. El control de esta constelación de satélites se llevará a cabo desde dos centros situados en Europa; los cuales se encargarán de llevar a cabo tareas tales como la sincronización de los cronómetros atómicos del satélite, el procesamiento de las señales de integridad, así como el manejo de datos de todos los elementos internos y externos. Además, una red de comunicaciones dedicada y de alcance mundial interconectará las estaciones de control y el resto de las instalaciones por medio de enlaces terrestres y satelitales.

Comparativamente (Tabla 1), los tres sistemas globales de navegación por satélite, NAVSTAR GPS, GLONASS y Galileo, actualmente disponibles, presentan las siguientes diferencias en sus parámetros técnicos:

Tabla 1.- Resumen comparativo con las principales características técnicas de los sistemas globales de navegación por satélite (Cueva-Lovelle, et al., 2007).

SISTEMA	GPS	GLONASS	Galileo
N° de Satélites	24	24	30
N° de Planos Orbitales	6	3	3
N° de Satélites por Plano Orbital	4	8	10
Inclinación Orbital	55°	64.8°	56°
Radio Orbital	26, 560 Km	25,510 Km	23,616 Km
Periodo Orbital	11 h 58 min	11 h 15 min	~ 14 h

EL SISTEMA GPS

El GPS o Sistema de Posicionamiento Global, puesto en funcionamiento desde 1973, fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para sustituir todos los sistemas de precisión media de navegación civil, Decca, Loran C, Omega, Transit, Tacan, ILS, Radiofaros, etc. Por razones de seguridad, las señales GPS generadas para uso civil se someten a una degradación deliberada, a pesar de ello, las aplicaciones civiles siguen proliferando a un ritmo exponencial gracias a la incorporación de las técnicas diferenciales (DGPS).

COMPONENTES DEL SISTEMA GPS

El sistema GPS está integrado por tres segmentos o componentes:

- **Segmento Espacial.**
- **Segmento de Control.**
- **Segmento Usuario.**

El **segmento espacial** está formado por una constelación de 24 satélites, que emiten señales de radio desde el espacio, distribuidos en 6 órbitas sincronizadas para cubrir toda la superficie terrestre, con un período de rotación de aproximadamente 12 horas, una órbita de 26560 Km de radio y, una inclinación de 55° respecto al plano ecuatorial. Esta distribución

espacial permite al usuario disponer en promedio de 5 a 8 satélites visibles en cualquier momento (Fig. 3).

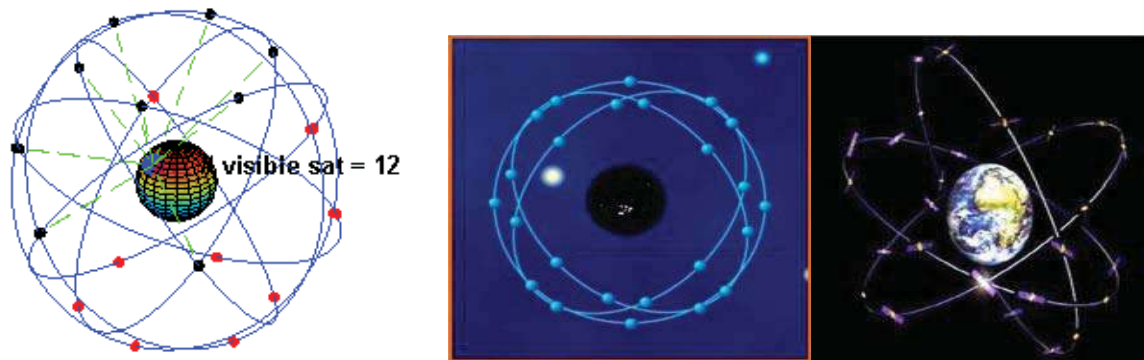


Fig. 3.- Segmento Espacial de los Sistemas GPS, GLONASS Y Galileo

Se planificaron tres generaciones de satélites compuestas por los siguientes bloques:

Bloque I. Los satélites de este bloque están aún en servicio parcialmente. Fueron lanzados desde la base de Vandenburg (California) entre los años 1978 y 1985, con carácter de experimentales. Estos satélites pesaban sobre unos 400 Kg. con paneles solares de 400 vatios de potencia. Cuatro satélites llevan osciladores de cuarzo, tres con relojes atómicos de rubidio y, tres con osciladores atómicos de cesio, de los diez puestos en órbita. La vida media de estos satélites es de cinco años.

Bloque II. El bloque II se puso en órbita mediante transbordadores espaciales, llevando tres satélites en cada viaje. Actualmente se están lanzando con el cohete MLV Delta 2. Estos satélites pesaban aproximadamente el doble que los del bloque I, y más pesados aún si iban provistos de los detectores de explosiones atómicas NUDET, llevan osciladores atómicos y paneles de 700 vatios de potencia. Hasta el momento todos los satélites están fabricados por Rockwell International, y cuentan con paneles solares para abastecerse de energía para cuando pasan por la zona de sombra de la Tierra. Poseen una serie de antenas emisoras que funcionan en la banda L del espectro, que son las que recibiremos en nuestro receptor.

Bloque III. Los satélites de última generación son mucho más confiables que los de la primera generación, dado que tienen sistemas alternativos computables desde tierra. Un satélite queda fuera de servicio cuando por avería o envejecimiento de los paneles solares, falta la capacidad de los acumuladores, por averías en los sistemas electrónicos, o agotamiento del combustible de maniobra y recuperación de órbita.

El *segmento de control* tiene la función de realizar el seguimiento continuo de los satélites, calcular su posición precisa, transmisión de datos y la supervisión necesaria para el control diario de todos los satélites del sistema NAVSTAR. Existen cinco estaciones de seguimiento; una estación maestra situada en la base aérea Falcon de *Colorado Springs* en Estados Unidos, y otras cuatro ubicadas en *Ascensión*, *Diego García*, *Kwajalein* y *Hawaii*, disponiendo todas de receptores con relojes de muy alta precisión. Se planea incrementar dicho segmento en dos fases adicionales, en la primera se incluiría a Cabo Cañaveral; y en la segunda, Washington, Quito, Buenos Aires, Hermitage, Bahrain y Smithfield (Fig. 4).

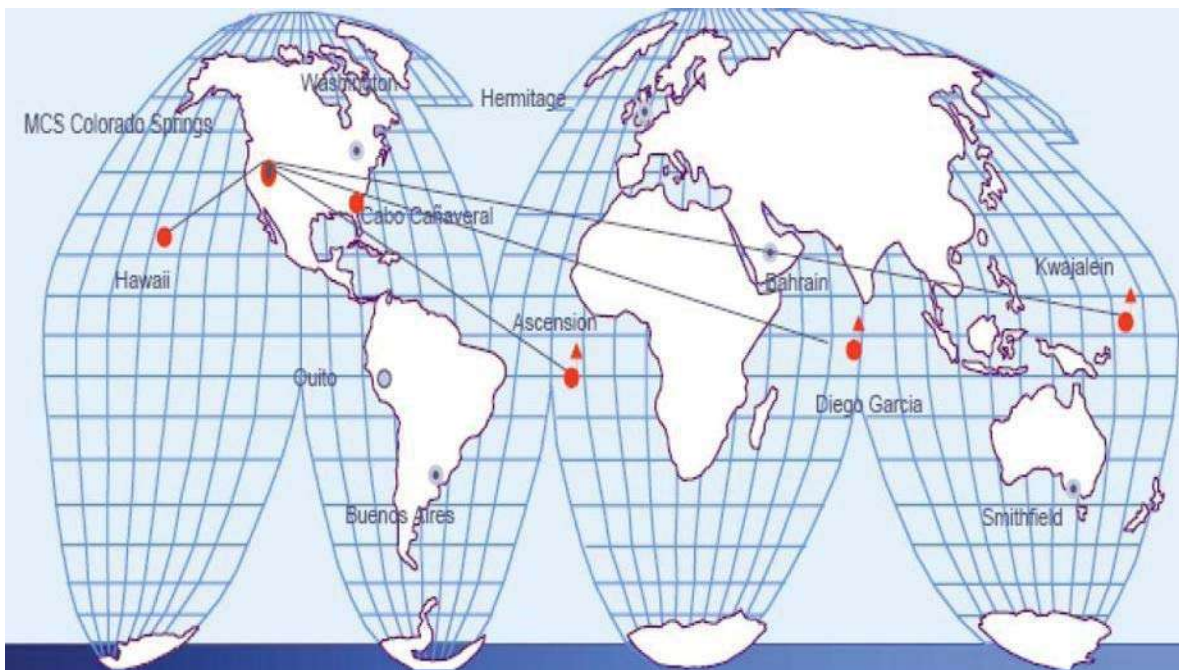


Fig. 4.- Segmento de Control del Sistema GPS (Koolhaas-Michel, 2003)

Los datos de las estaciones de seguimiento, cuyas posiciones son perfectamente conocidas, son transmitidos a la estación principal de control. Aquí las órbitas de los satélites son predichas junto con las correcciones del oscilador de los satélites. Estos datos son entonces transmitidos al correspondiente satélite, formando una parte esencial del mensaje-satélite. La sincronización del tiempo de los satélites es una de las más importantes misiones del segmento de control. La posición de los satélites es conocida por el receptor con base en las efemérides, que son predicciones de la posición actual de los satélites que se transmite al usuario en el mensaje de datos. La colección de efemérides de toda la constelación se completa cada 12 minutos y se guarda en el receptor GPS.

El *segmento usuario* comprende a cualquiera que reciba las señales satelitales con un receptor GPS, cuyo criterio de clasificación depende de la precisión que pueden alcanzar, así como su aplicación (Tabla 2), con las siguientes características:

Tabla 2.- Clasificación de los equipos GPS (Peñañiel y Zayas, 2004).

<i>EQUIPO GPS</i>	<i>MÉTODO</i>	<i>FRECUENCIA</i>	<i>OBSERVABLE</i>	<i>PRECISIÓN</i>	<i>APLICACIÓN</i>
NAVEGADOR	ABSOLUTO	L1	CÓDIGO C/A	± 100 Metros	NAVEGACIÓN
SUBMÉTRICO	DIFERENCIAL	L1	CÓDIGO C/A	1-2 Metros	CARTOG/SIG
MONOFRECUENCIA DE CÓDIGO Y FASE	DIFERENCIAL	L1	C/A y FASE	1 cm ± 2 mm	TOPOGRAFÍA
DOBLE FRECUENCIA	DIFERENCIAL	L1 Y L2	C/A, P y FASE	5 mm ± 1 mm	TOPOG/GEOD

➤ **GPS Navegadores.** Solo reciben datos de código C/A por la portadora L1; son receptores muy sencillos y de bajo precio; con funcionamiento autónomo, ya que no necesita descargar datos; son muy sencillos de manejar, con Firmware específico para la navegación; suelen tener accesorios para la colocación de antenas sobre barcos (Fig. 5).



Fig. 5.- GPS Navegador

➤ **GPS Submétricos.** Reciben datos de código C/A por la portadora L1, la diferencia con los anteriores es que ya trabajan diferencialmente es decir, un equipo de referencia, grabando datos continuamente y el equipo móvil tomando los puntos que deseamos levantar (Fig. 6), se utilizan en cartografía y SIG.



Fig. 6.- GPS Submétrico y/o Monofrecuencia de Código y Fase

- **GPS Monofrecuencia de Código y Fase.** Al igual que los anteriores, reciben datos de la portadora L1, pero con la diferencia de que además de tomar medidas en código C/A también realizan medidas de fase; trabajan también en modo diferencial, con receptores en referencia y móvil. La principal ventaja es el aumento de precisión, por lo que se utilizan en topografía (Fig. 6).
- **GPS Doble Frecuencia.** Se trata de los equipos de mayor precisión, por lo que se usan por excelencia en topografía y geodesia. Reciben datos de ambas portadoras emitidas por los satélites L1 y L2, realizando medidas de código C/A y P en L1, de código P en L2 y medidas de fase en L1 y L2 es decir, incluyen a todos los anteriores añadiendo las medidas sobre la portadora L2 (Fig. 7).



Fig. 7.- GPS Doble Frecuencia

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA GPS

El receptor GPS funciona midiendo su distancia a los satélites, y usa esa información para calcular su posición (Fig. 8). Esta distancia se mide calculando el tiempo que la señal tarda en llegar al receptor. Conocido ese tiempo y basándose en el hecho de que la señal viaja a la velocidad de la luz (salvo algunas correcciones que se aplican), se pueden calcular las distancias entre el receptor y los satélites, que por errores de sincronismo se denominan pseudodistancias.

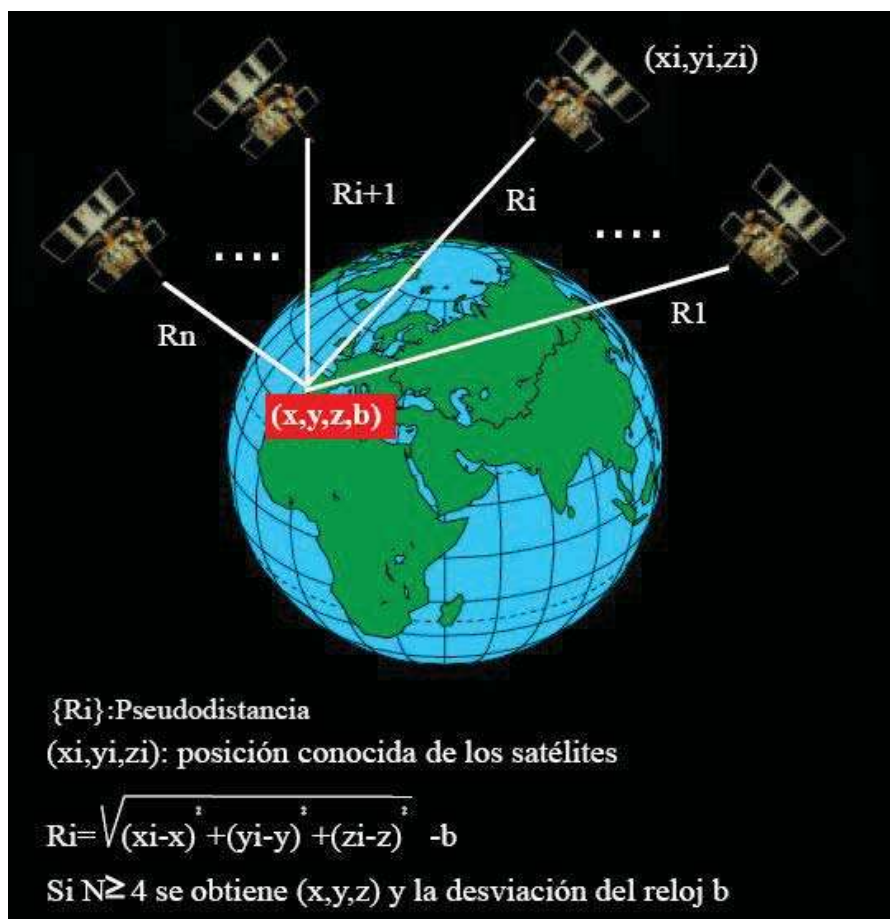


Fig. 8.- Funcionamiento del sistema GPS (Pozo-Ruz, et. al. 2000)

En el cálculo de las pseudodistancias debe considerarse que las señales GPS son muy débiles y están inmersas en el ruido de fondo inherente al planeta en la banda de radio. Este ruido natural está formado por una serie de pulsos aleatorios, lo que motiva la generación de un código pseudo-aleatorio artificial por los receptores GPS como patrón de fluctuaciones. En cada instante un satélite transmite una señal con el mismo patrón que la

serie pseudo-aleatoria generada por el receptor. En base a esta sincronización, el receptor calcula la distancia realizando un desplazamiento temporal de su código pseudo-aleatorio hasta lograr la coincidencia con el código recibido (Fig. 9); el mencionado desplazamiento corresponde al tiempo de vuelo de la señal. Este proceso se realiza de forma automática, continua e instantánea en cada receptor.

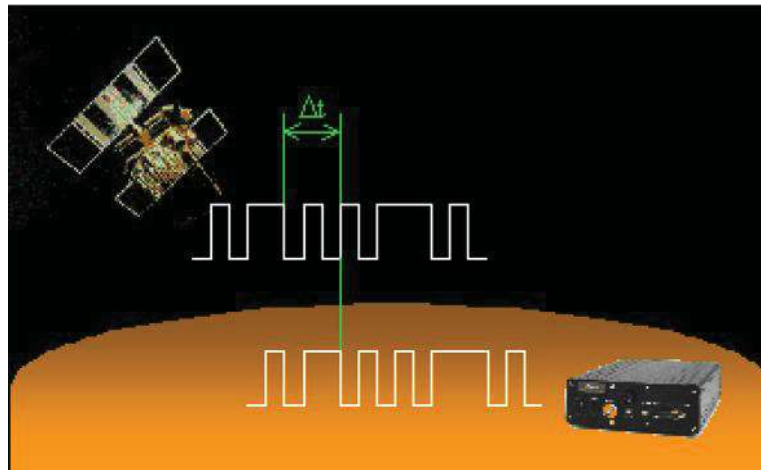


Fig. 9.- Sincronización del Código Pseudo-aleatorio GPS (Pozo-Ruz, et. al. 2000)

Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto de la superficie de la esfera, con centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor. Obteniendo información de dos satélites se nos indica que el receptor se encuentra sobre la circunferencia que resulta cuando se intersecan las dos esferas. Si adquirimos la misma información de un tercer satélite notamos que la nueva esfera solo corta la circunferencia anterior en dos puntos. Uno de ellos se puede descartar porque ofrece una posición absurda. De esta manera ya tendríamos la posición en 3-D. Sin embargo, dado que el reloj que incorporan los receptores GPS no está sincronizado con los relojes atómicos de los satélites GPS, los dos puntos determinados no son precisos.

Teniendo información de un cuarto satélite, eliminamos el inconveniente de la falta de sincronización entre los relojes de los receptores GPS (osciladores de cuarzo imprecisos) y los relojes de los satélites (relojes atómicos, dos de cesio y dos de rubidio). Y es en este momento cuando el receptor GPS puede determinar una posición 3-D exacta (latitud, longitud y altitud). Mientras no están sincronizados los relojes entre el receptor y los satélites, la intersección de las cuatro esferas con centro en estos satélites es un pequeño volumen en vez de ser un punto. La corrección consiste en ajustar la hora del receptor de tal forma que este volumen se transforma en un punto, por lo que resulta imprescindible un mínimo de cuatro satélites.

SEÑAL GPS

La clave de la precisión del sistema, es el hecho de que los componentes de la señal GPS están controlados por relojes atómicos de muy alta precisión. Los satélites tienen a bordo cuatro normas de tiempo: dos relojes de Rubidio y dos de Cesio, constituyendo el corazón de los satélites GPS.

El código pseudo-aleatorio transmitido se compone de tres tipos de cadenas (Fig. 10):

- El código C/A (*Coarse/Acquisition*), con frecuencia 1.023 MHz, utilizado por los usuarios civiles.
- El código P (*Precision Code*), de uso militar, con una frecuencia 10 veces superior al código C/A.
- El código Y, que se envía encriptado en lugar del código P cuando está activo el modo de operación anti-engaños (operativo desde 1994, impide que fuerzas hostiles generen y transmitan una señal igual a la de los satélites GPS).

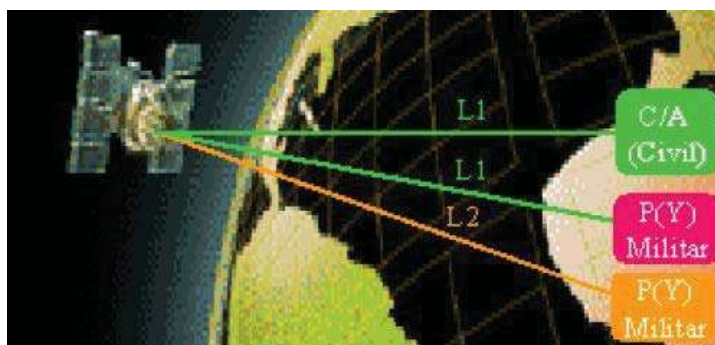


Fig. 10.- Señales Transmitidas por los Satélites GPS (Pozo-Ruz, et. al. 2000)

Los satélites GPS transmiten la información produciendo la frecuencia fundamental en la banda L. A partir de dicha frecuencia se derivan coherentemente dos señales, las frecuencias portadoras L1 a 1575.42 MHz, que transmite los códigos C/A y P; y L2 a 1227.60 MHz, que transmite información militar modulada en código P. Estas frecuencias duales son esenciales para eliminar el error causado por la refracción ionosférica. Además los satélites transmiten una señal de 50 Hz en ambas portadoras L1 y L2, que incluye las efemérides y las correcciones por desviación de sus relojes.

El sistema GPS proporciona dos niveles diferentes de servicio que separan el uso civil del militar:

- Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS, *Standard Positioning Service*). Precisión normal de posicionamiento civil obtenida con la utilización del código C/A de frecuencia simple.
- Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS, *Precise Positioning Service*). Este posicionamiento dinámico es el de mayor precisión, basado en el código P de frecuencia dual, y solo está accesible para los usuarios autorizados.

FUENTES DE ERROR DEL SISTEMA GPS

Las mediciones realizadas con GPS se ven afectadas de manera significativa por las siguientes fuentes de error:

- **Perturbación Ionosférica.** La ionósfera está formada por una capa de partículas cargadas eléctricamente que modifican la velocidad de propagación de las señales de radio que la atraviesan.
- **Fenómenos Meteorológicos.** En la tropósfera, cuna de los fenómenos meteorológicos, el vapor de agua afecta a las señales electromagnéticas disminuyendo su velocidad. Los errores generados son similares en magnitud a los ocasionados por la ionósfera, sin embargo su corrección es prácticamente imposible.
- **Imprecisión en los Relojes.** Los relojes atómicos de los satélites presentan ligeras desviaciones a pesar de su cuidadoso ajuste y control; lo mismo sucede con los relojes de los receptores.
- **Interferencias Eléctricas Imprevistas.** Las interferencias eléctricas pueden ocasionar correlaciones erróneas de los códigos pseudoaleatorios o un redondeo inadecuado en el cálculo de una órbita. Si el error es grande resulta fácil detectarlo, sin embargo no sucede lo mismo cuando las desviaciones son pequeñas y causan errores de hasta un metro.
- **Error Multisenda.** Las señales transmitidas desde los satélites pueden sufrir reflexiones antes de llegar al receptor, al hacer mediciones en condiciones topográficas abruptas, o en zonas urbanas con edificaciones altas. Los receptores modernos emplean técnicas avanzadas de proceso de señal, así como antenas de diseño especial para minimizar este error que resulta muy difícil de modelar al ser dependiente del entorno en el cual se ubique la antena GPS.

- **Interferencia "Disponibilidad Selectiva S/A".** Constituía la mayor fuente de error y era introducida deliberadamente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.
- **Topología Receptor-Satélite.** Los receptores deben considerar la geometría receptor-satélites visibles empleada en el cálculo de las distancias, ya que una determinada configuración espacial puede aumentar o disminuir la precisión de las mediciones. Los receptores más avanzados utilizan un factor multiplicativo que modifica el error de medición de la distancia (dilución de la precisión geométrica).

Las fuentes de error pueden agruparse según que dependan o no de la geometría de los satélites. El error debido a la Disponibilidad Selectiva y los derivados de la imprecisión de los relojes son independientes de la geometría de los satélites, mientras que los retrasos ionosféricos, troposféricos y los errores multisenda dependen fuertemente de la topología. Los errores procedentes de las distintas fuentes se acumulan en un valor de incertidumbre que va asociado a cada medida de posición GPS.

APLICACIONES DE LOS SISTEMAS GPS

Son múltiples los campos de aplicación de los sistemas de posicionamiento tanto como sistemas de ayuda a la navegación, como en modelización del espacio atmosférico y terrestre o aplicaciones con requerimientos de alta precisión en la medida del tiempo. A continuación se detallan algunos de los campos civiles y científicos donde se utilizan en la actualidad sistemas GPS:

- ✓ **Estudio de fenómenos atmosféricos.** Cuando la señal GPS atraviesa la tropósfera el vapor de agua, principal causante de los distintos fenómenos meteorológicos, modifica su velocidad de propagación. El posterior análisis de la señal GPS es de gran utilidad en la elaboración de modelos de predicción meteorológica.
- ✓ **Localización y navegación en regiones inhóspitas.** El sistema GPS se utiliza como ayuda en expediciones de investigación en regiones de difícil acceso y en escenarios caracterizados por la ausencia de marcas u obstáculos. Un ejemplo son los sistemas guiados por GPS para profundizar en el conocimiento de las regiones polares o desérticas.
- ✓ **Modelos geológicos y topográficos.** Los geólogos comenzaron a aplicar el sistema GPS en los 80 para estudiar el movimiento lento y constante de las placas tectónicas, para la predicción de terremotos en regiones geológicamente activas. En topografía, el sistema

GPS constituye una herramienta básica y fundamental para realizar el levantamiento de terrenos y los inventarios forestales y agrarios.

- ✓ **Ingeniería civil.** En este campo se utiliza la alta precisión del sistema GPS para monitorizar en tiempo real las deformaciones de grandes estructuras metálicas o de concreto sometidas a cargas.
- ✓ **Sistemas de alarma automática.** Existen sistemas de alarma conectados a sensores dotados de un receptor GPS para supervisión del transporte de mercancías tanto contaminantes de alto riesgo como perecederas (productos alimentarios frescos y congelados). En este caso la generación de una alarma permite una rápida asistencia al vehículo.
- ✓ **Sincronización de señales.** La industria eléctrica utiliza el GPS para sincronizar los relojes de sus estaciones monitoras a fin de localizar posibles fallos en el servicio eléctrico. La localización del origen del fallo se realiza por triangulación, conociendo el tiempo de ocurrencia desde tres estaciones con relojes sincronizados.
- ✓ **Guiado de disminuidos físicos.** Se están desarrollando sistemas GPS para ayuda en la navegación de invidentes por la ciudad. En esta misma línea, la industria turística estudia la incorporación del sistema de localización en guiado de visitas turísticas a fin de optimizar los recorridos entre los distintos lugares de una ruta.
- ✓ **Navegación y control de flotas de vehículos.** El sistema GPS se emplea en planificación de trayectorias y control de flotas de vehículos. La policía, los servicios de socorro (bomberos, ambulancias), las centrales de taxis, los servicios de mensajería, empresas de reparto, etc. organizan sus tareas optimizando los recorridos de las flotas desde una estación central. Algunas compañías ferroviarias utilizan ya el sistema GPS para localizar sus trenes, máquinas locomotoras o vagones, supervisando el cumplimiento de las señalizaciones.
- ✓ **Sistemas de aviación civil.** En 1983 el derribo del vuelo 007 de la compañía aérea coreana al invadir cielo soviético, por problemas de navegación, acentuó la necesidad de contar con la ayuda de un sistema preciso de localización en la navegación aérea. Hoy en día el sistema GPS se emplea en la aviación civil tanto en vuelos domésticos, transoceánicos, como en la operación de aterrizaje. La importancia del empleo de los GPS en este campo ha impulsado el desarrollo en Europa, Estados Unidos y Japón de sistemas orientados a mejorar la precisión de los GPS.

✓ **Navegación desasistida de vehículos.** Se están incorporando sistemas DGPS como ayuda en barcos para maniobrar de forma precisa en zonas de intenso tráfico, en vehículos autónomos terrestres que realizan su actividad en entornos abiertos en tareas repetitivas, de vigilancia en medios hostiles (fuego, granadas, contaminación de cualquier tipo) y en todos aquellos móviles que realizan transporte de carga, tanto en agricultura como en minería o construcción. La alta precisión de las medidas ha permitido importantes avances en el espacio en órbitas bajas y así tareas de alto riesgo de inspección, mantenimiento y ensamblaje de satélites artificiales pueden ahora realizarse mediante robots autónomos.

EL FUTURO DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

En 1996 la normativa de regulación de los sistemas GPS determinó la supresión en el 2006, de la Disponibilidad Selectiva, misma que se llevó a cabo el 1 de mayo del 2000, y la incorporación de una frecuencia más para uso civil. Esto significa que los satélites GPS transmiten código civil en las frecuencias L1 y L2, redundancia que permite estimar los errores ionosféricos, proporcionando una precisión en modo absoluto similar a la obtenida con técnicas diferenciales. La señal en la frecuencia L1 permanece invariable, lo que permite a los anteriores receptores seguir operativos.

El segmento de control se mejorará con la puesta en marcha de un nuevo sistema de control, actualmente en fase de diseño, para la estación experta que contempla hasta un total de veinte estaciones monitoras en tres fases, lo que supondrá un control más preciso de las efemérides y de los relojes de los satélites.

Con los sistemas de navegación actuales GPS, GLONASS, GPS/GLONASS no es posible cumplir los estándares rigurosos de seguridad que algunas aplicaciones civiles, como la navegación aérea, requieren. En concreto, la notificación de errores al usuario sobre el funcionamiento del sistema puede llevar desde un segundo, cuando el error se produce en el satélite, hasta varias horas, en aquellos casos en los que es el segmento control el que detecta el fallo. Con el fin de resolver estos inconvenientes, Europa está desarrollando EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) que estará operativo en los próximos años (Fig. 11). Este sistema reducirá los errores en posicionamiento para alcanzar los estándares de seguridad en la navegación aérea con la instalación en tierra de una red de 34 antenas receptoras fijas (RIMS) que recibirán las señales GPS enviándolas a un centro de control donde se calibrará la información del satélite midiendo el posible error para corregirlo y enviarlo de nuevo a 10 estaciones en

tierra. Además se enviarán estas señales a dos nuevos satélites INMARSAT geostacionarios situados a una altura de 35000 Km., que actuarán como repetidores enviando las señales a los usuarios. Servicios similares se están desarrollando en Estados Unidos (WAAS: *Wide Area Augmentation System*) (Fig. 11) y en Japón (MTSAS: *MTSAT Satellite Based Augmentation System*). Así mismo, Europa pondrá en marcha un sistema global de navegación por satélite (GNSS-1: *Global Navigation Satellite System 1*) que integrará los servicios de GPS, GLONASS y de las redes EGNOS, WAAS y MTSAS. Este será el paso inicial hacia la consecución de un sistema europeo de posicionamiento (GNSS-2 o Galileo) que utilizará una constelación de satélites europeos.

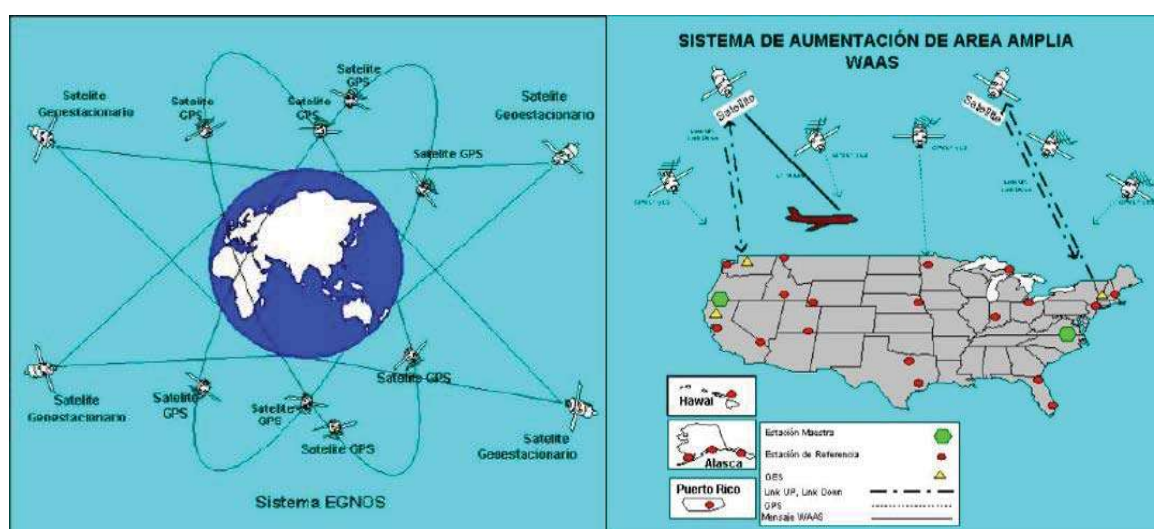


Fig. 11.- Sistemas EGNOS y WAAS

II.2 RGNA-INEGI

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), coordina desde febrero de 1993, un conjunto de estaciones de monitoreo continuo de datos GPS denominado Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), para el posicionamiento geodésico tridimensional en la república mexicana.

Actualmente la RGNA se conforma de 21 estaciones considerando las estaciones cooperativas del Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (IITJ) y del Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ciudad Juárez, Chihuahua (IMIP).

Cada una de estas estaciones tiene un radio de acción de 500 km. (Fig. 12), ofreciendo cobertura nacional. Su distribución estratégica permite a cada usuario disponer de dos a tres estaciones de la RGNA para ligar sus levantamientos con equipo GPS.

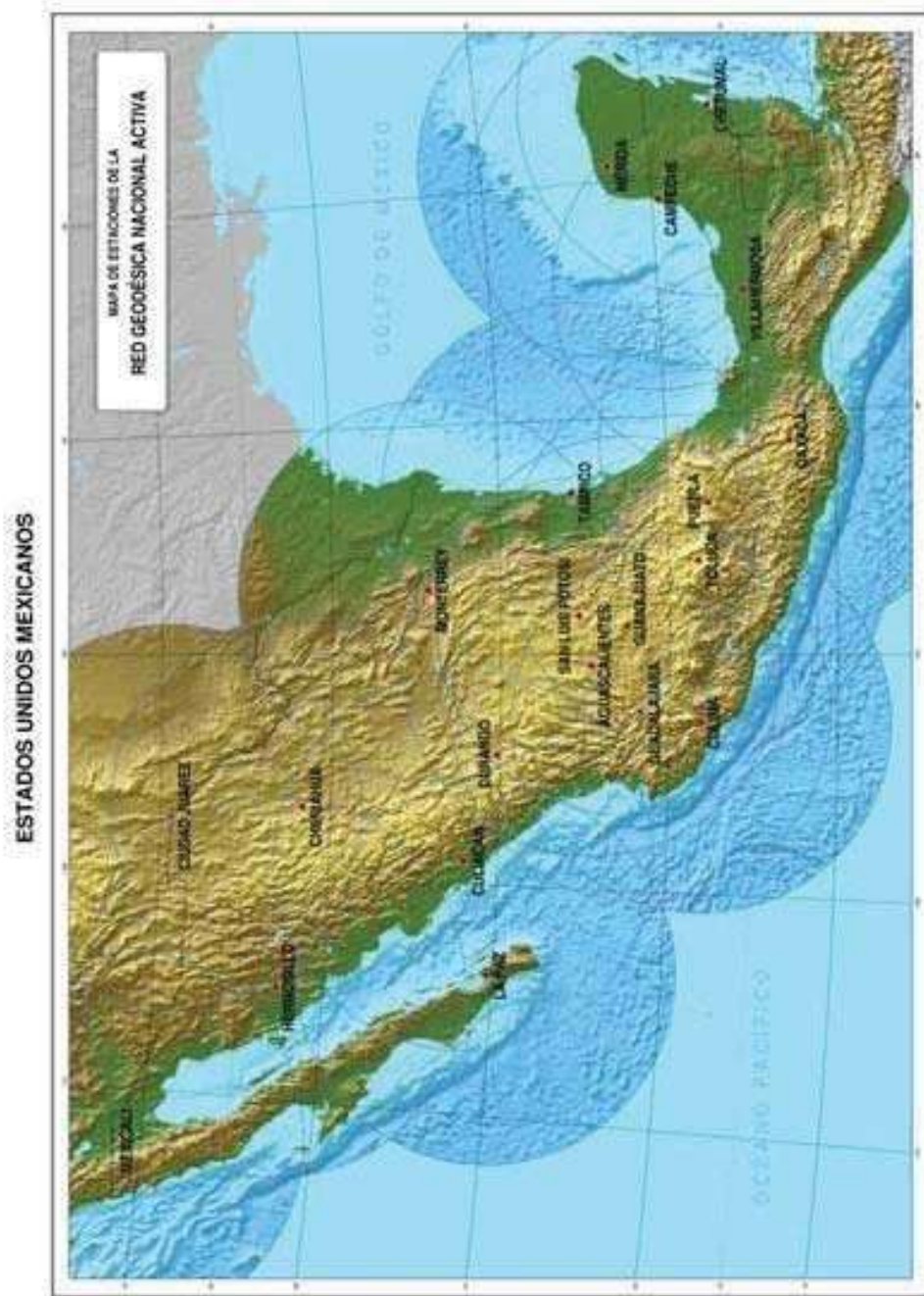


Fig. 12.- Red Geodésica Nacional Activa del INEGI (INEGI)

Las coordenadas de estas estaciones (Tabla 3), están disponibles en el sitio web del INEGI, dadas en el ITRF92, época 1988.0.

Tabla 3.- Coordenadas Geodésicas de las Estaciones de la RGNA del INEGI

Nombre de la Estación	Latitud Norte (° ' ")	Longitud Oeste (° ' ")	Altura Geodésica (m)	Altura vertical de la Antena (m)	Receptor	Antena
CHET	18 29 42.99542	88 17 57.20162	3.013	0.143	5700	Zephyr Geodetic
CHI3	28 39 43.89732	106 05 12.25225	1413.185	0.234	5700	Zephyr Geodetic
COL2	19 14 39.99621	103 42 6.77420	528.837	0.160	5700	Zephyr Geodetic
CULC	24 47 42.31241	107 24 45.33652	36.173	0.146	5700	Zephyr Geodetic
HER2	29 05 33.17336	110 58 01.96439	186.959	0.230	5700	Zephyr Geodetic
ICAM	19 51 12.44616	90 31 38.89310	2.635	0.136	5700	Zephyr Geodetic
ICEP	19 01 58.88570	98 11 15.34405	2150.341	0.214	ZXII	L1/L2 Geodetic
IMIP	31 44 41.76201	106 26 45.11357	1113.491	0.299	5700	Zephyr Geodetic
IDGO	24 04 02.83363	104 36 25.47325	1863.104	0.199	ZXII	L1/L2 Geodetic
IITJ	20 41 04.22247	103 26 45.73354	1657.055	0.102	4400	Permanent L1/L2
INEG	21 51 22.15474	102 17 03.12524	1888.090	0.180	5700	Choke Ring
LPAZ	24 08 19.66031	110 19 09.61863	-6.774	0.135	5700	Zephyr Geodetic
MERI	20 58 48.16279	89 37 13.13418	7.912	0.135	5700	Zephyr Geodetic
MEXI	32 37 58.76110	115 28 32.51482	-22.474	0.137	5700	Zephyr Geodetic
MTY2	25 42 55.82609	100 18 46.45205	521.781	0.139	5700	Zephyr Geodetic
OAX2	17 04 42.02155	96 43 00.25760	1607.298	0.185	5700	Zephyr Geodetic
TAMP	22 16 41.95723	97 51 50.48937	21.107	0.148	5700	Zephyr Geodetic
TOL2	19 17 35.64431	99 38 36.49337	2651.725	0.148	5700	Zephyr Geodetic
UGTO	21 00 09.75632	101 16 17.98423	2062.325	0.121	5700	Zephyr Geodetic
USLP	22 08 39.24062	101 00 56.40017	1892.880	0.195	ZXII	L1/L2 Geodetic
VIL2	17 59 25.47706	92 55 51.94738	27.720	0.124	5700	Zephyr Geodetic

Actualización: 18 de agosto de 2009

La RGNA fue concebida e implementada por las siguientes razones:

- Necesidad de establecer un marco de referencia compatible en precisión con las modernas tecnologías de posicionamiento.
- Adoptar un marco de mayor exactitud posicional y consistencia que el ofrecido por el NAD27.
- Responder a los requerimientos de referenciación geográfica que demandaron programas de relevancia nacional tales como el Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares Urbanos (PROCEDE).

Al corregir datos GPS con la RGNA se debe considerar que la mayor parte del territorio de nuestro país se encuentra asentado principalmente en dos placas tectónicas: Placa Norteamericana y Placa del Pacífico (Fig. 13). Una pequeñísima parte de Chiapas cercana a la frontera, se ubica en la Placa del Caribe, lo que tiene efectos en el procesamiento y ajuste de coordenadas usando estaciones de la RGNA ubicadas en distintas placas, porque estas presentan diferentes velocidades, pudiendo causar distorsiones en los resultados.



Fig. 13.- Placas Tectónicas en que se Ubica el Territorio Mexicano (Gráfico USGS, INEGI)

Por lo anterior, el INEGI recomienda enfáticamente para el procedimiento de procesamiento habitual de datos GPS en levantamientos de alta precisión solo realizar ajustes con estaciones ubicadas en la misma placa tectónica; para el caso de la placa del Pacífico, utilizar solo una estación para los trabajos, ya sea LPAZ o MEXI, pero no ambas. Esta última recomendación obedece al hecho de que la estación MEXI tiene una velocidad aproximada de dos centímetros menor comparativamente a LPAZ, por lo que entre más años transcurran en relación a la época de referencia del marco, su uso conjunto genera el aumento en la distorsión como efecto en el cálculo de coordenadas de los vértices.

A partir del 23 de Junio de 2004 las observaciones GPS de las estaciones de la RGNA referenciadas al ITRF92, se encuentran disponibles gratuitamente durante un periodo de 90 días, con archivos de tipo RINEX descargables en su sitio de internet. Los archivos RINEX (*Receiver INdependent Exchange format*) surgen de la necesidad de intercambiar información de distintos tipos de receptores, de distintas casas comerciales, de distintas versiones, en el mismo proyecto, e incluso registrada por equipos de posicionamiento con diferentes satélites, ya sean GPS, TRANSIT, GLONASS o combinados. Los ficheros RINEX se denominan por convención de la siguiente forma:

SSSSDDDF.YYT

Donde:

<i>SSSS...</i>	Primeros cuatro caracteres del nombre de la estación.
<i>DDD...</i>	Día del año, empezando a contar desde el primer día del año (Fig. 14).
<i>F...</i>	Sesión.
<i>YY...</i>	Los dos últimos dígitos del año.
<i>T...</i>	Tipo de fichero:
	<i>O...</i> Fichero de observación.
	<i>N...</i> Fichero de navegación.
	<i>M...</i> Fichero Meteorológico.

Lo que significa, que quién lleva a cabo un levantamiento GPS el día 04 de marzo de 2009, con referencia en la estación RGNA-INEGI-USLP, usará para corrección de sus datos el archivo rinex “***USLP0630.09o***”, proporcionado en línea por el INEGI.

Otro aspecto muy importante a considerar cuando se usan las estaciones de la RGNA-INEGI para corrección de datos GPS, es la estabilidad de las propias bases, ya que se han detectado cambios en la altura geodésica en varias de ellas, derivados muy probablemente del efecto de subsidencia en el sitio de emplazamiento.

Esta situación se puede observar como ejemplo con el comportamiento de la altura geodésica de la estación INEG (Aguascalientes) (Fig. 14), en diferentes épocas de observación, como lo muestra la siguiente figura:

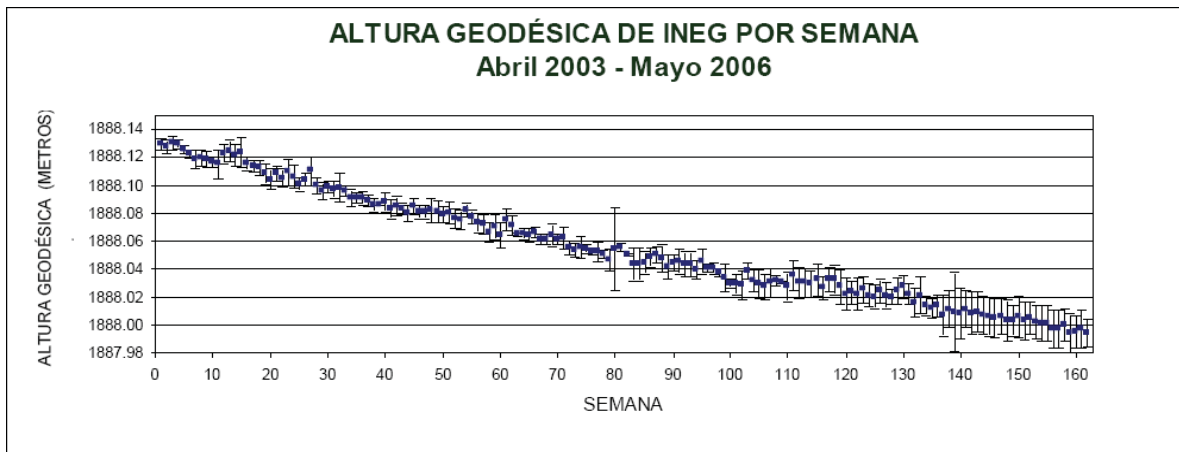


Fig. 14.- *Altura Geodésica de la Estación RGNA-INEGI-INEG (INEGI)*

Lo anterior plantea las siguientes consideraciones y recomendaciones:

- La propagación de coordenadas para puntos medidos con receptores GPS debe llevarse a cabo mediante el proceso diferencial de los datos obtenidos, esto implica el uso de una o varias estaciones de la RGNA.
- La exactitud de las coordenadas de los puntos propagados depende de varios factores, uno de ellos es la exactitud de las coordenadas conocidas del punto o estación empleada para el proceso diferencial. En este sentido, para el uso de la estación INEG tomado como ejemplo, en la propagación de coordenadas se debe tomar en cuenta la situación que presenta la altura geodésica de esta estación.
- Para el caso de levantamientos GPS en los que la propagación de coordenadas se hace a partir de una sola estación, se recomienda revisar la situación de su altura geodésica, a menos de que la calidad de la misma una vez propagada no sea relevante.

Estas variaciones en la vertical se tienen en la mayoría de las estaciones de la RGNA-INEGI, por lo que reviste mayor importancia lo realizado durante este trabajo de investigación, con la instalación de la base fija de “La Gavia” posteriormente referida, con desplazamientos reportados de entre 8-10 mm/año.

II.3 MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO CON GPS

Existen principalmente tres procedimientos para llevar a cabo una medición con GPS: *estático*, *dinámico* y en *tiempo real*.

El *estático*, se utiliza para distancias largas (mayores de 20 Km) y la más alta precisión. Consiste en estacionar dos o más receptores en los puntos de los cuales queremos conocer sus coordenadas, almacenar datos y calcular las coordenadas en tiempo diferido. Se utiliza en control geodésico, redes nacionales e internacionales, control de movimientos tectónicos y control de deformaciones en diques y estructuras, dado que es más preciso, eficiente y económico que los métodos topográficos tradicionales.

El *dinámico*, consiste en colocar el receptor de referencia siempre en posicionamiento estático, desplazando el receptor móvil. Se utiliza para la determinación de la trayectoria de objetos en movimiento, levantamientos de ejes de carreteras y ferrocarriles, medición de perfiles transversales, entre otros, con la ventaja de que se realizan mediciones continuas rápidas y económicas.

El procedimiento en *tiempo real*, es una de las últimas innovaciones en las técnicas de medida GPS. Consiste en obtener coordenadas en tiempo real en el sistema de referencia adoptado previamente. Todos los avances tecnológicos efectuados en las técnicas de medición GPS se dirigen hacia estar el menor tiempo posible en la toma del punto y tener el resultado en el propio campo. Mediante el tiempo real en el GPS, podemos utilizar este de manera similar a una estación total es decir, obtener las coordenadas al instante, con alta precisión.

El método estático tiene la variante denominada estático rápido. La precisión de una medición depende del tiempo de observación y, este a su vez está en función de la longitud de línea base, del número de satélites disponibles, de la geometría de dichos satélites (GDOP) y, de las condiciones atmosféricas. En el caso de mediciones en modos estático y estático rápido, la antena debe tener total estabilidad durante toda la ocupación en un punto, de lo contrario la calidad de las coordenadas durante el post-proceso se ve afectada.

Las observaciones en modo estático rápido deben presentar cuatro o más satélites con un GDOP ≤ 8 y, un ángulo de elevación mayor a 15° , tanto en la estación de referencia como en el punto de interés. Sin embargo las condiciones ideales son en la presencia de cinco o más satélites con un GDOP ≤ 5 y, un ángulo de elevación mayor a 20° .

Para lograr un levantamiento exitoso con GPS, es necesaria una recepción clara de las señales de los satélites; por lo tanto los receptores deben instalarse en sitios libres de obstrucciones: no deben de existir árboles, edificios altos, montañas, etc., que puedan interferir la línea de visibilidad entre la antena GPS y los satélites. Lo anterior se aplica con mayor rigor para los receptores que trabajan como estación de referencia.

Las características necesarias para lograr una buena precisión de los puntos medidos, depende del número de satélites observados o enganchados, de la señal de ruido, de la elevación de la máscara, de la línea base, de la geometría de la constelación de satélites (PDOP: Position Dilution of Precision), del tiempo de observación del punto o vértice por posicionar, de las efemérides, de las perturbaciones atmosféricas (ionosféricas y troposféricas), del efecto multitrayectoria y, de la resolución de ambigüedades. La temperatura ambiental para la operación es similar en todos los instrumentos GPS, con un promedio de -20 a 55° C.

II.4 MÉTODOS DE CORRECCIÓN DIFERENCIAL, RESTRICCIONES.

La corrección diferencial para levantamientos GPS, consiste en observar y calcular una línea base entre dos receptores. Uno de ellos, el receptor base, debe presentar coordenadas previamente corregidas. Cuando dichos receptores observan el mismo conjunto de satélites en forma simultánea, los efectos atmosféricos se anulan en gran parte; por lo tanto entre más corta sea la línea base (Tabla 4), mayor es la probabilidad de que la transmisión de señales a los dos receptores se lleve a cabo en condiciones atmosféricas idénticas, y por lo tanto requiere de menor tiempo de medición.

Tabla 4.- Relación Longitud de Línea Base-Tiempo de Medición (Peñafiel y Zayas, 2004)

Nº de satélites GDOP <= 8	Longitud de la línea base	Tiempo de observación DÍA	Tiempo de observación NOCHE
ESTAT. RAPIDO			
4 ó 5	menos de 5 Km.	de 5 a 10 min.	5 min.
4 ó 5	de 5 a 10 Km.	de 10 a 20 min.	de 5 a 10 min.
4 ó 5	de 10 a 15 Km.	alrededor de 30	de 5 a 20 min.
ESTATICO			
4 ó 5	de 15 a 30 Km.	de 1 a 2 horas	1 hora
4 ó 5	más de 30 Km.	de 2 a 3 horas	2 horas

La corrección diferencial GPS (DGPS) es un sistema que proporciona a los receptores correcciones de los datos obtenidos de los satélites. Dichas correcciones una vez aplicadas, generan una mayor precisión en el cálculo de la posición. Para poder emplear este sistema es necesario ubicar un receptor en una posición conocida de la superficie terrestre (estación base), el cual calcula su posición en función de las distancias a los satélites que observa; la diferencia entre la posición calculada y la exacta constituye el error en la medición, que se puede transmitir en un código predefinido y, de esta manera cualquier otro receptor con capacidad de corrección diferencial puede acceder a él para corregir su posición. La técnica DGPS elimina prácticamente los errores S/A siempre y cuando el receptor diferencial se localice próximo a la base emisora de la corrección (a menos de 1,000 km). Las correcciones pueden enviarse desde una estación base, una estación virtual (Internet), estaciones de radio comerciales, así como desde un sistema de satélites diseñado para tal efecto (WAAS-Estados Unidos, EGNOS-Europa y MSAS-Japón). Existen dos tipos de sistemas DGPS, los de área local (LADGPS) y, los de área amplia (WADGPS); la diferencia entre ambos, como su nombre lo indica es el área de cobertura del sistema.

La precisión de los datos de campo se obtiene a través de un proceso denominado corrección diferencial, el cual permite la obtención de coordenadas de los puntos que se midieron como estaciones móviles a partir de la estación base.

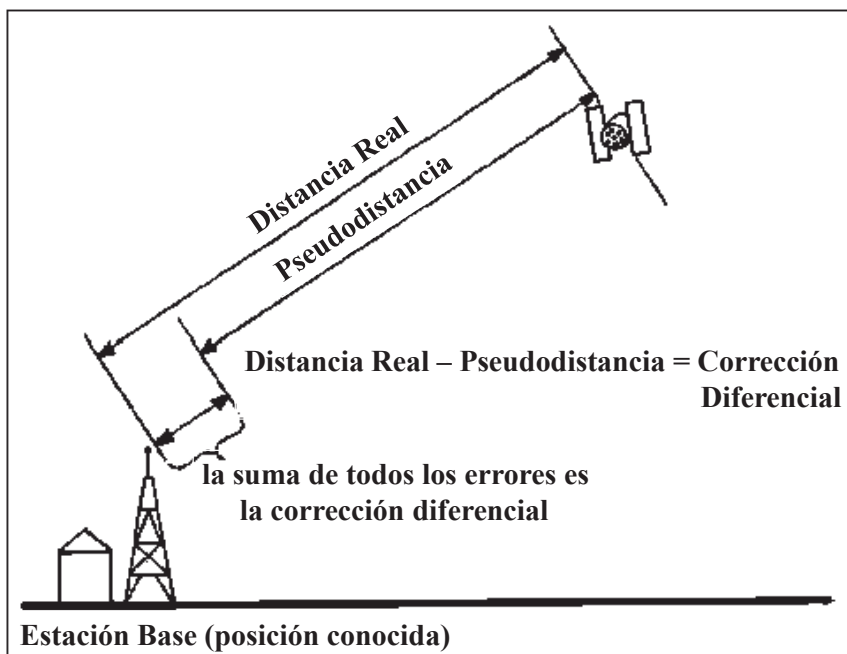


Fig. 15.- Corrección Diferencial de Datos GPS

Los datos capturados por los receptores GPS están sujetos a errores, que varían desde errores muy pequeños de los relojes de los satélites hasta errores muy grandes como los ocasionados por la Disponibilidad Selectiva, que el segmento de control introduce intencionalmente en el sistema. El proceso de Corrección Diferencial reduce este tipo de errores, además de los atmosféricos.

Para realizar la Corrección Diferencial se requiere por lo menos un archivo base y uno móvil, con tiempos comunes de medición. También es necesario que la base inicie primero que el móvil, que la hora de término del móvil sea primero y después la base, y que ambos receptores estén siguiendo a los mismos satélites (mínimo 4) ya que con esto la estación base capta los mismos errores que el móvil. El proceso de corrección diferencial puede corregirlos basándose en la hora en que las posiciones fueron capturadas, pudiendo ser: a tiempo real o a posteriori.

Las correcciones a tiempo real se usan específicamente en la navegación marítima y aérea, por posición o por tiempo, siendo estas últimas más precisas y con una mayor área de transmisión que las de posición. Cuando la corrección es transmitida a una gran área mediante satélites recibe el nombre de WAAS, de gran utilidad en los aeropuertos ya que disminuye el costo de los equipos requeridos para el aterrizaje, proporcionando también información para la gestión del tráfico aéreo. El DGPS en tiempo real no está limitado a zonas costeras, hay muchas compañías privadas que transmiten datos de corrección, sin embargo hay que pagar una cuota anual o semestral para que su receptor pueda captarlos.

Las correcciones a posteriori tal como lo indica su nombre, no se aplican en campo, sino que se llevan a cabo en gabinete después de haber hecho el levantamiento. Es un sistema más económico que permite disfrutar de la precisión DGPS, ahorrándose los gastos que conllevan las correcciones en tiempo real y eventualmente es la única posibilidad de realizar la técnica DGPS.

CAPÍTULO III.- ANTECEDENTES

III.1 SUBSIDENCIA, CREEP, FALLA

SUBSIDENCIA

Se le conoce como subsidencia terrestre al asentamiento de la superficie del terreno por causas naturales o antropogénicas (Carreón-Freyre *et al.*, 2002), siendo en ambos casos irreversible, pero con diferentes ordenes de magnitud.

La subsidencia de origen natural presenta escala regional, con velocidades de 0.7 a 2 mm/año, es inevitable, irreversible y difícilmente cuantificable (Termolini, 2007). Algunos tipos de subsidencia natural son: subsidencia tectónica y por eustatismo (Preti, 1999); por deshielo del *permafrost* es decir, deshielo de la capa de hielo congelada en los niveles superficiales de las regiones frías o periglaciares; por compactación natural de los sedimentos finos (Pieri *et al.*, 1981); kárstica por colapso de cavidades subterráneas (Sinclair, 1982).

La subsidencia por causas antropogénicas presenta velocidades del orden de las decenas de mm/año, con carácter de previsible y evitable. Algunos orígenes de este tipo de subsidencia son: subsidencia debida a la consolidación de un sistema acuífero (Trujillo-Candelaria, 1985, 1991; Garduño-Monroy *et al.*, 2001); por extracción de agua caliente y vapor de subsuelo para la generación de energía geotérmica; por extracción de hidrocarburos; por drenaje de suelos orgánicos; por extracción de minerales en la minería subterránea.

CREEP

La deformación de la superficie terrestre en el tiempo es controlada por mecanismos que dependen de variaciones de las tensiones efectivas en el subsuelo, junto a procesos de difusión del agua intersticial (*consolidación primaria*), o bien, por mecanismos que se producen en condiciones de esfuerzos efectivos y presiones neutras constantes, dependientes de las propiedades viscosas de la estructura (*creep*) (Terzaghi, 1925).

La extracción de agua del subsuelo, provoca un reacomodo de las partículas del suelo buscando nuevas posiciones que permitan soportar el incremento de presión efectiva, que por el abatimiento de la superficie piezométrica, la lleva hasta valores superiores a los de preconsolidación, sufriendo el suelo una deformación plástica que favorece la

subsistencia. Esta deformación, así como la filtración del agua, es totalmente vertical (unidimensional), es decir no existen asentamientos en condiciones no drenadas, tampoco al momento de la aplicación de la carga (Terzaghi, 1925).

La consolidación primaria se define como la reducción de volumen ocasionada por la expulsión de agua de los poros del terreno bajo esfuerzos, fenómeno en el que se transfiere la carga soportada por el agua al esqueleto sólido, que, consiguientemente, reorganiza rápidamente las partículas sólidas. Este tipo de consolidación actúa en un lapso de tiempo más o menos largo en función de la permeabilidad de la capa cargada, de su espesor y del tipo de estrato (abierto, cerrado, semi-abierto) y es el responsable de los asentamientos más consistentes. Mientras que la consolidación secundaria es ocasionada por el lento movimiento viscoso y residual de las partículas sólidas que se reacomodan, deformándose y compactándose por tiempos mucho más largos con respecto a los de la consolidación primaria (Terzaghi, 1925).

El término creep se emplea para denotar la deformación del suelo que es lenta, continua a través del tiempo, y asísmica, sin afectaciones al basamento rocoso (Garduño-Monroy *et al.*, 1999, 2001).

FALLA

Se le denomina falla a la fractura o área de fracturación entre dos bloques de roca o sedimentos, en donde se verifique o se haya verificado un desplazamiento relativo de un bloque con respecto al otro. El movimiento puede ser rápido y rígido o lento y viscoso. Este desplazamiento ocurre a lo largo de un plano, llamado *plano de falla*, que separa dos bloques llamados *techo* y *piso* en función de su posición con respecto a dicho plano. Se define como *salto vertical* o *desnivel topográfico* el desplazamiento vertical de un bloque con respecto al otro, o sea el desnivel del espejo de falla. El *salto real* o *salto de falla* corresponde a la medida del desnivel entre segmentos de una misma capa.

En función de la dirección de los desplazamientos relativos que ocurren en el plano de falla, la falla puede ser *normal* (el bloque de techo baja con respecto al bloque de piso) o *inversa* (el techo sube con respecto al piso), como respuesta a esfuerzos respectivamente de tensión o de compresión. Si el desplazamiento es paralelo a la dirección de la falla a esta se le llama *falla transversal*.

Se habla de falla sinsedimentaria cuando la deposición de los sedimentos sobreyacentes a la roca fallada es contemporánea al desplazamiento de los bloques de falla

originando espesores menores de sedimentos arriba del bloque de piso, y espesores mayores por encima del bloque de techo, este último bloque se desplaza hacia abajo si la falla es normal. Estas fallas reflejan una actividad sísmica repetida, así que entre la ocurrencia de dos o más sismos, se lleva a cabo la litificación diferencial de los depósitos sedimentarios sobreyacentes a los dos bloques de falla (Fig. 16).

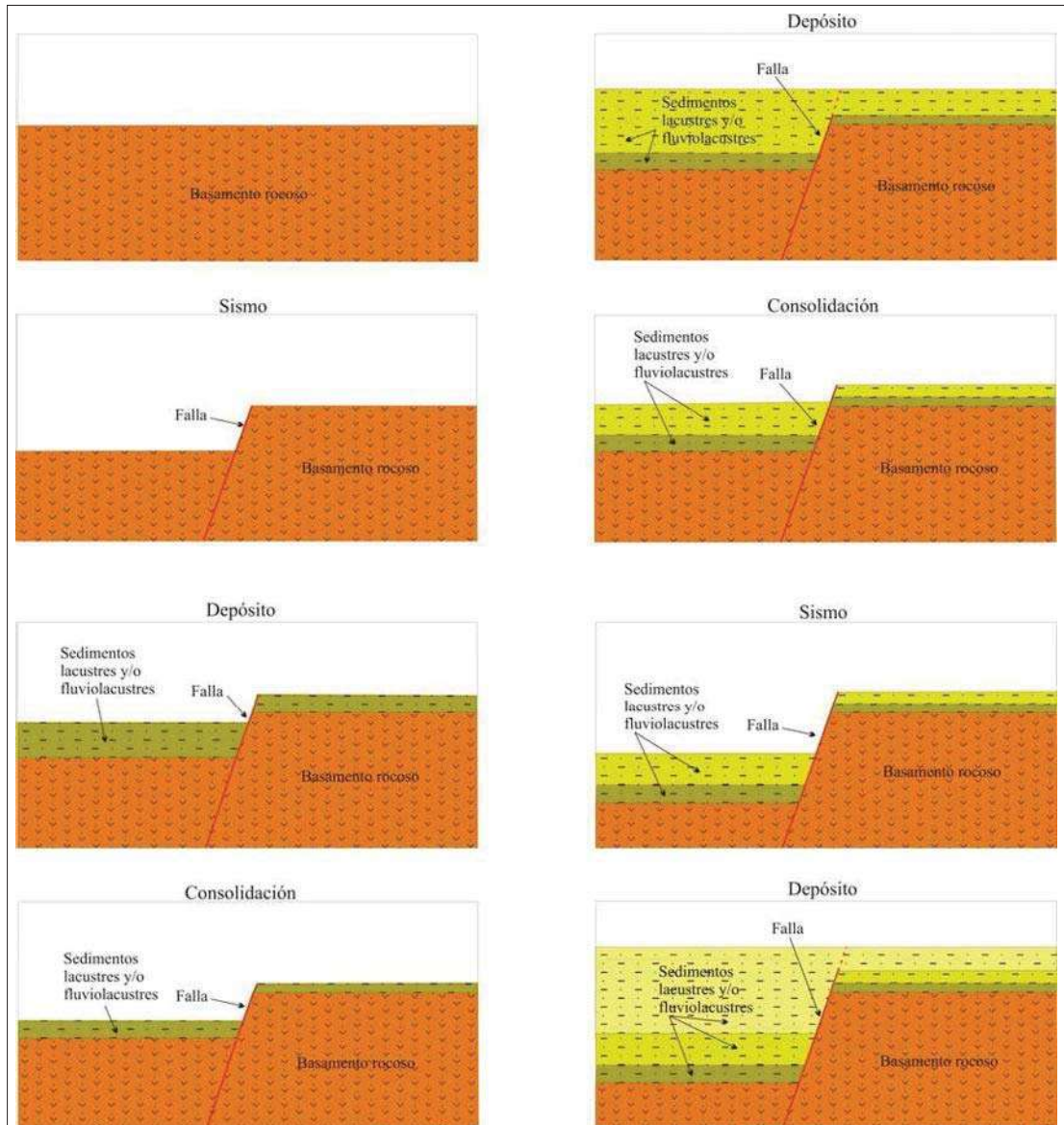


Fig. 16.- Modelo Conceptual de la Formación y Desarrollo de una Falla Sinsedimentaria (Ávila-Olivera, 2009)

PSCF

El fenómeno de fallamiento superficial que se presenta en la ciudad de Celaya se debe a la interacción de los tres factores anteriormente descritos, dando lugar a los conocidos como Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

Dichos PSCF, se definen como subsidencia diferencial que se genera por la consolidación de un sistema acuífero y por un control estructural del basamento rocoso que en este caso son las fallas geológicas regionales, las cuales hacen la función de guiar las deformaciones, que se manifiestan en forma de agrietamientos y fallas en la superficie. Para que se generen los PSCF es necesario que existan las condiciones idóneas; esto es, una cuenca rellena por sedimentos lacustres y/o fluviolacustres con la presencia de fallas geológicas sinsedimentarias, las cuales son las responsables del diferente espesor de sedimentos depositado a uno y otro lado de estas, lo que a su vez origina que la subsidencia que se desarrolla sea diferencial. Si las condiciones anteriores no prevalecen, los PSCF no se pueden llevar a cabo. Una vez que una zona determinada presenta las condiciones necesarias para que inicien los PSCF, a lo que denominaremos etapa cero, su formación y desarrollo es posible concentrarlo en las tres etapas descritas por Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2003), las cuales se definen a continuación:

I. La primera etapa está conformada por el hundimiento diferencial resultado de la subsidencia ocasionada por la explotación del sistema acuífero que abate la superficie piezométrica, generando una reducción de la presión de poro, misma que se transfiere a la fase sólida del suelo, produciendo a su vez una disminución del volumen de vacíos y por lo tanto una reducción de su espesor que se consolida de manera diferencial a causa del diferente espesor de sedimentos depositado, debido a la presencia de una falla geológica sinsedimentaria.

II. En la siguiente etapa se forma un agrietamiento de tensión que se lleva a cabo a lo largo de planos preexistentes, los cuales son las fallas geológicas sinsedimentarias en las secuencias lacustres y/o fluviolacustres en ocasiones sepultadas por los suelos recientes.

III. En la etapa final se genera el hundimiento de uno de los labios de la grieta (falla en la superficie), con lo que se genera un escarpe entre ambos bloques del agrietamiento formándose una geometría de falla semejante a la sufrida tanto en el basamento rocoso subyacente, como en las secuencias lacustres y/o fluviolacustres. Dicha geometría es el resultado del diferente espesor de las secuencias depositadas, el cual fue controlado por la presencia de una falla geológica sinsedimentaria.

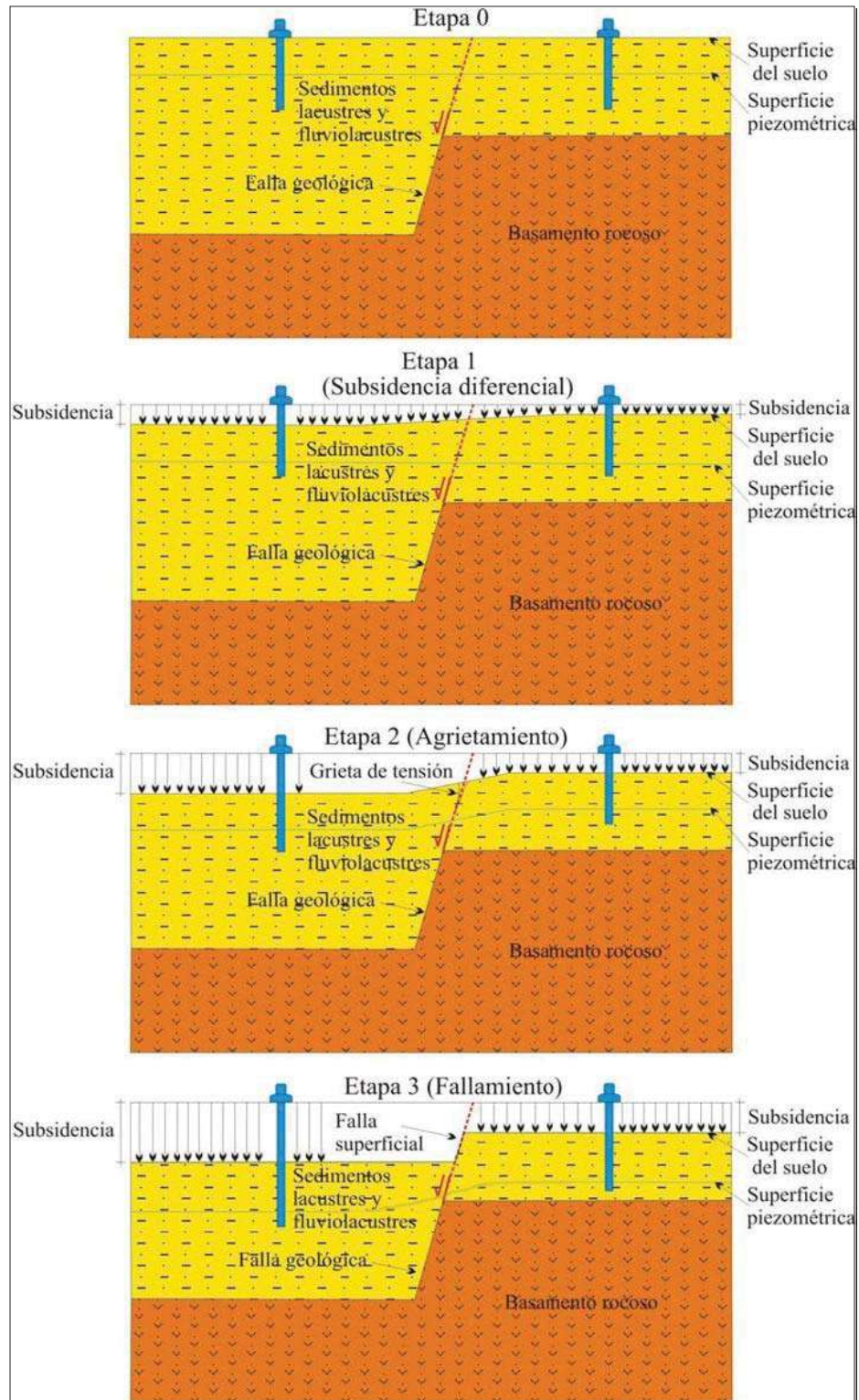


Fig. 17.- Etapas de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla

III.2 ANTECEDENTES DE LOS PSCF

A principios del siglo XX, se relacionaron los hundimientos del terreno con la extracción de agua del subsuelo, la explicación científica del fenómeno inicia con Terzaghi (1925) quien propone la conocida como ecuación de consolidación unidimensional. En 1928 Meinzer retoma y reconoce que la extracción de agua de un acuífero lleva a la compresión del mismo. Las primeras observaciones son realizadas por Rappley y Tibbets en 1933 (Poland, 1984a) en el Valle de Santa Clara en California. Con el crecimiento de la urbanización y el aumento de demanda de agua del subsuelo para usos humanos (industriales, agrícolas y públicos), se acrecentó la problemática; en el área de Houston, Texas, el abatimiento del nivel piezométrico generó alrededor de 86 fallas con tasas de hundimiento de 2.5 cm/año, las cuales desplazaron la superficie dañando a edificios y carreteras del área metropolitana en 1935 (Holzer y Gabrysch, 1987). En Texas City, en la parte sur del Condado de Galveston, la subsidencia empezó en los años 30 y en 1943, se había medido un descenso de más de 49 cm en el área industrial. La American Oil Company atribuyó este fenómeno de subsidencia a la extracción de agua del subsuelo y registró tasas de hundimientos de 6.5 cm/año en 1953 hasta 10.2 cm/año en 1952 (Vázquez-Carretero, 2001).

La afectación en China se presenta en más de 50 ciudades, en particular en la región del Delta del Río Yangtze, al norte de China y en el graben del río Fen-Wei, en Changping, al noreste de Beijing, y en la planicie de Hanzhou-Jiaying en la provincia de Zhejiang, localizada entre los ríos Yangtze y Oiantang: con base en los registros históricos de la extracción de agua y los hundimientos del terreno entre el 1964 y el 2000, se concluyó que la subsidencia era el resultado del continuo aumento de la extracción del agua subterránea desde los acuíferos confinados profundos, y que la evolución de los hundimientos superficiales podían ser caracterizados por un modelo multicapas. Estos modelos permitieron establecer algunas relaciones empíricas entre la velocidad de la subsidencia y la extracción anual del agua (Changjiang *et al*, 2006). En Japón, Bangkok y Thailandia, existen muchos ejemplos de fallamientos superficiales generados por subsidencia (Yamamoto, 1984).

Italia presenta estos fenómenos superficiales desde los 60's, en las ciudades donde las características litológicas del terreno favorecen la consolidación del esqueleto sólido, y en donde a la subsidencia natural se sumó la subsidencia antropogénica, los daños se hicieron muy intensos. Actualmente se registran subsidencias también en las provincias de Bologna, Modena, Reggio, Emilia y Parma, donde el abatimiento de la superficie piezométrica de 0.5 m/año está generando hundimientos superficiales del orden de 3-4

mm/año. Procediendo radialmente hacia el norte y hasta los ríos Reno y Savena se registran subsidencias del orden de 50-60 mm/año (Selli *et al.*, 1977; Cibirn y Severi, 2003). Murcia en España, registró en los 90's tasas de subsidencia de 8 centímetros en 2 años, con daños materiales urbanos valuados en 50 millones de euros (Vázquez-Carretero, 2001).

En México, el primer caso reportado del fenómeno de subsidencia fue detectado de manera casual en el año de 1925 por el Ing. Roberto Gayol, al observar una serie de deformaciones que afectaban al sistema de drenaje de aquel entonces en la Ciudad de México. Sin embargo tuvieron que pasar más de 20 años para que Nabor Carrillo en 1948 estableciera las primeras relaciones entre el hundimiento, la consolidación de las arcillas y, la extracción del agua del subsuelo a través de pozos profundos (Poland, 1984b). La SMMS, presta especial atención a este fenómeno en la década de los 70's (Carreón-Freyre *et al.*, 2006). Desde entonces muchos autores empezaron a estudiar los fenómenos de fracturamiento de los sedimentos lacustres y su origen antrópico, sobre todo desde principios de los 80's cuando los hundimientos diferenciales empezaron a afectar algunas de las principales ciudades del centro y norte de la República Mexicana, que tenían el factor común de localizarse en antiguas depresiones lacustres y/o fluvio-lacustres y de presentar una intensa urbanización con incrementos sustanciosos en la explotación del agua de subsuelo. Actualmente, las ciudades afectadas por los PSCF en México son: Ciudad de México, Celaya, Morelia, Querétaro, San Luís Potosí, Aguascalientes, Celaya, Guadalajara, Salamanca, Abasolo, León e Irapuato (Juárez Badillo, 1962; Poland, 1984b; Aranda-Gómez y Aranda-Gómez, 1985; Oliver, 1985; Trujillo-Candelaria, 1985, 1991; Figueroa Vega, 1989; Martínez-Reyes y Nieto Samaniego, 1990; Lermo-Samaniego *et al.*, 1996; Álvarez-Manilla y Pérez-Rea, 1996; Garduño-Monroy *et al.*, 1999; Ávila-Olivera, 2006, 2009)(Fig. 18).



Irapuato

*Fig. 18.- Daños por PSCF en:
Querétaro*

Salamanca

III.3 MÉTODOS DE MONITOREO DE LOS PSCF

Las técnicas de monitoreo de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, inician desde la aparición misma de los agrietamientos y la observación del hundimiento diferencial, con mediciones periódicas de los asentamientos aplicando técnicas sencillas como mangueras de nivel para la obtención del desnivel absoluto; colocación de testigos de yeso en grietas asociadas a la deformación diferencial en obras civiles, reglas testigo de un lado y otro de las grietas en muros, entre otros.

Con el desarrollo tecnológico, se ha llegado a mediciones mas sofisticadas mediante el uso de la percepción remota, particularmente el de la técnica InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). La interferometría de imágenes de radar de apertura sintética, es una técnica geodésica que calcula el patrón de interferencia (franjas), ocasionado por la diferencia de fase entre dos imágenes de la misma zona tomadas por un radar de apertura sintética, montado ya sea sobre un aeroplano o en el mejor de los casos sobre un satélite, en diferentes fechas. Dicha técnica permite observar movimientos de la superficie terrestre (fenómenos tectónicos, volcánicos, deslizamientos, subsidencia, movimientos de glaciares, etc.), perturbaciones en al atmósfera e, incluso puede ser capaz de identificar modificaciones dieléctricas en el suelo.

La técnica más confiable para el monitoreo de los PSCF, aplicada en el presente estudio, es llevada a cabo mediante levantamientos geodésicos empleando equipo terrestre de alta precisión con ayuda del sistema GPS, lo que implica la instalación de puntos de control ubicados estratégicamente en el área de estudio, para ser ocupados en campañas de medición diferencial (estación base y estación móvil), que determinan las coordenadas de cada uno de estos puntos. Con dichas coordenadas en diferentes fechas, se hace la comparación de las mismas, para determinar las diferencias en los tres sentidos, indicando el desplazamiento o estabilidad de cada uno de los puntos de la red, llevando al cálculo de tasas de hundimiento anual.

CAPÍTULO IV.- ÁREA DE ESTUDIO

IV.1 LOCALIZACIÓN

La Ciudad de Celaya (Fig. 19), se localiza en las coordenadas 20° 32' 05" de latitud norte y 100° 48' 49" de longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 1,752 m. Según la información del INEGI, la población sigue en aumento constante desde mediados de los 80's, ya que antes de 1990 la ciudad de Celaya contaba con menos de 200,000 habitantes, y el conteo de 2005 reportó que la población había crecido hasta 310,000 habitantes (Fig. 20). El municipio de Celaya colinda al norte con los municipios de Santa Cruz de Juventino Rosas y Comonfort; al este con los municipios de Apaseo el Grande y Apaseo el Alto; al sur con los municipios de Tarimoro y Cortazar; al oeste con los municipios de Cortazar, Villagrán y Santa Cruz de Juventino Rosas. El municipio cuenta con una superficie 580 km² que representa el 1.70% de la superficie del estado.



Fig. 19.- Croquis de localización de la ciudad de Celaya, Gto.

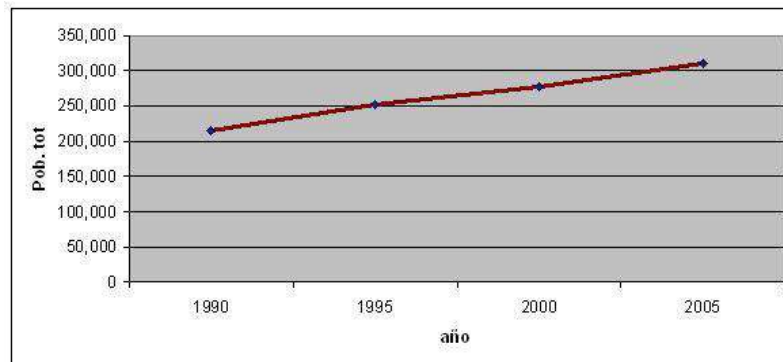


Fig. 20.- Crecimiento Poblacional de la Ciudad de Celaya, Gto. (INEGI)

IV.2 HIDROGRAFÍA Y CLIMA

El municipio de Celaya pertenece a la región hidrográfica No. 12 que recibe el nombre de Lerma-Santiago. Dicho municipio forma parte de las cuencas Laja y Lerma-Salamanca, específicamente en los distritos de riego Laja-Celaya y Apaseo en lo que respecta a la primera, y al distrito Solís-Salamanca que pertenece a la segunda. El 94.32% de la superficie municipal está cubierta por el distrito de riego Laja-Celaya. Las principales corrientes fluviales del municipio son los ríos Laja, Apaseo, Feo, Las Ánimas, El Varal, De Yeguas, Colorado. Su canal más importante es el Neutla (INEGI).

El clima del municipio de Celaya es principalmente del subtipo semiseco semicálido y, hacia el sur es del subtipo semicálido subhúmedo, con lluvias en verano (Fig. 21), de menor humedad. La temperatura media anual es de 20°C, sin embargo se han registrado temperaturas máximas de 36°C en los meses de abril y mayo y, mínimas de 1°C en el mes de enero. La precipitación media anual es de 600 mm, misma que en el verano llega a su máximo de 140 mm/mes, mientras que en el invierno disminuye hasta 5 mm/mes (INEGI).

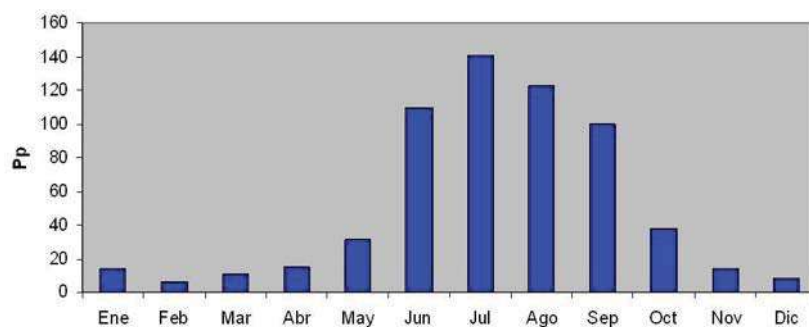


Fig. 21.- Distribución Anual de la Precipitación en la Ciudad de Celaya, Gto. (1921-2005) (INEGI)

IV.3 GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

La ciudad de Celaya se ubica dentro de la FVTM (Fig. 22), que es una zona volcánica de dirección E-O, con un ancho entre 20 y 200 km y 1000 km de longitud.; en su mayoría en la sub-provincia denominada Bajío Guanajuatense, caracterizada por ser una llanura muy extensa con derrames de lavas basálticas y andesíticas fracturadas (Plioceno-Pleistoceno Superior), provenientes de grandes aparatos volcánicos que constituyen algunos de los cerros más prominentes de la zona (al NE los volcanes “Santa Rosa” y “El Jocoque” con 2,600 y 2,500 m.s.n.m., respectivamente; al NO el conjunto de volcanes denominado “El Potrero” con 2,500 m.s.n.m.; al SE el volcán “El Pelón” con 2,400 m.s.n.m. y al SO el cerro “La Gavia” con 2,550 m.s.n.m.) (Fig. 23), y depósitos fluviolacustres (Holoceno), hacia el norte de la ciudad se hace presente la subprovincia Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, la cual pertenece a la provincia conocida como Mesa del Centro, que está caracterizada mayoritariamente por rocas volcánicas riolíticas (Oligoceno-Mioceno) (Fig. 24), que se presentan como tobas grises y rosadas y/o como ignimbritas de color café rojizo, con espesores aproximados de 100 metros (Trujillo-Candelaria, 1985).

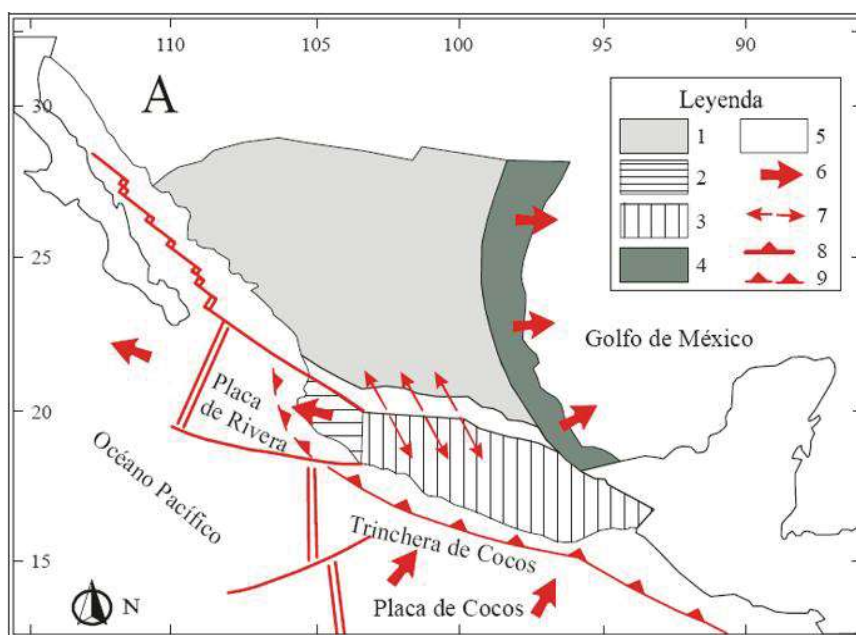


Fig. 22.- Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). 1. Placa de Norteamérica; 2. Bloque Jalisco; 3. Terrenos Estratotectónicos de Arcos volcánicos del Sur de México; 4. Planicie Costera del Golfo; 5. FVTM; 6. Movimiento Relativo de Placas; 7. Distensión en la FVTM; 8. Zona de Subducción; 9. Subducción en la Placa de Rivera. (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2002)

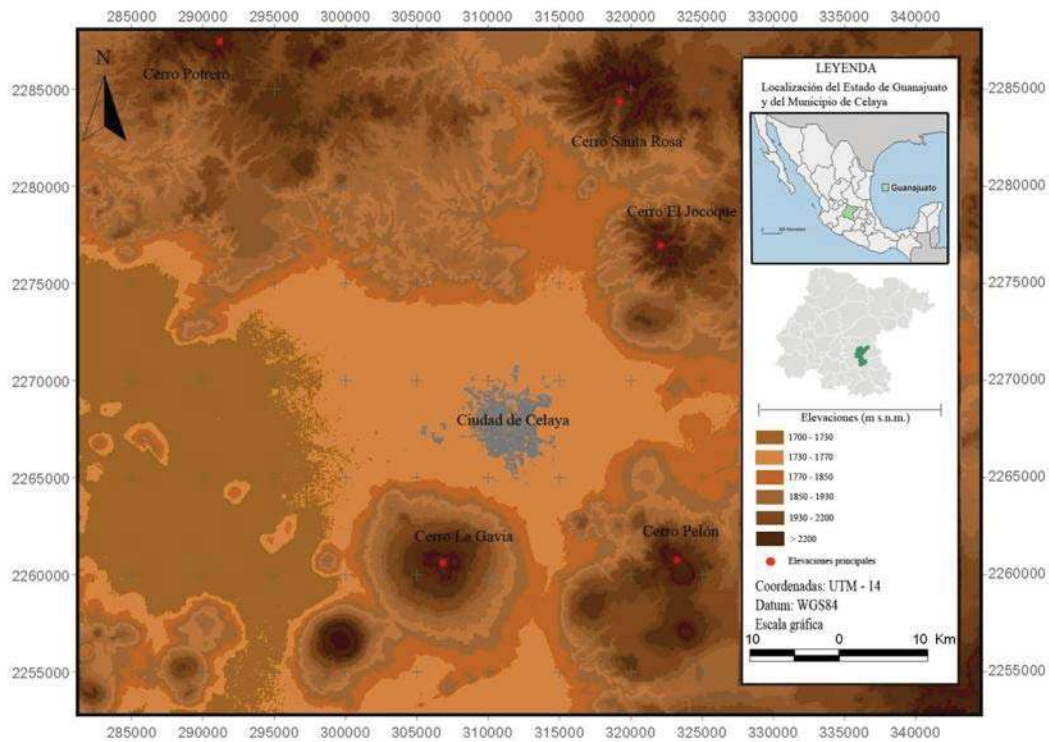


Fig. 23.- MDE de Celaya, Gto. con sus Elevaciones Principales

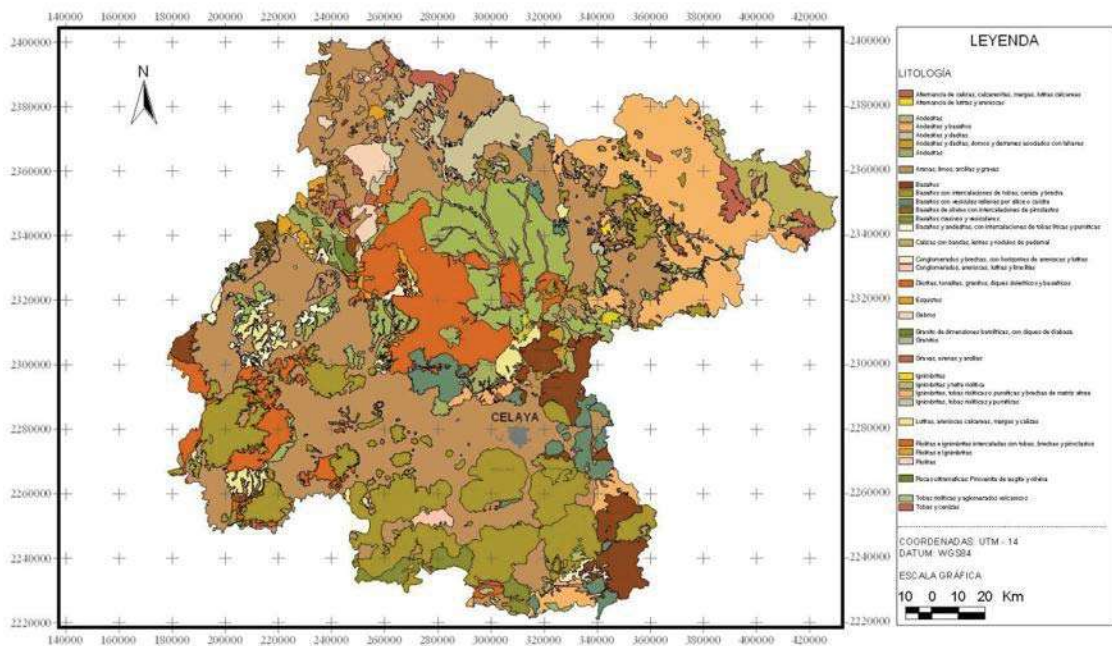


Fig. 24.- Mapa Geológico del Estado de Guanajuato (INEGI)

El valle sobre el cual está asentada la ciudad de Celaya, fue rellenado por sedimentos lacustres y/o fluviolacustres formados por gravas, arenas y arcillas, con espesores de hasta 300 m, dando a la región el aspecto de una gran planicie (Fig. 24).

IV.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y DEL SUBSUELO

La geología estructural de la región de Celaya está caracterizada básicamente por la existencia de lineamientos correspondientes a dos tendencias principales: la primera de dirección SO-NE, expuesto en las rocas de los cerros Picacho, San Pedro, norte de Neutla y Juventino Rosas, afectando a las rocas andesíticas y basálticas del Mioceno (Pasquaré *et.al.*, 1987) y, que además dio origen a la Depresión Central, misma que limita al poniente con el Lago de Chapala y al oriente con el sistema de fallas NNO-SSE (casi N-S) de Querétaro, conocido como lineamiento Taxco-San Miguel de Allende (Demant, 1978), que se manifiesta a través de dos largas fallas en el borde oriental de la Depresión Central.

La ciudad de Celaya se localiza en una planicie aluvial y fluvio-lacustre, sobreyacente a un basamento de rocas basálticas con origen vulcanosedimentario que afloran en la Sierra de Guanajuato. El subsuelo (Fig. 25), se describe a continuación, de la base a la cima:

1. El basamento presenta espesores superiores a los 150 metros de basaltos fracturados del Plioceno, con estructura de tipo *Horst* alargado en dirección N-S, afectado por un sistema de fallas normales y sinsedimentarias de dirección NNO-SSE, provocando un escalonamiento hacia el E y O del centro de la ciudad. Es decir, el techo del basamento se encuentra a una profundidad de 60-70 metros en la zona central de la ciudad y aumenta hasta los 300 m hacia el E y O de la macha urbana.
2. Secuencia fluviolacustre del Plioceno-Pleistoceno (Fig. 26) constituida por alternancias de conglomerados, arenas limosas, arcillas plásticas y productos piroclásticos con espesores que varían de 60 hasta 300 m, con coladas basálticas intercaladas en las zonas NO, NE y S de Celaya.

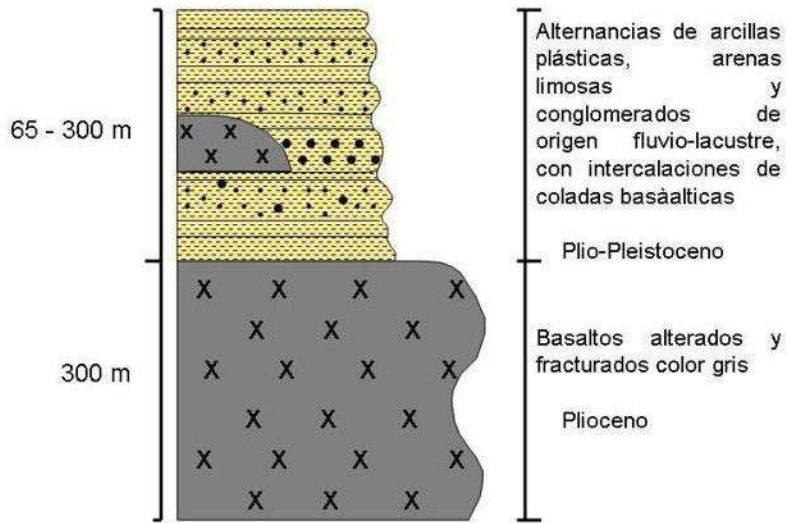


Fig. 25.- Columna Estratigráfica Representativa del Subsuelo de la Ciudad de Celaya (Giordano, 2010)

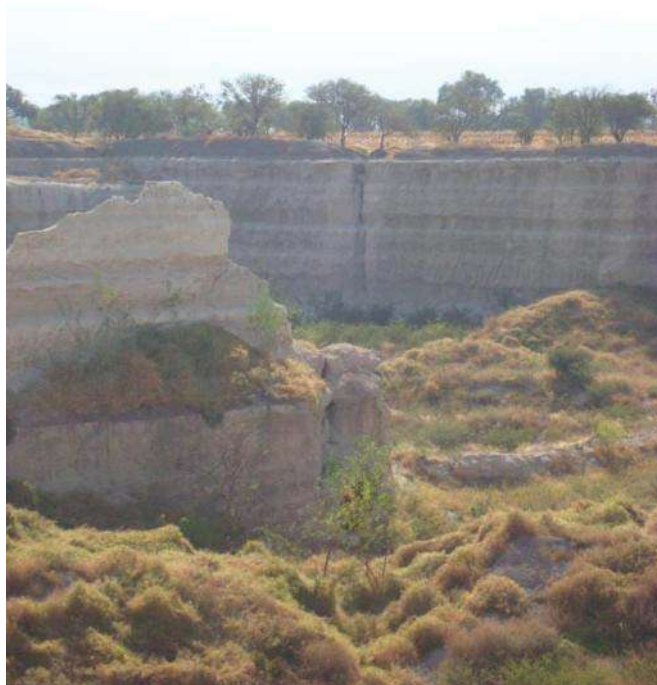


Fig. 26.- Depósitos Fluvio-lacustres al Sur de la Ciudad de Celaya

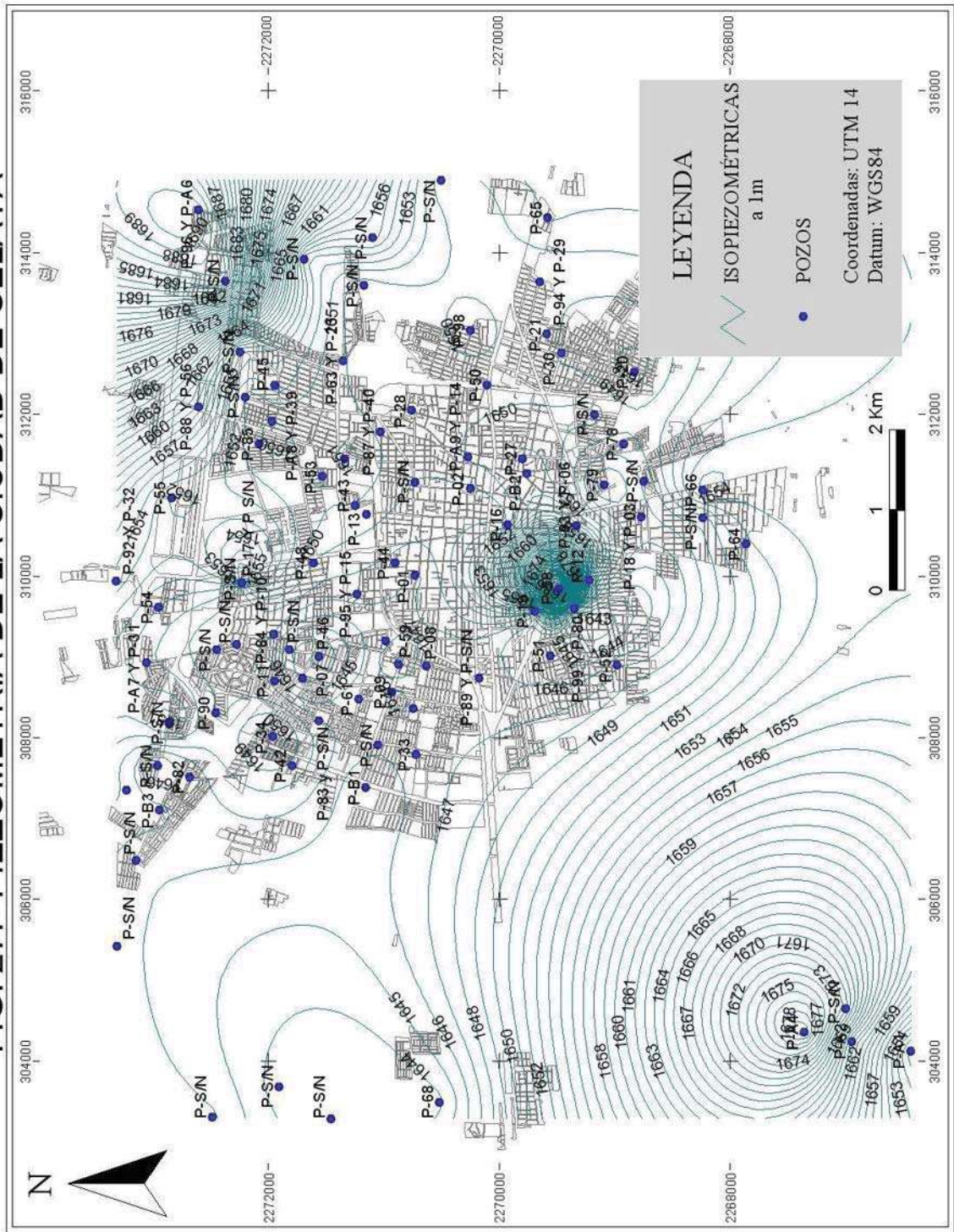
IV.5 CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

En el valle de Celaya la explotación del sistema acuífero se lleva a cabo a través de 3,600 pozos profundos que extraen un gasto de 600 millones de m³/año, lo que ocasiona una sobre-explotación de 200 millones de m³/año, ya que se ha determinado una recarga del sistema de 400 millones de m³/año (Trujillo-Candelaria, 1991). En la ciudad de Celaya el suministro de agua se realiza con aproximadamente 100 pozos con un gasto de 60 millones de m³/año (Fig. 27).

El acuífero presente en el subsuelo de la ciudad de Celaya se ubica predominantemente en los sedimentos fluvio-lacustres, de conductividad hidráulica media-alta (3×10^{-6} - 3×10^{-4} m/seg, INEGI); es de tipo libre, ya que no existen niveles impermeables sobre o sub-yacentes al mismo, según lo que se observa en los cortes de los pozos de explotación de agua del subsuelo. De acuerdo a los datos disponibles se deduce que el flujo subterráneo es local y presenta su zona de recarga en el volcán La Gavia al SO de la ciudad y el volcán El Jocoque ubicado al NE, en donde afloran basaltos fracturados, muy permeables, mientras que el área de descarga se ubica en el mismo valle de la ciudad. Es decir, el flujo hídrico converge de estas zonas hacia el centro de la ciudad (Fig. 27).

Actualmente el nivel piezométrico promedio es de 1651 m.s.n.m., siendo más somero al SO en el área de la Gavia (pozos Gavia 3, 4, 7 y 8, 80 m de profundidad) y hacia el NE de la ciudad (Pozos Santa Rita y 96, 70 m de profundidad), y más profundo en la zona occidental (110 m de profundidad) (Fig. 27) (JUMAPA).

FIG. 27.- PIEZOMETRÍA DE LA CIUDAD DE CELAYA



IV.6 ABATIMIENTO DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO

La extracción de agua del subsuelo en el Valle de Celaya comenzó en la década de los 50's. Trujillo-Candelaria (1991), asegura que la construcción de la presa Ignacio Allende sobre el río Laja, prácticamente hizo desaparecer las avenidas y desbordamientos que recargaban el sistema, reduciendo la cantidad de agua superficial, lo que intensificó las extracciones de agua de subsuelo en los 70's abatiendo el nivel piezométrico del sistema acuífero.

Lo anterior, aunado con la creciente urbanización y con el fenómeno meteorológico conocido como “El Niño”, que ocasiona una disminución de la precipitación en la zona durante principios de los ‘80s, ocasionaron la reducción de la recarga del sistema acuífero (H. Ayuntamiento de Celaya, 2006-2009) así que, para cubrir las necesidades agrícolas, fue necesario incrementar las extracciones de agua subterránea, propiciando de tal manera un aumento en la velocidad de abatimiento del nivel piezométrico, que en algunos sitios llega hasta los 60 m.

En estos años el abatimiento del nivel freático empezó a ocasionar hundimientos uniformes y lentos de la superficie en toda el área, mientras que los PSCF permanecieron imperceptibles hasta cuando la diferencia en los espesores de los sedimentos fluvio-lacustres llevó a hundimientos diferenciales, con el consecuente agrietamiento de tensión y fallamiento superficial, algunos años después, con las respectivas consecuencias y daños en las obras civiles en varios puntos de la ciudad (Fig. 28).



Fig. 28.- Falla Superficiales en Celaya, Gto. y sus Consecuencias
Sup. Izq.- Falla Insurgentes, Sup. Der.- Falla Sta. Teresita, Centro.- Falla Poniente,
Inferior.- Falla Oriente

CAPÍTULO V.- MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se contó con material proporcionado por la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (JUMAPA) de la ciudad de Celaya, como son: mapa catastral escala 1:2,000, cartografía de fallas, datos de monitoreo GPS del 2002, ubicación de los 98 pozos utilizados para la extracción de agua potable, nivel estático y dinámico del manto freático durante los años 2002, 2006 y 2008, gasto hidráulico y, litología del subsuelo (en el 61% de los pozos totales). De INEGI, se contó con un modelo digital de elevaciones y mapa topográfico del municipio, mapa geológico regional escala 1:250,000, mapa geológico local escala 1:50,000, información sobre viviendas, población, medio ambiente y fisiografía. De otras fuentes, imágenes satelitales (Google Earth), datos de nivel freático del año 1976 hasta el 1996 (Ávila-Olivera, 2009).

En la fase de monitoreo, se emplearon un par de equipos GPS 500 de Leica Geosystems (Fig. 35), conformados por un receptor GPS (RS500) con 12 canales en L1 y 12 canales en L2, trabajando en código y fase, para recibir las señales de los satélites NAVSTAR y determinar la distancia a aquellos que se encuentren visibles; una antena microstrip L1/L2 AT502 con plano de tierra integrado, para captar dichas señales; una Terminal GPS (TR500) compuesta por teclado y pantalla para controlar al receptor y; un programa de post-proceso de los datos GPS (SKI-Pro), que permite procesar las observaciones realizadas con el receptor, a fin de determinar las líneas base y las coordenadas. El software SKI-Pro es el programa estándar de post-proceso para los receptores de doble frecuencia.

Fig. 29.- Elementos del Equipo GPS 500
a) Antena Microstrip L1/L2 AT502
b) Batería Externa
c) Receptor GPS RS500 y Terminal GPS TR500

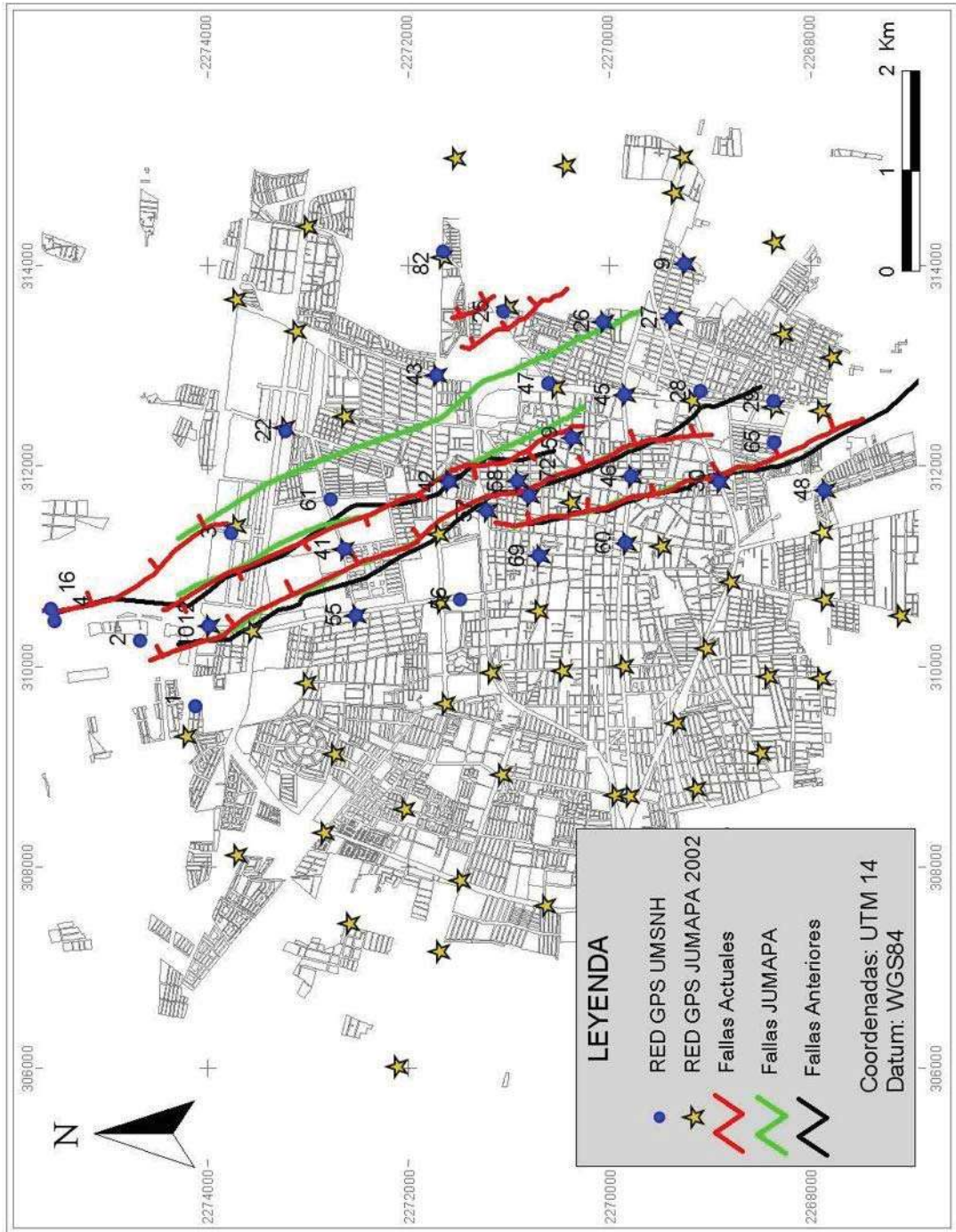


Como ya se mencionó, la JUMAPA nos proporcionó la cartografía existente al momento (2008) de las fallas de la ciudad de Celaya (Fig. 30), fue revisada y nos encontramos con el inconveniente de que mostraba zonas donde supuestamente pasaba la traza de las fallas que afectan el área de estudio, pero al efectuar el recorrido de reconocimiento del terreno no se encontró la evidencia morfológica en la superficie que mostraba dicha cartografía; así mismo contamos con otro material anterior de la misma naturaleza, donde se presentaban las fallas Universidad Pedagógica y Tecnológico unidas (Fig. 30), en la zona norte de Celaya, lo que no se detecta en el terreno. Estos errores se debieron a que estos trabajos cartográficos no se llevaron a cabo sobre un mapa catastral de la ciudad, llevando a imprecisiones en la información contenida en ellos.

Para corregir los errores detectados, se realizó la actualización cartográfica utilizando como mapa base los mapas catastrales de la ciudad, por lo que se imprimió dicho mapa proporcionado por la JUMAPA con escala 1:2000, mostrando a detalle la lotificación de la zona urbana de Celaya. Sobre este mapa se localizó, recorriendo a pie las zonas afectadas de la ciudad para ubicar visualmente y con apoyo de GPS, la traza actual de las fallas evidenciando los daños en las obras civiles (Fig. 30), para con esta información y la recolectada con los habitantes de la ciudad, poder determinar cuales puntos aún existentes de la red GPS 2002 de la JUMAPA se usarían y donde era necesario complementar con nuevos puntos colocados para el presente estudio.

El procedimiento seguido anteriormente para cartografiar estas fallas superficiales, nos limita a la vez para obtener tasas de crecimiento longitudinal confiable de su traza en la superficie urbana de Celaya, ya que cada material cartográfico disponible presenta diferente ubicación de las mencionadas fallas.

FIG. 30.- REDES GPS Y CARTOGRAFÍA DE FALLAS SUPERFICIALES EN CELAYA, GTO.



Dado que la JUMAPA ya había realizado en el 2002 estudios de hundimiento en la ciudad de Celaya, fue posible apoyarnos con la red GPS que se utilizó en ese momento, lamentablemente aunque teníamos datos de elevación de todos los puntos que la conformaban, muchos puntos de esta red fueron removidos por construcción o remodelación de calles y banquetas, por lo que se localizaron los puntos disponibles, logrando conformar una red de 32 puntos de control entre los disponibles de la red JUMAPA y los ubicados para este trabajo, distribuidos de manera estratégica en las zonas afectadas de la mancha urbana, de forma tal que nos permitieran monitorear y conocer la geometría de los PSCF en la ciudad de Celaya.

Los mencionados puntos de la red GPS 2002 de la JUMAPA están compuestos de una varilla hincada en el terreno, soldada a una placa en la superficie con datos de identificación (Fig. 31), totalizando 83 puntos de control a todo lo largo y ancho de la mancha urbana de la ciudad de Celaya; mientras que los puntos colocados para completar la red GPS de estudio para este trabajo, están conformados por un fragmento de varilla de acero inoxidable (Fig. 32), con muescas que permiten sean colados en perforaciones sobre lugares de fácil acceso, posicionados todos estos sobre guarniciones o lugares no removibles periódicamente.

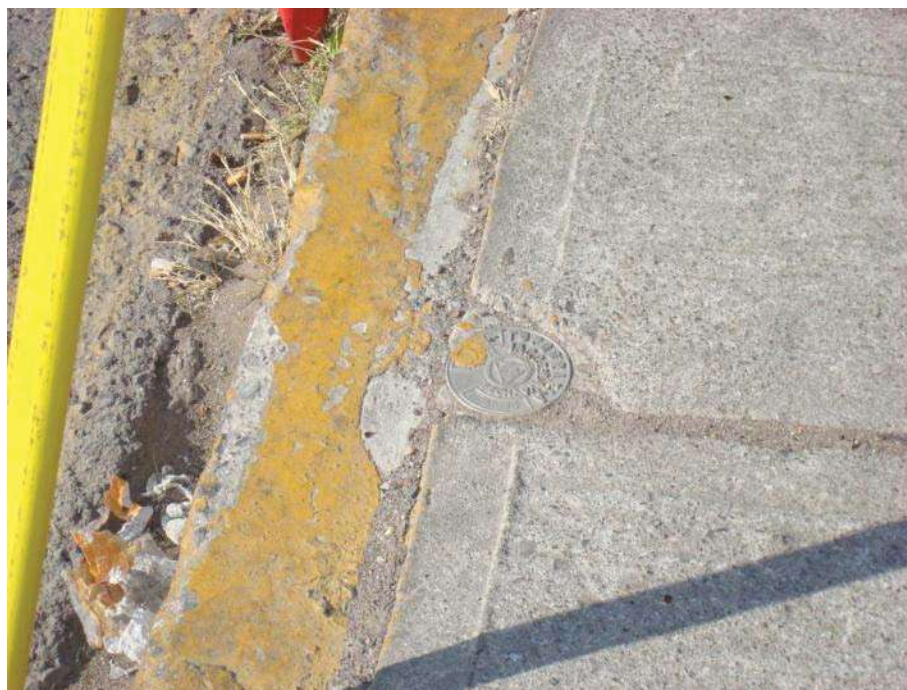


Fig. 31.- Punto de la Red GPS 2002 de la JUMAPA



Fig. 32.- Punto Complementario de la Red GPS de Estudio

Se logró el permiso por parte de la JUMAPA para ubicar una base GPS fija y permanente en la cisterna del pozo “La Gavia” propiedad de esta dependencia, ubicada sobre las faldas del volcán del mismo nombre al suroeste de la ciudad de Celaya, esto con el apoyo del Instituto de Geofísica de la UNAM, buscando eliminar el error que por distancia e inestabilidad aportan las bases de la RGNA del INEGI. La decisión de la ubicación de esta base obedeció principalmente a:

- La estabilidad de la zona por sus características geológicas. Se presentan coladas basálticas provenientes del volcán “La Gavia”, prestando características más estables que cualquier otro punto de la zona urbana.
- La importancia del horizonte de observación satelital de la antena del equipo. Es una zona no urbanizada, por lo que no se interfiere en la visual del equipo GPS instalado sobre la cisterna (Fig. 35).
- La cercanía de esta base con el área de estudio. Solo a 9.8 km de la ciudad, a diferencia de los 71.8 km de la base UGTO y 254.5 km de la base TOL2, ambas de la RGNA del INEGI (Fig. 36).
- La total colaboración por parte de la JUMAPA para su instalación en todo sentido, incluso sin negación para conectar el equipo a la alimentación eléctrica que este requiere para su correcto y continuo funcionamiento, aún cuando esto implicaba excavar dentro de las instalaciones de la dependencia (Figs. 33 y 34).



Fig. 33.- Trabajos de Excavación en la Base GPS Fija de “La Gavia”



Fig. 34.- Trabajos de Montaje de la Base GPS Fija de “La Gavia”



Fig. 35.- Vista de la Ciudad de Celaya desde la Base GPS de “La Gavia”

Lo anterior resultó en la red GPS de puntos de control para este trabajo:



Fig. 36.- Red GPS de la Ciudad de Celaya y Base de “La Gavia”

El proceso de monitoreo de la red de estudio GPS (Fig. 37), se llevó a cabo como lo muestra el siguiente diagrama:

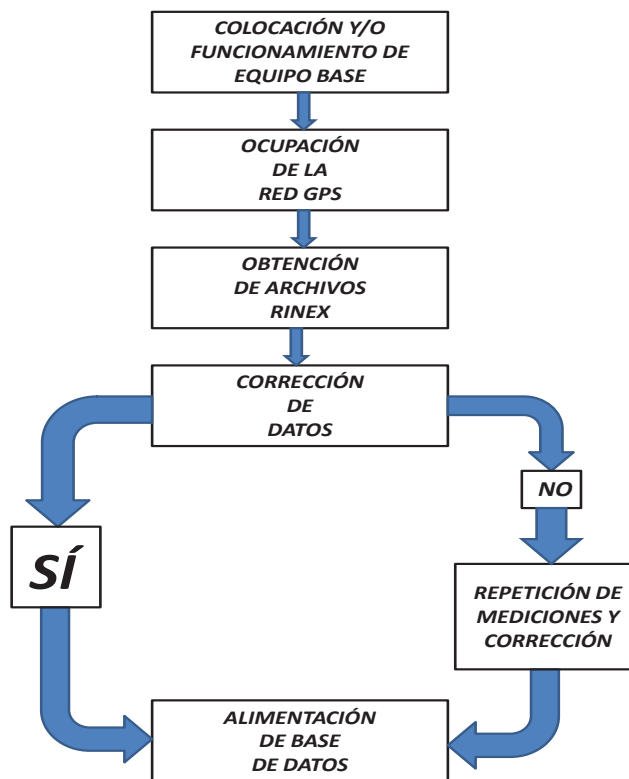


Fig. 37.- Proceso de Monitoreo de la Red de Estudio GPS

Dado que para el monitoreo de los PSCF es necesaria una precisión del orden de milímetros, se optó por el método de monitoreo denominado “estático rápido” que se caracteriza por tiempos relativamente cortos de observación.

Una vez definidos y colocados todos los puntos de la red GPS, en cada campaña, se colocó previo a la ocupación de la red, el equipo base cuando se corregiría con la RGNA-INEGI o se verificaba el adecuado funcionamiento de la base fija de “La Gavia”, misma que cualquiera que fuera el caso, debería estar funcionando ininterrumpidamente durante toda la jornada de trabajo en la red.

Posteriormente se hacía estación con el equipo móvil, en todos y cada uno de los puntos de la red GPS de la zona urbana, con 15 minutos de lectura ininterrumpida en cada uno de sus puntos, siempre y cuando, presentara la estación las condiciones mínimas necesarias para el adecuado funcionamiento del equipo ($GDOP \leq 5$). Una vez terminada cada jornada, se regresaba a “La Gavia” para checar que la base no hubiera tenido ninguna interrupción, de lo contrario, todo el trabajo llevado a cabo en la zona urbana de Celaya era inútil. Terminando la ocupación, obteníamos los archivos de tipo “RINEX” que almacenaba la base de “La Gavia”, o en su caso, debíamos esperar tres días para descargarlo del sitio web del INEGI, para realizar después corrección diferencial a posteriori mediante el software Sky-Pro disponible con el equipo GPS, comparando las coordenadas corregidas para cada una de las campañas de medición y por diferencia en estas determinar las tasas de hundimiento. Se llevaron a cabo correcciones diferenciales con la base fija de “La Gavia” en algunas campañas y con la RGNA del INEGI, en otras, con la finalidad de comparar resultados, lo que puede resumirse de la siguiente manera:

Tabla 5.- Campañas GPS y Base de Corrección

<i>No. de Campaña</i>	<i>Fecha de la Campaña</i>	<i>Equipo de Trabajo</i>	<i>Corrección Diferencial con INEGI</i>	<i>Corrección Diferencial con Base Fija “La Gavia”</i>
I-2002	Dic/2002	JUMAPA	TOL2	-
I-2008	Dic/2008	UMSNH	UGTO	Sí
I-2009	May/2009	UMSNH	-	Sí
II-2009	Jun/2009	UMSNH	-	Sí
III-2009	Ago/2009	UMSNH	UGTO	-

CAPÍTULO VI.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

VI.1 ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA DE LAS FALLAS SUPERFICIALES DE CELAYA.

Con base en la actualización cartográfica de las falla geológicas, se encontró que la zona urbana de la ciudad de Celaya muestra en su superficie seis fallas normales de dirección NNO-SSE (Poniente, Oriente, Pedagógica, Tecnológico, Insurgentes y Santa Teresita) (Fig.38), paralelas al sistema de fallas regionales NO-SE conocido como Taxco-San Miguel de Allende (Gómez-Tuena *et al.* 2005), con salto máximo en la superficie de 2.5 m (Trujillo-Candelaria, 1985 y 1991). Dichas fallas se describen a continuación:

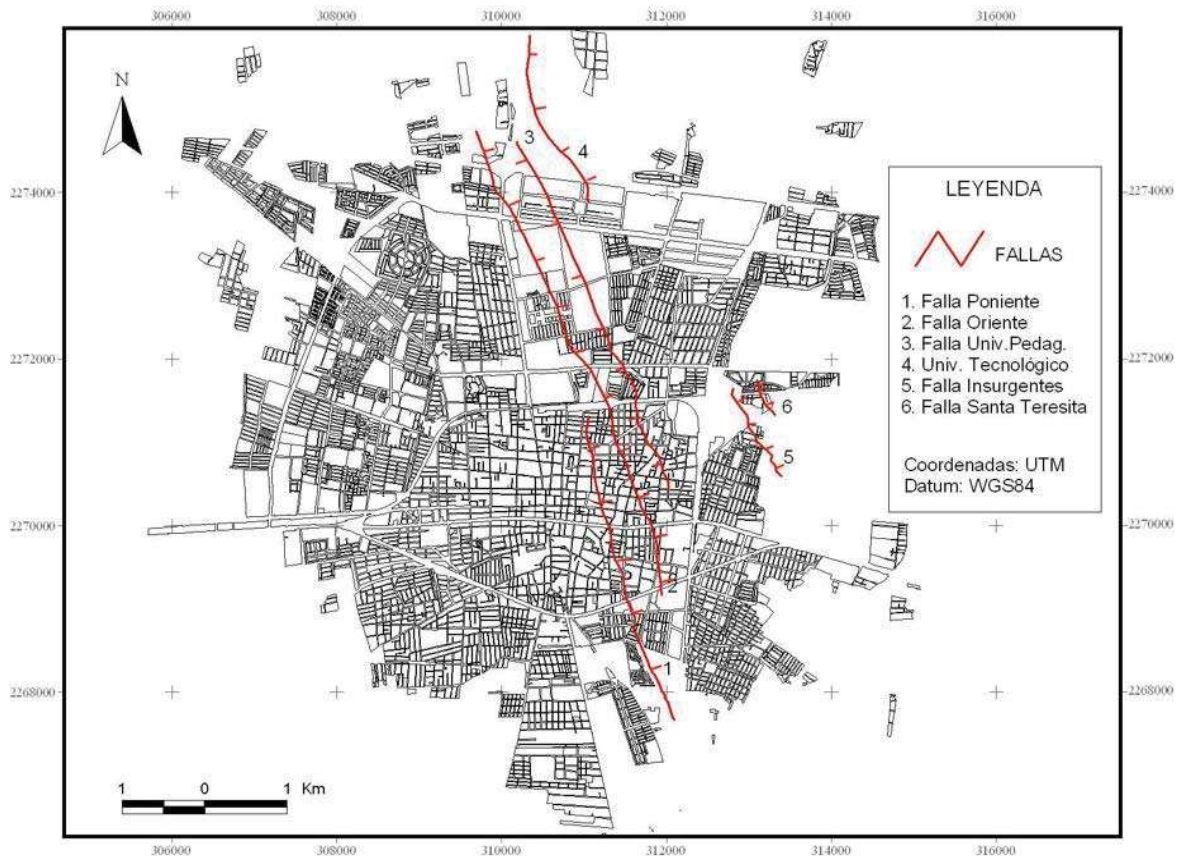


Fig. 38.- Mapa de Fallas Geológicas en Celaya, Gto.

Falla Poniente.

Fue identificada en 1980. A la fecha tiene un salto máximo de 1.5 m, de tipo normal, con una longitud de 3.8 km. El plano de falla tiene dirección NO30° con buzamiento hacia el NE. El extremo norte de esta falla se detecta en la calle Sinaloa del Barrio San Antonio, al NO de la Alameda. La falla causa grandes daños a lo largo de toda su traza, pasando a través del Convento de San Francisco, a unos metros de la Catedral y de la Bola de Agua de Celaya (Fig. 39). Más adelante, pasa frente a la Central Camionera, cruza la Central de Abastos, la Carretera Panamericana y el Gasoducto de Pemex, y sigue por aproximadamente 1,500 m a lo largo de la Avenida Paseo del Sol, cortando terrenos baldíos, campos de cultivos y drenajes. La Falla Poniente está afectando a más de 90 viviendas y aproximadamente 25 calles.



Fig. 39.- Falla Poniente

Falla Oriente.

Fue identificada en 1980, de tipo normal, y dirección $NO35^\circ$, con un salto que alcanza los 3 m (Fig. 40) y, una longitud de 6 km. El extremo norte de esta falla se observa actualmente en el nuevo fraccionamiento Villas del Mar, al poniente de la salida a San Miguel de Allende. Pasa por el Centro de Investigaciones Agrícolas del Bajío (CIAB), el Conalep y sigue hacia el sur por la Unidad Habitacional Fovissste; cruza la vía del ferrocarril y la calzada G. Prieto, donde se aprecia el mayor salto, se pierde en las inmediaciones de la calle Prolongación 2 de Abril hacia el SE de la ciudad. Afecta a más de 130 viviendas y 45 calles.



Fig. 40.- Falla Oriente

Falla Universidad Pedagógica.

Tiene un trazo paralelo a la falla Oriente, de dirección $NO35^\circ$, con buzamiento hacia el SO, es decir, es antitética con respecto a las estructuras paralelas. Presenta un desnivel máximo de 1.5 m. Su extremo norte se localiza en la misma zona del extremo norte de la falla Poniente, pero al este de la salida a San Miguel de Allende. Cruza la autopista Salamanca-Querétaro, la Ciudad Industrial, pasando por el CECAT y la Bodega Municipal. Causa graves daños en las colonias Alfredo Vázquez Bonfil y el fraccionamiento Emiliano Zapata Sur, se pierde en el Fraccionamiento Villa de los Reyes, entre las calles Tampico y Campeche, 800 m al SE del Avenida G. Prieto. La falla Universidad pedagógica tiene una longitud de 4.5 km y afecta aproximadamente a 90 viviendas y 30 calles (Fig. 41).



Fig. 41.- Falla Universidad Pedagógica

Falla Insurgentes.

Dicha falla fue identificada en 1984, es normal y paralela a las otras; su nombre se debe a los daños que ocasiona en dicha colonia, localizada en la zona oriental de la ciudad, con una longitud inicial de 500 m, de los cuales la mayoría corresponden a terrenos baldíos donde se apreciaban una serie de sumideros alineados; así como también un salto superficial de 15 cm (Trujillo-Candelaria, 1985). A finales de los años 90's la longitud de esta falla era aproximadamente 1300 m. Dado que la zona es de reciente urbanización, los efectos en la superficie están actualmente ocultos (Fig. 42). No se descarta una futura evidencia morfológica en la superficie de continuar la extracción de agua del subsuelo en dicha área. La afectación es difícil de determinar, ya que no es muy apreciable en el terreno.



Fig. 42.- Monitoreo de la Falla Insurgentes

En este trabajo se reportan las siguientes fallas que no habían sido reportadas en estudios previos.

Falla Tecnológico.

Esta falla normal, paralela a las otras, se puede apreciar en la zona norte de la ciudad, en la salida a San Miguel de Allende, específicamente en la desviación a Juventino Rosas, afectando la sub-estación de la Comisión Federal de Electricidad y el acceso al fraccionamiento Praderas de la Hacienda (Fig. 43). Hacia el sur se pierde en la ciudad industrial. La evidencia morfológica es mucho menor con respecto a las otras fallas de la ciudad, ya que se encuentra en su mayoría en áreas de la ciudad parcialmente urbanizadas.



Fig. 43.- Monitoreo de la Falla Tecnológico

Falla Santa Teresita.

En el barrio del mismo nombre, en el margen oriental de la ciudad, se identificaron notables daños en las obras civiles (Fig. 44), a lo largo de una discontinuidad de dirección NO30°, salto máximo de 5° cm y, una longitud de 500 m. El extremo norte se ubica en Villas Reales, entre la línea de ferrocarril y la avenida Irrigación, y sigue hasta Villas de Celaya, donde se pierde en baldíos, aproximadamente a 100 m al SE del camino a Santa Teresita.



Fig. 44.- Falla Santa Teresita

VI.2 Hundimiento del Terreno en los Puntos Medidos.

Como ya se mencionó, durante este estudio se llevaron a cabo cuatro campañas de monitoreo GPS en la ciudad de Celaya, Gto., en Dic/2008, May/2009, Jun/2009 y Ago/2009. Contamos también con resultados de una campaña de monitoreo GPS por parte de la JUMAPA, llevada a cabo en Dic/2002.

La campaña de Dic/2002 llevada a cabo por la JUMAPA nos reporta las coordenadas de su red de monitoreo GPS con 83 puntos, corregida con la RGNA del INEGI, sin información de la estación utilizada, ni el procedimiento de monitoreo GPS empleado, por lo que solo será utilizada como referencia, además debido a la creciente urbanización y modernización de la zona urbana de Celaya, se perdieron la mayoría de estos puntos, siendo útiles por su localización solamente 13 de los 83 referidos.

Los resultados de las campañas de Dic/2008, May/2009 y Jun/2009 se corrigieron con la base fija de “La Gavia”, cuyos resultados en la coordenada “Z” fueron comparados con los datos ajustados de la campaña de Dic/2002 por parte de la JUMAPA (Fig. 45).

Con las coordenadas obtenidas en las campañas Dic/2008 y Jun/2009, corregidas con la base fija de “La Gavia”, se obtuvo la diferencia en la componente “Z”, con la que se obtuvo un modelo digital de hundimientos de la superficie de Celaya, para el periodo mencionado (Fig. 46).

El mapa de contornos de hundimientos invertidos de la ciudad de Celaya (dado que los resultados InSAR muestran el hundimiento con signo negativo), fue comparado con la otra técnica de monitoreo de los PSCF, referida en este trabajo, es decir, la técnica InSAR, cuyos resultados fueron reportados en 2006 (Ávila-Olivera) (Fig. 47).

Con la finalidad de poder comparar los resultados en la vertical, de la campaña GPS del JUMAPA de Dic/2002, se corrigieron con la RGNA del INEGI las campañas de Dic/2008 y de Ago/2009 llevadas a cabo durante este estudio, con la estación UGTO (Fig. 48).

Lo anterior se muestra en el siguiente grupo de gráficas y mapas:

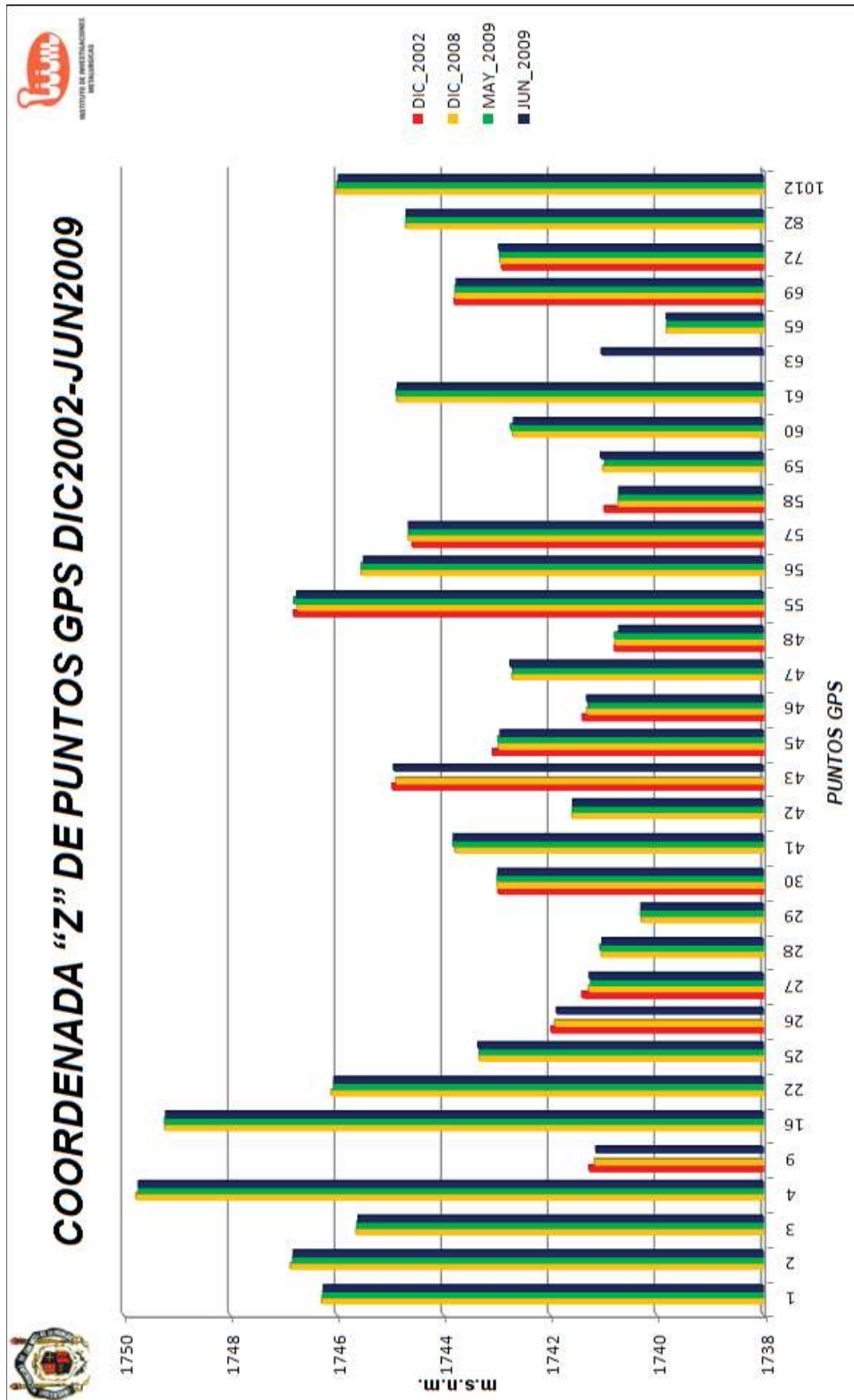


Fig. 45.- Coordenada "Z" de los Puntos GPS Corregidos con "La Gavia"

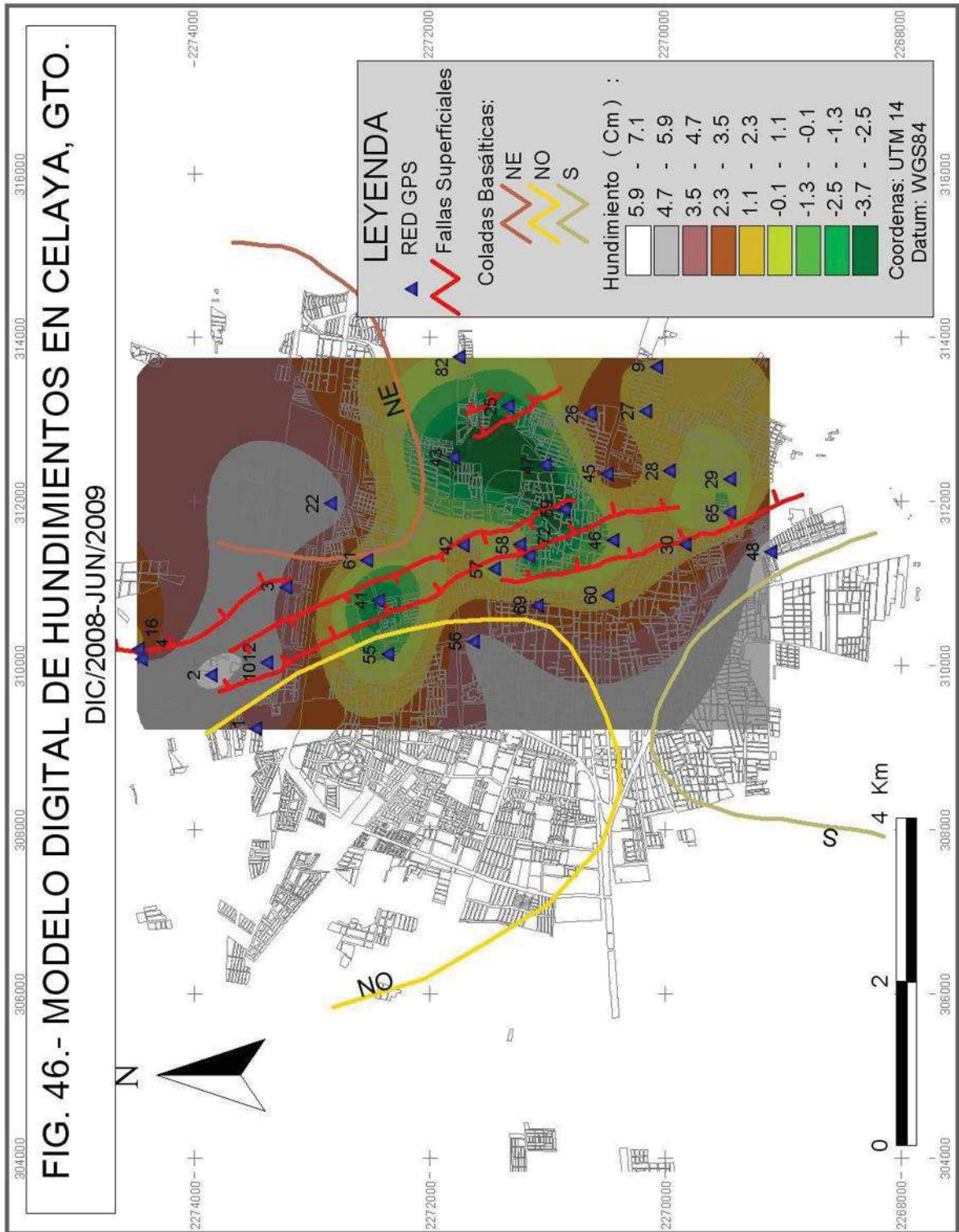
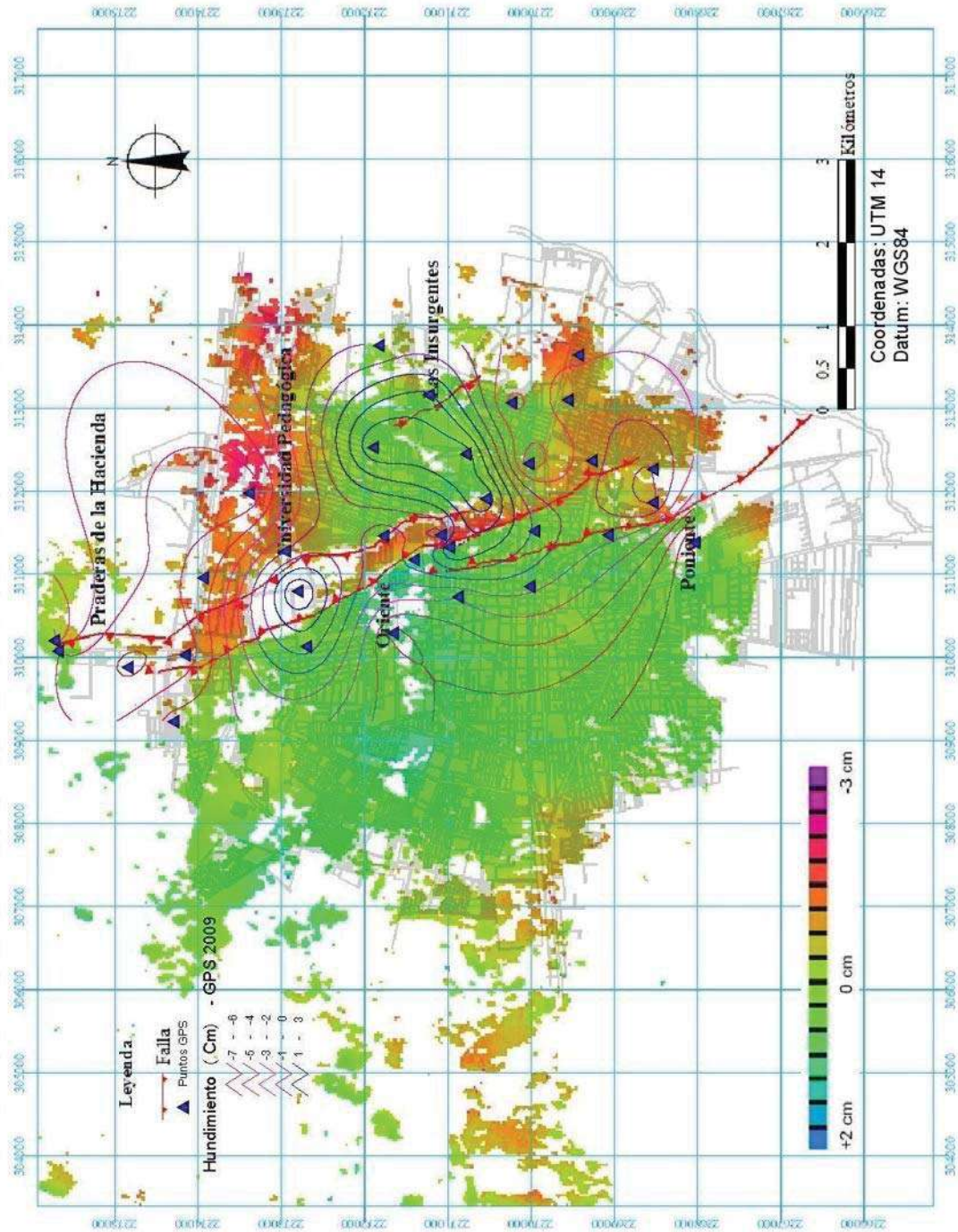


FIG. 47.- InSAR 2006 - GPS 2009



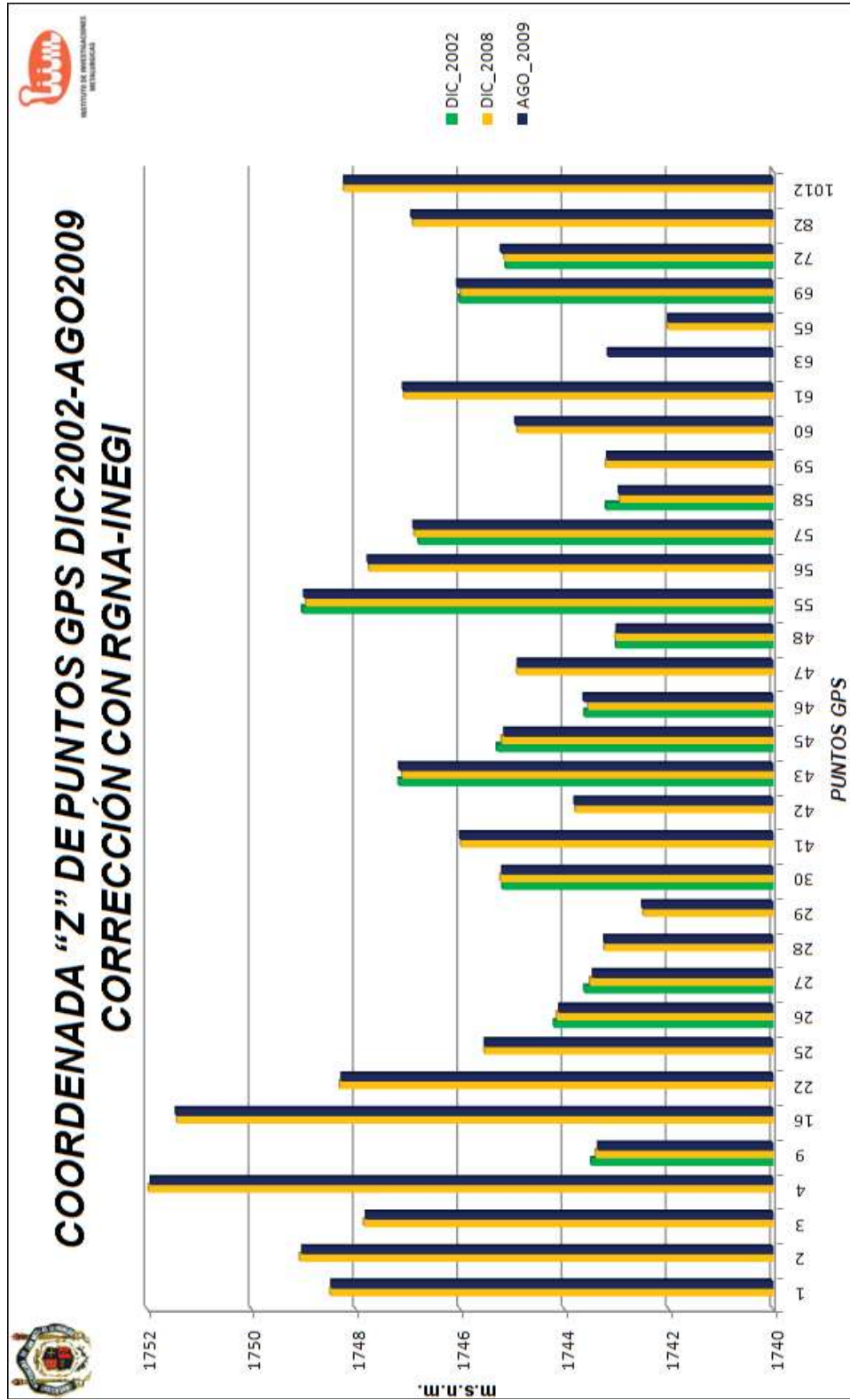


Fig. 48.- Coordenada "Z" de puntos GPS Corregidos con INEGI-UGTO

En la gráfica de comparación de la coordenada “Z”, de la campaña Dic/2002 de la JUMAPA y las campañas Dic/2008, May/2009 y Jun/2009 realizadas durante este trabajo y corregidas con la base fija de “La Gavia” (Fig. 45), encontramos que la superficie de la zona de estudio presenta hundimientos a largo plazo, pero en el corto y mediano plazo, puede tener oscilaciones en la vertical, ya que se aprecian aparentes ascensos en algunos puntos de la red GPS de estudio. Cabe señalar que estos puntos anómalos de la red GPS están situados en zonas no urbanizadas o no pavimentadas, lo que podría favorecer la infiltración de agua al subsuelo. Así mismo encontramos en el punto 58, un valor muy alto de la coordenada “Z” en la campaña Dic/2002, que como ya se mencionó, no tenemos mayor referencia de como se realizó, por lo que podríamos considerarlo un error durante el monitoreo, además, no se llevó a cabo una segunda ocupación de esta red posterior al 2002, lo que imposibilita el corroborar lo anteriormente dicho.

El modelo digital de hundimientos de Celaya, Gto. (Fig. 46), muestra los diferentes resultados obtenidos en la zona de estudio durante el período de monitoreo, reportando tasas máximas de hundimiento de: entre 12 y 14 cm/año, en la zona N (salida a San Miguel de Allende), que es zona de reciente urbanización, no permitiendo detectar afectaciones en las construcciones, punto de control 2; y entre 10 y 12 cm/año, al SO de la zona monitoreada (punto de control 56, zona del panteón) y al N (ciudad industrial y salida a San Miguel de Allende); con aparentes ascensos en zonas de la mancha urbana carentes de pavimentación o urbanización, señalados anteriormente como zonas de oscilación de la coordenada “Z” de los puntos GPS de la red de estudio, dichas zonas de ascenso se localizan en las inmediaciones de un centro deportivo (punto de control 41) y, de las vías del ferrocarril que cruzan la zona urbana de Celaya (puntos de control 43 y 47).

El aparente ascenso mostrado en la superficie de Celaya, se encontró también en anteriores trabajos realizados en la zona de estudio mediante la técnica InSAR (Ávila-Olivera, 2006) (Fig. 47), donde el SIG utilizado para el procesamiento de datos arroja una escala de color con valores de ascenso en la superficie. Cabe señalar que no existe una total correspondencia de estos ascensos de la superficie, debido a que son trabajos realizados en diferentes fechas, y la oscilación encontrada en la vertical del terreno podría hacerlos variar. Para entender estas oscilaciones, sería recomendable continuar los monitoreos en la zona, sobre la misma red GPS, preferentemente corregidos con los archivos RINEX de la base fija de “La Gavia”.

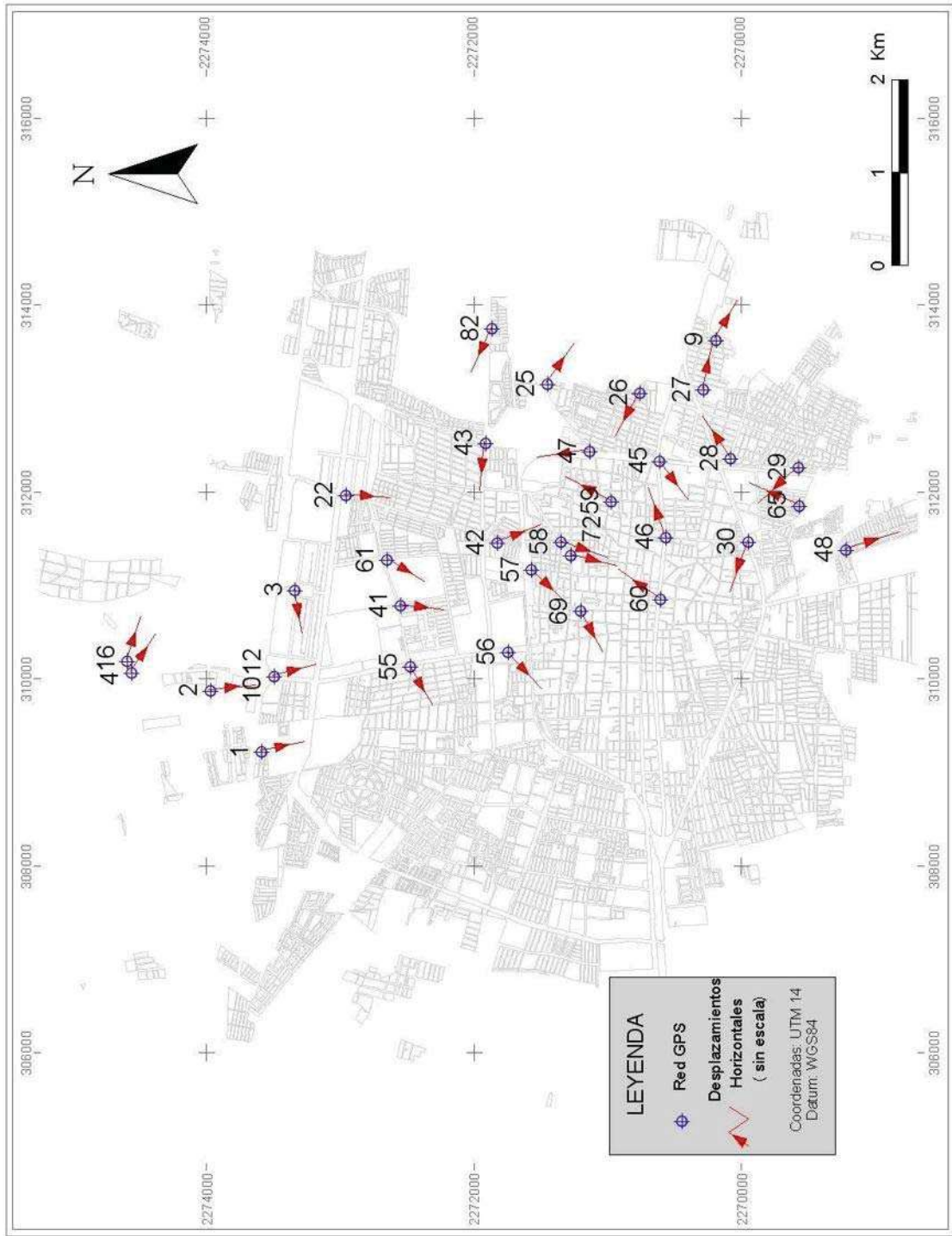
Al momento de procesar los datos de la campaña de Jun/2009, y encontrar los ascensos reportados en la superficie, se tomó la decisión de llevar a cabo la campaña de Ago/2009, corrigiéndola con la RGNA-INEGI estación UGTO, ya que se tenían las mismas

características de corrección en la campaña de Dic/2008, las coordenadas “Z” de dichas ocupaciones se compararon con las obtenidas por la JUMAPA en Dic/2002 (Fig. 48), buscando descartar un posible error de procesamiento de los datos al emplear la base fija de “La Gavia”. Dicha comparación reportó nuevamente ascensos en la superficie del área de estudio, incluso más elevados que los reportados al corregir con la base fija de “La Gavia”, viendo la conveniencia de utilizar bases que ofrezcan una mayor estabilidad. Por lo que en lo sucesivo analizaremos solamente los resultados de las campañas corregidas con la base de “La Gavia” (Dic/2008-Jun/2009). Encontramos entonces, ascensos de la superficie en la ciudad de Celaya, mediante la técnica InSAR en 2006 (Ávila-Olivera), y mediante monitoreo con GPS, haciendo corrección diferencial con la RGNA-INEGI y con la base fija de “La Gavia”.

VI.3 DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL DE LOS PUNTOS MEDIDOS.

Las coordenadas obtenidas en la campañas Dic/2008 y Jun/2009, con sus componentes X y Y, nos permiten determinar los desplazamientos horizontales en los puntos GPS de la red de estudio en Celaya (Fig. 49), mismos que no presentan tendencia alguna, reportando valores de desplazamiento que van desde 0 hasta 3 cm, que sin escala, se muestran en la siguiente figura:

FIG. 49.- DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN CELAYA, GTO.



VI.4 RELACIÓN FALLAS DEL BASAMENTO-COLADAS BASÁLTICAS-FALLAS SUPERFICIALES.

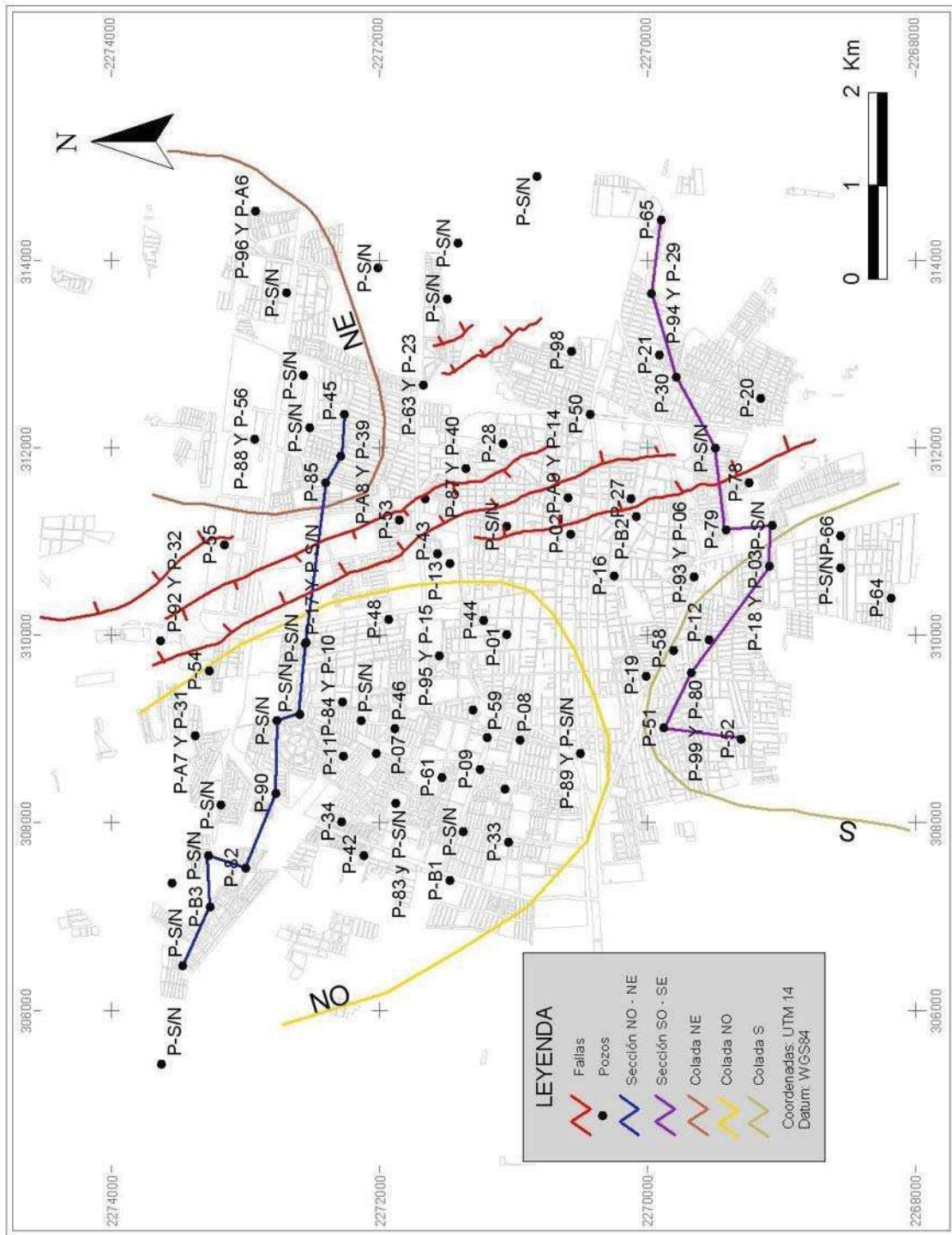
Con la información disponible sobre la litología del subsuelo en 60 de los 98 pozos profundos usados para la extracción y suministro de agua en la zona urbana de la ciudad, y secciones geológicas (Fig. 50), con sus correspondientes correlaciones estratigráficas (Fig. 51), fue posible relacionar las intercalaciones basálticas presentes en los sedimentos fluvio-lacustres del subsuelo de Celaya.

En dichas secciones es posible determinar el nivel del basamento rocoso con sus fallas, los espesores de sedimentos fluvio-lacustres, el nivel freático e intercalaciones de basaltos en las capas de sedimentos (Fig. 51).

Las intercalaciones basálticas detectadas en las secciones geológicas (Fig. 51), no se encuentran en todas las litologías de pozos disponibles (JUMAPA), por lo que señalando aquellos donde tenemos disponible la litología y encontramos intercalaciones de basaltos, es posible detectar coladas basálticas en el subsuelo de Celaya (Fig. 52), que provienen de los conos volcánicos denominados “El Potrero” al NNO, “El Jocoque” al NE y “La Gavia” al SSO de Celaya (Fig.53), mismas que parecen regular la presencia morfológica de las fallas superficiales en Celaya (Fig. 54).

Lo anterior se ilustra con el siguiente grupo de mapas y figuras:

FIG. 50.- SECCIONES GEOLÓGICAS Y SU RELACIÓN CON LAS COLADAS BASÁLTICAS



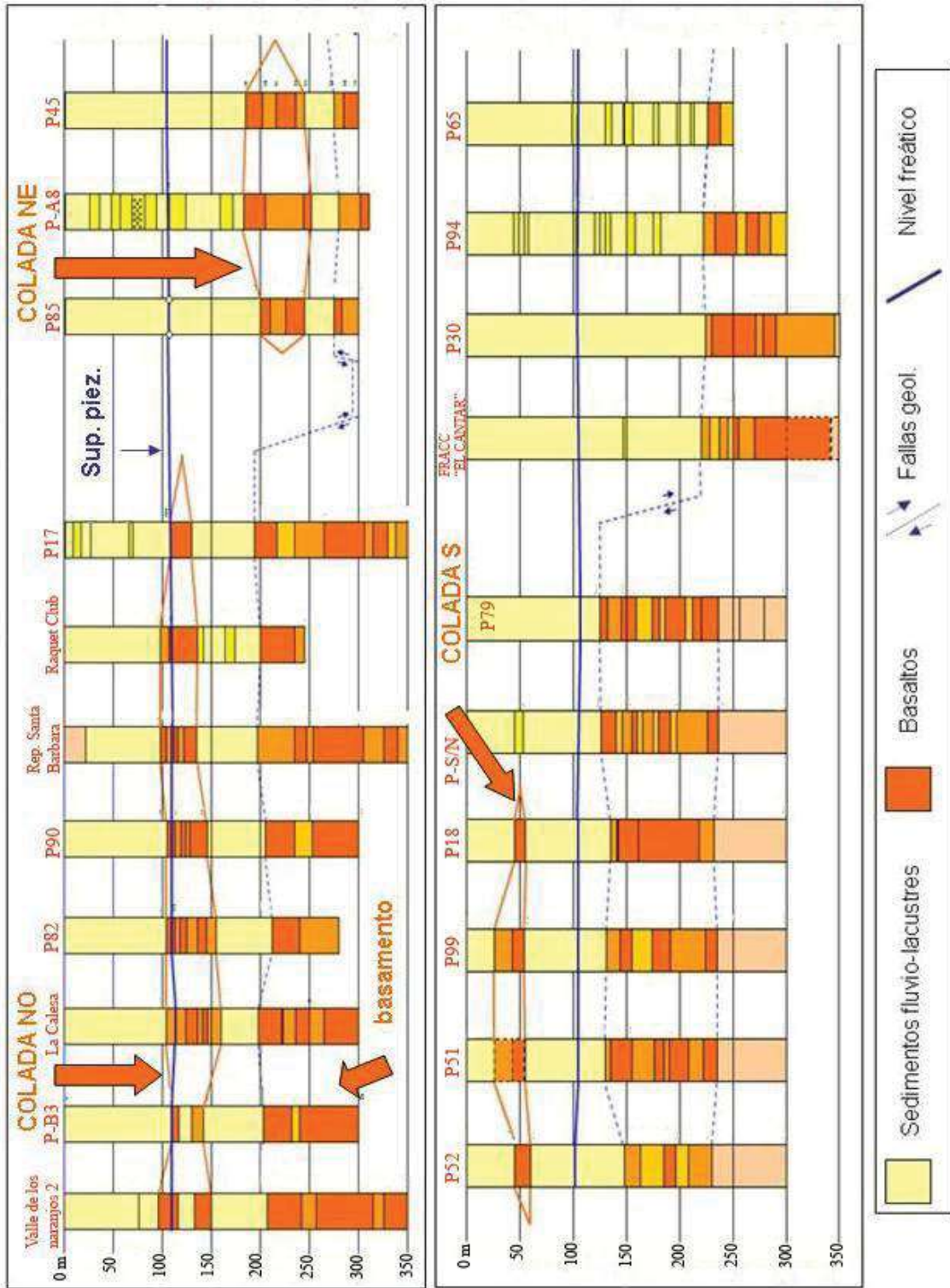


Fig. 51.- Secciones Geológicas NO-NE y SO-SE

FIG. 52.- POZOS PROFUNDOS Y COLADAS

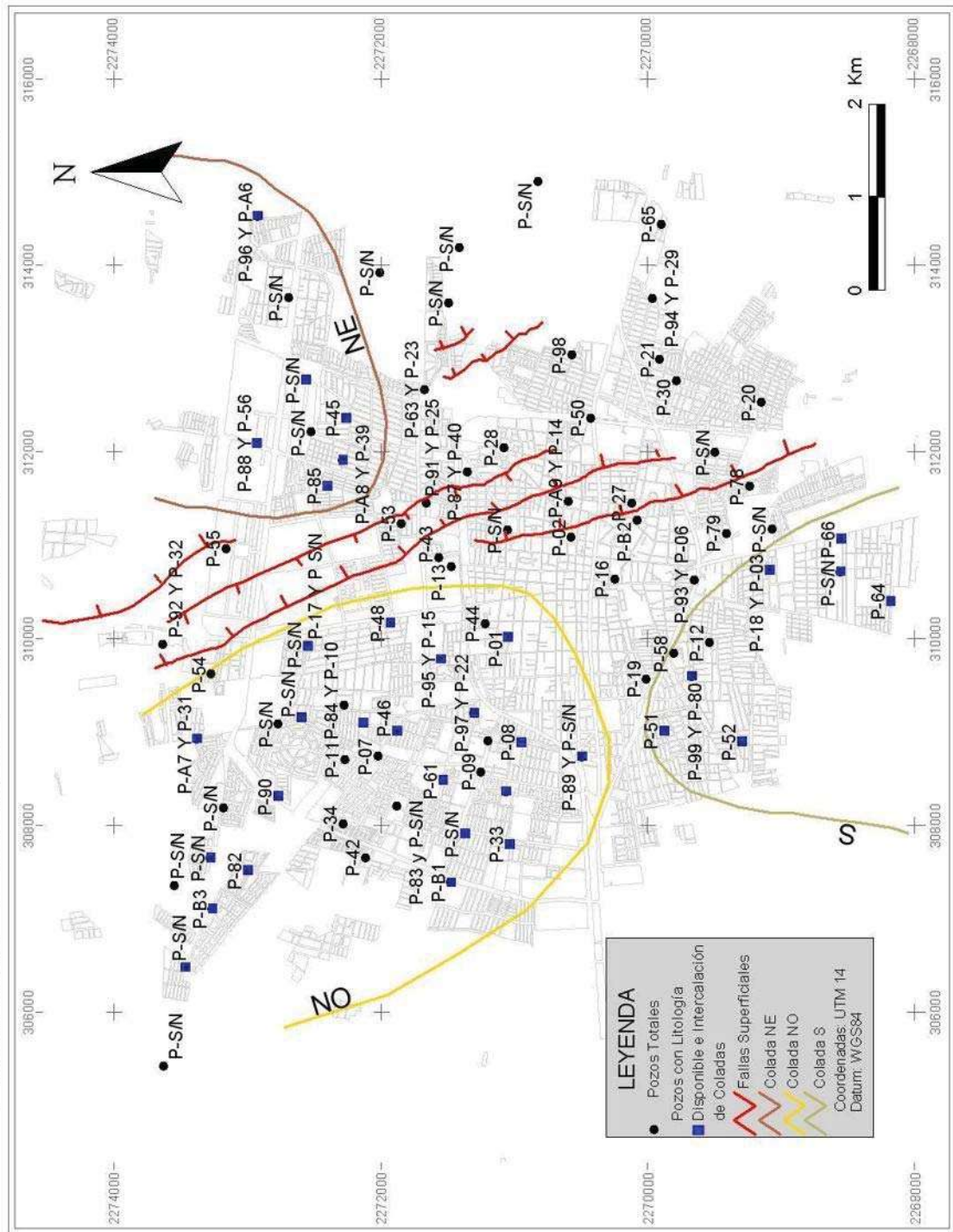


FIG. 53.- ORIGEN DE LAS COLADAS BASÁLTICAS EN CELAYA, GTO.

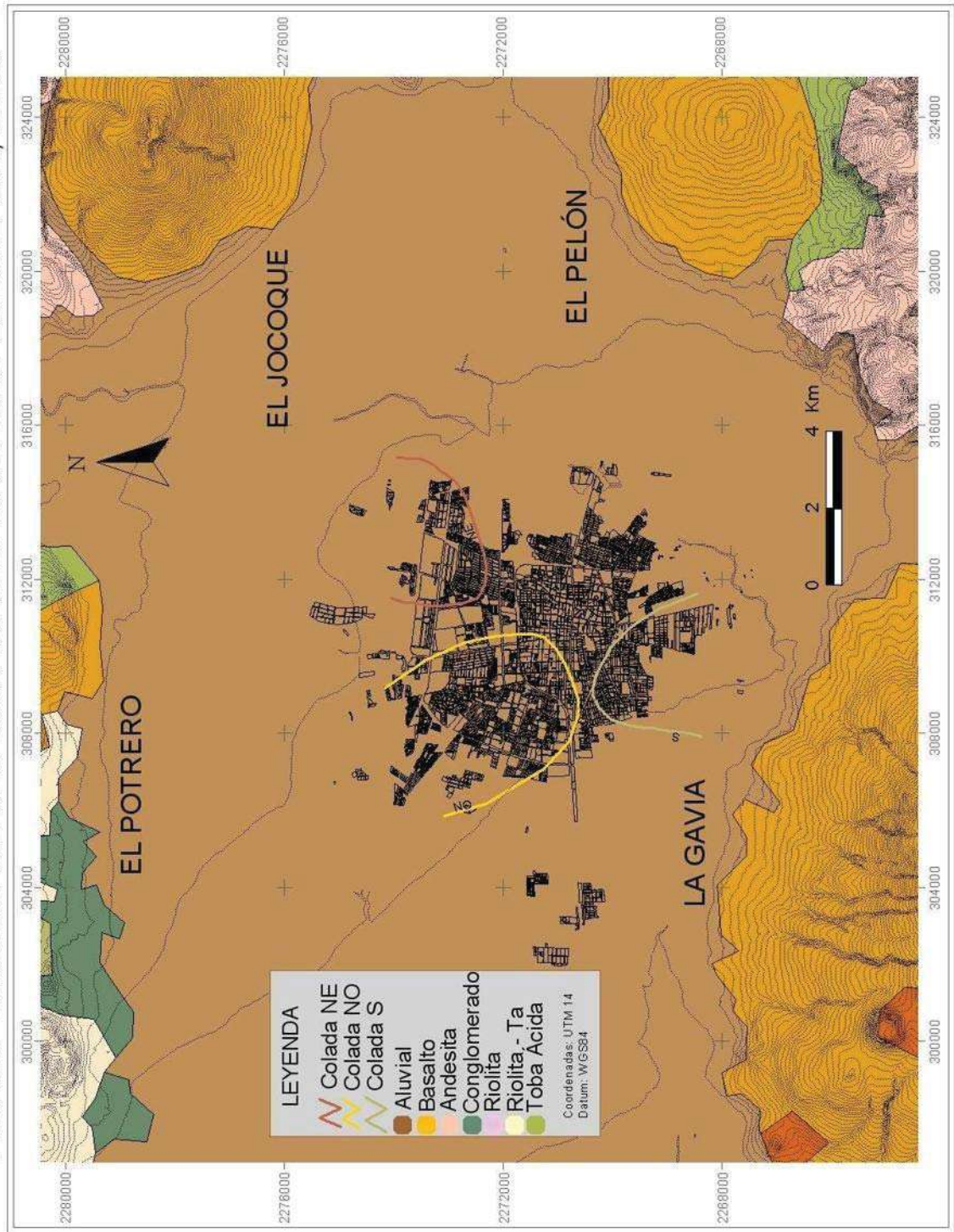
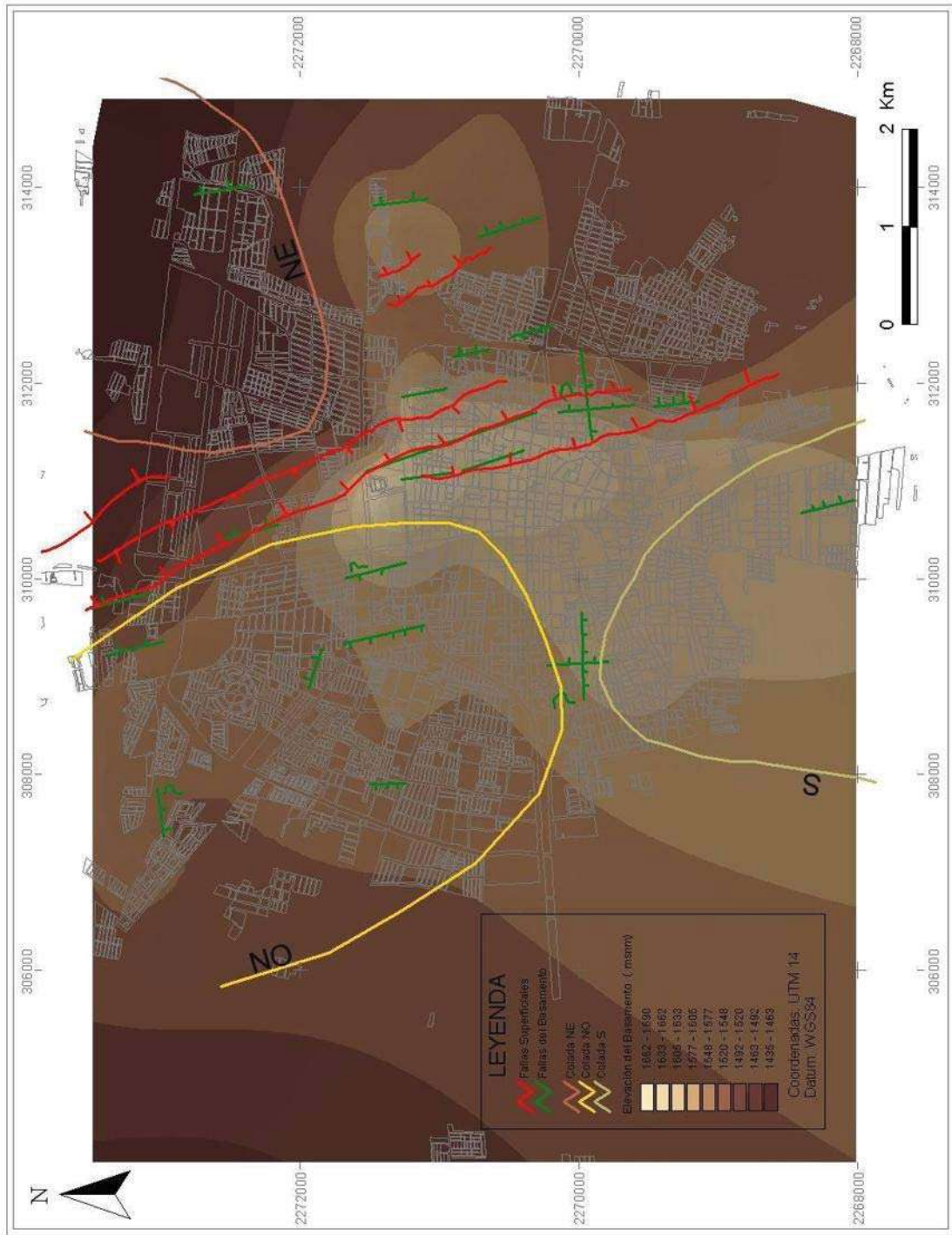


FIG. 54.- FALLAS DEL BASAMENTO Y SUPERFICIALES EN CELAYA, GTO.



La distribución espacial de los pozos profundos que extraen agua del subsuelo de Celaya, una vez identificados aquellos donde está disponible la litología, nos permitieron trazar secciones geológicas (Fig. 50), para analizar en conjunto todos los pozos que las conforman.

Las mencionadas secciones (Fig. 51), muestran en el recuadro superior (sección NO-NE de la Fig. 50), el basamento rocoso a 200 m de profundidad en la zona NO de la ciudad, para posteriormente encontrar una discontinuidad de 100 m correspondiente a la falla Oriente (falla superficial de mayor salto visible), más hacia el NE, otra discontinuidad de aproximadamente 20 m, correspondiente a la falla superficial antitética Universidad Pedagógica, marcando finalmente hacia el NE, una profundidad en los sedimentos de aproximadamente 270 m. Se observan en las zonas NO y NE dos coladas basálticas localizadas a diferentes profundidades, así como la superficie piezométrica a 110 m.

En la recuadro inferior (sección SO-SE de la Fig. 50), se ubica el basamento entre 150 y 120 m de profundidad al SO, con una discontinuidad de 100 m correspondiente a la falla Poniente, cuya salto máximo en la superficie se localiza más hacia el S, respecto del lugar de salto máximo superficial de la falla Oriente. Hacia el SO, se ubica el basamento aproximadamente a 220 m de profundidad, así mismo, se ubica una colada basáltica denominada colada sur, cuyo nivel de piso ha sido rebasado por el abatimiento de la superficie piezométrica.

Las coladas basálticas del subsuelo de la ciudad de Celaya fueron delimitadas con ayuda de las secciones anteriores (Fig. 51) y los pozos profundos con intercalaciones de basaltos en su litología, ya que estos quedan agrupados en tres zonas, NO, NE y S (Fig. 52). Cabe señalar que aquellos pozos que aparecen en zonas de coladas y no se muestran como que tienen intercalaciones basálticas, son aquellos de los cuales no se tiene disponible la litología.

Analizando los datos disponibles de las muestras de recuperación en la perforación de los pozos y las secciones geológicas proporcionadas por la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya (JUMAPA), es posible identificar las características de las tres coladas basálticas intercaladas en los sedimentos fluvio-lacustres, así como su probable origen (Fig. 53), en tres diferentes niveles de los mismos:

- **COLADA SUR:** Tiene dirección S-N, proviene del volcán “La Gavia”, ubicado aproximadamente a 10 km al suroeste de la ciudad (Fig. 53). El piso de dicha colada está localizado alrededor de los 60 m de profundidad mientras que su techo se ubica entre los 30 y 40 m.

- **COLADA NO:** Debido a su dirección NO-SE, se supone que provenga del conjunto de volcanes denominados “El Potrero” ubicados al NO de la ciudad (Fig.53). Esta colada es la más importante, con espesores que varían entre los 20 m y los 60 m. El piso y el techo se localizan a una profundidad de entre 140-160 m y 80-110 m respectivamente. Estas diferencias son debidas al hecho de que la colada se asienta según la morfología pre-existente, es decir en las áreas en donde se ubica el alto estructural de tipo *Horst* de dirección N-S, al centro de la ciudad, los espesores de la colada son menores.

- **COLADA NE:** Tiene una dirección NE-SO y proviene del volcán “El Jocoque” (Fig. 53). Su espesor es mide aproximadamente 60 metros; el piso se encuentra asentado a una profundidad de 250 m, el techo a 190 m.

Sobreponiendo el mapa del basamento con sus fallas, de las coladas y de las fallas superficiales (Fig. 54), se deduce que las fallas geológicas en el basamento tienen una precisa correspondencia con las superficiales, salvo en los casos en que existen coladas basálticas intercaladas en los sedimentos fluvio-lacustres. Estas coladas juegan un papel muy importante en el hundimiento superficial y en la posición de las fallas superficiales, ya que, por una parte amortiguan el efecto de los PSCF en las áreas de colada (al NE, NO y SO de la ciudad), procurando más bien hundimientos homogéneos y continuos, por otra acentúan dicho efecto en sus márgenes, debido a la gran diferencia entre el espesor deformable sobreyacente a las coladas y el contiguo.

Como prueba de esto se aprecia en el mapa de fallas del basamento y superficiales de Celaya (Fig. 54), que las zonas de hundimientos diferenciales en la superficie, se localizan entre las coladas, y que las fallas Tecnológico e Insurgentes se interrumpen al entrar en la zona de la colada NE. Además, en el área de la colada NO se aprecian fallas normales en el basamento, con buzamiento del plano de falla hacia el oeste, sin correspondencia morfológica en la superficie.

VI.5 RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ABATIMIENTO-HUNDIMIENTO

El registro de precipitación total anual en Celaya, para el período 1940-1997 (Fig. 55) nos permite compararlo, para el período coincidente, con la información piezométrica disponible de 1976 al 2008, de la cuál, una vez analizada, se eligieron datos de cuatro pozos (el ZA94 en el O; el ZA100 en el norte, cuya características son las del área NO; el ZA80 en el S, con las características del área SO y; el ZA53, en el NE) ubicados en diferentes zonas clave de la ciudad, de donde se generaron gráficos de abatimiento para el mencionado período de tiempo (Fig. 56).

Así mismo se generaron, el mapa de abatimientos entre 2002 y 2008 (Fig. 57), así como el correspondiente mapa piezométrico de la ciudad de Celaya, Gto (Fig. 58).

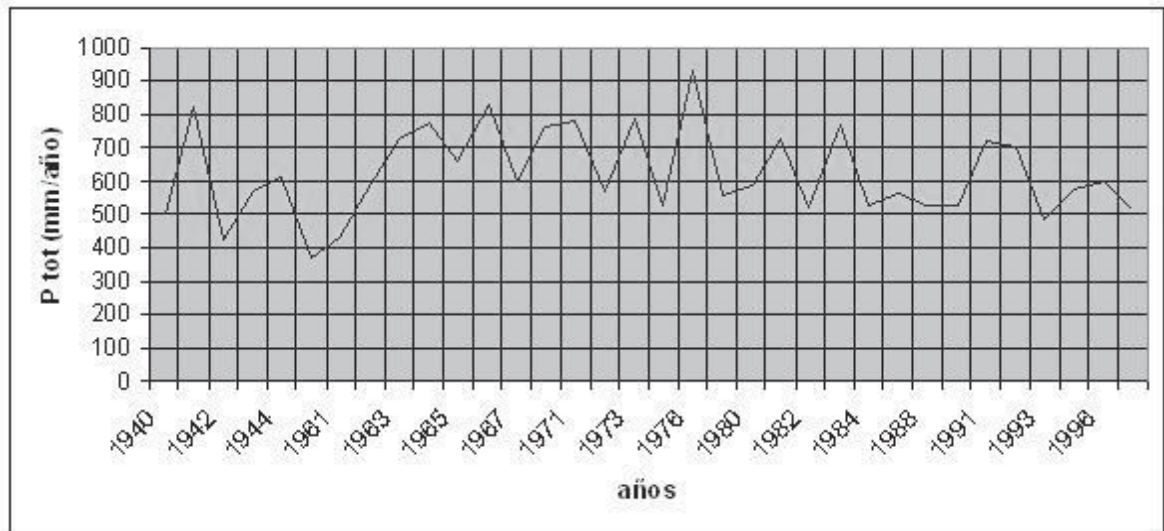


Fig. 55.- Precipitación Total Anual del Período 1940-1997 en la ciudad de Celaya, Gto. (INEGI)

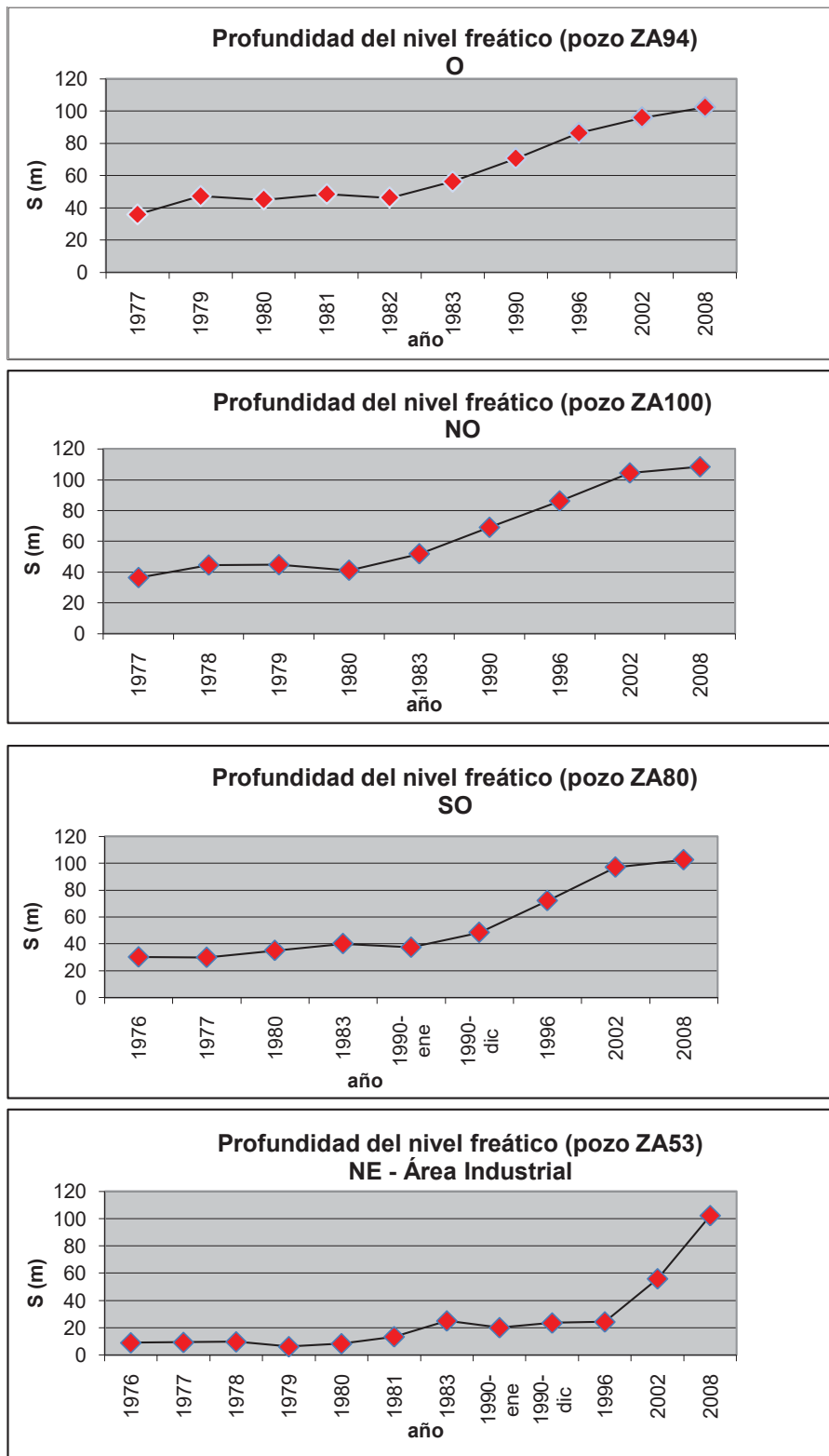


Fig. 56.- Abatimiento del Nivel Freático de Celaya 1977-2008

FIG. 57.- ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN CELAYA, GTO. 2002 - 2008

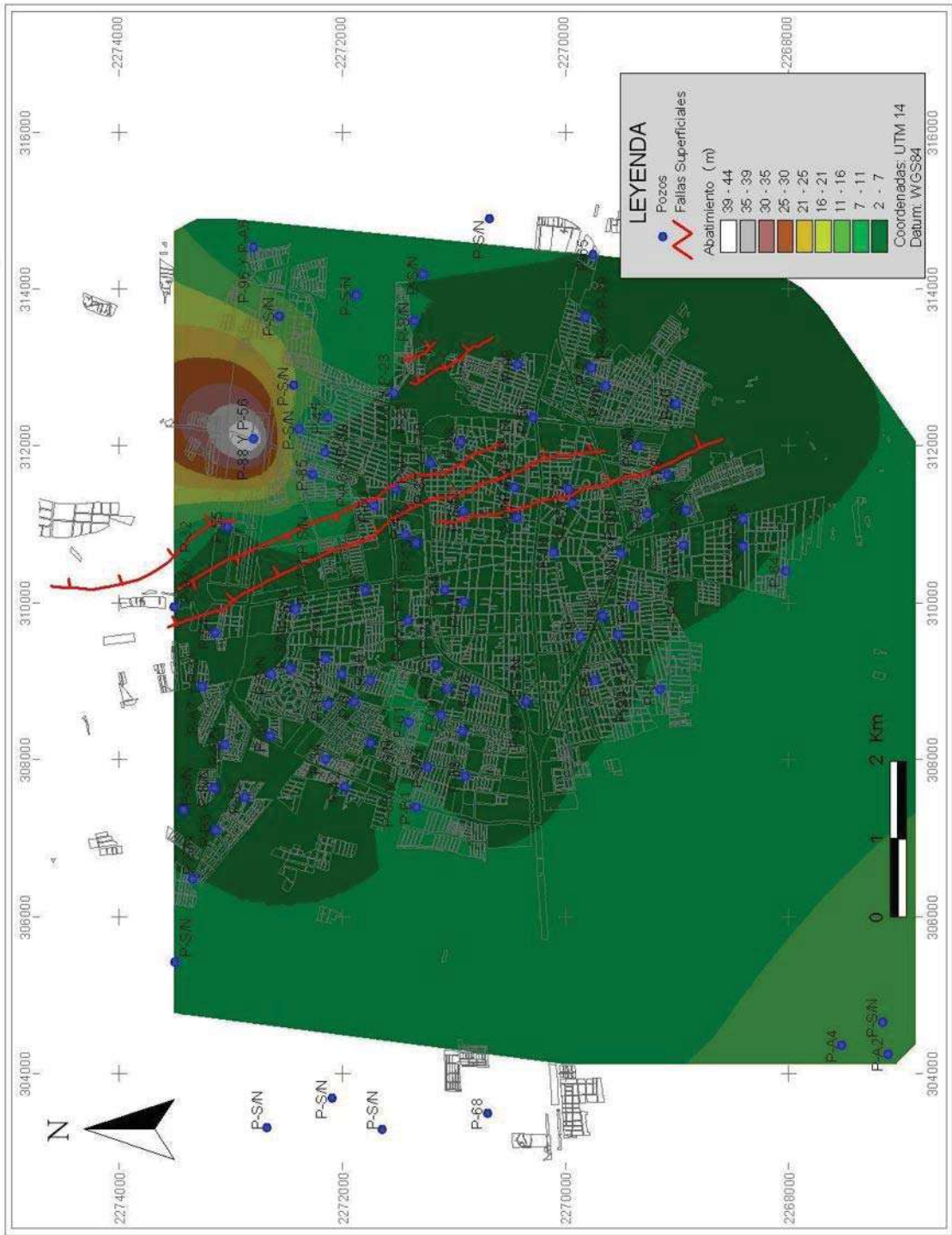
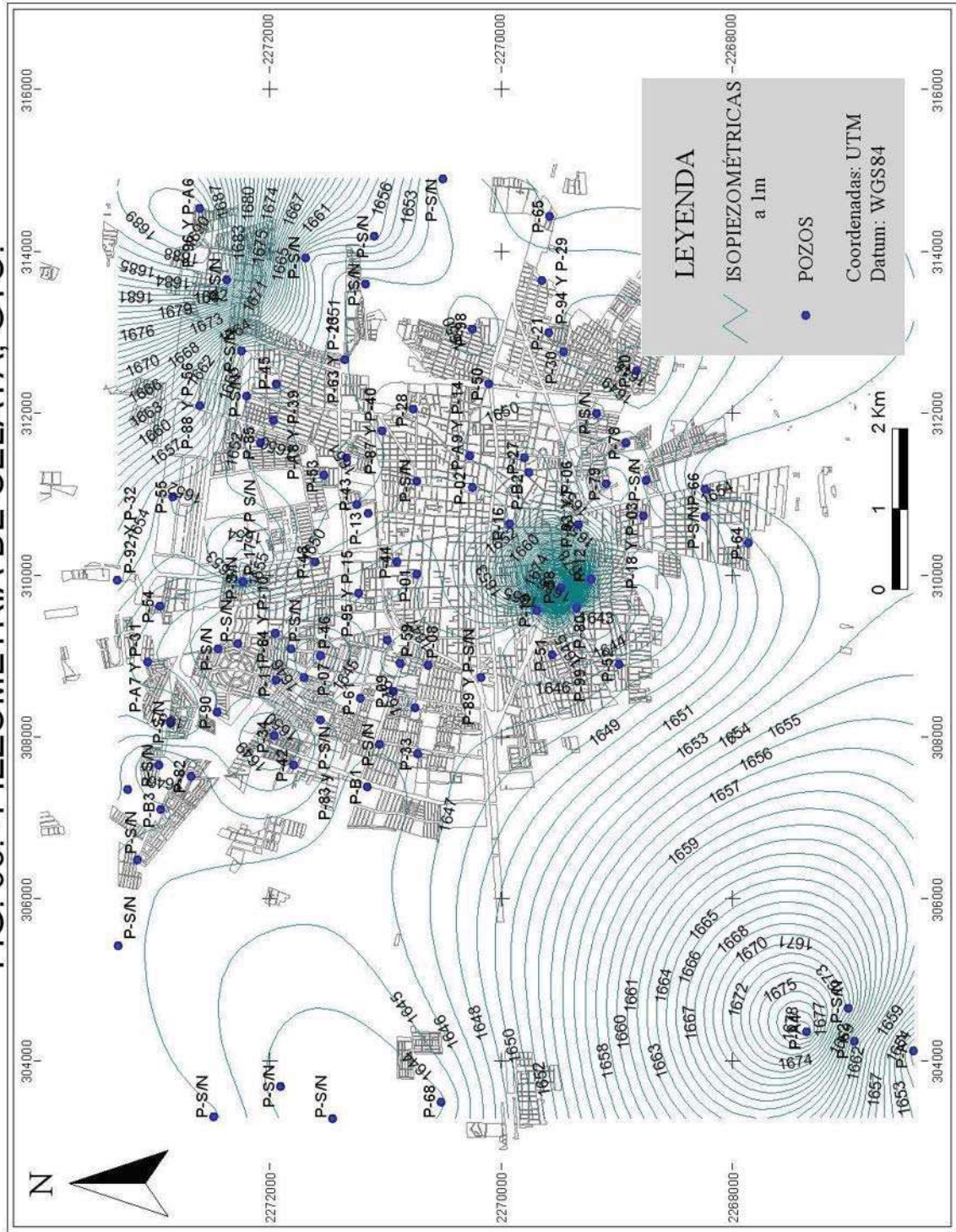


FIG. 58.- PIEZOMETRÍA DE CELAYA, GTO.



La gráfica de precipitación total anual del período 1940-1997 en la ciudad de Celaya, Gto. (Fig. 55), muestra valores mínimos de 380 mm/año en 1961 y máximos de 920 mm/año en 1977. Para el período de concordancia con los datos de abatimiento, encontramos el máximo de 1977, con valores altos semejantes en 1981, 1984 y 1992, de entre 700 y 750 mm/año y valores bajos semejantes en 1979 con 550 mm/año, en 1983 y el período de 1985 a 1990 con aproximadamente 520 mm/año y, en 1994 con 480 mm/año.

En los gráficos de abatimiento del nivel freático de Celaya durante el período 1977-2008 (Fig. 56), es posible observar tres tendencias:

1. En las zonas O y NO (pozos ZA94 y ZA100, respectivamente) el nivel piezométrico fluctúa alrededor de los 40 m de profundidad, hasta principios de la década de los 80's, para posteriormente presentar un crecimiento en los valores de abatimiento, debido a la creciente urbanización, al fenómeno de "El Niño" y a la construcción de la presa Ignacio Allende, aumentando la explotación del acuífero, hasta llegar a los 105 m de profundidad del nivel freático en el 2008.
2. Dado que la zona SO de la ciudad de Celaya es reconocida como área de recarga, el nivel piezométrico permaneció estable hasta el primer semestre de 1990 (pozo ZA80), mostrando a partir de entonces un aumento en el abatimiento semejante a lo que se observa en los otros pozos de la ciudad.
3. En el NE de la ciudad, zona designada como industrial, el pozo ZA53 muestra primero niveles freáticos someros alrededor de los 10 m de profundidad, hasta principios de los 80's, posteriormente profundidades alrededor de los 20 m a mediados de la década de los 90's, y finalmente un acelerado incremento en los abatimientos hasta el orden de los 100 m en el 2008.

Se encuentra correspondencia del máximo y los altibajos del período 1977- 1984 (Fig. 55), con la estabilidad de la profundidad del nivel freático en las zonas O y NO, que en la zona SO se extiende hasta el primer semestre de 1990 (Fig. 56), debido a que es reconocida como área de recarga.

En las zonas O y NO se incrementa la profundidad del nivel freático, a partir de los primeros años de la década de los 80's, debido a la creciente urbanización y el crecimiento de la población, aumentando la demanda y extracción de agua del subsuelo, aunado a la influencia del fenómeno meteorológico denominado "El Niño", caracterizado por la disminución de las precipitaciones, llevando el nivel freático hasta valores superiores a los

100 m, influencia que se observa en la zona SO hasta el segundo semestre de 1990 para alcanzar también profundidades alrededor de los 100 m en el nivel freático, en el 2008.

La mencionada estabilidad se prolonga por más tiempo en la zona NE, en las inmediaciones de la ciudad industrial, donde el lento desarrollo urbano hacia esa zona, además de que se reconoce también como zona de recarga, retardaron el abatimiento hasta 1996, relacionándose con la tendencia a la baja de las precipitaciones totales anuales de la zona (Fig. 55), encontrando un acelerado abatimiento del nivel freático, con valores de hasta 40 m en el período 2002-2008, relacionado con el crecimiento poblacional de la época (Fig. 20).

Con base en los valores piezométricos disponibles durante el periodo 2002-2008 y en los abatimientos del mismo periodo se deduce que la creciente urbanización del área de estudio (Fig. 20) ha provocado aumentos importantes en los abatimientos, con valores de entre 2 y 6 m en zonas urbanas a diferencia de la zona industrial donde se observan abatimientos del orden de 40 m (Pozos 88 y 56) (Fig. 57), correspondientes con los hundimientos máximos reportados en el estudio GPS (12 a 14 cm/año), en la zona NNE de la ciudad.

En el mapa piezométrico (Fig. 58) se observa una zona de nivel somero de la piezometría en correspondencia del pozo 58 (42 m de profundidad), en la zona SO de la ciudad, debido a la demanda de agua del mismo pozo y de los alrededores (12, 19, 93 y 99) que ocasionan un cono invertido en el área de la colonia Quinta Arboledas, en las inmediaciones de la avenida Constituyentes. De acuerdo a los datos disponibles se deduce que el flujo subterráneo es local y presenta su zona de recarga en el volcán La Gavia al SO de la ciudad y el volcán El Jocoque ubicado al NE, en donde afloran basaltos fracturados, muy permeables, mientras que el área de descarga se ubica en el mismo valle de la ciudad. Es decir, el flujo hídrico converge de estas zonas hacia el centro de la Celaya.

VI.6 RELACIÓN NIVEL FREÁTICO-ESPESOR DE SEDIMENTOS-COLADAS-HUNDIMIENTO

Conjuntando los datos piezométricos (Fig. 58), geológicos (Fig. 51) y de hundimientos (Fig. 46), encontramos que el nivel freático se localiza dentro de la colada NO, aproximadamente a 110 m de profundidad, con espesores de sedimentos de alrededor de 200 m, sin reportes de fallas superficiales en la zona O y NO de la ciudad y, hundimientos máximos del orden de entre 7 y 10 cm/año; a 70 m sobre la colada NE, con espesores máximos de sedimentos de 280 m, sin reportes de fallas superficiales sobre la colada y, hundimientos máximos entre 10 y 11 cm/año y; aproximadamente a 50 m debajo de la colada S, con espesores de sedimentos entre 120 y 150 m, sin reportes de fallas superficiales en la zona SO de la ciudad y hundimientos máximos entre 7 y 10 cm/año.

De lo anterior se deduce que el hundimiento no depende solamente del abatimiento del nivel freático y el espesor de sedimentos, sino que está regulado (sobre todo el diferencial) por la relación de posición de las coladas con la profundidad del nivel freático, por lo que existe la probabilidad de que una vez que el nivel freático se abata hasta llegar a los sedimentos lacustres subyacentes a las coladas, la propia carga litostática de los basaltos podría influir sobre las tasas de hundimiento, acelerándolas, o bien, podría darse la aparición de fallas superficiales coincidentes con los flancos de las coladas, dada la diferencia de espesores de sedimentos sobre las coladas, comparados son los espesores en las zonas contiguas a estas.

La creciente urbanización y demanda de agua en la ciudad de Celaya, llevan a pensar que los hundimientos diferenciales continuarán, salvo aquellos casos donde se presentan coladas basálticas intercaladas en los sedimentos.

CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ciudad de Celaya, Gto., asentada sobre una cuenca rellena en tiempos geológicos por sedimentos lacustres y/o fluviolacustres, localizada en la zona norte de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), está siendo afectada por los PSCF.

El basamento rocoso se encuentra afectado por un sistema de fallas de dirección NNO-SSE, de tipo normal y sin-sedimentario, generando capas de sedimentos de mayor espesor arriba del bloque de techo con respecto al bloque de piso. La diferencia de espesor deformable se traduce en un hundimiento diferencial que origina fallas superficiales, representando la evidencia morfológica de las correspondientes fallas en el basamento. Estos hundimientos son provocados por la excesiva explotación del sistema acuífero, ocasionando una compactación diferencial de los espesores deformables.

Ha sido posible identificar que la zona urbana de la ciudad de Celaya muestra en su superficie seis fallas de tipo normal (Poniente, Oriente, Pedagógica, Tecnológico, Insurgentes y Santa Teresita), paralelas al sistema de fallas regionales NNO-SSE conocido como Taxco-San Miguel de Allende, con salto máximo en la superficie superior a los 2.5 m. La falla Tecnológico se presentaba en la cartografía anterior como continuación de la falla Insurgentes, sin que se presentara evidencia de esto en el terreno, siendo localizada en fraccionamientos de reciente construcción al norte de la ciudad, mientras que la falla Santa Teresita fue localizada en el barrio del mismo nombre, que aunque por informes de los vecinos es muy antigua, no aparecía en la cartografía disponible. Las fallas Oriente, Poniente y Pedagógica extienden su longitud respecto a datos anteriores disponibles, testigo de que los hundimientos superficiales continúan, aunque el levantamiento anterior de la traza de las fallas no permite determinar una tasa de crecimiento longitudinal.

Gracias a la información proporcionada por la JUMAPA, fue posible identificar y digitalizar las fallas geológicas existentes en el basamento aún cuando todavía no hay una evidencia morfológica en la superficie; observando también que el basamento presenta una estructura de tipo *Horst* alargado en dirección N-S, en la zona centro de la ciudad. En esta área los sedimentos fluvio-lacustres tienen espesores de 70 m a 100 m, que aumentan siguiendo una estructura escalonada del basamento hacia el oriente y el poniente de la ciudad, llegando a espesores desde los 250 m hasta los 300 m. Las fallas geológicas tienen hasta 150 m de salto en el basamento.

A partir del análisis de las muestras de recuperación en la perforación de los pozos profundos llevado a cabo por la JUMAPA y de las secciones geológicas disponibles, fue

posible identificar tres coladas basálticas intercaladas en los sedimentos fluvio-lacustres en tres diferentes niveles de los mismos, provenientes de los conos volcánicos de los alrededores de Celaya (El Potrero al NO, El Jocoque al NE y La Gavia al SO).

Las fallas geológicas en el basamento tienen una precisa correspondencia con las superficiales, salvo en los casos en que existen las coladas basálticas intercaladas en los sedimentos fluvio-lacustres. Estas coladas juegan un papel muy importante en los hundimientos diferenciales y en la posición de las fallas superficiales en las zonas NE, NO y S de la ciudad. Como prueba de esto se aprecia en los mapas que el hundimiento diferencial se da entre las coladas y que las fallas Tecnológico e Insurgentes se interrumpen al entrar en la zona de la colada NE. Además, en el área de la colada NO se aprecian fallas normales en el basamento, con buzamiento hacia el oeste, sin correspondencia morfológica en la superficie.

Con base en los valores piezométricos disponibles durante el periodo 2002-2008 y en el mapa de abatimientos del mismo periodo se deduce que la creciente urbanización del área de estudio ha provocado aumentos diferenciales en los datos de abatimientos actuales, con valores de entre 2 y 6 m en zonas urbanas, a diferencia de la zona industrial donde se observan abatimientos del orden de 40 m (Pozos 88 y 56).

Todo lo anterior indica que existe una relación directa entre la evolución morfológica de la subsidencia en Celaya, la geología del subsuelo con sus coladas basálticas y la dinámica del acuífero, y que sin una adecuada planeación de la explotación de este, la profundidad del nivel freático podría sobrepasar la colada NO, donde al presentarse espesores importantes de sedimentos deformables bajo esta, podría llevar a una aceleración de la tasa de hundimiento debido a la carga litostática propia de la colada, o bien, a la formación de fallas coincidentes con los flancos de esta, con los consiguientes daños en las estructuras urbanas, debido a la diferencia entre el espesor deformable sobreyacente a la colada y el contiguo.

El estudio de las tasas de hundimiento mediante levantamientos geodésicos con GPS, se llevó a cabo corrigiendo los datos obtenidos en los monitoreos con las estaciones de la RGNA del INEGI (TOL2 y UGTO), y con una base fija instalada en la cisterna del pozo “La Gavia” propiedad de la JUMAPA, con apoyo del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Estas correcciones permitieron comparar resultados en ambos casos, mostrando la conveniencia de utilizar una base de la mayor estabilidad posible. Dicho estudio reportó

tasas máximas de entre 12 y 14 cm/año, con puntos anómalos que presentaban ascensos de la superficie en el corto plazo, pero que a largo plazo terminan en hundimiento, lo que nos permite concluir que la vertical del terreno en Celaya es oscilante. Estos ascensos de la superficie fueron encontrados en estudios previos de la subsidencia de la zona por la técnica de percepción remota denominada InSAR (Ávila- Olivera, 2006).

Los desplazamientos horizontales de los puntos de la red de estudio GPS no muestran una tendencia definida, por lo que no se puede determinar si tienen una relación con la cinemática regional.

Los resultados muestran correspondencia entre el desarrollo urbano, el abatimiento del nivel freático y el hundimiento en la zona urbana de Celaya, Gto., específicamente en la zona norte de la ciudad, entre la denominada zona industrial y la salida a San Miguel de Allende, donde se reportan las tasas de hundimiento máximas y abatimientos del nivel freático de hasta 40 m en el periodo 2002-2008.

La geometría y monitoreo de los PSCF en Celaya, Gto., fueron exitosamente logrados por medio del GPS, debido a la precisión que este ofrece, aunada a la decisión de corregir los datos con una base colocada en zona estable, evitando el error que por falta de estabilidad aporta la RGNA del INEGI.

Se recomienda continuar el monitoreo GPS, ya que el período de mediciones logrado no permitió clarificar sobre el ascenso y los desplazamientos horizontales de la superficie en la zona de estudio, corrigiendo los datos GPS con la base fija de “La Gavia”.

Es necesaria una adecuada planeación urbana que evite las zonas afectadas o aquellas que se visualiza tendrán afectaciones según la dirección de las fallas, así mismo, de continuar una irracional explotación del acuífero, la longitud y el salto en la superficie de las fallas aumentaría, hasta que los sedimentos presentes dejaran de consolidarse, todo esto con el consiguiente daño a las estructuras urbanas.

REFERENCIAS

- Álvarez-Manilla A.A. y Pérez-Rea M. de la L., 1996, Subsistencia y fallamiento en el Valle de Querétaro, XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Morelia, Michoacán.
- Aranda-Gómez J.M. y Aranda-Gómez J.J., 1985, Fallamiento de la Ciudad de Celaya, Análisis del agrietamiento de la Ciudad de Aguascalientes.
- Ávila-Olivera J.A. y Garduño-Monroy V.H., 2003, Estudios Geotécnicos y Geofísicos de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla en la Ciudad de Morelia, Michoacán, Unión Geofísica Mexicana, Reunión Anual, Resúmenes: Geos.
- Ávila-Olivera J.A., 2004, Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, caso: la Ciudad de Morelia, Michoacán, México: Querétaro, Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro, Tesis de Maestría.
- Ávila-Olivera J.A. y Garduño-Monroy V.H., 2006, El Abatimiento del Nivel Freático Activa el Desarrollo de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, caso: la ciudad de Morelia, Michoacán.
- Ávila-Olivera J. A., 2009, Evolución de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla en Antiguas Zonas Lacustres y Fluvio-Lacustres del Cinturón Volcánico Mexicano: Ejemplos, Ciudades de Morelia, Mich. y Celaya, Gto.”, Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bell J.W., 1981a, Subsidence in Las Vegas Valley, Nevada Bureau of Mines and Geology Bulletin 95, 1 plate, scale 1:62,500.
- Carreón-Freyre D.C., Cerca-Martínez M., Vargas-Cabrera C., Gámez-González J. y Álvarez-Rodríguez J., 2002, Factores geológicos y geomecánicos que condicionan la evolución del fracturamiento en el relleno sedimentario de la Ciudad de Querétaro, Unión Geofísica Mexicana, Reunión Anual, Resúmenes: Geos.
- Cueva-Lovelle J.M., Sánchez-Bayón B., Suárez-García D., Suárez-López A., 2007, Sistemas de Información Geográfica y Servicios Web, Máster y Doctorado en Ingeniería Web, Universidad de Oviedo.

- Changjiang Li, Xiaoming Tang y Tuhua Ma, 2006, Land subsidence caused by groundwater exploitation in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain, China, *Hydrogeology Journal*, Vol.14 num. 8.
- Demant A., 1978, Características del Eje Neovolcanico Transmexicano y sus problemas de interpretación, Instituto de Geología, UNAM, Vol. 2 No. 2, p. 172-187.
- Figuroa-Vega G.E., 1989, Mecanismos de producción de grietas inducidos por la explotación del agua subterránea: México, D.F., Academia Mexicana de Ingeniería, Alternativas Tecnológicas.
- Galloway D., Jones D.R. and Ingesbritsen S.E., 1999, Land Subsidence in the United States, U.S. Geological Survey, Circular 1182.
- Garduño-Monroy, V.H., G.M. Rodríguez-Torres, I. Israde-Alcántara I. E. Arreygue-Rocha, P. Canuti y S. Chiesa (1999). Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia. *Geos, Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, Vol. 9, No. 2.
- Garduño-Monroy, V.H., E. Arreygue-Rocha, I. Israde-Alcántara y G.M. Rodríguez-Torres, 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 18, No. 1.
- Giordano N., 2010. Estudio con Georadar (GPR) de la Geometría de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF), en la Ciudad de Celaya, Guanajuato, México. Tesis de Maestría en revisión.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T. y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis Ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario*, Temas Selectos de la Geología Mexicana, TOMO LVII, NÚM. 3, 2005, P. 227-283
- H. Ayuntamiento de Celaya, Administración 2006-2009, <http://www.celaya.gob.mx>
- Holzer T.L. y Davis S.N., 1976, Earth fissures associated with water-table declines (abs.), *Geological Society of America* 8 (6), p. 923-924.

- Holzer T.L. y Pompeyan E.H., 1981, Earth fissures and localized differential subsidence, *Water Resources Research* 17 (1), p. 223-227.
- Holzer T.L., 1984, Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment, in Holzer, T.L., ed., *Maninduced land subsidence: Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, v. 6, 221 p.
- Holzer T L y Gabrysch R K, 1987, Effect of water-level recoveries on fault creep, *Houston Texas, Ground Water*, Vol. 25, p. 392-397.
- INEGI, Información geográfica del municipio de Celaya, Gto.
- Israde-Alcántara I. y Garduño-Monroy V.H., 2002, La geología de la región de Morelia: Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia, v. 1.
- Juárez-Badillo E, 1962, Mecanismo de grietas de tensión en el Valle de México, Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- JUMAPA, Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de la Ciudad de Celaya, Guanajuato.
- Koolhaas-Michel, 2003, Elementos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Versión 1.3
- Lermo-Samaniego J., Nieto-Obregón J. y Zermeño M., 1996, Fault and Fractures in the Valley of Aguascalientes, Preliminary Microzonification, *World Conference on Earthquake Engineering*, 11th Amsterdam, Elsevier.
- Martínez-Reyes J. y Nieto-Samaniego A. F., 1990, Efectos Geológicos de la Tectónica Reciente en la Parte Central de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, vol. 9 núm. 1.
- Meinzer O E, 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifers, *Econ. Geology*, v. 23, no. 3, p. 263-291.
- Oliver A., 1985, Efectos del fallamiento en edificios y servicios públicos en la Ciudad de Celaya, Gto., Reunión de la Sociedad de Mecánica de Suelos y la Asociación Geohidrológica Mexicana sobre "Fallamiento de Terrenos en Celaya", Celaya, Gto.

- Pasquaré G, Ferrari L, Perazzoli M, Tiberi y Tuchetti F, 1987, K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the trans-mexican volcanic belt, *Geofísica Internacional*, Vol. 26, No. 1, p. 109-158.
- Pasquaré G., Ferrari L., Garduño V.H., Tibaldi A., y Vezzoli L., 1991, Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán: Boulder, Geological Society of America, Map and Chart series, MCH072.
- Peñafiel J., Zayas J., 2004, Fundamentos del Sistema GPS y Aplicaciones en la Topografía, Leica Geosystems.
- Pieri M., Groppi G., 1981, Subsurface geological structure of the Po plain, Italy, C.N.R. Pubbl. 414 Progetto Finalizzato Geodinamica, 13 pp.
- Poland J.F., 1984a, Case History No. 9.14. Santa Clara Valley, California, U.S.A., in Poland J.F. ed, Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal: International Hydrological Program, Working Group 8.4, 305 p.
- Poland J F, 1984b, Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal: International Hydrological Program, Working Group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor, 305 p.
- Pozo-Ruz A., Ribeiro A., García-Alegre M.C., García L., Guinea D. Y Sandoval, F., 2000, Sistema de posicionamiento global (GPS): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro, 9 pags.
- Preti M., 1999, The Holocene transgression and the land-sea interaction south of the Po delta, *Giornale di Geologia*, 61, 143-159.
- Rincón-Juárez V., 2003, Contribución a los estudios geotécnicos de la falla poniente de Celaya, Guanajuato: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de licenciatura.
- Rojas-González, E., J. Arzate-Flores y M. Arroyo-Contreras (2002). Predicción de las zonas de agrietamientos debido a la extracción de agua. *Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Tomo 1.

- Sinclair W.C., 1982, Sinkhole development resulting from ground-water development in the Tampa area, Florida, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 81-50, 19 p.
- Termolini G., 2007, *Analisi degli effetti indotti dal sovrasfruttamento degli acquiferi di pianura: emungimenti e subsidenza nella piana campana*, Tesis de doctorado, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Terzaghi K, 1925, Principles of soil mechanics: IV, Settlement and consolidation of clay, Eng. News-Rec., p. 874-878.
- Trujillo-Candelaria J.A., 1985, Subsistencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto., Reunión sobre Asentamientos Regionales, México, D.F., Sociedad Mexicana de Suelos, Asociación Geohidrológica Mexicana.
- Trujillo-Candelaria, J.A., 1991a, Fallamiento de terrenos por efecto de la sobreexplotación de acuíferos en Celaya, Guanajuato, México, in XXIII Congress of the Association of International Hydrologists, Sobreexplotación de acuíferos: España.
- Trujillo-Candelaria, J.A., 1991b, Origen del Fallamiento del Terreno en Celaya. Soc. Mex. de Mec. de Suelos.
- Vázquez -Carretero N J, 2001, Cálculo de la subsidencia unidimensional debida a los descensos del nivel piezométrico, Aplicación al casco urbano de Murcia y a los efectos sobre sus edificios, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Wikipedia, La enciclopedia libre, Sistema de posicionamiento global.
http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global
- Yamamoto S., 1984, Case History No. 9.10. Bangkok, Thailand, in Poland J.F. ed, Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal: International Hydrological Program, Working Group 8.4, 305 p.