



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de ingeniería

EVALUACIONES DE RIESGO POR FALLAMIENTO ASOCIADO A SUBSIDENCIA DERIVADAS DE INSAR.

TESIS

Que para obtener el grado de ingeniero geólogo
presenta:

Darío Emmanuel Solano Rojas.



Director : Enrique Cabral Cano

JUNIO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE	pág.
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	
	1
1.1 Contexto Social.	2
1.2 Demografía, expansión urbana y consumo hídrico.	4
1.3 El estudio de la subsidencia en el área Metropolitana de la Ciudad de México.	5
1.4 Análisis SAR de subsidencia previos en el Valle de México.	7
CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ALREDEDORES.	
	10
2.1 Contexto de la Cuenca de México.	11
2.2 Estratigrafía de la Cuenca de México.	12
<u>2.2. 1 Mesozoico.</u>	15
2.2.1.1 <i>Unidad Sedimentaria Marina.</i>	15
<u>2.2.2 Cenozoico.</u>	16
2.2.2.1 <i>Grupo Balsas (Teob).</i>	16
2.2.2.2 <i>Unidad Volcánica Inferior.</i>	16
2.2.2.3 <i>Unidad Volcánica Superior (Grupo Tarango).</i>	17
2.2.2.4 <i>Rocas Volcánicas del Cuaternario.</i>	18
2.2.2.5 <i>Rocas Sedimentarias del Cuaternario.</i>	18
2.3 Aspectos destacados de la geología estructural de la cuenca de México.	19
2.4 Unidades hidrogeológicas.	20
CAPÍTULO 3. INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (INSAR) EN LA CIUDAD DE MÉXICO.	
	22
3.1 Radar, SAR e InSAR.	23

ÍNDICE	pág.
3.2 Interferometría de dispersores persistentes: PSInSAR y SqueeSAR.	24
3.3. Subsistencia asociada a extracción intensiva de agua subterránea usando SAR	25
3.4 Análisis PSI de subsistencia en la Ciudad de México.	27
3.5 Áreas Geoestadísticas Básicas y medidas de subsistencia.	28
<u>3.5.1 AGEBs.</u>	31
<u>3.5.2 Los AGEBs como unidades para las observaciones de subsistencia.</u>	31
CAPÍTULO 4. INTEGRACIÓN DE MAPAS DE DESPLAZAMIENTO INSAR AL ANÁLISIS DRASTIC.	36
4.1 Metodología DRASTIC.	37
4.2 Sg como parámetro de DRASTIC.	39
<u>4.2.1 Desarrollo metodológico.</u>	39
<u>4.2.2 Mapa DRASTIC-Sg.</u>	42
4.3 Conteos comparativos de área, población y parámetros de subsistencia entre DRASTIC y DRASTIC-Sg.	42
<u>4.3.1 Conteos de población por Zona de Vulnerabilidad.</u>	42
4.3.1.1 <i>Procedimiento.</i>	42
4.3.1.2 <i>Resultados y discusión.</i>	44
<u>4.3.2 Análisis de tasa y gradiente de subsistencia por Zona de Vulnerabilidad.</u>	46
4.3.2.1 <i>Resultados “Área todo el D.F.”</i>	47
4.3.2.2 <i>Resultados “Área AGEBs”.</i>	49
<u>4.3.3 Comparaciones de Área por Zona de Vulnerabilidad entre “Área todo el D.F.” y “Área AGEBs”.</u>	51
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE ORIENTACIONES DE FALLAS Y FRACTURAS EN ZONAS SELECTAS.	53
5.1 Introducción al fracturamiento.	54
5.2 El estudio del fracturamiento asociado a subsistencia.	55
5.3 Modelo conceptual del fracturamiento en la Ciudad de México.	56
<u>5.3.1 Modelo conceptual en la delegación Iztapalapa.</u>	57

ÍNDICE		pág.
<u>5.3.2 Extrapolación del modelo a la Ciudad de México.</u>		58
5.4 Metodología.		60
<u>5.4.1 Características del Muestreo.</u>		60
<u>5.4.2 Consideraciones.</u>		61
<u>5.4.3 Manipulación de los datos de orientación de fracturas.</u>		61
5.5 Mapa de orientaciones de fracturamiento en zonas selectas del Distrito Federal.		66
<u>5.5.1 Resultados.</u>		68
5.6 Conclusiones.		69
CAPÍTULO 6. CORRELACIONES SUBSIDENCIA GPS-INSAR Y ABATIMIENTO -SUBSIDENCIA.		72
6.1 Introducción.		73
<u>6.1.1 Correlación de subsidencia GPS - InSAR.</u>		73
<u>6.1.2 Correlación subsidencia - abatimiento.</u>		73
6.2 Análisis GPS-InSAR.		75
<u>6.2.1 Metodología.</u>		75
<u>6.2.2 Resultados.</u>		79
6.3 Correlación subsidencia - abatimiento del nivel estático.		80
<u>6.3.1 Metodología.</u>		80
<u>6.3.2 Resultados.</u>		81
CAPÍTULO 7. MAPAS DE PELIGRO POR FALLAMIENTO ASOCIADO A SUBSIDENCIA.		88
7.1 Contexto del mapa de riesgo.		89
7.2 Mapa de Riesgo del Área Metropolitana de la Ciudad de México2010.		90
<u>7.2.1 Procedimiento.</u>		90
<u>7.2.2 Resultados.</u>		94
7.3 Crecimiento de la mancha urbana en el periodo 1986-2010.		96
<u>7.3.1 Marco teórico.</u>		96
<i>7.3.1.1 Definiciones de Percepción Remota.</i>		97
<i>7.3.1.2 Satélites, sensores y principios de percepción remota.</i>		99

ÍNDICE	pág.
7.3.1.3 <i>Satélites disponibles.</i>	100
7.3.1.4 <i>RADAR</i>	101
7.3.1.5 <i>Landsat.</i>	102
<u>7.3.2 Procedimiento.</u>	103
<u>7.3.3 Resultados.</u>	109
7.4 Las zonas de riesgo en la mancha urbana 1986-2010.	114
<u>7.4.1 Procedimiento.</u>	114
<u>7.4.2 Resultados.</u>	116
7.5 Conclusiones.	117
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.	119
CAPÍTULO 9. RECOMENDACIONES.	126
CAPÍTULO 10. REFERENCIAS.	129

RESUMEN

La subsidencia y el fallamiento superficial son fenómenos que afectan distintas ciudades alrededor del mundo, frecuentemente relacionados a extracción de agua subterránea intensiva. Estos fenómenos son controlados también por las condiciones locales de estratigrafía y geología estructural. La Ciudad de México es bien conocida por ser afectada dramáticamente por subsidencia del terreno que resulta en peligro de inundaciones y fallamiento superficial intenso, que ha producido daños severos a la infraestructura durante las últimas décadas.

Este trabajo fue desarrollado en la zona metropolitana de la Ciudad de México y sus productos están basados en datos de subsidencia derivados de InSAR que incluyen entre otros: una evaluación de mecanismos de fallamiento asociado a subsidencia, conteos de la vulnerabilidad acuífera asociada, correlaciones entre los abatimientos del nivel estático y series de tiempo de subsidencia, y una valoración del riesgo a fallamiento inducido por subsidencia en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Esta última incluye un mapa de riesgo basado en el gradiente horizontal de subsidencia (a partir de datos SqueeSAR) y datos de la distribución de la población del censo 2010 del INEGI, que muestra que 21.8% del área urbanizada se encuentra clasificada como de alto y muy alto riesgo, y 34.5 de la población total vive en estas áreas, lo que representa 5.81 millones de habitantes. Adicionalmente, se calculó que más del 27% de las actuales áreas de muy alto riesgo y su respectiva población se establecieron en un periodo de tiempo de 25 años, lo cual contrasta con el establecimiento del ~18% de las áreas actuales de menor riesgo.

El objetivo final de este trabajo es que se convierta en una herramienta para las personas en el gobierno a cargo de tomar decisiones, para beneficio de la población de la zona metropolitana de la Ciudad de México, ayudando a considerar las condiciones geológicas e hidrogeológicas para las políticas de planeación de extracción de agua subterránea, mitigación de los efectos del fallamiento superficial y el crecimiento urbano.

Palabras clave: InSAR, SqueeSAR, fallamiento, subsidencia, riesgo.

ABSTRACT

Subsidence and surface faulting are phenomena that affects many important cities around the world, frequently related to intense groundwater extraction. This phenomena are also controlled by local stratigraphic and structural conditions. Mexico City is well known by being dramatically affected by ground subsidence that results in flooding hazards and intense surface faulting, that has produced severe infrastructure damage during the last decades.

This work was carried out in Mexico City's urban area and its products are based on InSAR-derived subsidence data and include among others: an evaluation of subsidence-related faulting mechanisms, associated aquifer vulnerability counting, water table withdrawal and subsidence data correlations, and a subsidence-induced faulting risk assessment in Mexico City's urban area. This latter includes a risk map based on horizontal subsidence gradient (from SqueeSAR data) and 2010 census population distribution data from INEGI, that shows that 21.8% of the urbanized area is under a high to very high risk level, and 34.5% of its population (27.2% and 7.3% respectively) lives within these areas, which means 5.81 millions of inhabitants. Additionally, it was calculated that more than 27% of actual areas under very high risk level and its population were established in a 25-year period, differing with the establishment of ~18% of the actual areas under lower risk level.

The final objective of this work is to become a tool for the decisions makers in government for the benefit of the population of Mexico City's urban area, helping to consider geological and hydrogeological conditions for groundwater extraction planning politics, surface faulting mitigation, and urban growth.

Key words: InSAR, SqueeSAR, faulting, subsidence, risk.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Antonio Hernández Espriú, codirector de esta tesis.

A CONACyT, por la beca otorgada para la realización de esta tesis, dentro del proyecto “Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas de la Zona Metropolitana del Valle de México y fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos”, CONACYT – GDF, clave 121128.

Al proyecto DGAPA-PAPIIT: Análisis de subsidencia en la región del Bajío aplicando geodesia satelital, Proyecto PAPIIT IN108611 por el patrocinio económico y de logística proporcionado.

A mi Universidad y a mi Facultad.

A mis 2 hermanas. Dulce, gracias por el apoyo aún cuando estuvimos molestos, porque un hermano está siempre cuando lo necesitas, siempre. Andrea, porque en días difíciles, como aquel 10 de mayo en que fui por ti a la secundaria, me di cuenta de lo difícil que era para todos.

A mis padres. Gracias Estela por tu apoyo incondicional, por la comida para llevar, por enseñarme las reglas ortográficas, por tu guía moral, las palabras y el apoyo que sólo tú sabes dar. Gracias doctor, por aquel día de primer semestre cuando fui a verte al hospital en que pude entender que valdría la pena, pese a las dificultades que se pudieran presentar y porque sin ti no estaría aquí.

Gracias Vanessa, por compartir tantas risas y momentos tristes pero necesarios, por compartir tantas comidas, abrazos, lágrimas, películas, juegos. Gracias por tus palabras en los momentos en que más las he necesitado. Gracias por tu cariño y apoyo. Gracias por toda tu ayuda en el final de mis días de estudiante en la UNAM, por acompañarme a mis actividades, por alegrarte por mis logros y apoyarme en mis fracasos, gracias por estar conmigo en el comienzo de una etapa nueva. Gracias por dejarme ser un niño y ser feliz contigo.

Gracias a mis amigos ingenieros, todos, con gusto seré padrino de sus hijos. Gracias a mis compañeros de carrera, Luis, Nashe, Adriana, Angy, Miguel, César, Magdaleno y todos los que me faltan, que convivimos en campo y en el salón de clases.

Ale, gracias por estos años de amistad, de días alegres y tristes, de comidas en la calle, prácticas de campo y desveladas estudiando (y/o en Youtube). Trufo, no podría enumerar tantas cosas que hemos vivido y en que me has apoyado, en el hospital, la delegación, la universidad, las fiestas, los viajes, la música, el depe, etc., has sido mi hermano. Nashy, gracias por las experiencias juntos y porque en campo nos volvimos más unidos, espero que tu boda sea tan buena como la de tu hermana. Karina, gracias por tu apoyo y las barritas de amaranto con chocolate, gracias por las risas y por los trabajos en equipo. Edgar, gracias por las pláticas de filosofía y de la vida, porque las amistades se eligen y hay que saber elegir lo que es bueno para el alma. Jorge, por las brigadas en campo, los desayunos, comidas y cenas, por tu amistad y tu apoyo. Jordi, por tu confianza en mí, por abrirme las puertas de tu casa y por compartirme tu visión de la vida, por tu amistad sincera y tu apoyo.

Gracias a mis amigos de Ciencias, Gris, Ix, Sam, pero sobre todo David, por las conversaciones sobre la vida, álgebra lineal, espacios vectoriales y psicología, por todas las comidas juntos, porque compartir el pan es compartir el espíritu.

Gracias a los amigos que tomaron un camino diferente y nos vimos distanciados: Maricarmen, Marco, Néstor, Mauricio, Abigail, Ulises, Marien, Itahí, Angélica, Zamorano, Morris, Huerta, Abril, Carlita y tantos más.

Gracias también a las familias de mis amigos, que me recibieron en sus casas y me apoyaron lejos de mi casa. En especial gracias a las familias de Trufo y Alejandra.

Gracias a mis tutores. Gracias Toño por invitarme al Grupo de Hidrogeología, pese a que mis planes iban por otro lado; aprendí lo necesario y un poco más gracias a tus consejos y por poner a mi alcance ese paper que imprimí a blanco y negro de la subsidencia en la Ciudad de México. Gracias doctor Enrique por su atención, paciencia, comprensión y por la oportunidad de elevar mis expectativas educativas y de vida de una manera que no imaginé cuando llegué a la UNAM.

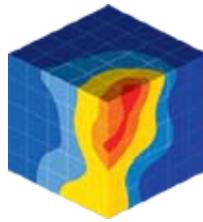
Gracias a mis amigos de psicología, compañeros en una incursión en busca de mí mismo, en especial a Isaac.

Gracias a mis amigos del CELE del francés y del inglés. En especial Liliana, Talia, Andrea, Marysol, David, Ricardo, Francisco y Patricia. Aprendí mucho con ustedes,

pero sobre todo aprendí de ustedes.

Gracias a todos mis profesores. Del anexo, en donde disfruté (y sufrí) cada suma, resta, factorización, integral, sistema matricial, campo vectorial y cada ecuación diferencial. Del principal, donde aprendí de rocas y de ingeniería, pero sobre todo aprendí de México, de las personas, de la vida y del mundo. De idiomas, en especial a José Luis, por su dedicación y empeño. En especial gracias a la Maestra Villaseñor, por sus palabras y acciones que marcaron mi vida. Gracias al Ing. Leovigildo, que confió en mí. Gracias al doctor Sánchez Zavala, por la que fue la mejor práctica de campo de la carrera. Gracias al Ing. Arellano por su constante esfuerzo y dedicación a la docencia, por alentarme a participar en un congreso y darme la oportunidad de dar una de sus clases. Gracias al M. en C. Enrique González, por su interés sincero en los estudiantes y porque siempre está dispuesto a tender una mano. Gracias al Maestro Vicente Torres por la oportunidad de trabajar.

Gracias a todos los que no alcanzo a mencionar en estas hojas, porque tuve la oportunidad de conocerlos y convivir con ustedes.



The
HYDRO
geology
Group
FACULTY OF ENGINEERING
U N A M



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

Este documento representa la **onceava** tesis del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación de acuíferos.

Capítulo 1.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Contexto Social.

Desde hace ya algún tiempo, en distintos medios de comunicación se han abordado temas sobre problemas relacionados a subsidencia en el área metropolitana de la Ciudad de México, donde un gran número de personas tienen afectaciones de manera directa o indirecta. Un ejemplo reciente de afectación indirecta se observa en el Sistema de Transporte Colectivo (Valdéz, 2012), donde la línea A del Metro tuvo que cerrar temporalmente (varios meses) seis de sus estaciones (Guelatao a La Paz) en 2012, ya que se había detectado la nivelación deficiente de vías que se estaban “hundiendo” y también se estaban presentando un gran número de fracturas que afectan directamente a la infraestructura del Metro. Del texto de Valdéz (2012), se extrae:

“Esperamos la comprensión de los usuarios, pero las obras son necesarias, pues las fracturas y las fallas geológicas han causado afectaciones serias en las vías, el cajón, las paredes, las juntas y el material fijo de la Línea A del Metro, pero las reparaciones y las afectaciones no representan un riesgo para la gente”, indicó Francisco Bojórquez, director del Metro...Según datos del Metro, la Línea A, que corre de Pantitlán a La Paz a lo largo de 17.1 kilómetros, traslada diariamente a 234 mil 41 usuarios”

Como antecedente se tiene que en 2002 se registró un descarrilamiento debido a la deformación de las vías, sin registrarse pérdidas humanas (Llanos, 2008). Este no es el único caso donde miles de usuarios están siendo afectados, también en varias delegaciones del oriente de la Ciudad de México, un gran número de viviendas han sido dañadas por la presencia de fracturas, así como infraestructura pública como lo son banquetas y el pavimento de las avenidas. Algunas de las zonas más afectadas son Iztapalapa y Chalco, donde a pesar de que, según Guzmán (2012), algunos espe-

cialistas han advertido a las autoridades sobre las causas de estas manifestaciones geológicas no se han detenido las construcciones de nuevas viviendas y no existen acciones claras de planificación de las actividades de extracción de agua (Guzmán, 2012).

En estas delegaciones el agrietamiento está aumentando cada vez más, como el texto de Guzmán (2012) en el periódico El Universal, revela:

“Hasta el momento, no hay un conteo exacto de grietas en la ciudad; en Iztapalapa, desde 2007 la delegación ha detectado y estudiado el fenómeno y ha encontrado que 30% del territorio que tiene la delegación presenta agrietamientos, es decir cerca de 38.6 kilómetros cuadrados, debido a que la demarcación tiene una extensión de 116 kilómetros cuadrados.”

Se han detectado diversos problemas en unidades habitacionales en zonas como Chalco, en donde según Ramón y Salinas (2009), se realizaron estudios y se determinó que las manifestaciones de grietas están asociadas a extracción de agua subterránea y la consecuente respuesta mecánica del terreno y en algunas de ellas ha sido necesario llegar a desalojos por los daños ocasionados a viviendas, pues el terreno es inadecuado para construcción, con 3500 viviendas en riesgo (Espinoza, 2011). A pesar de que las estructuras principales causantes de daño en la región de Chalco han sido identificadas, se ha autorizado la construcción de complejos de hasta 20 mil viviendas en la zona (Morales, 2009).

Las afectaciones a la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son diversas y se reflejan en distintos ámbitos, desde las reparaciones menores que dejan de ser atendidas al no representar una urgencia inmediata hasta aquéllas que requieren inversiones de recursos públicos y privados para la mitigación de riesgos a la población.

1.2 Demografía, expansión urbana y consumo hídrico.

Según el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI (INEGI, 2011a), las dos entidades más pobladas del país son el Distrito Federal con 8,851,080 habitantes y el Estado de México con 15'175,862 habitantes, lo que representa el 21.4% de la población total de los 112'336,538 habitantes en México. Así mismo a nivel delegación y/o municipio, Iztapalapa y Ecatepec de Morelos son los más poblados del país. Según la CONAPO (2012), con las tasas de crecimiento poblacional actuales, se prevé que para 2030 la población conjunta del Estado de México y el Distrito Federal rebase los 28.6 millones de habitantes.

El asentamiento histórico del área urbana en la Ciudad de México se ha caracterizado por establecerse en la zona de lago, principalmente en la zona que corresponde al antiguo Lago de Texcoco, y más recientemente también ocupa espacios en la zona correspondiente al Lago de Xochimilco y de Chalco (UAM, 2005). Las tendencias actuales de ocupación urbana se caracterizan por definir los contornos urbanos previamente establecidos, lo que genera que la densidad de población aumente en las zonas de lago. Las secuencias sedimentarias en las zonas de lago de México y Chalco, con actividad volcánica reciente y contemporánea al depósito que genera suelos ricos en alófono (de forma esférica de ~4nm de diámetro) e imogolita (de forma tubular), minerales, cuya combinación genera elevado potencial de compresibilidad, lo que se traduce en subsidencia en el área urbana (Carreón-Freyre et al., 2006).

Este crecimiento urbano acelerado demanda servicios necesarios como el agua, que según el INEGI (2011b), para el año 2008 se extrajeron del sistema acuífero 603,374 miles de metros cúbicos en el D.F. y 947,055 miles de metros cúbicos en el Estado de México, lo que representa respectivamente el 59 y 73 % de los recursos hídricos provenientes de fuentes superficiales y acuíferas. Es lógico pensar que al aumentar la población y las zonas urbanas, el consumo de agua aumentará, teniendo así como consecuencias una serie de problemas en el subsuelo que se ven reflejadas en superficie, empeorando las condiciones actuales. Esta es una problemática que está afectando a millones de personas en el Distrito Federal y el Estado de México.

1.3 El estudio de la subsidencia en el área Metropolitana de la Ciudad de México.

El estudio de la subsidencia en la Ciudad de México tiene diversos antecedentes, debido a los efectos asociados a la misma. Carrillo (1948) fue el primero en demostrar que la causa de subsidencia era la extracción de agua subterránea por pozos para consumo municipal. Figueroa-Vega (1984) enfatiza los efectos de fracturamiento asociados a la subsidencia en Paseo de la Reforma en la zona arcillosa (generando daños en casas, escuelas y puentes derivando en demoliciones y reparaciones de importancia) y en la zona Noroeste de la Ciudad de litología tobácea. Menciona que entre 1970 y 1973 se correlacionó un 75% de la subsidencia total a la consolidación de las arcillas del acuitardo y el 25% restante a la compresión de los materiales que constituyen el acuífero. La Comisión hidrogeológica de la Cuenca del Valle de México (CHCVM, 1953) reconoce consolidación del relleno lacustre y subsidencia asociada, generados por extracciones superiores a la recarga natural del acuífero que provocan abatimientos del nivel piezométrico y plantea la necesidad de las autoridades del Distrito Federal de introducir un caudal de agua para eliminar el sobrebombeo y satisfacer las necesidades futuras. Dicho trabajo reconoce hundimientos totales en el periodo 1891-1952 de hasta 6 metros en el centro de la Ciudad de México y recomienda eliminar la sobreexplotación al clausurar los pozos causantes de la misma, teniendo preferencia por aquellos que generen interferencia y hundimientos locales, relocalizando algunos en zonas con mejores condiciones del nivel freático. Ortega et al. (1993) identifica subsidencia de hasta 6 m en Chalco en el periodo 1960-1989 de hasta 6 metros con tasas de hasta 40 cm/año, previniendo tendencias alarmantes. Así como la Ciudad de México, existen otras ciudades en el país que sufren problemas por sobrebombeo de agua subterránea, como Celaya, Irapuato, Toluca, Aguascalientes y Valle de Lerma (Mazari et al., 1992).

Figueroa-Vega (1948) reconoce la dificultad de estimar los daños económicos y sociales en casas, banquetas, pavimentados y otros, asociados a la subsidencia en la Ciudad de México, así como los costos derivados de bombeo para el drenaje de

la ciudad a partir de 1951 que originalmente funcionaba por gravedad. Mazari et al. (1992) mencionan el potencial de las fracturas formadas en superficie de contaminar mantos freáticos por la generación de conductos directos para aguas residuales de las líneas de drenaje y aguas superficiales contaminadas en tiraderos de basura, así como los efectos negativos en la resistencia del suelo para cimentaciones. De este modo, los costos generados por subsidencia podrían ser sensiblemente mucho mayores que los generados por traer agua de otras fuentes para evitar la sobreexplotación del sistema acuífero local (Figueroa-Vega, 1948). Mazari y Alberro (1991) reconocen los efectos de la subsidencia diferencial en las cimentaciones de distintas obras del centro histórico, como Palacio Nacional, la Catedral, el Templo Mayor, el monumento a la Independencia y el Palacio de Minería, entre otros, reconociendo la causa de dichos efectos a la sobreexplotación acuífera. Mazari et al. (1992) atribuyen el origen de las grietas en superficies lacustres a 4 causas principales: el encharcamiento de agua en zonas previamente afectadas por evaporación intensa, el bombeo sobrebombeo de los mantos freáticos en zonas de escalón de falla de la roca basal o en zonas de transición de depósitos lacustres a macizos rocosos, la evaporación intensa en zonas aledañas a zonas cubiertas por una lámina de agua delgada perenne o estructuras que inhiben bajo ellas la evaporación de agua intersticial del suelo (como canales, carreteras, cimentaciones, etcétera) y el incremento en las presiones del agua intersticial de estratos permeables cercanos a la superficie. Mazari et al. (1992) argumentan que existen zonas de flujo divergente del agua subterránea asociadas a la aparición de fracturas y grietas en las zonas propensas.

Lesser-Illades y González-Posadas (2005a) analizan la evolución de los niveles estáticos 1985-2003 y encuentran abatimientos de 20 m en el aeropuerto y 30 m en el Cerro de la Estrella, además de conos de abatimiento piezométrico en Azcapotzalco, Xotepingo y Chalco y evidencia abatiemientos continuos asociados a la extracción de agua subterránea y registra recuperaciones en las zonas altas de Tlalpan, atribuyendo la recuperación a que la zona no se cuenta con sistema de drenaje y tiene captación por aguas de lluvia y domésticas por fosas sépticas. Lesser-Illades y González-Posadas (2005b) realizan un balance de aguas subterráneas para 2003 considerando el efecto

de drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero, considerando la sobreexplotación del acuífero como la suma del cambio de almacenamiento más el drenado vertical de las arcillas y considerando las entradas por flujo subterráneo y las salidas derivadas del bombeo, encontrando una sobreexplotación del acuífero, dividiendo el análisis en 3 subsistemas: en el subsistema correspondiente a los límites del Distrito Federal de un 56.6%, en el subsistema Texcoco de un 65.1% y en el subsistema del Valle de Chalco de un 36.3%. Lesser-Illades y González-Posadas (2005b) argumentan que la porción del acuífero correspondiente al Distrito Federal es la que más cede agua al acuífero con $3.97\text{m}^3/\text{s}$, cercano al doble de lo que se cede en los otros dos subsistemas.

1.4 Análisis SAR de subsidencia previos en el Valle de México.

Se han realizado diversos estudios de los procesos subsidentes basados en análisis a partir de datos SAR. Strozzi et al. (2004) realizan estudios de interferometría diferencial de pares de imágenes SAR determinando movimientos del terreno con una componente vertical mayor a 30 cm/año, en las cercanías del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, en la zona correspondiente al ex Lago de Texcoco, reportando también que la presencia de gradiente de subsidencia se relaciona con daños estructurales en las construcciones de la región entre 2002 y 2004.

Cabral-Cano et al. (2008) realizan el análisis InSAR de subsidencia enfocado en la región correspondiente al ex Lago de Texcoco, al NE de la Ciudad de México, con imágenes entre 1996 y 2005, además de análisis de datos derivadas de estaciones de GPS en la zona de estudio, a partir de la cual se realizaron calibraciones a la metodología InSAR. El análisis de GPS es congruente con los resultados obtenidos a través de InSAR y reporta tasas verticales de subsidencia de hasta 347 mm/año en las zonas más subsidentes con variaciones estacionales despreciables, lo que indica que los procesos de subsidencia en el periodo de tiempo estudiado presentan un comportamiento prácticamente lineal. Dicho trabajo presenta además un análisis de las zonas con mayor gradiente de subsidencia obtenidas a través de los interferogramas de

InSAR. Se muestra también una fuerte correlación de la magnitud de subsidencia con la clasificación geotécnica de la cuenca, siendo las zonas más subsidentes aquellas sobre las que se encuentran depósitos arcillosos (zona de lago). Estos autores definen zonas de pronunciado gradiente de subsidencia, destacando las laderas de la sierra de Guadalupe, el Peñón de los Baños, el Peñón del Marqués y la Calzada Ermita Iztapalapa. A saber, los altos topográficos están compuestos por rocas competentes, que sufren deformación imperceptible y los sedimentos lacustres se consolidan a tasas muy altas, por lo que se generan zonas de ruptura.

Cabral-Cano et al. (2010) presentan un análisis de la subsidencia centrado en la región al SE del centro de la Ciudad de México, incluyendo Iztapalapa, Ciudad Nezahualcóyotl y Chalco, a través de la técnica de Persistent Scatterer InSAR (PSI), en donde se propone una zonificación de las zonas vulnerables al fracturamiento a través del gradiente de subsidencia, comparando la presencia de fallas previamente reportadas en la zona con la presencia de un gradiente de subsidencia pronunciado, así como reportando del movimiento del terreno a lo largo del transecto del Canal de La Compañía, lo cual implica posibles daños estructurales que provocarían desbordes e inundaciones como las registradas en el año 2000 y 2010.

Osmanoglu et al. (2011) analizan la subsidencia en el sector NE y centro de la Ciudad de México con la técnica de PSI y reportan valores de subsidencia “Line of Sight” (LOS) de hasta 25 cm/año en el periodo observado de 2004-2006. Este trabajo resalta los efectos del gradiente horizontal de subsidencia en los alrededores de las vías de la línea 4 del Sistema de Transporte Colectivo Metro, en donde el tramo de vía elevada subsidencia a tasas menores que el terreno a su alrededor, y enfatiza las diferencias de la respuesta mecánica de los elementos afectados por el gradiente, presentando fallamiento con diferentes saltos dependiendo de la competencia mecánica de los materiales. De la misma manera describe las afectaciones a la Catedral de la Ciudad de México, que presenta diferentes magnitudes de subsidencia debido a que el basamento de la misma se hizo sobre materiales de competencia diferente, lo que genera un gradiente que somete a esfuerzos diferenciales a la estructura.

Este conjunto de trabajos enfatiza el efecto de la extracción de agua en el proceso de subsidencia, debido a la secuencia de sedimentos arcillosos en la parte superior de la columna estratigráfica. La extracción de agua ha producido la consolidación de dichos materiales y subsidencia en la superficie con tasas cercanas a los 40 cm/año. En regiones en donde la extracción de agua es agresiva y genera conos de abatimiento pronunciados, este fenómeno se acentúa. A nivel local existen otros componentes del fallamiento por gradiente de subsidencia como la diferencia de densidades entre litologías, conos de abatimiento locales, pérdida de fluidos en las rocas, dilatación por cambios de temperatura, heterogeneidad en la composición de los sedimentos, presencia de cargas inducidas, entre otros. El gradiente de subsidencia afecta a estructuras civiles de particulares (casas, fábricas, unidades habitacionales, etcétera) así como a obras de infraestructura pública (Sistemas de Transporte Colectivo, sistemas de desagüe, vialidades) y edificios de patrimonio cultural. El cálculo de los costos generados por el mantenimiento de estas obras a través de los años es de gran importancia para la evaluación de daños por el fenómeno de subsidencia y para ello es necesario zonificar las áreas afectadas, así como la población involucrada y la determinación de patrones para prevenir daños a futuro y planear acciones para amortiguar las afectaciones.

Capítulo 2.

CAPÍTULO 2. GEOLOGÍA DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ALREDEDORES.

2.1 Contexto de la Cuenca de México.

La Cuenca de México se encuentra en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (**Figura 2.1, A**), en la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 2013). La Faja Volcánica Transmexicana tiene una extensión de 90 km de norte a sur y 50 - 100 km de este a oeste, con un área cercana a los 9600 km² (Santoyo et al., 2005). La Cuenca de México se encuentra rodeada al norte por la Sierra de Guadalupe, al sur por la Sierra de Chichinautzin, al este por la Sierra Nevada y al oeste por la Sierra de las Cruces. Su planicie se eleva a 2240 msnm en el sur y a 2390 en el norte; las montañas circundantes se elevan de 3000 m hasta cerca de 5500 m en la cima del Popocatepetl; incluye el Distrito Federal y porciones del Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala (**Figura 2.1, B**). La Cuenca originalmente drenaba hacia el Océano Pacífico, hasta el emplazamiento de la Sierra del Chichinautzin, hace 600 mil años (Santoyo et al., 2005). La parte de bajo relieve de la Cuenca anteriormente fue un lago, siendo el actual Lago de Texcoco uno de sus remanentes. Las islas más importantes de este sistema lacustre eran Tenochtitlan, Tlatelolco, Nonoalco, Mixhuca y Tlalpan. El desagüe de los Lagos comenzó desde la época del virreinato para llegar a la delimitación actual de los cuerpos de agua.

2.2 Estratigrafía de la Cuenca de México.

Diversos autores han investigado la estratigrafía de la cuenca y su funcionamiento hidrogeológico, con estudios de campo y datos provenientes de pozos de extracción de agua, cimentaciones y pozos profundos. Los trabajos de Mooser (1975), Aguayo et al. (1989), Herrera et al. (1989), Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) y Santoyo et al. (2005) figuran entre los más completos.

En este trabajo se presenta la descripción sintetizada de las características geológicas de la región de la Cuenca de México. Se divide la estratigrafía en 6 unidades, que son: Unidad Sedimentaria Marina, Grupo Balsas, Unidad Volcánica Inferior, Unidad Volcánica Superior (también referida como Grupo Tarango), Rocas Volcánicas del Cuaternario y Rocas Sedimentarias del Cuaternario.

El mapa geológico de las unidades aflorantes en la zona de estudio se muestra en la Figura 2.1, C. En dicho mapa se puede apreciar la distribución espacial de las formaciones sedimentarias del Cuaternario hacia el noreste de la Ciudad de México. Igualmente, la Figura 2.1, B, muestra que son las zonas más bajas de la región, formando una cuenca endorreica delimitada por 3 sierras, de origen volcánico, que se sitúan en el Eje Neovolcánico (Figura 2.1, A). La columna estratigráfica con el resumen de las características de cada unidad y formación se muestra en la Tabla 2.1, elaborada por el Grupo de Hidrogeología de la UNAM (Hernández-Espriú et al., 2011).

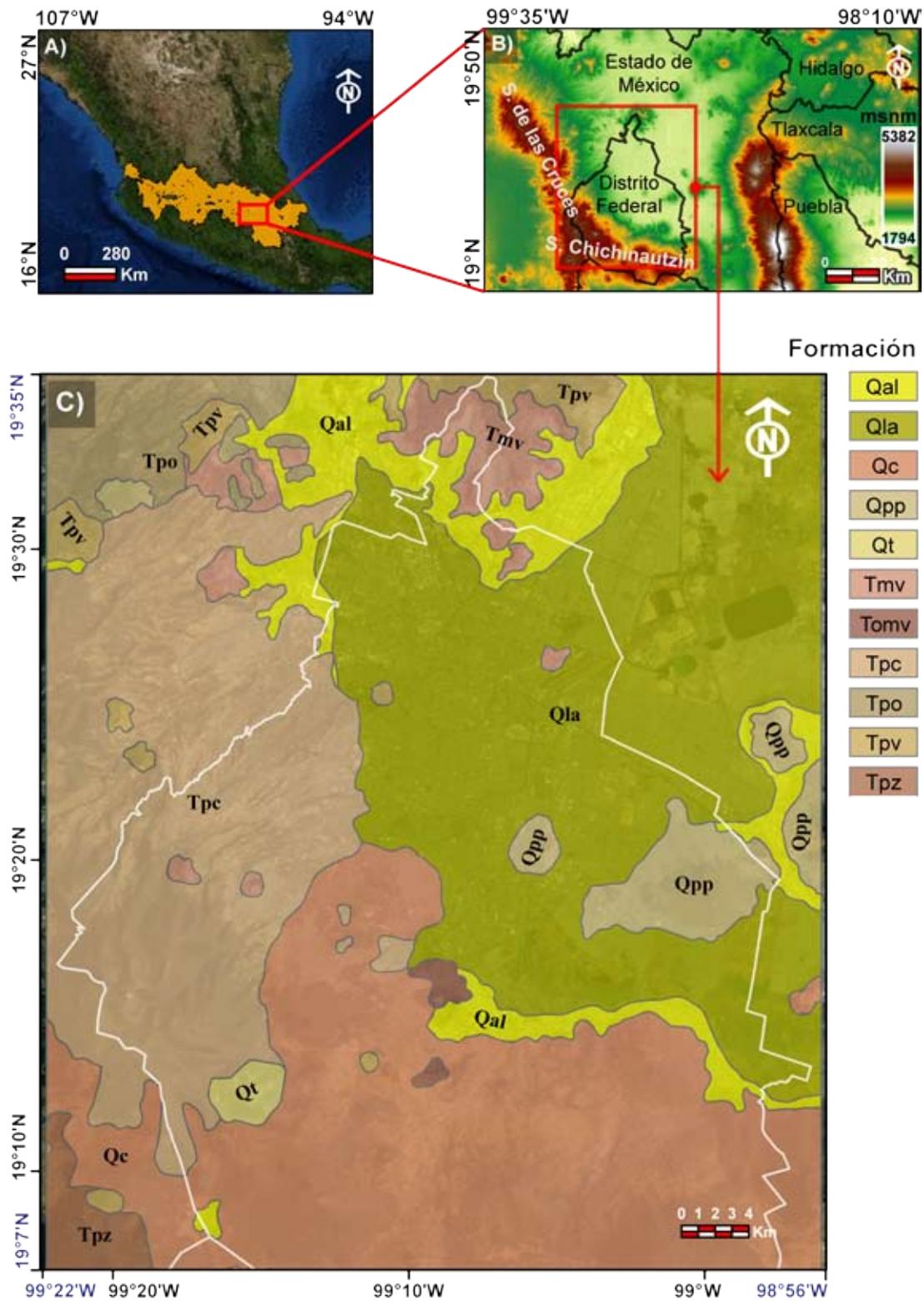


Figura 2.1. A) Faja Volcánica Transmexicana (INEGI, 2012a); B) Relieve de la porción sur de la Cuenca de México; C) Mapa geológico de la Ciudad de México y alrededores.

Era	Edad	Unidad	Formación	Litología		
Cenozoico	Pleistoceno Tardío - Holoceno	Cuaternario Sedimentario (Qs)	Depósitos aluviales (Qal)	Depósitos lacustres (Qla)	Sedimentos clásticos y piroclásticos, arcillas, ceniza y pómez	
	Pleistoceno - Holoceno				Material clástico fluvial, sedimentos lacustres y depósitos volcánicos	
	Pleistoceno Tardío - Holoceno	Cuaternario Volcánico (Qv)	Formación Chichinautzin (Qc)	Aluvial (Cal)	Lavas andesítico-basálticas y andesíticas	
	Pleistoceno Tardío - Holoceno				Formación Popocatepetl (Qp)	Secuencias eruptivas, andesitas, pómez, cenizas y piroclastos
	Pleistoceno Medio				Formación Iztaccihuatl (Qi)	Derrames lávicos
	Pleistoceno				Formación Tláloc (Qt)	Coladas lávicas, pómez y líticos
	Pleistoceno	Unidad Volcánica Superior - Grupo Tarango (Qt)	Formación El Pino (Qpp)		Flujos lávicos, tefra, cenizas, lapillis y escoria	
	Pleistoceno Temprano (Cuaternario)		Formación Llano Grande (Qlg)	Lapilli, flujos de cenizas, brechas y derrames lávicos		
	Plioceno	Unidad Volcánica Inferior	Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc)		Tobas, brechas volcánicas, aglomerados, conglomerados, arenas y arcillas	
	Plioceno Tardío		Riolita Navajas (Tpn)		Derrames lávicos	
	Plioceno Tardío		Formación Zempoala (Tpz)		Derrames de lava, capas volcanoclasticas y lahares	
	Plioceno Tardío		Formación Las Cruces (Tpc)		Depósitos piroclásticos, pómez, cenizas y material aluvial	
	Plioceno Tardío - Pleistoceno Temprano		Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío (Tpb)		Derrames lávicos, brechas volcánicas y piroclastos	
	Plioceno Tardío		Formación Otomí (Tpo)		Depósitos piroclásticos	
	Plioceno Temprano		Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv)		Tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas	
	Mioceno Medio - Mioceno Tardío		Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv)		Tobas, brechas volcánicas y lavas	
	Oligoceno - Plioceno		Grupo Pachuca (Tomp)		Brechas volcánicas, piroclastos, derrames lávicos y tobas	
	Oligoceno Tardío - Mioceno Temprano		Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv)		Depósitos piroclásticos, tobas líticas, cristalinas y vítreas	
	Eoceno Tardío - Oligoceno Temprano	Grupo Balsas	Grupo Balsas (Teob)		Conglomerado oligomictico calcáreo	
Mesozoico	Turoniano - Maestrichtiano	Unidad Sedimentaria Marina	Formación Mexcala (Kmx)		Turbiditas, limolitas y lutitas	
	Cenomaniano Tardío - Turoniano Tardío		Formación Cuautla (Kc)		Calcarenitas	
	Albiano Medio - Cenomaniano		Formación Morelos (Km)		Calizas y dolomías	
	Aptiano		Formación Xochicalco (Kx)		Calizas arcillosas y limosas	

Figura 2.2. Tabla estratigráfica de la Ciudad de México (Hernández-Espriú et al., 2011).

2.2. 1 Mesozoico.

2.2.1.1 Unidad Sedimentaria Marina.

Son las rocas más antiguas de la zona de estudio, del Periodo Cretácico, que comprenden las Formaciones Xochicalco (Kx), Formación Morelos (Km), Formación El Doctor (Kid), Formación Cuautla (Kc) y la Formación Mexcala. Consideradas como unidad, corresponden a rocas calizas con nódulos y lentes de pedernal, con capas de lutitas interestratificadas y láminas de anhidrita, así como depósitos turbidíticos.

La formación Xochicalco es la más antigua reconocida, se considera que tiene un espesor mayor a los 500 m, son calizas de laminación fina, con contenido carbonoso variable, depositada durante el Aptiano en ambiente de cuenca marina. La Formación Morelos tiene espesores de hasta 900 m al sur de la Sierra Chichinautzin, se encontró en los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 a 2060 y 2160 m de profundidad, con espesores de 410 y 650 m respectivamente (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), son calizas de capas gruesas y dolomías diagenéticas. La Formación El Doctor es una secuencia de 200 m de espesor del Albiano-Cenomaniano de plataforma compuesta por calizas *mudstone* en capas delgadas con nódulos y lentes de pedernal e intercalaciones de lutita, que se interdigita con la Formación Morelos. La Formación Cuautla se compone de facies de cuenca, de banco y de litoral del Cenomaniano-Turoniano. Los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 la localizan a 1575 y 2100 m de profundidad, con espesores que varían entre 200 y 750 m y se compone de calizas de estratificación gruesa (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). La Formación Mexcala sobreyace concordantemente a la Formación Cuautla, aflora al sur de la Sierra Chichinautzin con espesores máximos de 1500 m, con espesores de hasta 1500 m, son rocas turbidíticas con areniscas, limolitas y lutitas, depositadas en aguas someras en el Coniaciano-Campaniano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

2.2.2 Cenozoico.

2.2.2.1 Grupo Balsas (Teob).

El Grupo Balsas tiene una edad del Eoceno-Oligoceno y consta de un conglomerado oligomítico calizo compacto, matriz limo-arcillosa cementada por calcita y óxido de hierro, tiene espesores de hasta 500 m, cubiertas por una secuencia de 800 a 2000 m de espesor, formada por capas deleznales de arcilla, limo y arena, con derrames basálticos locales e intercalaciones de tobas riolíticas. Este grupo sobreyace discordantemente a las rocas marinas cretácicas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

2.2.2.2 Unidad Volcánica Inferior.

Esta Unidad (**Figura 2.1, C**) comprende las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío- Mioceno Temprano (Tomv), el Grupo Pachuca (Tomp), rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv), los depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv), la Formación Otomí (Tpo), las rocas volcánicas máficas del Plioceno Tardío (Tpb), la Formación Las Cruces (Tpc) y los depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc).

Estas rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano son secuencias volcánicas de tobas, brechas y aglomerados que incluyen a la RiolitaTilzapotla, tienen espesores entre 390 y 1750 m, de composición andesítica a riodacítica. El Grupo Pachuca es equivalente en edad (Oligoceno-Plioceno) e incluye rocas que se sobreponen a las de la Sierra Madre Oriental en de la Faja Volcánica Transmexicana, incluyen derrames de lavas, tobas y brechas de composición basáltica y riolítica. Las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío representan el inicio de actividad de la Faja volcánica Mexicana, son secuencias de tobas y brechas volcánicas intercaladas con derrames, de composición andesítica y dacítica. Estas unidades fueron cortadas por los Pozos Texcoco-1, Roma-1, Mixhuca-1, Copilco-1 (Vázquez-Sánchez y Jaimes-

Palomera, 1989). Los depósitos volcánicos del Plioceno Temprano son rocas de un segundo periodo de actividad de la Faja Volcánica Transmexicana, consisten en una secuencia de tobas, brechas derrames y domos, de composición andesítica y dacítica, con espesores de hasta 650 m. La Formación Otomí consiste en flujos de ceniza con bloques, intercalados con lavas, brechas y coronados por domos de composición andesítica y dacítica, con espesores máximos de 1300 m. La Formación Las Cruces son rocas pumicíticas, flujos piroclásticos, intercalados con lavas, lahares y aluvión, coronados por domos. Estas rocas son las formadoras de la Sierra de Las Cruces (**Figura 2.1, B**), con espesores variables de hasta 990 m. Aparece en los pozos Copilco-1 entre 25 y 510 m de profundidad. Los depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno contienen lentes locales de tierra diatomácea, margas y arcillas lacustres e interdigitados con unidades volcánicas de la misma edad. Tiene espesores de hasta 400 m, se conforma por gravas, arenas, limos y arcillas de constitución volcánica, producto de acumulación fluvial, con intercalaciones de tobas de grano fino y lapilli, cubiertos discordantemente por aluvión del cuaternario y se acumulan en fosas tectónicas como el graben de Chalco (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), con espesores de hasta 750 m.

2.2.2.3 Unidad Volcánica Superior (Grupo Tarango).

Esta unidad se compone por la Formación Llano Grande (Qllg), Formación el Pino (Qpp) y Formación Tláloc (Qt).

La Formación Llano Grande aflora en la base de la Sierra Nevada y es antecesora de la actividad volcánica del Iztaccíhuatl. Consiste en depósitos de pómez, flujos de ceniza y brechas de flujo, sobreyacidas por derrames lávicos y dómicos, de composición andesítica a dacítica. La Formación El Pino se compone de derrames con intercalaciones de ceniza, lapilli y escoria de composición basáltica, andesítica y traquítica de hasta 750 m de espesor. La Formación Tláloc se compone de pómez, flujos de ceniza y de bloques, derrames y domos, de composición andesítica, latítica y

dacítica (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

2.2.2.4 Rocas Volcánicas del Cuaternario.

Esta unidad se conforma por las Formaciones Iztaccíhuatl (Qi), Popocatepetl (Qp) y Chichinautzin (Qc).

La Formación Iztaccíhuatl es una secuencia de hasta 2500 m de espesor de eventos efusivos, consistentes en derrames y domos de composición andesítica y basáltica a dacítica. La Formación Popocatepetl consiste en depósitos piroclásticos, brechas de avalancha, lavas con pómez, flujos de ceniza y piroclásticos de caída de espesores de hasta 3500 m de espesor, de composición andesítica y basáltica a dacítica. La Formación Chichinautzin es conformada por derrames con contenido de tefra de caída y material piroclástico de composición andesítica y basáltica. Se considera que esta formación tiene un espesor máximo de 1800 m y cubre discordantemente las unidades cretácicas y del Terciario (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). El depósito de los flujos de esta Formación cerró la cuenca en el Cuaternario, reteniendo los flujos de agua saturada de sedimentos y generando el carácter endorreico a la cuenca (Santoyo et al., 2005).

2.2.2.5 Rocas Sedimentarias del Cuaternario.

Estas rocas comprenden los Depósitos aluviales (Qal) y los Depósitos lacustres (Qla).

Los Depósitos aluviales contienen lentes locales de piroclastos, travertino, yeso y caliza lacustre y se encuentran interdigitados con las formaciones del Cuaternario Volcánico, rellenan depresiones profundas horadadas sobre rocas del Plioceno (Tppc) y en el graben de Chalco, con espesores de hasta 500 m.

Los Depósitos lacustres alcanzan espesores de hasta 300 m, se conforman por arcillas, limos y arenas, con lentes locales de piroclastos, se encuentran sobreyacendo

a los Depósitos aluviales y se interdigitan con los depósitos del Cuaternario volcánico, principalmente con los depósitos de Chichinautzin al sur (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). El vidrio volcánico producto de la actividad volcánica del Cuaternario se meteorizó y depositó en los lagos, en donde se hidrató y se convirtió en arcillas con alto contenido de agua (Santoyo et al., 2005).

2.3 Aspectos destacados de la geología estructural de la cuenca de México.

Aguayo et al. (1989) definen sistemas de fracturas SE-NW y SW-NE asociados a los efectos compresivos de la Placa de Cocos. Aguayo et al. (1989) refieren que los sistemas estructurales regionales se definen por 16 fallas distensivas principales que inciden en el interior de la Cuenca con rumbo $N45^{\circ}$ - 55° E, delimitando a 15 bloques estructurales mayores, con separación entre fallas de 6 km, afectando a las estructuras NW-SE del Mioceno y a los estratos del Plioceno. En el trabajo de Aguayo et al. (1989) se distinguen también fallas locales originadas por desplazamientos debidos a la inestabilidad de los flancos de promontorios estructurales, las mayores de ellas con tendencias N-S, pero que varían dependiendo de la orientación de los flancos y un conjunto de fallas locales alrededor del Cerro de la Estrella y el Peñón del Marqués. Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) identifican un sistema conjugado de fracturas afectando las rocas del Plioceno, con direcciones este-oeste y $N65^{\circ}$ E, atribuyendo su origen a sistemas de esfuerzos relacionados con la convergencia de la Placa de Cocos y la Placa de Norteamérica.

Según De Cserna et al. (1988) el área metropolitana de la Ciudad de México está afectada por 14 fallas con orientación NE-SW de desplazamiento lateral. De Cserna et al. (1988) analizan el lineamiento de los volcanes monogenéticos del Cuaternario, relacionandolo con el fracturamiento en otras zonas de la Cuenca y asociándole edades de 40000 años o menos, encontrando orientaciones predominantes en los conos del Chichinautzin hacia $NE55-75^{\circ}$ que predominan sobre las orientaciones E-W y $NE45^{\circ}$, en el campo volcánico Tezontepec hacia $NE45^{\circ}$ (congruentes con las orientaciones en

la falla Las Cruces) y en los conos volcánicos de las partes meridionales del vaso de la Cuenca de la Ciudad de México de NE75°, NE45°, NE65°, NE50° y NE35°; mencionan también que el emplazamiento de este último grupo de volcanes monogenéticos se emplazan sobre fallas inferidas de estudios gravimétricos.

2.4 Unidades hidrogeológicas.

Herrera et al. (1989) definen al sistema acuífero de la Cuenca de México que se constituye por 4 cuerpos con funcionamiento hidráulico diferente (**Figura 2.3**):

1. Acuitardo de ~70 m de espesor de flujo esencialmente vertical. Consiste en dos grandes horizontes de arcilla separados por una capa delgada de material arenoso (estos estratos corresponden con el Cuaternario lacustre de la Unidad sedimentaria del Cuaternario). Esta unidad cede agua en flujo vertical por goteo al acuífero inferior, debido a la pérdida de presión debida a la extracción, lo que produce consolidación y reacomodo en las arcillas, produciendo hundimientos en la superficie.

2. Acuífero granular de 800 m de espesor. Esta unidad acuífera está formada por las rocas volcánicas de la Unidad volcánica superior y es el que mantiene las actividades extractivas actuales, siendo los 300 m superiores los de importancia para la extracción de agua en la Ciudad (Herrera et al., 1989); se encuentra en condiciones de semiconfinamiento por el acuitardo superior. La recarga de este acuífero se da en las sierras que circundan la cuenca.

3. Acuífero volcánico de 2000 m de espesor, que consiste de rocas volcánicas fracturadas sobreyaciendo a las rocas carbonatadas de la Unidad Sedimentaria Marina conformado por la Unidad volcánica inferior.

- 4.- Unidad calcárea, representada por la Unidad Sedimentaria Marina. El trabajo de Herrera et al. (1989) menciona desconocimiento acerca de esta unidad respecto a su funcionamiento.

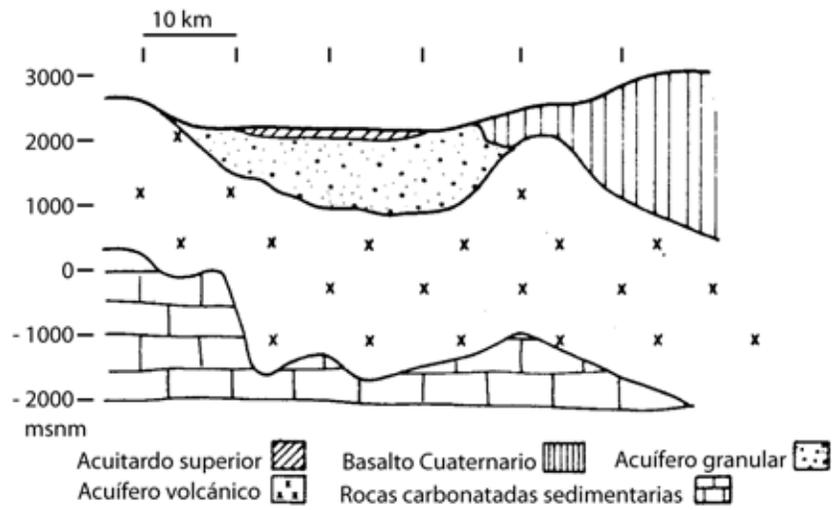


Figura 2.3. Sección esquemática idealizada Norte-Sur del sistema acuífero de la Ciudad de México, modificado de Herrera et al. (1989).

Capítulo 3.

CAPÍTULO 3. INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (INSAR) EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

3.1 Radar, SAR e InSAR.

Radar (RADio Detection And Ranging) es una técnica de sensores remotos en la cual se ilumina un objetivo con ondas electromagnéticas en el rango de frecuencia de las microondas y se utiliza la señal reflejada para deducir información acerca del objetivo. Para ello se registra el tiempo de viaje, la amplitud y fase de onda de la señal reflejada para determinar distancias del objetivo y generar una imagen bidimensional del área objetivo conforme el RADAR barre una escena determinada. El tipo de señal reflejada depende de la pendiente y la rugosidad del terreno, así como de las propiedades dieléctricas del material del material en la superficie. La resolución del RADAR de apertura real es de entre 5 y 10 km, dependiendo de la sensibilidad del sensor; dicha resolución limita el uso de esta información para las aplicaciones de percepción remota (Bürgmann et al., 2000).

SAR (Radar de Apertura Sintética) combina las técnicas de procesamiento de señal con información de las órbitas satelitales para producir imágenes de RADAR de mucho mayor resolución, con píxeles de entre 20 a 100 m con coberturas de decenas a centenas de kilómetros.

Dos (o más) imágenes SAR se pueden combinar para producir un interferograma de radar, el cual puede revelar información en tres dimensiones del área objetivo o medir cambios sutiles entre dos adquisiciones. Después del proceso de enfoque de SAR, las imágenes de RADAR se corregistran en dos dimensiones de amplitud y fase de la señal reflejada en el área de estudio. La amplitud es producto de la reflectividad o retrodispersión de la energía de la señal, mientras que la fase implica cambios en la superficie. InSAR utiliza la información de fase de dos imágenes SAR para determinar la diferencia de fases en ellas para cada pixel y producir así un interferograma. De esta manera, si dos imágenes SAR se pueden alinear de manera que al menos una fracción de pixel se sobreponga, se puede determinar el cambio relativo de fase en

el área correspondiente a ese pixel. Al analizar dos imágenes SAR tomadas desde puntos ligeramente diferentes se pueden generar imágenes de la topografía en la superficie. Si se analiza la fase de estas imágenes, se pueden deducir los cambios de fase en un punto determinado que se deben a cambios o desplazamientos del terreno con precisión milimétrica (p. ej. Bürgmann et al., 2000).

3.2 Interferometría de dispersores persistentes: PSInSAR y SqueeSAR.

Persistent Scatterers Interferometry (PSI) es el conjunto de técnicas que utilizan el principio de los llamados Dispersores Persistentes (Persistent Scatterers) para obtener datos del movimiento del terreno.

El empleo de la técnica InSAR permite obtener información solamente por pares de escenas SAR. La solución para maximizar el número de adquisiciones depende de puntos correlacionables en tiempo, usualmente en conjuntos de al menos ~15 imágenes SAR. Para ello se utilizan objetivos del radar que presentan propiedades de amplitud estables y coherencia en la fase de la señal en todas las imágenes del conjunto. A estos puntos objetivos se les llama Dispersores Permanentes o Persistentes, comúnmente conocidos como PSs o PSIs. La ubicación de éstos, se presenta principalmente en áreas urbanas pero la densidad de puntos objetivos es variable según las características del terreno y área urbana. La aplicación de esta técnica depende de una imagen maestra a partir de la cual se correlacionan las demás imágenes SAR y se eligen los puntos objetivos (Bernardino et al., 2002).

PSInSAR es una de las principales técnicas que utiliza el principio de los puntos de dispersión persistente y es tal vez la más conocida de este tipo. En esta técnica los PSIs provienen de objetos hechos por el hombre (cruces de calles, antenas, edificios, etc.), por lo tanto, la densidad de PSIs en zonas urbanas es alta pero también variable, mientras que en regiones no urbanizadas la densidad de PSIs es mucho menor y en ocasiones es posible obtener muy poca o incluso nula información.

La segunda generación de técnicas de PSI es SqueeSAR, la cual identifica los PSIs pero explota además Dispersores Distribuidos (Distributed Scatterers = DS). Los DS provienen principalmente de suelo homogéneo, afloramientos dispersos flujos de escombros, áreas no cultivadas y desiertos; esto proporciona información adicional en regiones homogéneas de baja reflectividad. Sin embargo, las áreas con vegetación abundante y/o estacionalmente variable por lo general no son conducentes al retorno de la señal, por lo cual éstas por lo general siguen careciendo de información de deformación de alta densidad (SqueeSAR, 2011).

3.3 Subsistencia asociada a extracción intensiva de agua subterránea usando SAR.

El uso de sensores remotos para medir y mapear subsidencia se ha correlacionado con datos hidrogeológicos para la obtención de modelos y la aplicación de medidas de mitigación de la subsidencia causada por el abatimiento del nivel estático de los sistemas acuíferos, como la reducción del abatimiento por reducción de la extracción y la recarga artificial de acuíferos. El problema de la detección de subsidencia del terreno regional es sobre todo la extensión de las regiones sujetas a cambios de elevación, así como la necesidad de emplear puntos fijos de referencia para hacer las mediciones requeridas. Las aplicaciones de las técnicas basadas en análisis SAR han ayudado a mejorar la caracterización de la respuesta espacio-temporal de los acuíferos a cambios hidromecánicos inducidos por el cambio de almacenamiento hidrogeológico; así mismo, la observación de los movimientos en superficie proporcionan una guía para la evaluación de los modelos de recarga y descarga subterránea, identificación de barreras subterráneas, caracterización de fluctuaciones estacionales del terreno, así como las relaciones de variación en el comportamiento extractivo.

Galloway y Burbey (2011) enumeran diferentes ciudades con problemas de subsidencia han sido objeto de estudio para la aplicación de técnicas basadas en SAR, entre las que se pueden enlistar: Bologna, Italia (40 mm/año); Coachella Valley , California,

U.S. (70 mm/año); Datong, China (20 mm/año); Houston-Galveston, Texas, U.S (15 mm/año).; Kolkata, India (6 mm/año); El Valle Mashhad, Irán (280 mm/año); Murcia, España (35 mm/año); Phoenix-Scottsdale, Arizona, U.S. (15 mm/año); Semarang, Indonesia (80 mm/año); La Cuenca de Teherán, Irán (250 mm/año); Toluca, México (90 mm/año); Ciudad de México (300 mm/año). Las aplicaciones de información derivada de SAR se extienden a mejorar la definición de la heterogeneidad estructural, deposicional e hidromecánica de sistemas acuíferos aluviales de gran espesor. Del mismo modo esta información puede ser correlacionada con fenómenos locales debido a la extracción agresiva de agua subterránea. A partir de los datos derivados de InSAR y PSInSAR se pueden desarrollar múltiples modelos que combinen otros factores hidrogeológicos y así llegar a una mejor comprensión de su interrelación.

Galloway y Hoffmann (2007) señalan que algunas investigaciones correlacionan las variaciones estacionales del movimiento del terreno y la información disponible de abatimientos en la región, en ciudades como Las Vegas, Antelope Valley, Santa Clara, Yucca Flat, todas en Estados Unidos. Estas correlaciones muestran patrones de correlación entre los movimientos estacionales del terreno y la variación del nivel estático, así como con los espesores de los sedimentos arcillosos.

3.4 Análisis PSI de subsidencia en la Ciudad de México.

Los datos de subsidencia usados en este trabajo fueron los de Solano-Rojas et al. (2012); y consisten en una nube de puntos SqueeSAR obtenidos a partir de 29 escenas SAR, adquiridas del sistema Envisat ASAR con fechas entre 2003 y 2007 a partir de las cuales se analizó la subsidencia, asociada al abatimiento del nivel freático en la Ciudad de México y obteniendo valores de movimientos del terreno desde -350.52 hasta 12.43 mm/año. Se utilizó la escena del 29 de julio del 2005 como escena maestra. Además de la nube de puntos SqueeSAR, se utilizaron datos de 9 estaciones GPS continuas en el área de estudio; cuatro de ellas están localizados dentro del área lacustre de mayor subsidencia (MOCS, MPAA, MRRA and UPEC) y el resto en áreas estables. La nube de puntos SqueeSAR y la ubicación de las estaciones de GPS se muestran en la **Figura 3.1**.

La estación UCHI fue seleccionada como sitio de referencia para los cálculos de la línea base por tener la línea de tiempo más completa de los GPS localizados en sitios estables, ya que se ubica en la Sierra de Guadalupe (que es una estructura andesítica-dacítica en el noreste de la Ciudad).

El algoritmo SQUEESAR utilizado inicia seleccionando PSIs visibles en todos los interferogramas y desarrollando sus cambios de fase a través del tiempo. Estos PSIs son filtrados para detectar y remover la contribución atmosférica de fase, conocida comúnmente como APS (atmospheric phase screen). Los factores que influyen las mediciones de fase de InSAR son: la deformación de la señal de interés, la contribución topográfica de fase o error del modelo digital de elevación y la contribución orbital debido a errores orbitales (que es mínima con el uso de órbitas precisas), la contribución de fase debida a la fase atmosférica de la escena, la fase por dispersión (que puede ser ignorada debido a que los PSIs no cambian en el tiempo) y el ruido por efecto de fase que puede ser ignorado por la congruencia de los PSIs en las imágenes.

A lo largo de este trabajo, se utilizan directamente las series de tiempo de la nube SqueeSAR para analizar las variaciones en el tiempo de los movimientos del terreno. Debido a la falta de homogeneidad en la cobertura espacial de la nube de puntos, se

remuestrearon e interpolaron imágenes raster con celdas de 270x270m; este tamaño de celda es adecuado para las dimensiones del área de estudio, pues asegura la existencia de celdas en regiones de baja densidad de PSIs. El primer raster generado fue el de magnitud de subsidencia, que se muestra en la **Figura 3.2**. A partir de éste generé la imagen de gradiente de subsidencia (**Figura 3.3**) con el comando *Slope* de la caja de herramientas de *Spatial Analyst* de ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008).

3.5 Áreas Geoestadísticas Básicas y medidas de subsidencia.

Para las finalidades de este estudio, se emplearon las AGEBS urbanas correspondientes al Distrito Federal y al Estado de México del año 2010 (INEGI, 2011a). A partir de estas geometrías y de los datos de habitantes por AGEB descargados a través del sistema para la consulta de información censal (SCINCE) del INEGI (INEGI, 2011a), se generaron mapas temáticos de área, población total y densidad de población por AGEB. Además, se utilizaron los datos de tasa y gradiente de subsidencia para obtener mapas temáticos que asignan valores promediados por AGEB, generando versiones de los mapas de subsidencia y gradiente de subsidencia con aplicaciones de mayor impacto para la administración de políticas administrativas en zonas urbanas.

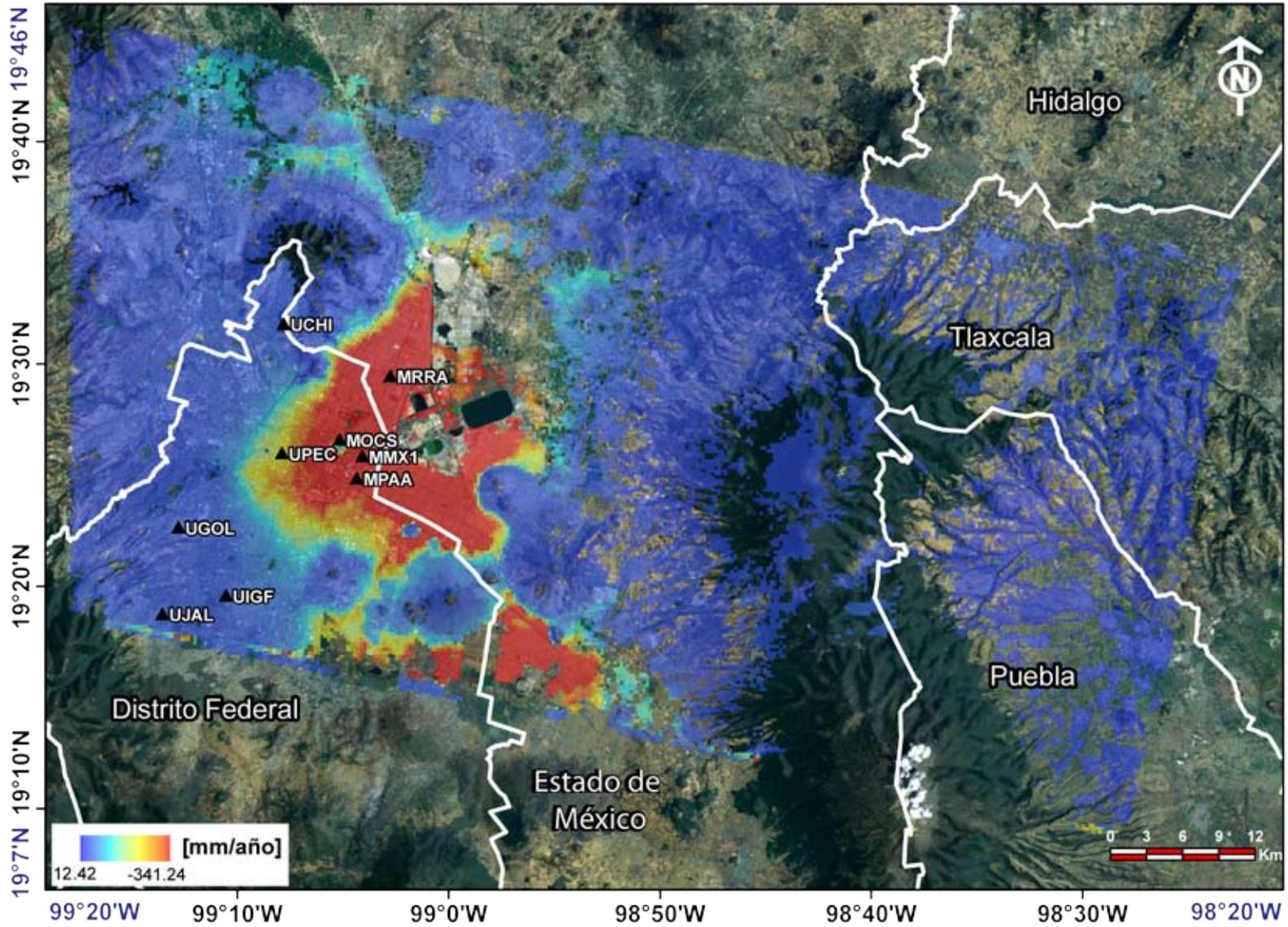


Figura 3.2. Raster de magnitud de subsidencia, derivado de la nube de puntos SqueeSAR.

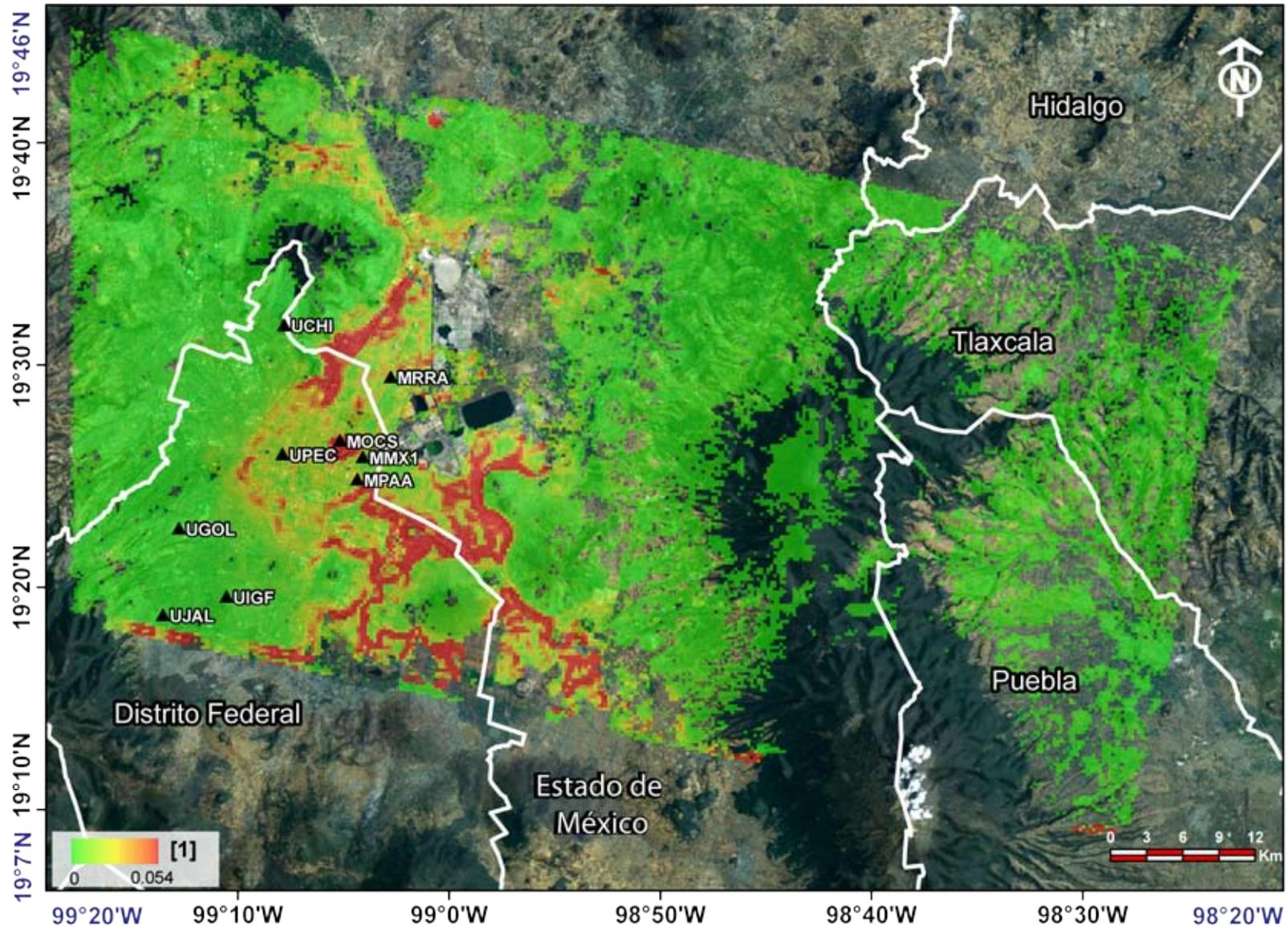


Figura 3.3. Raster de gradiente de subsidencia, derivado del raster de magnitud de subsidencia.

3.5.1 AGEBS.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2012b), “Un Área Geoestadística Básica (AGEB) es la extensión territorial que corresponde a la subdivisión de las áreas geoestadísticas municipales. Dependiendo de sus características, se clasifican en dos tipos: AGEB urbana o AGEB rural.”, “Un AGEB urbana, es un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas (generalmente ~50) perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y sólo son asignadas al interior de las localidades urbanas.” y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, comercial y de servicios. Es decir, un AGEB urbana se encuentra dentro de una localidad urbana que es “...aquella que tiene una población mayor o igual a 2 500 habitantes o que es cabecera municipal, independientemente del número de habitantes.”

3.5.2 Las AGEBS como unidades para las observaciones de subsidencia.

La información de los AGEBS proviene del Censo de Población y Vivienda del año 2010 (INEGI, 2012b), y contiene las geometrías de las AGEBS en formato shape junto con una tabla de atributos con datos de población así como un conjunto de indicadores calculados para cada AGEB. Con ayuda del Sistema de Información Geográfica ArcGis 9.3, se obtuvo el área de cada AGEB en kilómetros cuadrados; con el área calculada y los datos de población total por AGEB, se obtuvo la densidad de población por AGEB en habitantes por kilómetro cuadrado. Con esta información generé los mapas de la **Figura 3.4** de información de población por AGEB.

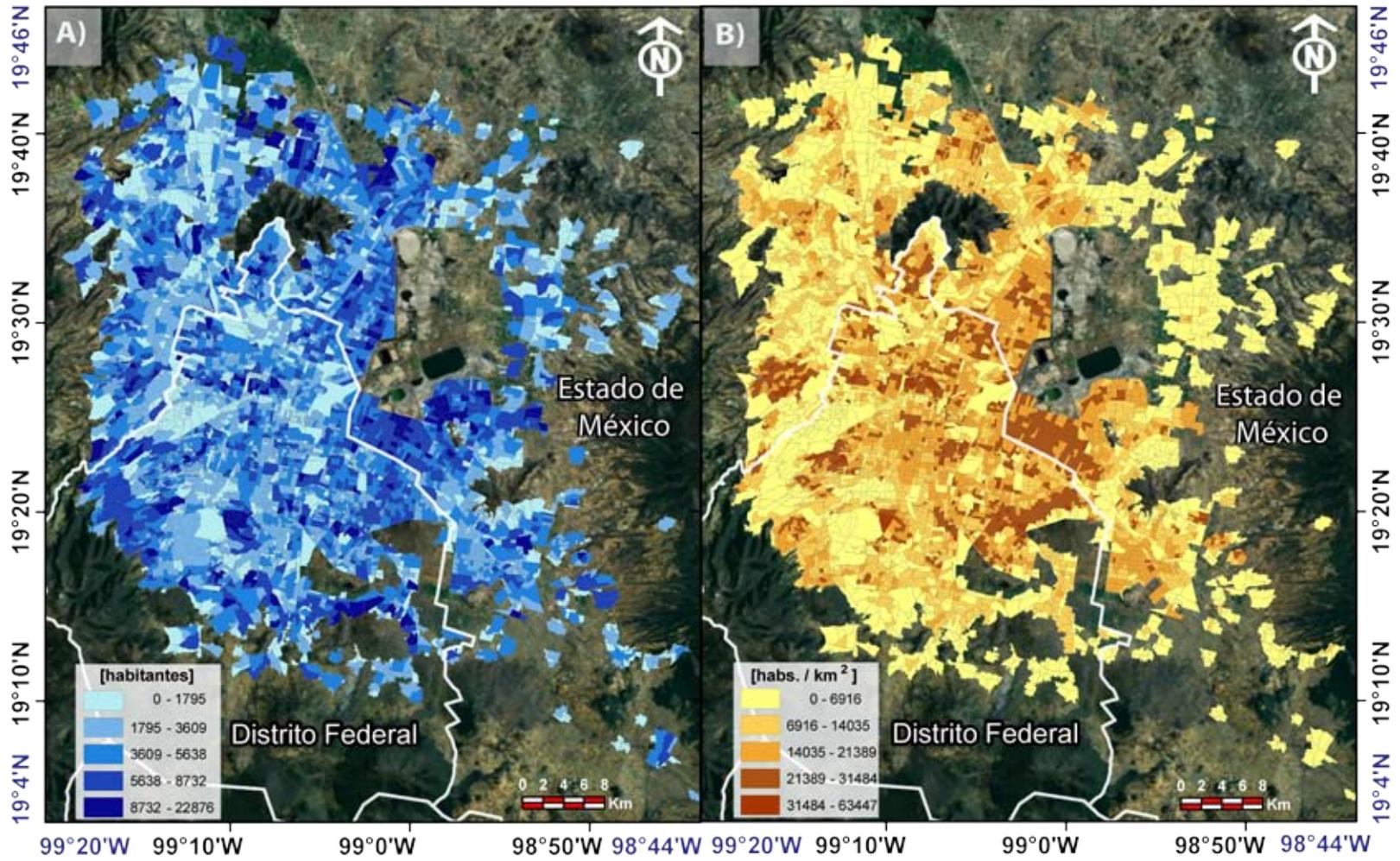


Figura 3.4. A) Población total por AGE B; B) Densidad de población por AGE B.

A partir de las imágenes de magnitud de subsidencia y gradiente de subsidencia remuestreadas a celdas de 270 m, se realizaron reclasificaciones para dividir dichas celdas en celdas de 30 m. Posteriormente se convirtieron los rasters a puntos con la herramienta *Raster to Point* de ArcGIS, con el objetivo de poder fusionar esta información con los AGEBS. De esta manera se extrajo la información de magnitud y gradiente de subsidencia correspondientes a cada AGEB para generar promedios de gradiente y magnitud de subsidencia y así obtener versiones “agebizadas” de tasa y gradiente, lo que permite tener clasificaciones administrativas de las medidas de subsidencia, con los mapas de tasa de subsidencia por AGEB (**Figura 3.5**) y de gradiente de subsidencia por AGEB (**Figura 3.6**).

Los mapas se despliegan agrupando los valores por AGEB en 5 clases, según el método de Natural Breaks de Jenks, el cual se emplea para disminuir la varianza dentro de cada clase y maximizar la varianza entre las clases creadas, disponiendo los límites de clases en saltos relativamente grandes de los valores de los datos (Natural Breaks (Jenks), 2007); esto permite resaltar la variabilidad de los datos en los trabajos cartográficos.

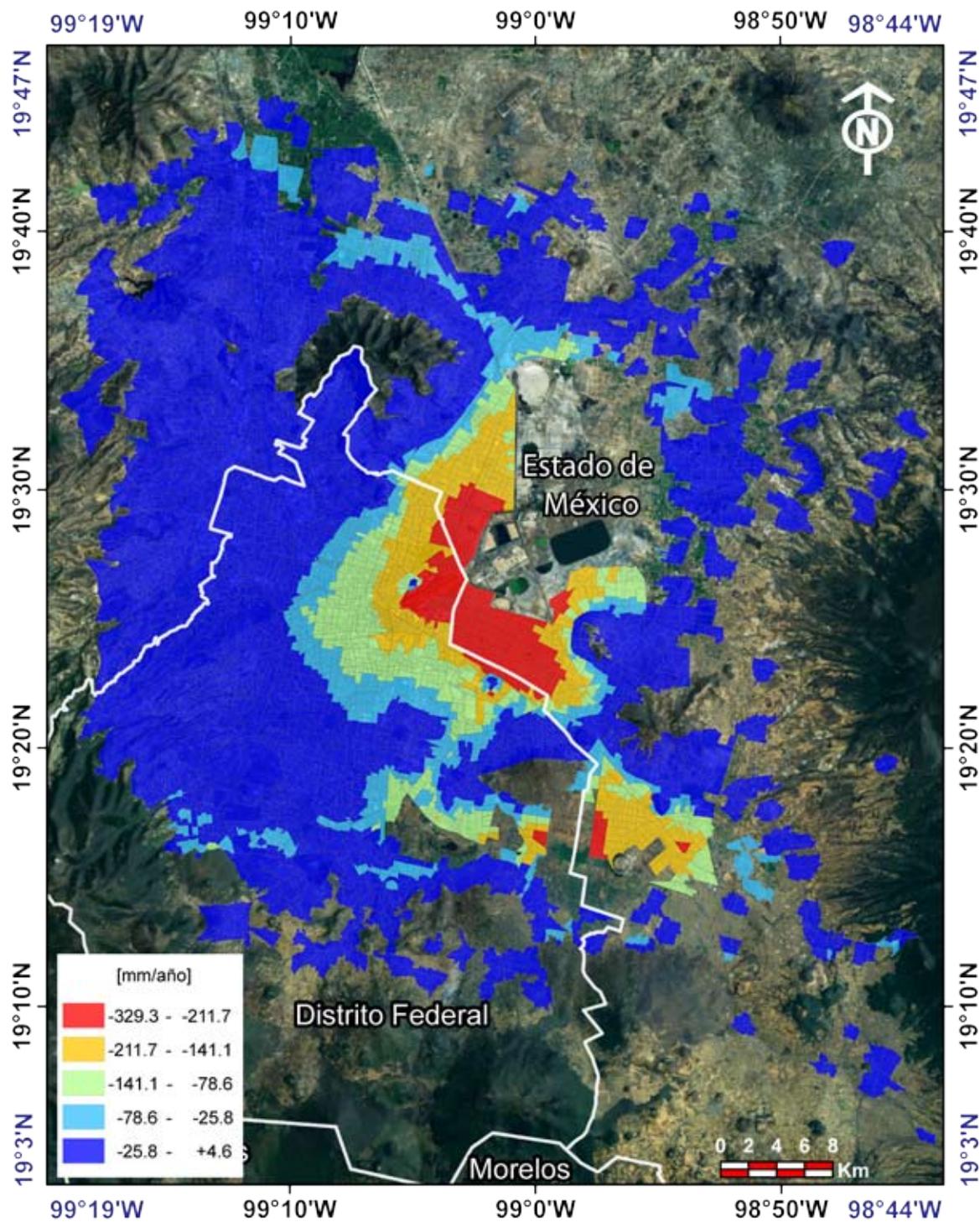


Figura 3.5. Mapa de sectores de tasa de subsidencia por AGEB.

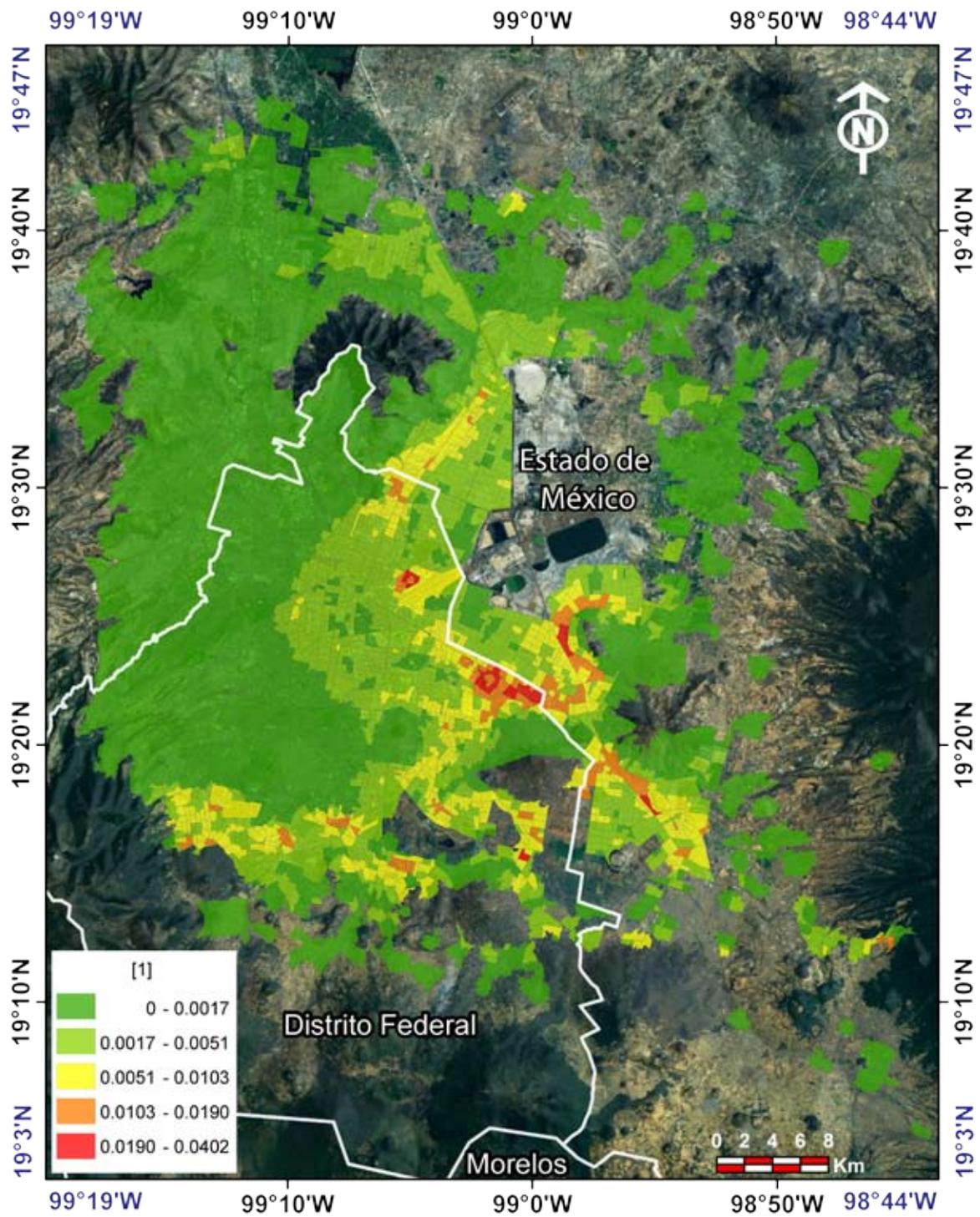


Figura 3.6. Mapa de sectores de gradiente de subsidencia por AGEB.

Capítulo 4.

CAPÍTULO 4. INTEGRACIÓN DE MAPAS DE DESPLAZAMIENTO INSAR AL ANÁLISIS DRASTIC.

4.1 Metodología DRASTIC.

DRASTIC es una metodología sistemática de evaluación de la vulnerabilidad a contaminación de un medio hidrogeológico que fue desarrollada por Aller et. al (1987), financiada por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Este método consta de dos partes: la designación de unidades cartografiables, llamadas características hidrogeológicas y la superposición con una ponderación relativa.

Las características físicas del medio acuífero son inherentes a cada parámetro hidrogeológico que afecta el potencial de contaminación del agua subterránea. Los factores evaluables más importantes según la metodología DRASTIC son: profundidad al nivel freático (D=depth to groundwater), recarga neta (R=Recharge), litología del acuífero (A=Aquifer media), tipo de suelo (S=Soil media), topografía o pendiente (T=Topography or slope), impacto a la zona vadosa (I=Impact to vadose zone media) y conductividad hidráulica del medio acuífero (C=Conductivity of the aquifer media), (Aller et al., 1987).

Cada parámetro tiene un peso y un rango de valores, que al multiplicarse se suman a los demás parámetros para generar un índice relativo que se adapta a una clasificación en la escala del uno al diez. Los resultados que se obtienen son relativos y delimitan las zonas de un acuífero con vulnerabilidad similar, obteniendo la ecuación $D+R+A+S+T+I+C = \text{Vulnerabilidad Acuifera}$, en donde cada parámetro de la suma es el resultado de la multiplicación del peso por un valor numérico asignado. La **Tabla 4.1** muestra los pesos asignados a cada parámetro.

Para el caso del análisis de la Vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México, se desarrolló el proyecto “Nivel de Riesgo en la Ciudad de México en Función de las Características Hidrogeológicas de la Zona Metropolitana del Valle de México y Fuentes Potenciales y Activas de Contaminación por Hidrocarburos, clave 121128” a cargo del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, patrocinado

por el Fondo Mixto para la Investigación Científica y Tecnológica CONACyT-ICyTDF-GDF. El producto principal del mismo fue el mapa de vulnerabilidad acuífera según la metodología DRASTIC para el Distrito Federal, según describen Hernández-Espriú et al. (2011). Los índices utilizados en el desarrollo de dicho trabajo se muestran en la **Tabla 4.2**.

En el desarrollo de dicho trabajo se utilizó la información proveniente de 615 pozos de extracción de agua y 372 cortes litológicos, además de una intensa jornada de campo y trabajo en gabinete.

Tabla 4.1. *Peso asignado a los parámetros DRASTIC según Aller et al. (1987).*

	Parámetro	Peso
D	Profundidad al nivel freático	5
R	Recarga neta	4
A	Material del acuífero	3
S	Tipo de suelos	2
T	Topografía	1
I	Material de la zona vadosa	5
C	Conductividad hidráulica	3

Tabla 4.2. *Índices utilizados por Hernández-Espriú et al. (2011) para el mapa de vulnerabilidad del Acuífero de la Ciudad de México.*

Índice DRASTIC	Índice normalizado	Zonas de vulnerabilidad
55-74	0-2	Muy Baja
74-93	2-4	Baja
93-112	4-6	Moderada
112-131	6-8	Alta
131-150	8-10	Muy Alta

4.2 Sg como parámetro de DRASTIC.

A pesar del amplio rango de parámetros hidrogeológicos abarcados en la metodología DRASTIC convencional, dentro del proyecto de CONACyT se consideró adecuada la incorporación de información de las zonas propensas a fallamientos superficiales debidos a fenómenos de subsidencia diferencial del terreno en donde la conductividad hidráulica es mayor y que a nivel regional es difícil detectar por medio de pruebas de bombeo. Esto se hizo a partir del parámetro denominado Gradiente de Subsidencia (Sg= Subsidence Gradient) y a partir de este parámetro se elaboró el mapa DRASTIC-Sg del Distrito Federal (Hernández-Espriú, et al. 2012; Hernández-Espriú, et al. 2013).

DRASTIC-Sg incorpora las regiones en donde la conectividad hidráulica es mayor a casusa del fracturamiento asociado a subsidencia, característica de evidente importancia en el Distrito Federal considerando sus antecedentes, contexto geológico y explotación del acuífero.

4.2.1 Desarrollo metodológico.

A partir de los datos de la nube de Puntos Persistentes obtenido por medio de la metodología SqueeSAR desarrollado por TRE (Solano-Rojas et al., 2012) con series de tiempo de InSAR (esta técnica se describe en el Capítulo 3), el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM generó un recorte de la zona de interés del estudio que corresponde a los límites políticos del Distrito Federal. A cada punto se le asignó el valor obtenido de dividir la diferencia entre la última y la primera adquisición SAR entre el periodo de tiempo en días comprendido entre las adquisiciones SAR (7 de marzo del 2003 al 12 de octubre del 2007) y multiplicado por 365 para obtener una tasa anualizada de esta magnitud, obteniendo valores entre -350.52 y 12.42 mm/año.

A partir de la nube de puntos SqueeSAR y la magnitud de su tasa de subsidencia anualizada, el Grupo de Hidrogeología de la UNAM realizó un raster de celdas de 270x270 m, para asegurar la cobertura de las celdas en el Distrito Federal, aún en

las zonas en donde la densidad de cobertura de los puntos es baja. Sin embargo este producto no cubre en su totalidad al D.F., ya que la nube de puntos cuenta con limitantes de cobertura espacial debido a la extensión de la franja de adquisición del satélite ENVISAT-ASAR utilizado. Destacan dos áreas con faltantes de información.

Por un lado, el área correspondiente al norte de la delegación Xochimilco y el área al sur de Tláhuac no presentan información, en donde influye la presencia de cuerpos de agua y además llega al límite de la cobertura espacial del mosaico de imágenes de la plataforma ENVISAT. Por esta razón y debido a que el método DRASTIC-Sg necesita un raster continuo y sin huecos fue necesario interpolar y asignar el valor de los pixeles faltantes y así completar la cobertura de los datos en el Distrito Federal y obtener una rejilla uniforme. Esto generó el mapa de tasa de subsidencia intrepolada, como se muestra en la **Figura 4.1, a**.

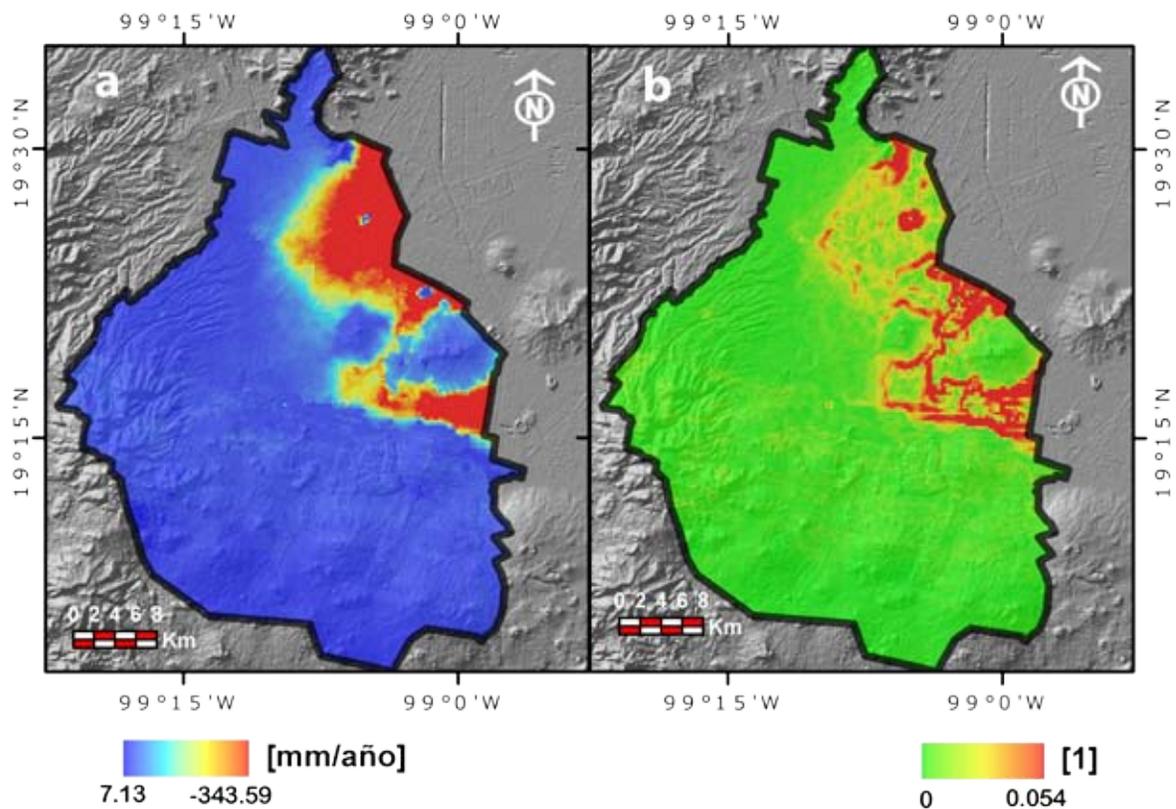


Figura 4.1. a. Mapa de subsidencia interpolada; b. Mapa de gradiente horizontal de subsidencia generado a partir del mapa de tasa de subsidencia interpolada.

A partir de este producto se realizó en ArcGIS 9.3, a través de la herramienta *Slope*, la comparación de la diferencia de la mayor magnitud de subsidencia entre celdas adyacentes en el raster, y dividiéndose entre la distancia comprendida entre los centros de cada celda, generando de esta manera un mapa de gradiente horizontal de subsidencia (Cabral-Cano et al., 2012). Este mapa se muestra en la **Figura 4.1b**, es un excelente proxy para definir zonas en las cuales el terreno es más propenso a sufrir fallamiento superficial (Cabral et al., 2011). En otras palabras, cuando la diferencia de la magnitud de subsidencia es sustancial dentro de una distancia horizontal corta, el terreno está sometido a mayores esfuerzos los cuales deforman el terreno hasta hacerlo fallar. Esta tendencia al fallamiento se expresa de manera numérica en el raster.

Al parámetro de gradiente horizontal de subsidencia se le asignó un peso de 5 y se le aplicó la ponderación que se muestra en la **Tabla 4.3**. Para obtener directamente la ponderación correspondiente al parámetro Sg, se aplicó la ecuación $y = 2.3002 \ln(x) + 16.889$, en donde el eje X representa el gradiente de subsidencia por celda con un factor de escala y el eje Y representa la ponderación correspondiente a dicho gradiente.

Tabla 4.3. Ponderación aplicada a los valores de gradiente horizontal de subsidencia.

Gradiente de subsidencia	
Valor	Ponderación
0.001	1
0.021	8
0.050	10

4.2.2 Mapa DRASTIC-Sg.

A través de la herramienta ArcGIS Weighted Sum, se incorporó el parámetro Sg a la metodología DRASTIC (Hernández-Espriú, et al. 2012; Hernández-Espriú, et al. 2013). Así, el Grupo de Hidrogeología de la UNAM elaboró el mapa DRASTIC-Sg de zonas de Vulnerabilidad. Los mapas DRASTIC y DRASTIC-Sg se muestran en la Figura 4.2. Con la información de cobertura espacial por Zonas de Vulnerabilidad y la información de densidad de población derivada de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) del censo 2010 del INEGI, fue posible realizar conteos de áreas y poblaciones afectadas entre las versiones del mapa DRASTIC y DRASTIC-Sg.

4.3 Conteos comparativos de área, población y parámetros de subsidencia entre DRASTIC y DRASTIC-Sg.

Con la información generada a partir del análisis DRASTIC y DRASTIC-Sg y los AGEBS urbanos 2010 del INEGI, se realizaron conteos comparativos de la población involucrada por zonas de vulnerabilidad, el análisis de la distribución de las zonas de vulnerabilidad en la zona urbana, y la comparación de los valores de magnitud y gradiente horizontal de subsidencia en cada zona de vulnerabilidad.

4.3.1 Conteos de población por Zona de Vulnerabilidad.

4.3.1.1 Procedimiento.

A partir del mapa temático de densidad de población por AGEBS del Distrito Federal, se realizó un raster con celdas de 30 m, asignando a cada celda la densidad correspondiente, obtenida al dividir la población por AGEBS entre el área en metros cuadrados y multiplicándolo por 900, que son los metros cuadrados en la celda de 30 m por lado. Este procedimiento se resume en los siguientes pasos:

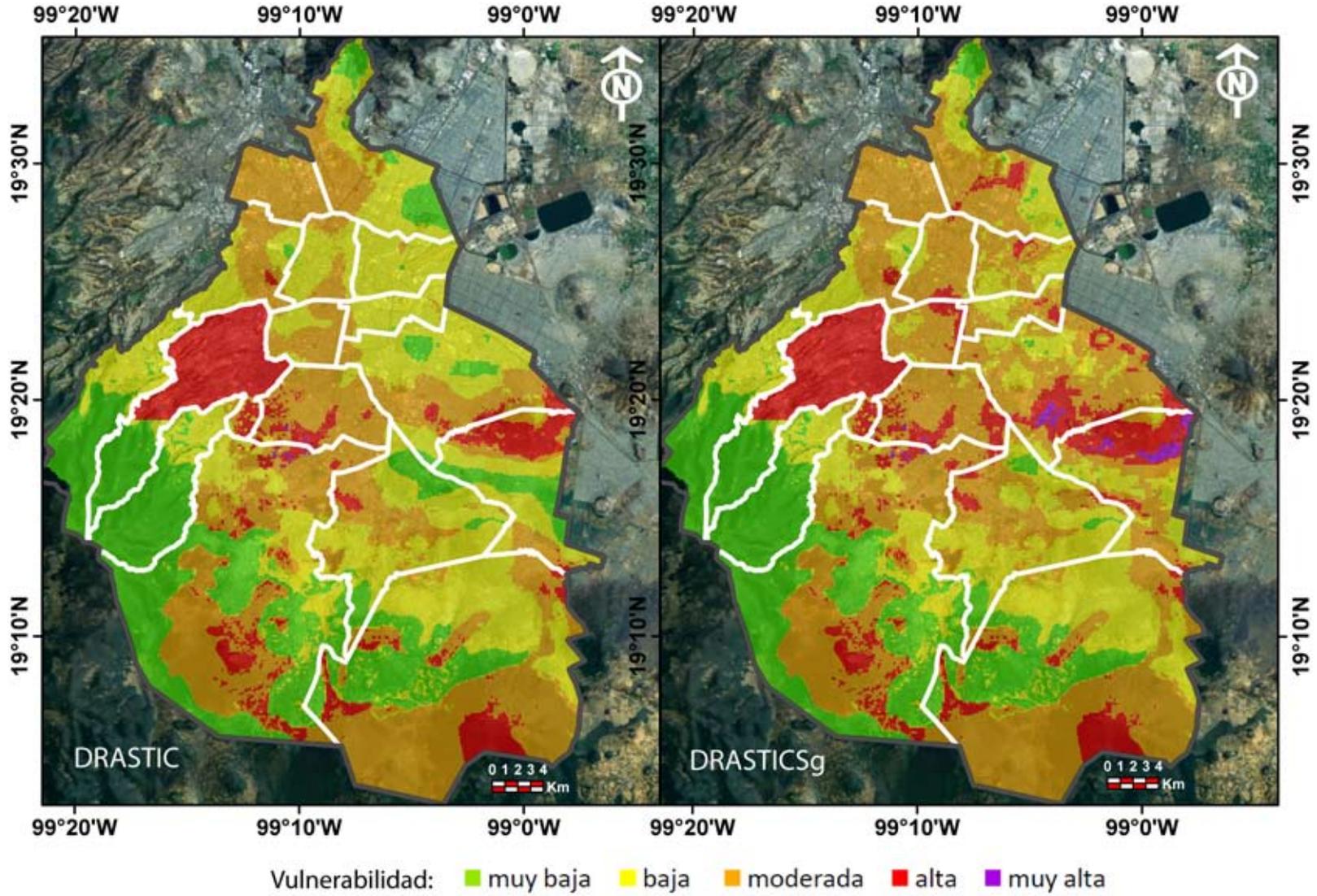


Figura 4.2. Mapas de vulnerabilidad acuífera de la ciudad de México. Izquierda: Mapa DRASTIC. Derecha: Mapa DRASTIC-Sg.

- Determinación del área de la traza urbana por área geoestadística básica (AGEB).
- Determinación de la densidad de población por AGEB.
- Ponderación de densidad correspondiente a un área de 900 m².
- Creación de un raster de 30 x 30 m de cobertura total de la traza urbana de AGEB.

Posteriormente se convirtió el raster de densidad de población a puntos y con el comando *Raster to Point*. A los rasters de los mapas DRASTIC y DRASTIC-Sg se les sobrepusieron los puntos de datos de densidad de población. Con ellos se extrajeron los identificadores de las zonas de vulnerabilidad de ambas versiones de DRASTIC con el comando *Extract Values to Points*. Con el resultado fue posible sumar las poblaciones correspondientes a cada zona de vulnerabilidad y después se obtuvieron los valores porcentuales de las mismas. También se obtuvo el área de los AGEBs de correspondiente a cada zona de vulnerabilidad.

4.3.1.2 Resultados y discusión.

Los resultados de estos conteos se resumen en la **Tabla 4.4**. A partir de esta tabla se elaboraron las gráficas de barras para comparar las condiciones de ambos mapas de vulnerabilidad.

Tabla 4.4. *Conteos comparativos de área y población por zona de vulnerabilidad para DRASTIC y DRASTIC-Sg.*

Zona de vulnerabilidad	DRASTIC				DRASTICSg			
	Área [km ²]	Área [%]	Población [hab.]	Población [%]	Área [km ²]	Área [%]	Población [hab.]	Población [%]
Muy Baja	60.98	7.73	561,304	6.36	33.96	4.31	228,227	2.59
Baja	350.94	44.51	3,946,137	44.72	247.49	31.39	2,352,144	26.66
Moderada	280.94	35.63	3,306,273	37.47	364.66	46.25	4,481,654	50.79
Alta	94.60	12.00	1,001,920	11.35	137.16	17.40	1,699,657	19.26
Muy Alta	1.04	0.13	7,976	0.09	5.22	0.66	61,928	0.70

De las **Figuras 4.3** y **4.4** se observa que zona por zona, los conteos de área y población presentan un decremento en las Zonas de Muy Baja y Baja Vulnerabilidad y un incremento en las zonas de Moderada, Alta y Muy Alta Vulnerabilidad en DRASTIC-Sg.

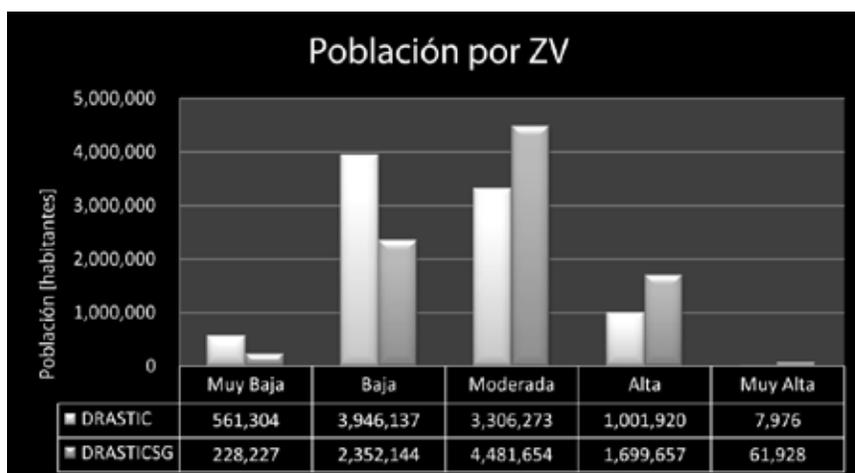


Figura 4.3. Comparativo de población por Zona de Vulnerabilidad en DRASTIC y DRASTIC-Sg.

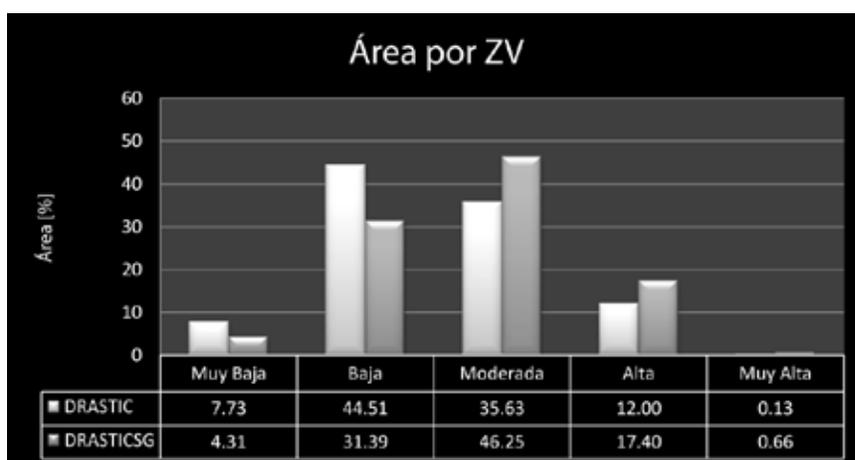


Figura 4.4. Comparativo de área por Zona de Vulnerabilidad en DRASTIC y DRASTIC-Sg

De la **Tabla 4.4** y la **Figuras 4.3** y **4.4** de las áreas y poblaciones por Zonas de Vulnerabilidad en DRASTIC y DRASTIC-Sg, se observa que el aumento en del área en las zonas de Alta y Muy Alta vulnerabilidad en DRASTIC-Sg va de 12.13 a 18.06%, lo que representa casi el 6% del área total (cerca de 47 km²) y la diferencia en la población según el conteo de los AGEBS va de 11.54 a 19.96%, lo que representa un

incremento del 8.52 % de la población total (cerca de 752 mil habitantes previamente no considerados en estas áreas, para dar un total de 1.76 millones de habitantes).

Cuando se consideran las zonas de Moderada, Alta y Muy Alta vulnerabilidad, se observa que el aumento del área es de un 16.55%, o sea 130.5 km² y el aumento en el conteo de población es de 21.84%, o sea 1.92 millones de habitantes.

De lo anterior se desprende que la consideración del parámetro Sg en la metodología DRASTIC implica un incremento en el conteo de áreas más vulnerables. A la par, se genera un incremento en los conteos de población de las mismas, en una proporción incluso mayor que el generado en los conteos de área, ya que en el caso en el que se incluye las zonas de Alta y Muy Alta vulnerabilidad se tiene un cociente de 5.93% de área/8.52% de población y en el caso en el que se considera las zonas de Moderada, Alta y Muy Alta vulnerabilidad se genera un cociente de 16.55% de área/21.84% de población. Es decir, al incluir el parámetro Sg en la metodología DRASTIC, se genera un aumento en área de las zonas más vulnerables, que al mismo tiempo son zonas de mayor densidad de población que las computadas en los conteos de DRASTIC. Esto muestra claramente que la metodología DRASTIC subestima las áreas vulnerables en zonas donde el fenómeno de subsidencia está presente.

4.3.2 Análisis de tasa y gradiente de subsidencia por Zona de Vulnerabilidad.

A partir del raster de información de Zonas de Vulnerabilidad de DRASTIC y DRASTIC-Sg, se extrajeron valores de magnitud y gradiente horizontal de subsidencia correspondiente por pixel, los cuales previamente convertí a puntos y se realizó un procedimiento similar al anteriormente descrito con el uso del comando *Extract Values to Points*, pero en vez de evaluar la suma de las celdas, fueron generados los promedios correspondientes por zonas de vulnerabilidad. El procedimiento se puede resumir en los siguientes pasos:

- Conversión a puntos de los rasters de gradiente y tasa de subsidencia.
- Extracción de los valores de magnitud y gradiente horizontal de subsidencia por

pixel de Zona de Vulnerabilidad.

- Generación de conteos a partir de las tablas de los puntos.
- Obtención de promedios por Zonas de Vulnerabilidad.

Adicionalmente, se utilizaron los AGEBS 2010 correspondientes al Distrito Federal como máscara para realizar recortes de los rasters de DRASTIC, DRASTIC-Sg, gradiente horizontal de subsidencia y tasa de subsidencia. Esto me permitió generar conteos solamente de la zona urbanizada. Se designó esta subárea como “Área AGEBS” y el área de la extensión total del Distrito Federal como “Área todo el D.F.”.

Lo anterior permitió analizar la distribución de las Zonas de Vulnerabilidad en el área urbanizada y el comportamiento implícito del gradiente y la tasa de subsidencia por Zona de Vulnerabilidad, así como compararlo con el comportamiento a nivel de toda la cobertura del Distrito Federal.

4.3.2.1 Resultados “Área todo el D.F.”.

Los resultados de los conteos en el área delimitada por los límites políticos del Distrito Federal, referida como “Área todo el D.F.” se resumen en la **Tabla 4.5**, a partir de la cual se elaboraron las **Figuras 4.5** y **4.6**.

Tabla 4.5. Resumen de los conteos en el “Área todo el D.F.”.

Área todo el D.F. (1487.2986 km²)

	Zona de Vulnerabilidad	Tasa subs. prom.	Gradiente subs. prom	Área [km ²]	Área [%]
DRASTIC	Muy Baja	-19.5	0.0009	339.68	22.84
	Baja	-43.6	0.0023	486.90	32.74
	Moderada	-7.5	0.0007	506.31	34.04
	Alta	-3.1	0.0005	153.35	10.31
	Muy Alta	-2.6	0.0004	1.05	0.07
DRASTICsg	Muy Baja	-2.9	0.0003	296.23	19.92
	Baja	-32.6	0.0009	383.63	25.79
	Moderada	-25.7	0.0016	603.35	40.57
	Alta	-15.3	0.0022	196.17	13.19
	Muy Alta	-37.7	0.0069	7.91	0.53



Figura 4.5. Comparativos de tasa de subsidencia promedio por Zonas de Vulnerabilidad en “Área todo el D.F.”

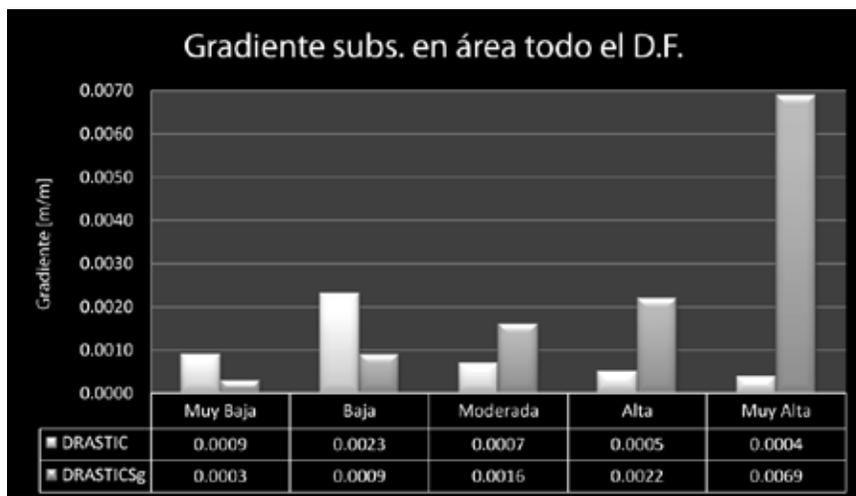


Figura 4.6. Comparativos de gradiente de subsidencia promedio por Zonas de Vulnerabilidad en “Área todo el D.F.”

Al observar las **Figuras 4.5** y **4.6**, se aprecia que en la versión DRASTIC la magnitud de subsidencia (valores negativos más grandes) se presenta en las zonas clasificadas como Muy Baja y Baja Vulnerabilidad y mayor en las zonas de Vulnerabilidad Moderada, Alta y Muy Alta; y el gradiente horizontal de subsidencia es mayor en las zonas de menor Vulnerabilidad y viceversa. Es decir, se observa una relación de menor subsidencia-menor gradiente-mayor Vulnerabilidad (excepto en el caso de Muy Baja Vulnerabilidad). Esto quiere decir que las zonas de mayor vulnerabilidad en el mapa DRASTIC se presentan en zonas de menor subsidencia y menor gradiente de subsi-

dencia, lo que se traduce en zonas sin fallamiento superficial asociado.

Con lo que respecta a DRASTIC-Sg, no se observa una relación entre el grado de vulnerabilidad y la tasa de subsidencia, pero sí queda claro que a mayor vulnerabilidad, mayor gradiente horizontal de subsidencia y es debido a la incorporación del parámetro Sg en la metodología DRASTIC. Esto es, la metodología DRASTIC-Sg relaciona las zonas de mayor vulnerabilidad con mayor gradiente, o sea, mayor fallamiento asociado a subsidencia, por lo tanto, regiones de mayor conductividad hidráulica.

4.3.2.2 Resultados “Área AGEBs”.

Los resultados del “Área AGEBs” se resumen en la **Tabla 4.6**. De la observación de las **Figuras 4.7** y **4.8** derivadas de la **Tabla 4.6** se aprecia que para DRASTIC existe un relación de mayor subsidencia-menor gradiente de subsidencia-mayor vulnerabilidad. Comparado con los resultados del “Área todo el D.F.”, se observa que existe un menor promedio de magnitud subsidencia junto con un mayor gradiente en la clase de Muy Baja Vulnerabilidad, debido a la redistribución espacial en el mapa DRASTIC, que originalmente contenía sectores de Muy Baja Vulnerabilidad en el Este del D.F. (como se puede observar en la **Figura 4.2**).

Tabla 4.6. Resumen de los conteos en el “Área AGEBs”.

Área AGEBs (789.4845 km²)

	Zona de Vulnerabilidad	Tasa subs. prom.	Gradiente subs. prom	Área [km ²]	Área [%]
DRASTIC	Muy Baja	-67.3	0.0025	61.15	7.75
	Baja	-55.8	0.0027	350.73	44.43
	Moderada	-13.3	0.0012	281.19	35.62
	Alta	-3.2	0.0004	94.57	11.98
	Muy Alta	-2.7	0.0004	1.04	0.13
DRASTICSg	Muy Baja	-10.3	0.0004	34.08	4.32
	Baja	-41.6	0.0010	247.65	31.37
	Moderada	-38.9	0.0022	364.62	46.18
	Alta	-20.0	0.0028	137.17	17.37
	Muy Alta	-31.3	0.0061	5.17	0.66

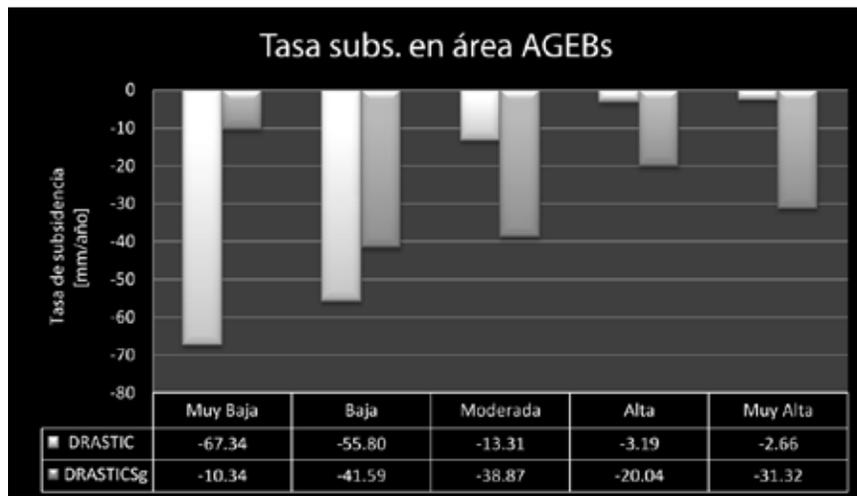


Figura 4.7. Comparativos de tasa de subsidencia promedio por Zonas de Vulnerabilidad en “Área AGEBS”.

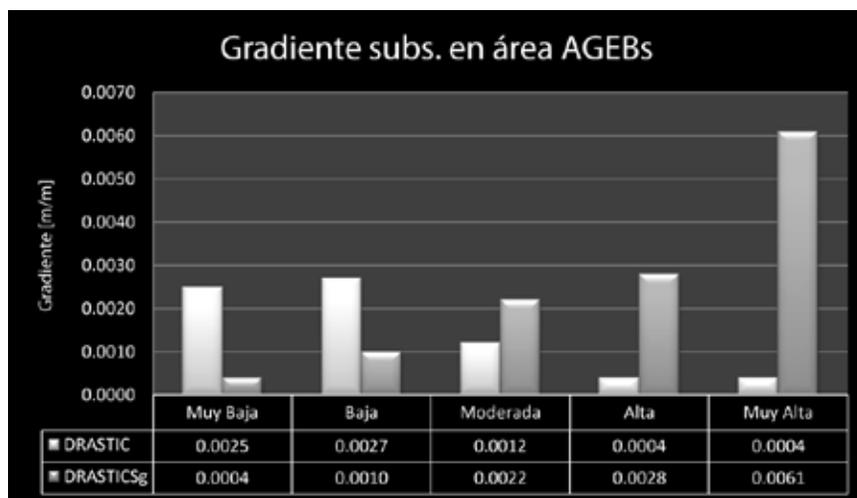


Figura 4.8. Comparativos de gradiente de subsidencia promedio por Zonas de Vulnerabilidad en “Área AGEBS”.

Los conteos para DRASTIC-Sg en el “Área AGEBS” no muestran una relación directa entre zonas de vulnerabilidad y la magnitud subsidencia, pero sí una relación directa entre zonas de vulnerabilidad y el gradiente horizontal de subsidencia. Esto es lógico bajo la premisa de que el gradiente horizontal de subsidencia tiende a incrementarse en las zonas en donde la tasa de subsidencia muestra mayor contraste en áreas contiguas. Este comportamiento genera mayor dispersión de los valores de magnitud de subsidencia y por lo tanto un sesgo en los promedios.

4.3.3 Comparaciones de Área por Zona de Vulnerabilidad entre “Área todo el D.F.” y “Área AGEBS”.

A partir de los datos de las **Tablas 4.5** y **4.6** se elaboraron las **Figuras 4.9, 4.10** y **4.11**.

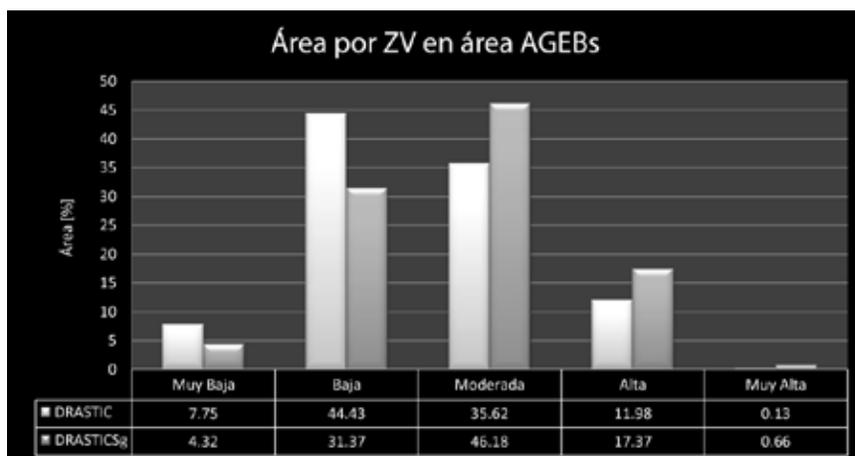


Figura 4.9. Comparativo de área para cada Zona de Vulnerabilidad en “Área AGEBS”.

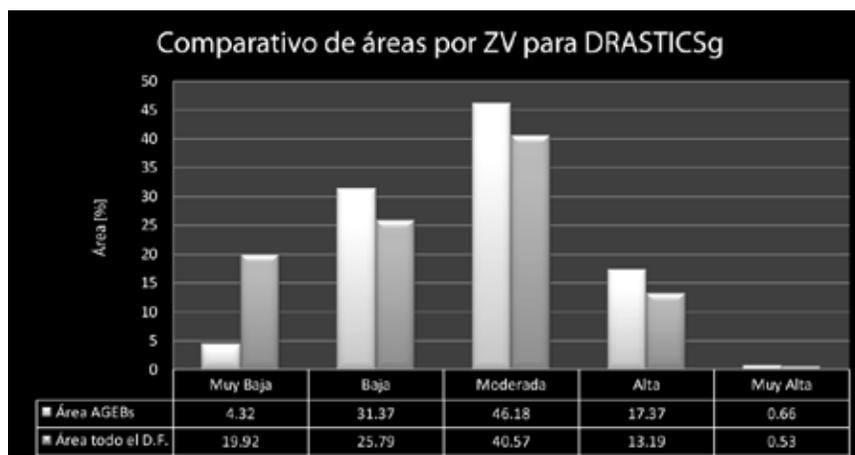


Figura 4.10. Considerando como totales de área “Área AGEBS” y “Área todo el D.F.” respectivamente, se muestra el % de área por zona de Vulnerabilidad para DRASTICSg.

La **Figura 4.9** compara las diferencias de área por Zona de Vulnerabilidad entre las metodologías DRASTIC y DRASTIC-Sg en el “Área AGEBS” (lo que representa resultados similares al área obtenida como subproducto en los conteos de población, con diferencias despreciables por error de conteo). La **Figura 4.4** antes mencionada, muestra el área por Zona de Vulnerabilidad en el “Área todo el D.F.”. Ambas gráficas

demuestran que la metodología DRASTIC-Sg incorpora áreas menores clasificadas como Muy Baja y Baja Vulnerabilidad y áreas mayores clasificadas como Moderada, Alta y Muy Alta Vulnerabilidad. Sin embargo, los contrastes obtenidos en el “Área AGEBS” son más pronunciados en dichos decrementos e incrementos.

Además, de la **Figura 4.10**, que presenta la cobertura porcentual de las Zonas de Vulnerabilidad, resalta una disminución sustancial del porcentaje de área de Muy Baja Vulnerabilidad cuando se considera el “Área AGEBS” en la metodología DRASTIC-Sg. Esto es, el área urbana se clasifica en su mayoría como más vulnerable que el “Área todo el D.F.”.

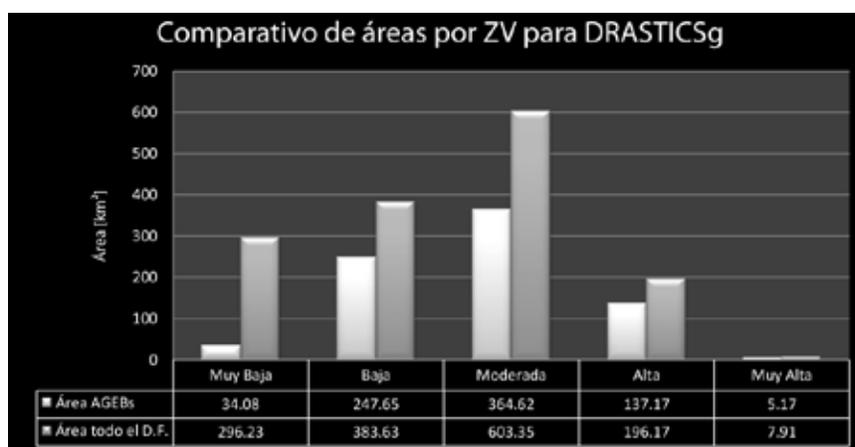


Figura 4.11. Comparativo de áreas en km² clasificadas para cada Zona de Vulnerabilidad en “Área AGEBS” y “Área todo el D.F. para DRASTIC-Sg”

De la observación de la **Figura 4.11** se infiere que además de ser clasificada como una región de mayor vulnerabilidad, el área urbana contiene en sí la mayoría de las zonas más vulnerables (142 de los 204 km² de Alta y Muy Alta Vulnerabilidad) y muy pocas de las zonas de Muy Baja Vulnerabilidad (solamente 34 de los 296 km² clasificados en esta Zona de Vulnerabilidad en todo el Distrito Federal).

Esto arroja como conclusión que la zona urbanizada ha desarrollado una mayor vulnerabilidad hacia el acuífero, lo que genera que sus porcentajes de áreas más vulnerables sean mayores respecto al total del D.F., y que la mayoría de las zonas menos vulnerables del mismo son precisamente aquellas regiones no urbanizadas que se localizan al sur de la Ciudad de México.

Capítulo 5.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE ORIENTACIONES DE FALLAS Y FRACTURAS EN ZONAS SELECTAS.

En este capítulo se analizan los patrones de fracturas y su relación con la subsidencia en la zona de lago, asociada a la extracción de agua subterránea. Esto aunado a la información sobre subsidencia expuesta en este trabajo complementa la interpretación del régimen geológico-estructural que están sometidos los geomateriales de manera natural y por acción antropogénica asociada a actividades extractivas de agua en la cuenca, a través del manejo estadístico de datos de orientaciones de fracturas recabados por Hernández-Espriú et al. (2011), en un muestreo selecto de localidades de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

5.1 Introducción al fracturamiento.

Las fracturas en un sistema geológico no se presentan aisladas, sino como parte de una familia de fracturas, en donde las variaciones de las condiciones litológicas y de esfuerzos determinarán la orientación de las mismas, así como su distribución y abundancia. Debido a esto, resulta imposible saber donde se originaron todas las fracturas en una localidad dada, por lo que se debe realizar la interpretación por conjuntos de fracturas. Ahora bien, dos o más conjuntos de fracturas forman una familia. Los dominios estructurales son definidos con base en límites geográficos, contactos litológicos, rocas según sus edades, subdivisiones estructurales, entre otros criterios, dependiendo del enfoque del estudio a realizar (Davis et al, 1996).

Según Romero-Miranda (2011), “La palabra fractura proviene del latín fractus, que significa “quebrar” y se refiere a superficies discretas que segmentan o dividen en bloques de rocas y minerales en la naturaleza; éstas definen superficies de baja cohesión”...”Las fracturas pueden ser generadas por la concentración de esfuerzos en zonas de contraste composicional (contactos de capas, cambios de facies), por pérdida de volumen (compactación), por enfriamiento, durante deformación contraccional o extensional.”. El mismo autor argumenta que la orientación de las fracturas y las fallas

responden al mecanismo de formación que las origina, generando conjuntos y familias de fracturas.

Para realizar la medición de planos en el estudio de sistemas geológicos, como lo son las fracturas, existen los conceptos de rumbo y echado. El rumbo de un plano se define como “el ángulo que forma la línea horizontal contenida en el plano con respecto al norte o sur geográfico” y el echado es “el ángulo medido entre un plano horizontal imaginario y el plano de interés en la dirección de la línea de máxima inclinación contenida en el plano de interés”. Para realizar estas mediciones se utiliza comúnmente la brújula Brunton, con la correspondiente corrección por declinación magnética regional.

Dada la complejidad de los sistemas geológicos y la extensión de los mismos, es imposible examinar todas las fracturas en un área de estudio, pues se puede incluso recurrir al examen de microfracturas, por lo que es necesario acotar los sitios de estudio y las características de las fracturas a medir. Esto se hace dependiendo de la abundancia y calidad del objeto de medición.

5.2 El estudio del fracturamiento asociado a subsidencia.

El problema del fracturamiento en la Ciudad de México ha sido de gran importancia por su impacto en los asentamientos urbanos, siendo el fracturamiento asociado a la subsidencia de gran relevancia desde la década de los 1950s, incrementando el riesgo de daños a la infraestructura, afectando considerablemente la vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México al facilitar el acceso al subsuelo de posibles contaminantes (hidrocarburos, desechos industriales, desechos orgánicos, metales pesados, etc.).

Carreón-Freyre et al. (2006) consideran diversos factores de propagación de las fracturas en las secuencias lacustres, entre las que menciona el ambiente de depósito y las estructuras preexistentes del basamento como factores de heterogeneidad primarios, seguidos de la historia de cargas y variaciones de humedad durante el depósito,

que generan las primeras fracturas por desecación y que condicionan el estado local de esfuerzos alrededor de ellas. Por último contemplan la variación de la mineralogía de las arcillas y de la permeabilidad de los sedimentos que se traducen en variaciones de compresibilidad y llevan al fracturamiento por deformación diferencial.

Lesser-Illades y Cortés-Pérez (1998) discuten la relación extracción de agua subterránea-hundimiento para el caso del centro de la Ciudad de México, en donde mencionan que para el periodo entre 1981 y 1994, se registró un aumento súbito en las tasas de extracción en las décadas de 1940 y 1950, acelerando el hundimiento del terreno y aunque la extracción de agua subterránea disminuyó en los años 1960s hasta cerca de su mínimo histórico, el proceso de subsidencia no se detuvo, ni sus manifestaciones en superficie.

Se reconoce al desequilibrio mecánico como principal disparador de fracturas en sedimentos fluvio-lacustres (Carreón-Freyre et al., 2006). Estos se clasifican en fenómenos naturales (sismos e inundaciones) y antropogénicos: estáticos (sobrecarga por construcción), dinámicos (fatiga de los materiales en vías terrestres) y la despresurización del medio geológico por extracción de agua subterránea. Se tiene además que los eventos generadores de fracturas y fallas tienen variaciones de periodos de actividad; “Las observaciones realizadas en 1996 y 1999-2000 en la Delegación Iztapalapa muestran que el crecimiento de las grietas es permanente, aunque lento y se ha producido en etapas, donde se alternan las de estabilidad y actividad” (Cabral-Cano et al., 2000).

5.3 Modelo conceptual del fracturamiento en la Ciudad de México.

Las condiciones particulares de la Ciudad de México requieren la implementación de un modelo para poder entender los mecanismos de generación y propagación de fracturas, por lo que a continuación se propone un modelo que se adecúa a las condiciones geológicas y antrópicas en la Ciudad de México.

5.3.1 Modelo conceptual en la delegación Iztapalapa.

Cabral-Cano et al. (2000) proponen un modelo conceptual (**Figura 5.1**) en los alrededores del Peñón del Marqués, en la Delegación Iztapalapa. Sin embargo, las condiciones propuestas se ajustan a las condiciones generales de la cuenca: Altos topográficos de origen ígneo de alta competencia mecánica, zonas de transición con mezcla de materiales de competencia intermedia rodeadas de sedimentos (en el medio dúctil) que presentan compresibilidad por desequilibrio mecánico por actividades de extracción de agua subterránea y la consecuente caída del nivel estático. En este modelo se ha considerado la extracción de agua subterránea ($Q=40$ lps en Iztapalapa, que ha generado un hundimiento del terreno de 8 m de 1981 a 1997) junto con abatimientos del nivel piezométrico (14.52 m en 11 años), (Cabral-Cano et al., 2000). Esto genera disipación de la presión de poro en los sedimentos lacustres y consolidación e los mismos, transfiriendo los esfuerzos a la fracción arenosa.

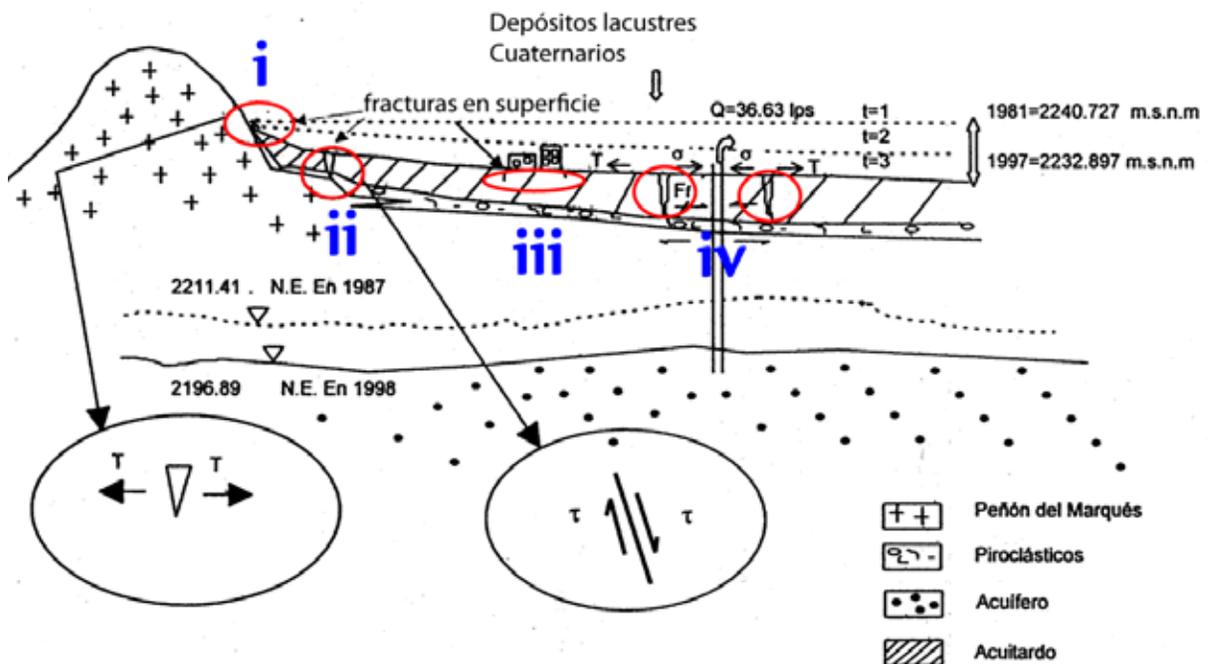
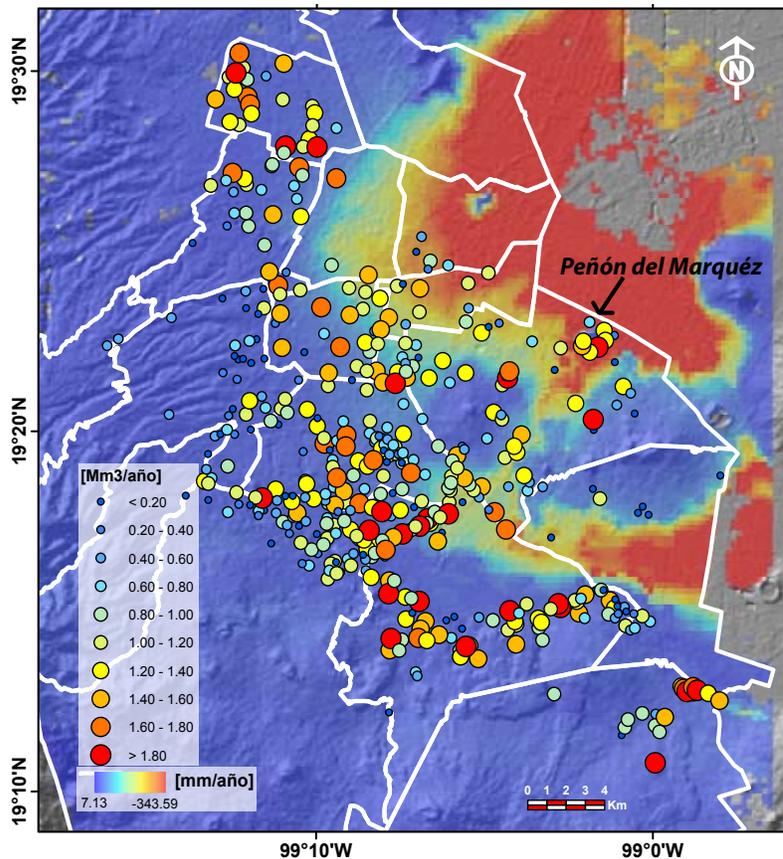
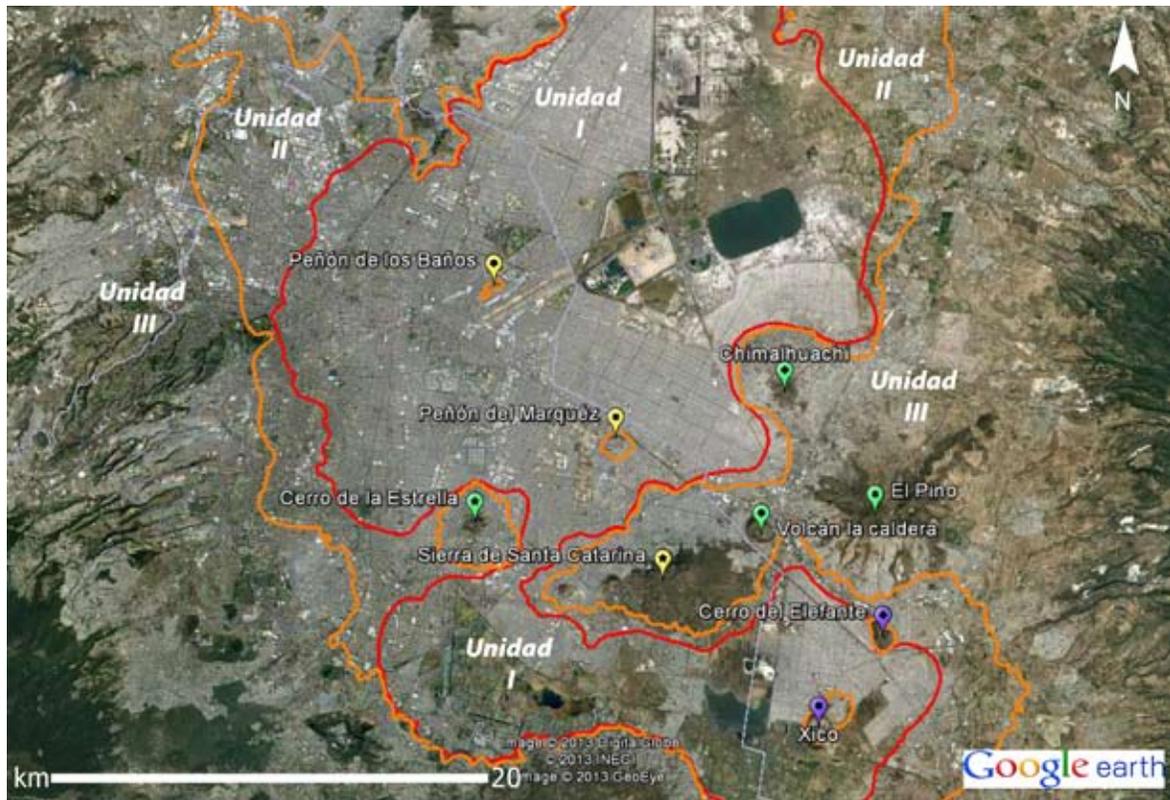


Figura 5.1. Modelo conceptual del fracturamiento en Iztapalapa (modificado de Cabral-Cano et al., 2000).

“Debido a la consolidación del terreno cerca de la zona del contacto expuesto (zona de piedemonte) entre el material volcánico... (y) los materiales compresibles lacustres se inducen esfuerzos de tensión”. Esto genera que en las zonas de contacto o piedemonte se produzcan fracturas (**Figura 5.1, i**). Otras regiones se encuentran afectadas por efectos cortantes debido a la geometría del basamento (**Figura 5.1, ii**). Además, el peso de las estructuras civiles genera carga estática que induce esfuerzos, descompensando mecánicamente, generando fracturas (**Figura 5.1, iii**). Finalmente, el modelo contempla la formación de fracturas de tensión asociadas a las actividades extractivas y abatimiento del nivel estático (**Figura 5.1, iv**) (Cabral-Cano et al., 2000).

5.3.2 Extrapolación del modelo a la Ciudad de México.

Se puede apreciar la congruencia de este modelo con las condiciones generales de la Ciudad de México al observar la zonificación geotécnica de la Ciudad de México, del Gobierno del Distrito Federal publicada en 2004 (GDF, 2004), como se muestra en la **Figura 5.2**. La Unidad I corresponde con las pendientes de las montañas que rodean a la Ciudad e incluyen flujos de lava basálticas, y tobas pumicíticas así como horizontes areno-arcillosos con un alto porcentaje de grava (correspondientes con las Unidad Volcánica Inferior en la porción norte, oriente y poniente de la Ciudad de México, con la Unidad volcánica Superior al oriente y el Cuaternario volcánico al sur). La Unidad II representa la transición entre depósitos lacustres y los macizos rocosas correspondiente con los Depósitos aluviales (Qal) del Cuaternario sedimentario. La Unidad III es la correspondiente a los depósitos lacustres de los Depósitos lacustres (Qla) del Cuaternario Sedimentario, que incluye los depósitos del antiguo Lago de Texcoco, principalmente arcillas suaves y compresibles con relativamente baja permeabilidad. La **Figura 5.3** muestra los volúmenes de extracción de agua para el año 2010 en el Distrito Federal y tiene como fondo la tasa de subsidencia anualizada.



Arriba: Figura 5.2.
Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (GDF, 2004).

Izquierda: Figura 5.3.
Volúmenes de extracción de agua subterránea para 2010 en el Distrito Federal.

Del análisis de la **Figura 5.3** se desprende que la localización de los pozos de extracción no presenta relación directa con la distribución espacial de la magnitud de subsidencia, pero por otra parte, la extracción genera abatimientos en las zonas de lago que sí se correlacionan con procesos de subsidencia en las zonas lacustres.

A estos factores se puede agregar el efecto de carga dinámica y estática propiciada por las vías de comunicación y estructuras civiles. Así también, las obras de transporte colectivo (sistema de transporte colectivo Metro, Metrobús, Tren Suburbano, Tren ligero) aportan componentes dinámicos por vibración y carga.

5.4 Metodología.

Para la realización del presente estudio, se utilizaron datos muestreados en campo por el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Hernández-Espriú et al., 2011; López-Mendoza, 2012), con los cuales se generaron diferentes tipos de diagramas, que combinados con el mapa de gradiente de subsidencia, generan un mapa de orientaciones de fracturamiento.

5.4.1 Características del Muestreo.

En el muestreo se definieron recuadros de 5x5m, definidos con tiza de un color resaltante, la cual también se usó para remarcar las fracturas a medir. Las localidades de estudio (**Figura 5.7**) fueron escogidas estratégicamente por ser lugares en los cuales la afectación a estructuras es de mayor importancia o es conocida la facilidad de medición de las mismas. El material de medición fue tanto afloramientos de roca como pavimento y cemento, debido a que las afectaciones en superficie son una manifestación en superficie que reflejan el comportamiento de los geomateriales en el subsuelo.

5.4.2 Consideraciones.

Algunas características del muestreo que se deben tener en cuenta para la interpretación de las rosetas son las siguientes:

-La selección de las estaciones de muestreo se realizó a partir de criterio experto, que consiste en seleccionar zonas en las cuales se sabe que la calidad de los datos es mayor para obtener mediciones más representativas, en las zonas críticas e históricamente conocidas de ser afectadas por este fenómeno.

-El muestreo realizado en este estudio contempla el levantamiento de datos en roca y en sedimentos no consolidados. Para este último se asume que los datos tomados en banquetas, asfalto, concreto, etc. son reflejo del comportamiento del subsuelo. Esto es una consecuencia de la extensión de la mancha urbana, que impide la toma de datos en afloramientos convencionales.

-Las estaciones de muestreo se consideran puntuales y su locación es limitada por las condiciones de tráfico, acceso a vialidades y ubicación de áreas particulares de acceso restringido, razón por la cual los datos obtenidos deben considerarse con sesgo. Aún así, la selección de los sitios de muestreo y la cantidad de datos recolectados permiten someterlos a tratamiento estadístico.

-Del levantamiento de datos se observa una tendencia muy marcada de los planos a la verticalidad, característica de los mecanismos de fallamiento normal, por lo que se considera a los planos de fracturas con echados verticales (90°).

5.4.3 Manipulación de los datos de orientación de fracturas.

Los datos recabados fueron sometidos a un análisis estadístico, debido a la incertidumbre y variación propios de los sistemas naturales de fracturamiento de las rocas, lo que permite considerar a los datos individuales como grupo y observar las tendencias generales, en vez de enfocarse en las variaciones locales, para poder definir el comportamiento de los datos como grupo.

Para este propósito, con ayuda del programa de uso libre *OpenStereo 0.1.2 devel*, desarrollado en la Universidad de Sao Paulo y descargable en línea (Grohmann y Campanha, 2010), se realizaron tres tipos de diagramas, que son de utilidad en los análisis de geología estructural. Estos son: el diagrama de densidad de líneas, el histograma de frecuencias de las direcciones de rumbo y la Rosa o Roseta de fracturas. Éstos se describen a continuación.

Un diagrama de densidad, tradicionalmente, es una gráfica que muestra la abundancia de polos, que son la representación estereográfica de la línea perpendicular a los planos de fractura, concepto muy recurrido en la geometría descriptiva. En este estudio los datos se consideran usando la regla de la mano derecha. De este modo, se logra congruencia visual entre el diagrama de densidad y el diagrama de rosa o roseta.

Un histograma muestra la frecuencia de las mediciones en clases de 10° , que representan el rumbo de los planos de discontinuidad medidos, concentrando las direcciones equivalentes de NE con SW y de NW con SE para lograr una representación de -90° a 90° . De este modo se puede observar la dirección preferente de los rumbos de los planos de fractura, lo que permite agruparlos en conjuntos y posteriormente definir familias de fracturas.

Un diagrama de roseta, condensa la información de frecuencia por clase con la dirección con respecto al Norte, permitiendo obtener con una rápida inspección visual las clases de mayor frecuencia junto con su orientación.

La ventaja de utilizar las rosetas es que se pueden observar los datos de forma concéntrica que muestra tanto la frecuencia relativa en % por cada clase 10° , así como la dirección preferencial en la que dicha clase se emplaza. En un solo diagrama se resume la frecuencia de los datos por cada clase y además los datos se visualizan con su orientación real al colocarse en un mapa, de manera congruente con las observaciones en campo, gracias a que las clases son delimitadas por radios

Los formatos con los diagramas realizados para cada estación de muestreo se presentan en forma de mosaicos en las **Figuras 5.4, 5.5 y 5.6**.

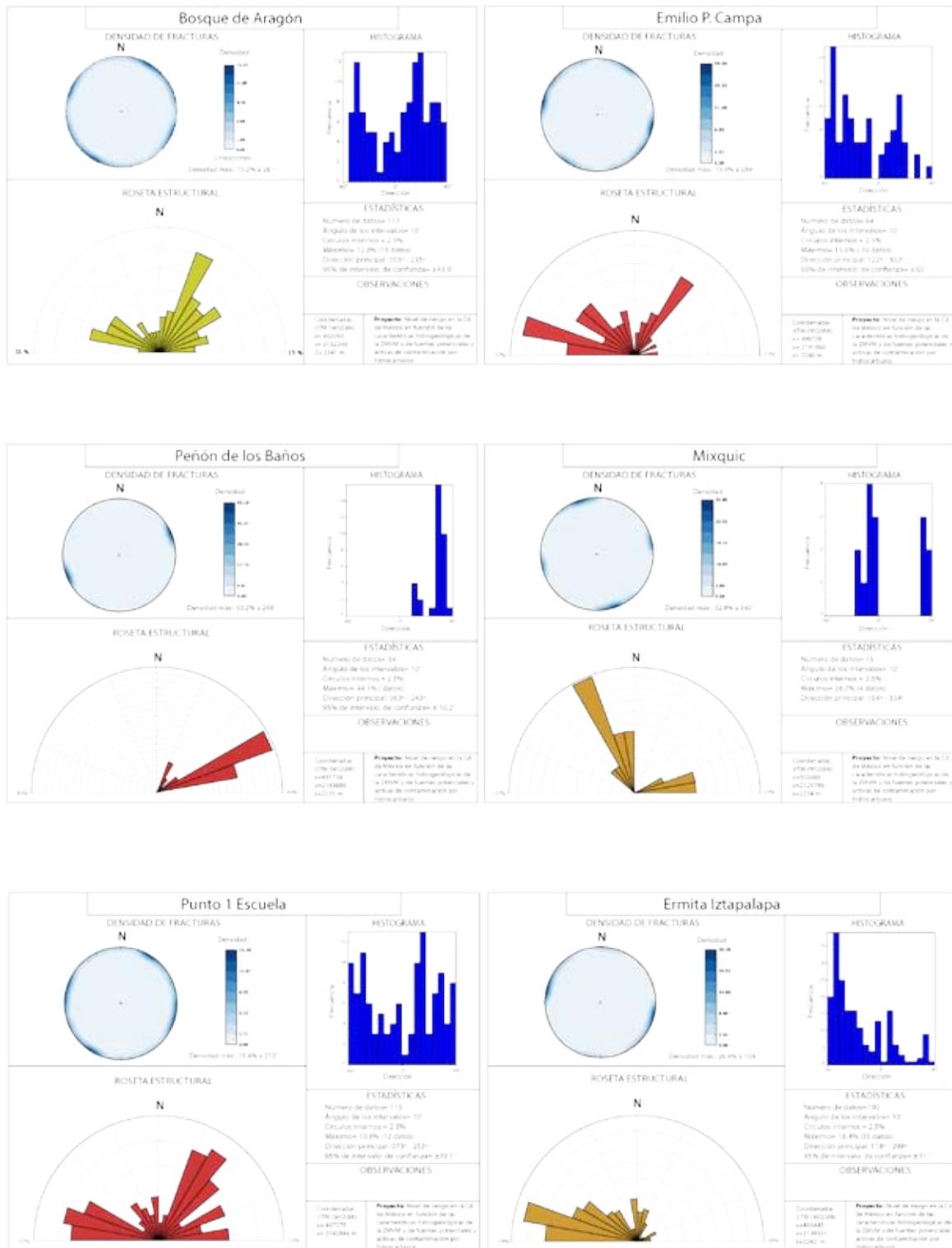


Figura 5.4. Formatos para las estaciones de muestreo.

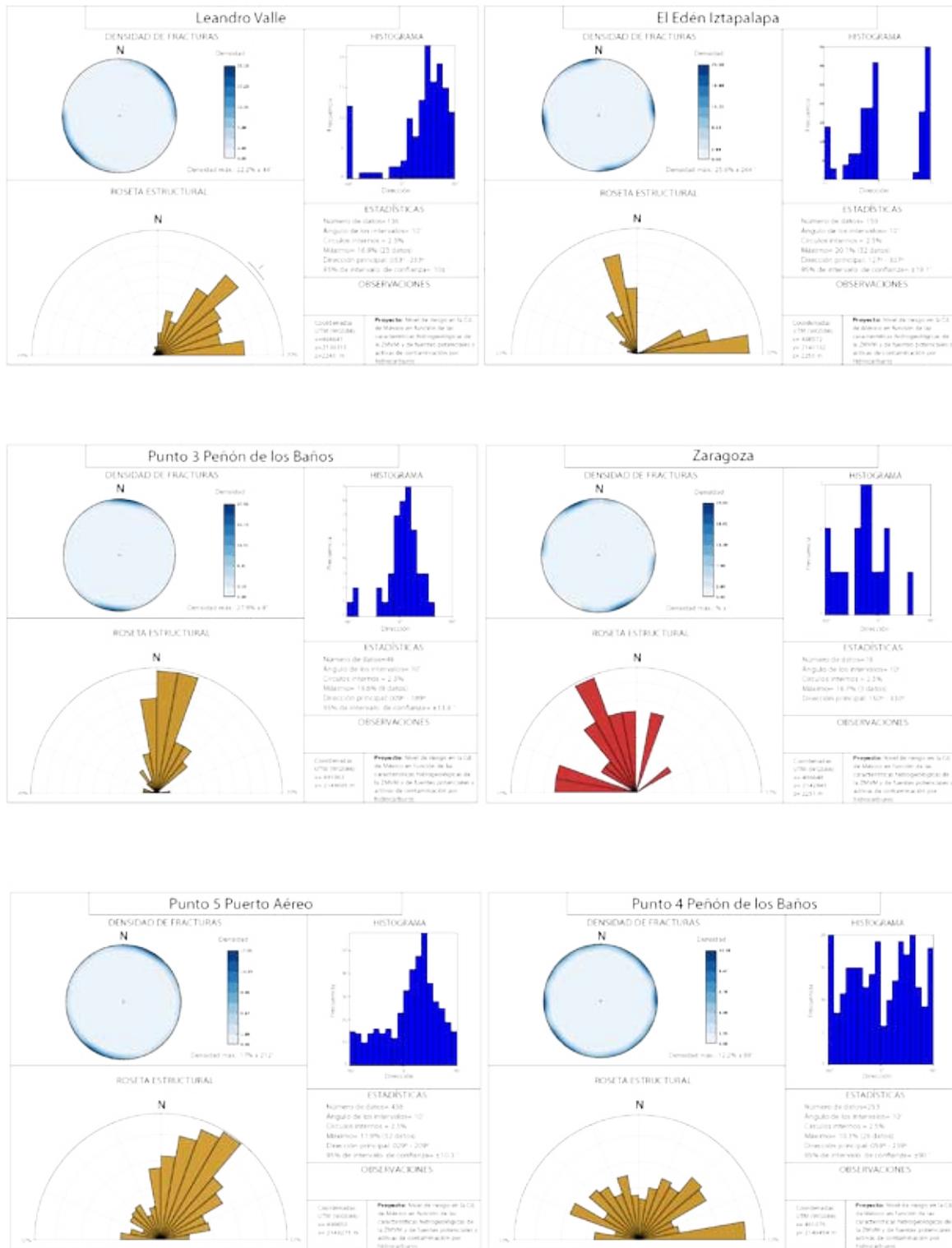


Figura 5.5. Formatos para las estaciones de muestreo.

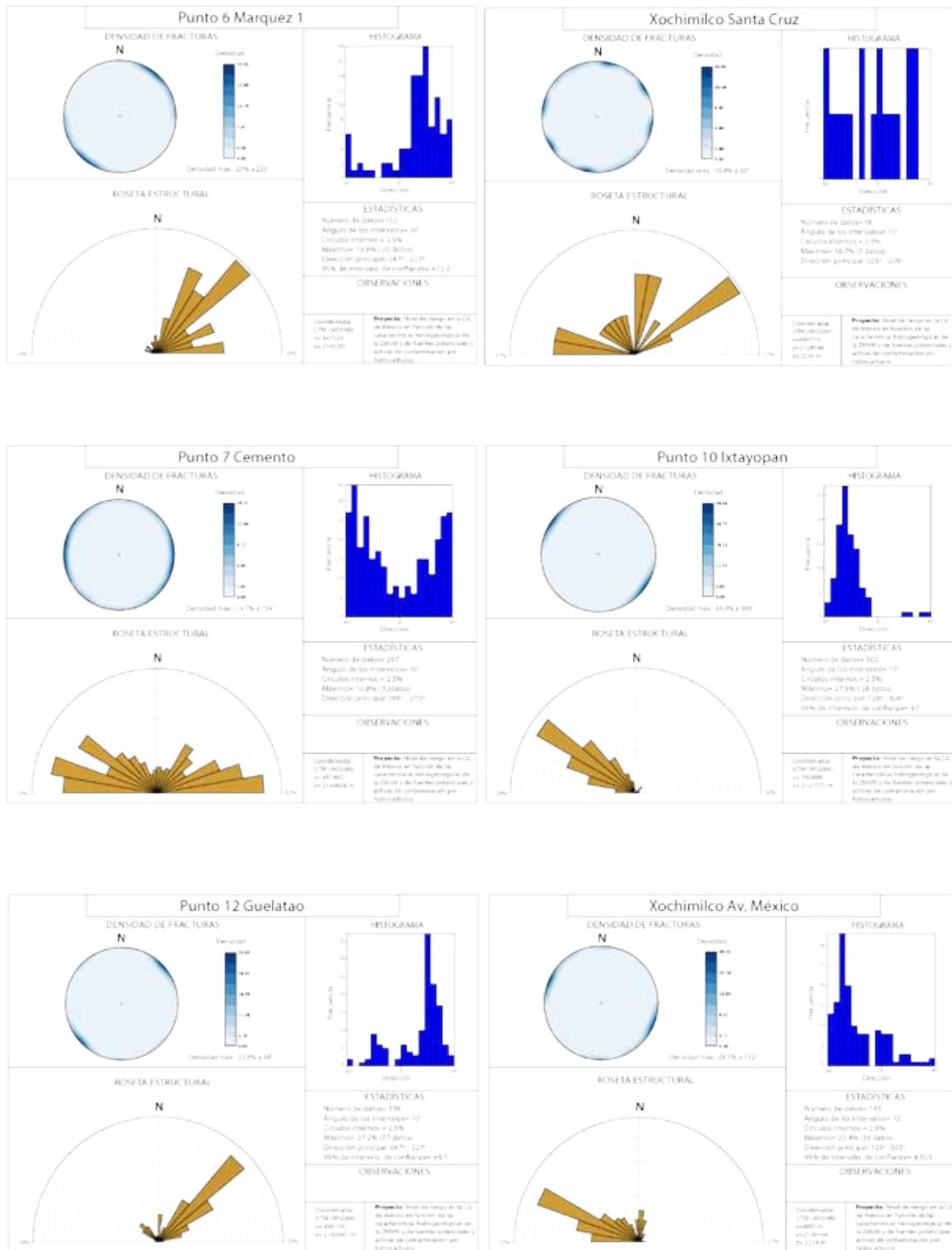


Figura 5.6. Formatos para las estaciones de muestreo.

5.5 Mapa de orientaciones de fracturamiento en zonas selectas del Distrito Federal.

El resultado del trabajo de muestreo de fracturas en zonas críticas del Distrito Federal se presenta en la **Figura 5.7**, en donde se tiene como fondo el mapa de gradiente de subsidencia para el Distrito Federal descrito en el Capítulo 4. Los límites políticos de las delegaciones del Distrito Federal proporcionan el marco de referencia espacial; de Norte a Sur en la parte Este: Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa y Tláhuac son las zonas con mayor magnitud y gradiente de subsidencia.

Las rosetas que tienen un semicírculo color blanco indican estaciones de muestreo en roca y aquellas con un círculo negro señalan estaciones de muestreo en zonas bajas de acumulación de sedimentos. En la parte superior izquierda de cada roseta, se encuentra una etiqueta blanca que indica el número de datos de la muestra en cada estación, y en color azul se muestra una letra se utiliza como identificador en el proceso descriptivo. Además, el color de los pétalos en las rosetas corresponde con el de las zonas de vulnerabilidad del mapa DRASTIC-Sg del capítulo 4, revelando que las zonas de muestreo se encuentran en zonas de Moderada y Alta Vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad. Se puede apreciar que de las estaciones de muestreo elegidas para zonas bajas, la mayoría se encuentra en zonas de alto gradiente de subsidencia, a excepción de las que se encuentran en el sector Sur del mapa, en donde se carece de datos de InSAR pero en realidad se sabe que se presenta el mismo fenómeno.

De la inspección detallada de los diagramas de rosa, se pueden definir varias orientaciones preferenciales que saltan a la vista.

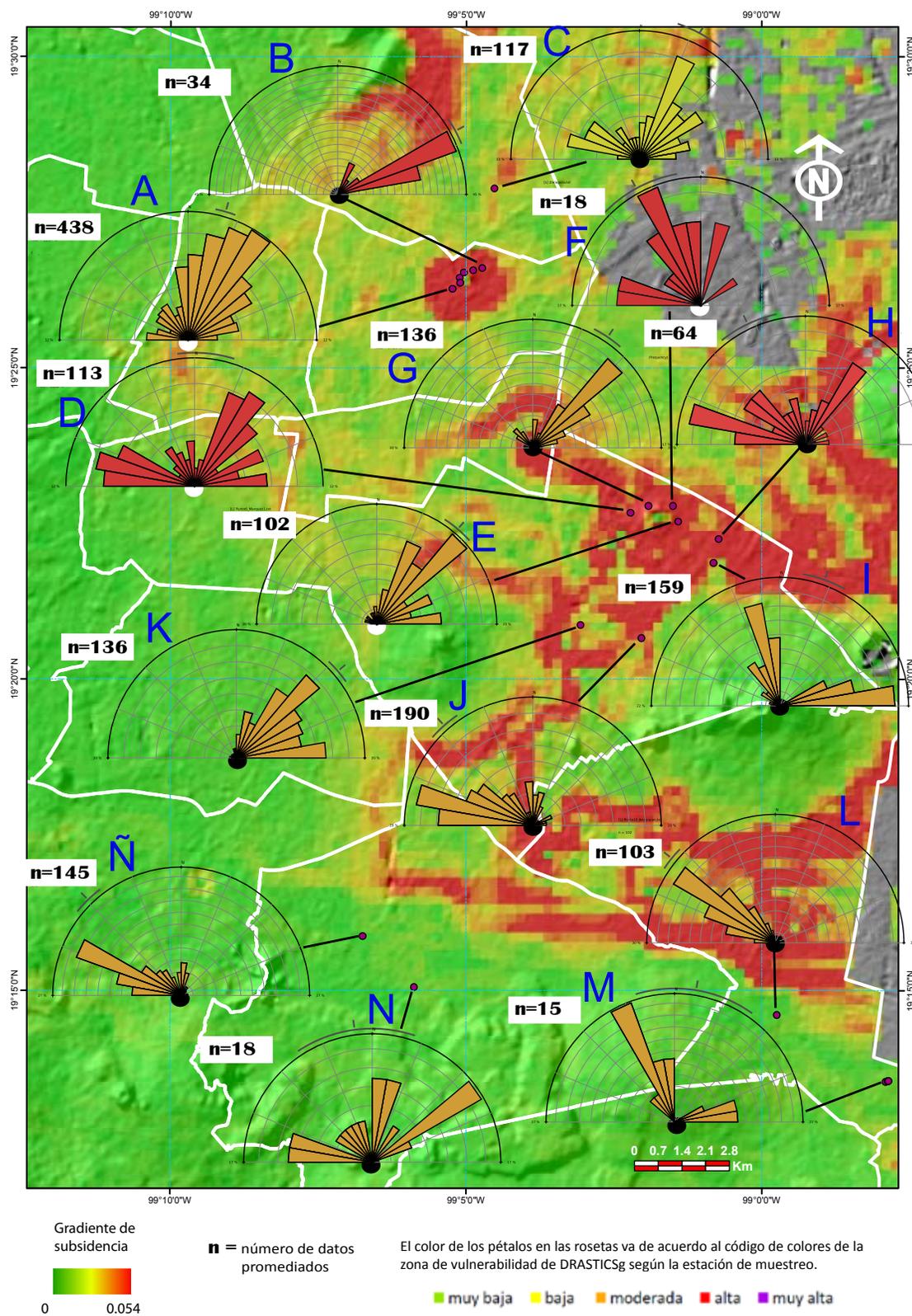


Figura 5.7. Mapa de orientaciones de fracturamiento en zonas selectas del Distrito Federal.

5.5.1 Resultados.

De la observación de la porción Norte, en las cercanías al Peñón de los Baños, se tiene que el fracturamiento muestra un comportamiento independiente entre las estaciones de muestreo en roca y en sedimentos. Esto es reflejo de que su origen se debe a mecanismos diferentes. La estación A (con $n=438$) que es de muestreo en roca, tiene el mayor número de datos recabados en todo el estudio; los datos de esta estación se encuentran enmascarados entre sí, es decir, varias familias de fracturas con diferentes orígenes se encuentran sobrepuestas. El comportamiento de esta estación difiere bastante con el de la estación B ($n=34$), a pesar de su cercanía, siendo que B tiene tendencias muy claras con la moda en $NE65^\circ$. La estación C ($n=117$) tiene modas en $NE25^\circ$ y $NW75^\circ$. La estación A se encuentra en el piedemonte del Peñón del Marqués y la estación C en una zona de mayor espesor de sedimentos.

Con respecto a las rosetas de estaciones en roca ubicadas en las cercanías del Peñón del Marqués, se aprecia que el comportamiento del fracturamiento es variable. En la estación D ($n=113$), las clases modales muestran tendencias hacia $NE35^\circ$ y $NW75^\circ$; en E ($n=102$) la clase modal se orienta hacia $NE45^\circ$; en F ($n=18$) las tendencias tienen preferencia hacia $NW25^\circ$ y $NW80^\circ$. Con respecto a las estaciones de muestreo en zonas bajas de sedimentos no consolidados, se aprecia que en G ($n=136$) la orientación es $NE45^\circ$. Dicha estación de muestreo se encuentra en el flanco NW del Peñón del Marqués.

Del análisis del resto de las rosetas en zonas bajas de sedimentos no consolidados, es difícil hablar acerca de una tendencia regional. Las familias modales varían según el punto de muestreo, siendo en la delegación Iztapalapa, en H ($n=64$), $NW75^\circ$ y $NE35^\circ$, en I ($n=159$), $NW15^\circ$ y $NE85^\circ$, en J ($n=190$), $NW75^\circ$. En la zona de lago entre la Sierra de Santa Catarina y el Cerro de la Estrella, se encuentra la estación K ($n=136$), con clases modales en $NE45^\circ$ y $NE85^\circ$.

En la delegación Tláhuac, en la estación L ($n=103$) la moda se encuentra en $NW55^\circ$ y en M ($n=15$) en $NW25^\circ$ y $NE80^\circ$ y en la delegación Xochimilco, N ($n=18$) tiene como moda $NE55^\circ$ y en Ñ ($n=145$) tiene su clase modal en $NW65^\circ$. Estas últimas

4 estaciones de muestreo aparecen en zonas de bajo gradiente de subsidencia, sin embargo, de los datos de InSAR originales se infiere que en realidad sí se presenta el fenómeno de gradiente de subsidencia, pero las limitantes de cobertura de la información derivada de InSAR (descritas en el Capítulo 4) impiden que esas regiones cuenten con lecturas adecuadas, pero se sabe que el mecanismo de generación de fracturas es el gradiente.

Junto con las familias de fracturas descritas, están presentes otras familias de menor frecuencia que se enmascaran con la presencia de las fracturas dominantes, pero es imposible hacer un estudio minucioso de todas las familias de fracturas encontradas, al menos en escala regional, ya que existen numerosos mecanismos para su formación.

5.6 Conclusiones.

Las tendencias de orientación de las familias de fracturas en zonas bajas no presentan una tendencia regional definida. Cada estación de muestreo en zonas bajas tiene condiciones particulares que determinan la orientación de las familias de fracturas modales, sin embargo, en todas el factor común es el gradiente de subsidencia, por lo que se sabe que su aparición está condicionada al hundimiento diferencial y que su emplazamiento continuará y se propagará a zonas en donde aún no se presenta el fenómeno o donde su presencia no ha tenido gran impacto por las afectaciones a las obras civiles al día de hoy. Alrededor de los altos topográficos se forman familias de fracturas congruentes con la orientación de las pendientes pronunciadas, que son las zonas en las cuales el gradiente de subsidencia es influenciado por la magnitud de subsidencia diferencial en el piedemonte.

El mapa de López-Mendoza (2012) (**Figura 5.8**) muestra en color amarillo las zonas de fracturas y en verde las zonas de fallas en el Distrito Federal producto de su estudio; señala que la aparición de éstas, en su mayoría, se encuentran en zonas de lago y de transición. Al comparar este mapa con la clasificación geotécnica (**Figura**

5.2), se aprecia que efectivamente la aparición de algunas de sus zonas de estudio se ubican en cambios abruptos entre zona de lago y zona de lomas, como es el caso del Peñón de los Baños y el Peñón del Marqués, así como en el piedemonte al norte de la Sierra de Santa Catarina. De la misma manera, se muestra congruencia con el mapa de gradiente de subsidencia (**Figura 5.7**), salvo por la zona Sur, en donde se tienen las limitantes de los datos InSAR expuestas en el Capítulo 4.

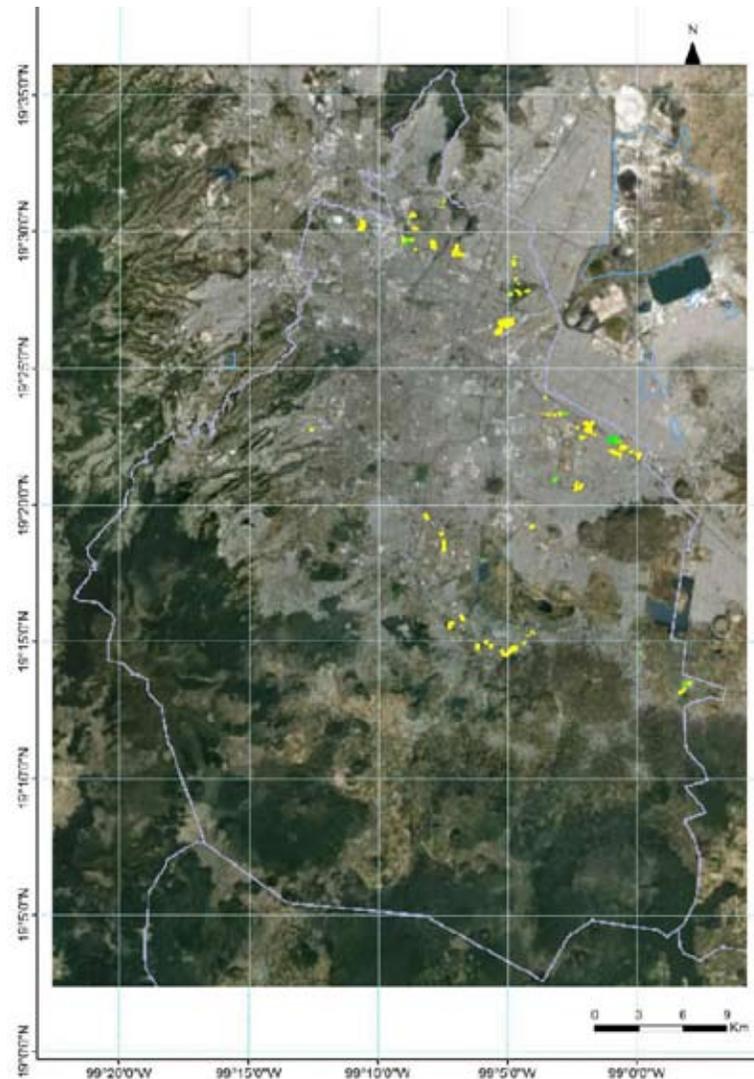


Figura 5.8. Mapa de fracturamiento realizado por López-Mendoza, 2012.

Es decir, por un lado, se delimitaron zonas propensas al fracturamiento por actividades directas en campo como lo expone López-Mendoza (2012) y por el otro según los datos del mapa de gradiente horizontal de subsidencia derivado de InSAR, encontrando congruencia, lo que valida la ubicación de zonas vulnerables al fracturamiento por tratarse de técnicas y criterios independientes que generan resultados congruentes. Del mismo modo, de la **Figura 5.3** se aprecia que de los pozos en los alrededores del Peñón del Marqués, los 6 más cercanos al mismo (Peñón 3, 5, 6, 7, 8 y 9) registraron volúmenes de extracción de agua para 2010 desde ~1.22 hasta valores superiores a los 1.8 millones de metros cúbicos, cuyos conos de abatimiento influyen en el comportamiento local del gradiente de subsidencia. Sin embargo, la presencia de pozos de extracción en otras zonas de la Ciudad no condicionan la aparición de gradiente de subsidencia, ni viceversa. La presencia de un mayor gradiente de subsidencia está condicionada al marco geológico y al abatimiento del nivel estático a nivel regional.

El análisis estadístico del fracturamiento en la Ciudad ayuda a mejorar la visualización de las tendencias generales, en los materiales geológicos y en los materiales de origen antropogénico, que heredan el comportamiento del subsuelo, así como a prever escenarios futuros.

Capítulo 6.

CAPÍTULO 6. CORRELACIONES SUBSIDENCIA GPS-INSAR Y ABATIMIENTO-SUBSIDENCIA.

En este capítulo se discute la relación existente entre datos de 9 estaciones de GPS en la zona metropolitana de la Ciudad de México y los datos de PSIs derivados del análisis InSAR, así como la relación existente entre el abatimiento del nivel freático y la subsidencia.

6.1 Introducción.

6.1.1 Correlación de subsidencia GPS - InSAR.

A partir de información de 9 estaciones de GPS (**Figura 6.1, A**), se realizaron comparaciones de los históricos de movimiento del terreno en la componente vertical y de los PSIs en una zona de influencia de 300 m de radio.

6.1.2 Correlación subsidencia - abatimiento.

A partir de la información de pozos de extracción de agua disponible del proyecto CONACyT-ICyTDF-GDF 121128 (Hernández-Espriú et al., 2011), se extrajeron aquellos cuya información histórica del nivel freático del sistema acuífero de la Ciudad de México presentan mayor consistencia, es decir, aquellas mediciones tienen datos suficientes (varias observaciones) y con tendencia claramente definida. Con este criterio, se obtuvieron 180 pozos, de los cuales, el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM obtuvo además la tasa de abatimiento para cada histórico (Hernández-Espriú et al., 2011).

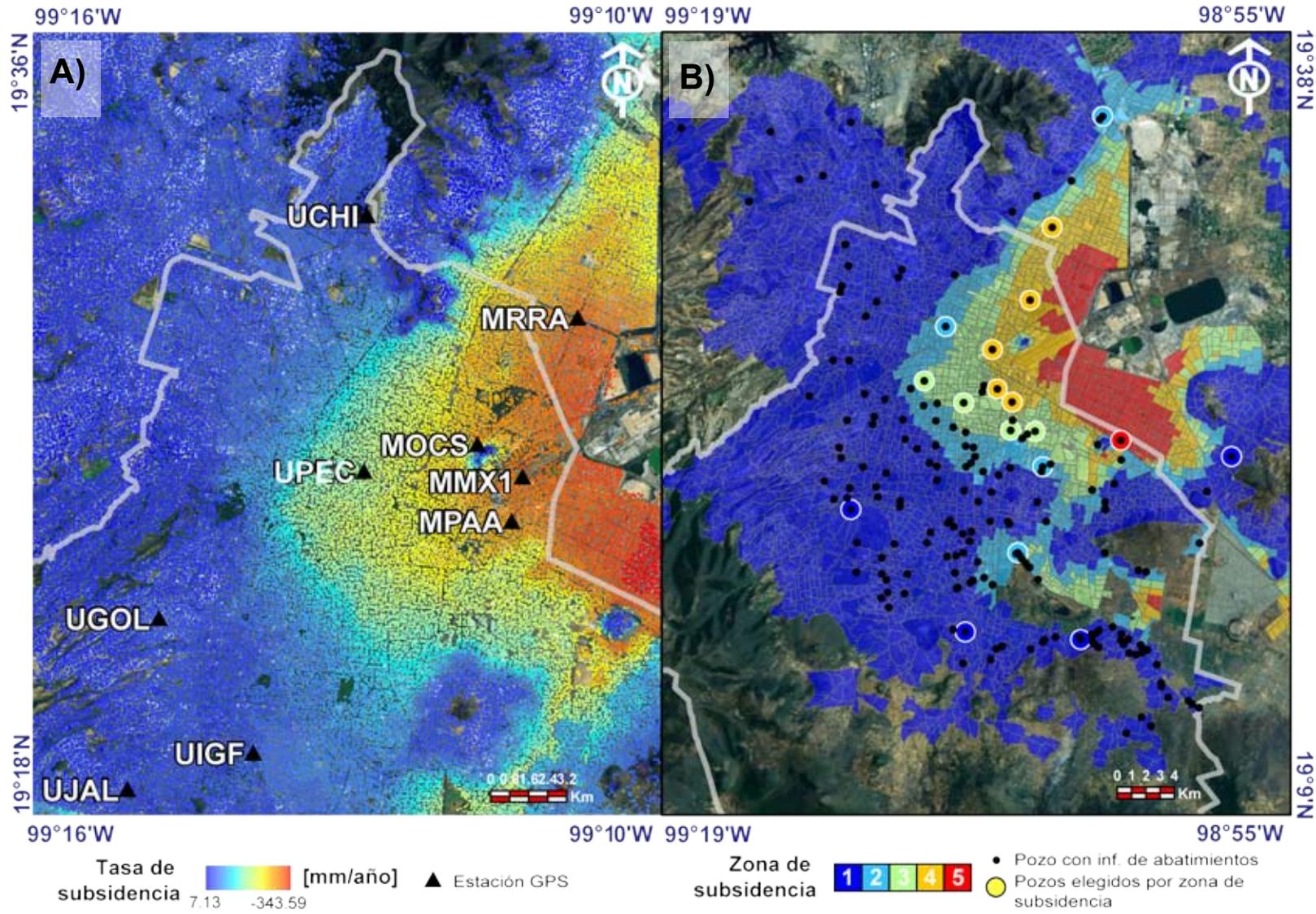


Figura 6.1. A) Acercamiento de la nube SqueeSAR; B) Zonificación de tasa de subsidencia por AGEB y pozos selectos.

Del proceso de asignación de etiquetas de magnitud y gradiente horizontal de subsidencia, para las áreas AGEBs propuse una zonificación por zonas de muy baja, baja, media, alta y muy alta tasa de subsidencia, identificada del 1 al 5 respectivamente. En este mapa (**Figura 6.1, B**) se muestra la ubicación de estos pozos que presentan registros históricos de abatimientos y de ellos se seleccionaron 17 pozos, siendo los casos más representativos por cada zona. En las zona 1 (de muy baja subsidencia) la abundancia de pozos con históricos disponibles (y de pozos en operación) es mayor y disminuye la cantidad de pozos disponibles hacia la zona 5 (de muy alta subsidencia), en donde solamente hay un solo pozo disponible. La distribución de los pozos con información histórica disponible y los seleccionados por zona de tasa de subsidencia se muestran en el sector derecho de la **Figura 6.1, B**.

6.2 Análisis GPS-InSAR.

6.2.1 Metodología.

Se graficaron las series históricas registradas por las estaciones de GPS y de los PSIs ubicados dentro de un radio de 300 m alrededor de cada estación de GPS. La abundancia de retrodispersores permanentes PSIs por cada estación de GPS varía debido a que la existencia de los PSIs depende de la persistencia de coherencia a lo largo de diferentes escenas SAR y de otros factores (ver Capítulo 3). En las gráficas resultantes (**Figuras 6.2, 6.3 y 6.4**) el tiempo medido en años se mide en el eje “x” y la deformación del terreno se mide en el eje “y” en milímetros. Las mediciones derivadas del GPS y del PSI ubicado en el mismo punto son congruentes cuando las pendientes en las gráficas respectivas son similares, a pesar de que no se traslapen, debido a que sus puntos de inicio/fin de la medición de deformación pueden diferir en tiempo. Las pendientes del GPS y de cada PSI representan su magnitud de subsidencia. Se incorporó una gráfica en miniatura que muestra las tasas de subsidencia del GPS, los PSIs y las celdas del raster de tasa de subsidencia (descrito en el Capítulo 3 de esta tesis) para los radios de influencia de cada estación GPS.

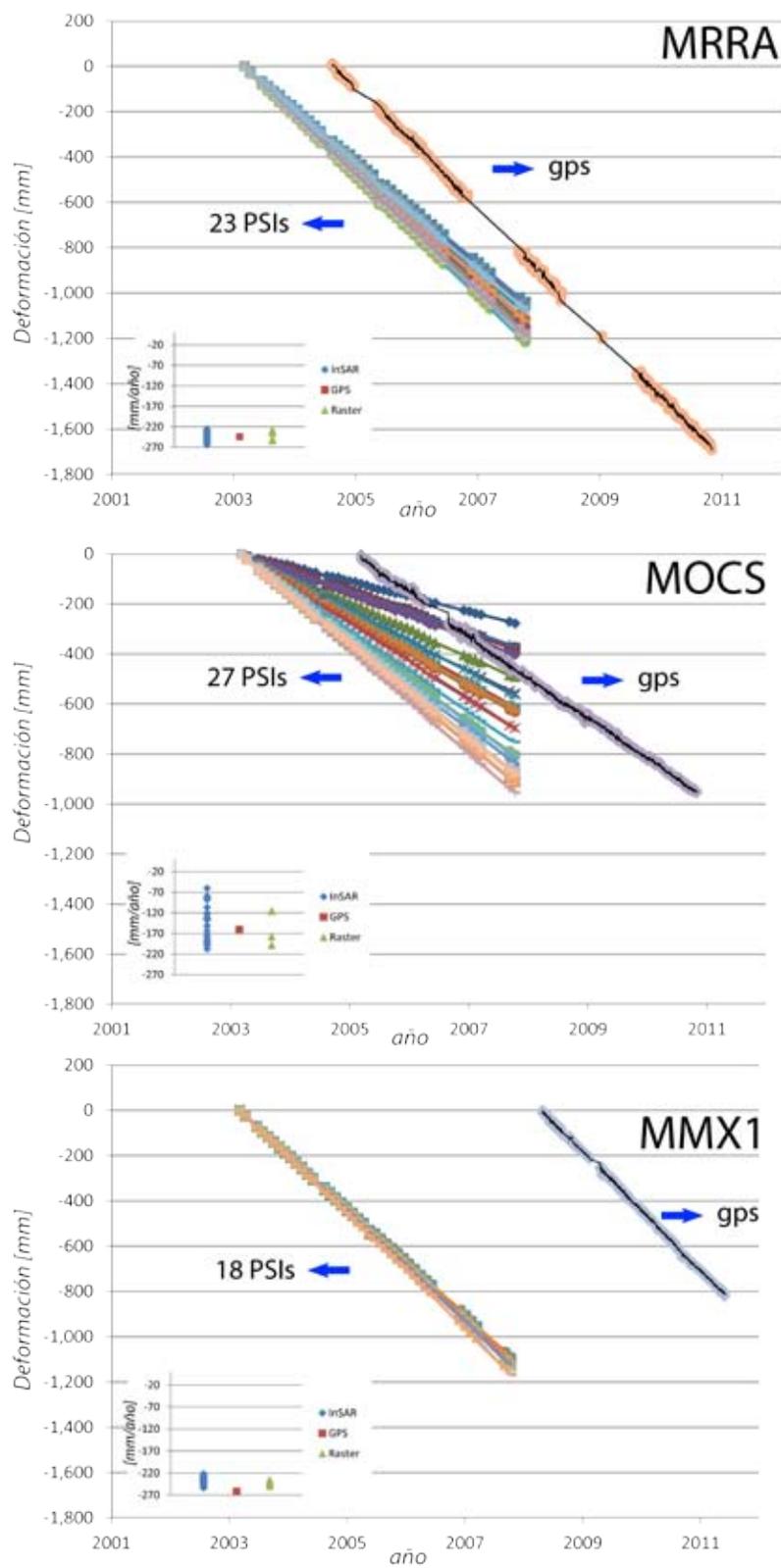


Figura 6.2. Series históricas de GPS y PSIs para MRRA, MOCS y MMX1.

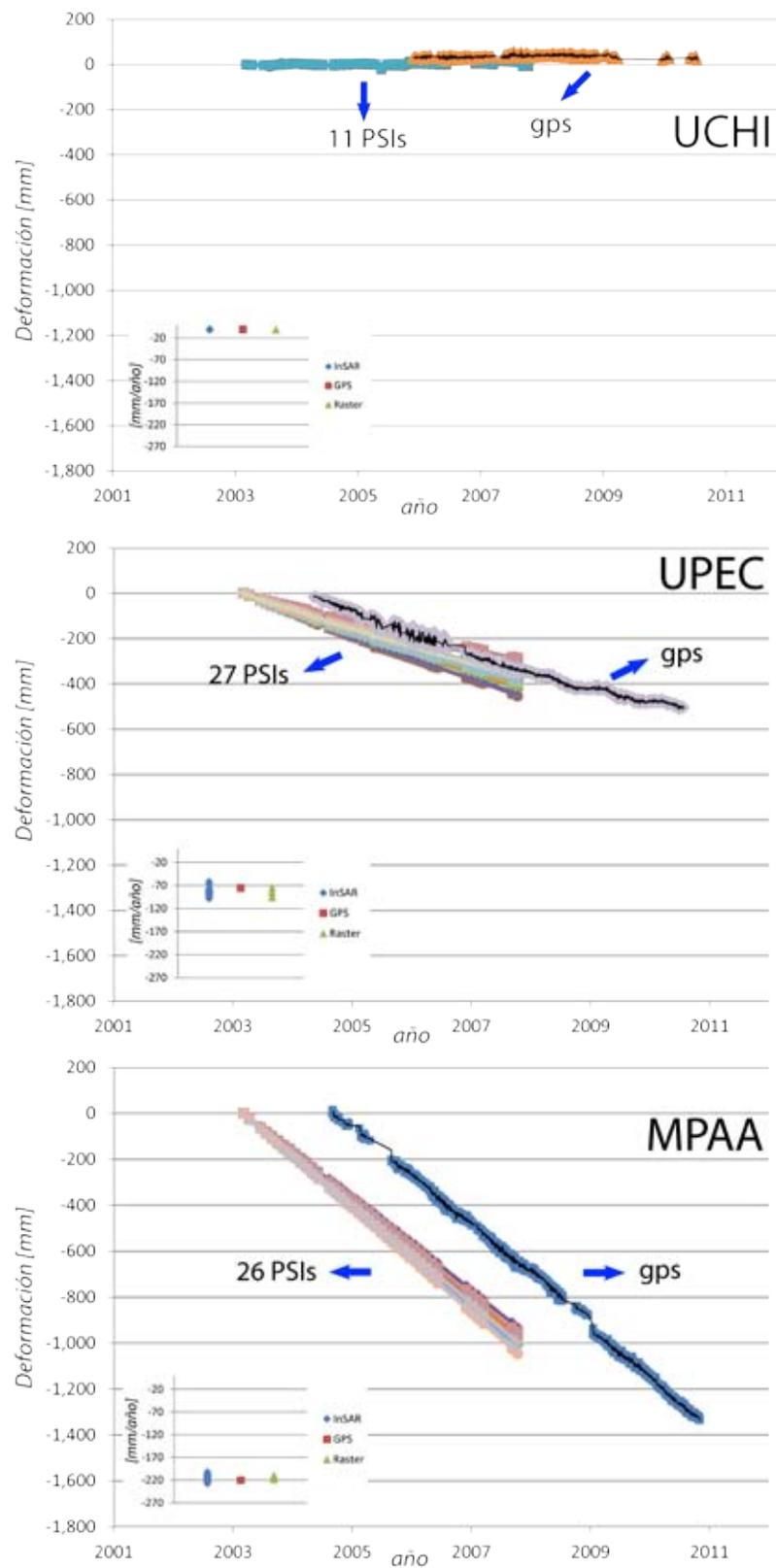


Figura 6.3. Series históricas de GPS y PSIs para UCHI, UPEC y MPAA.

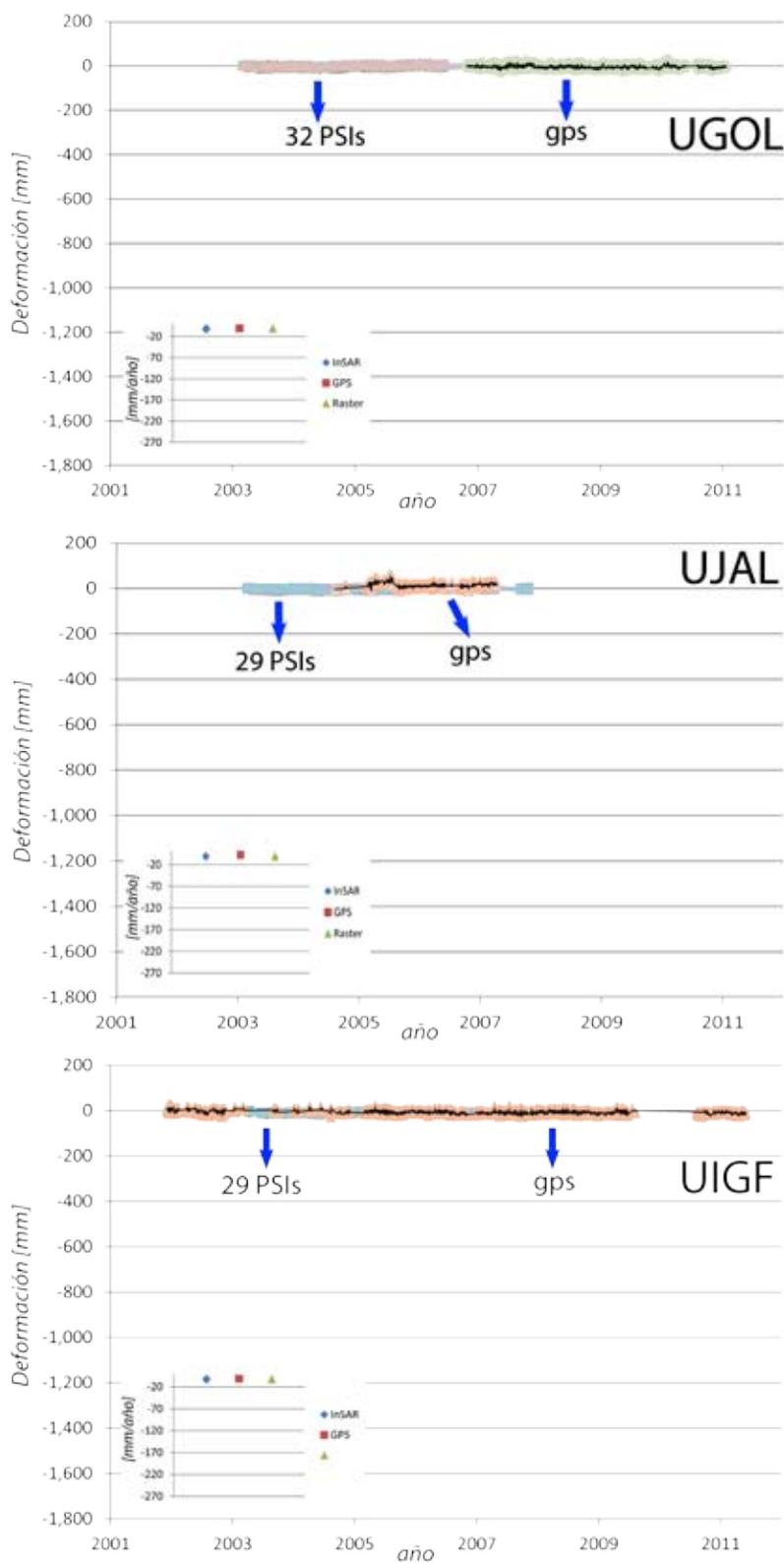


Figura 6.4. Series históricas de GPS y PSIs para UGOL, UJAL y UIGF.

6.2.2 Resultados.

Las gráficas resultantes se aprecian en las **Figuras 6.2, 6.3 y 6.4**. En todos los casos los ejes de las gráficas están a la misma escala. Las mediciones de GPS y de PSIs tienen un comportamiento lineal con variaciones de menor escala que se consideran despreciables. La pendiente de cada serie de tiempo representa la tasa de subsidencia registrada para ese punto: la congruencia y traslape de los PSIs muestra que, para esa estación de GPS, los puntos circundantes tienen componentes de movimiento vertical similares; cuando las series de tiempo de los PSIs muestran dispersión y forman “abanicos” quiere decir que los puntos alrededor de la estación de GPS tienen diferentes tasas de subsidencia. Es precisamente cuando se aprecia la aparición de abanicos en las series de tiempo de los PSIs que se aprecian valores altos de gradiente horizontal de subsidencia y que es entendible porque resultan de la alta variabilidad espacial de la magnitud de subsidencia.

En la **Figura 6.1** se observa la ubicación de cada estación de GPS con los PSIs circundantes. Las estaciones MRRA, MOCS y MMX1, cuyas gráficas se encuentran en la **Figura 6.2** se encuentran en zonas de alta tasa de subsidencia, con valores entre 170 y 270 mm/año, como lo indican las pendientes de los GPS; sin embargo, se observa que los 18 PSIs circundantes a MMX1 presentan un comportamiento casi idéntico, lo que provoca el traslape de sus series de tiempo y de los puntos en la gráfica miniatur de pendientes. En MRRA se puede apreciar que los datos de PSIs generan la aparición de un pequeño abanico en las series de tiempo. En MOCS es evidente que el comportamiento de los 27 PSIs circundantes a la estación de GPS varía, generando un abanico muy abierto y por lo tanto un alto gradiente horizontal de subsidencia. En resumen, las mediciones de los GPSs en las tres estaciones muestran altos valores de subsidencia, en MMX1 los PSIs muestran subsidencia a las mismas tasas, en MRRA se forma un abanico por la subsidencia diferencial de puntos vecinos y en MOCS se forma un abanico abierto, que muestra gran dispersión en las series de tiempo de los PSIs. Esto se debe a que MRRA se encuentra en zona de lago, generando en MRRA un gradiente moderado, mientras que MMX1 se encuentra cercano al piedemonte

del Peñón de los Baños, provocando que los puntos PS dentro de un radio de 300 m puedan proveer información tanto del Peñón de Iso Baños cuya deformación es nula como de la zona de lago, combinación de factores que genera la aparición del gradiente de subsidencia pronunciado.

La **Figura 6.3** muestra que las observaciones en la estación UCHI corresponden a una deformación prácticamente nula (tasas de subsidencia cercanas a 0 mm/año), tanto en el GPS como en los PSIs. En las inmediaciones de la estación UPEC se aprecia una mayor tasa de subsidencia (80 mm/año) por parte del GPS y la formación de un abanico moderado en los PSIs, mientras que en MPAA se observa una tasa de subsidencia cercana a 220 mm/año con la formación de un abanico moderado en los datos de los PSIs. De la comparación de MPAA y UPEC se aprecia que a pesar de que la tasa de subsidencia es de más de 1.5 veces mayor que en MPAA, se genera un mayor gradiente de subsidencia en UPEC. Esto es, que el gradiente de subsidencia no se correlaciona con las mayores tasas de subsidencia sino con la mayor dispersión de la magnitud en su entorno inmediato, siendo que tanto UPEC como MPAA se encuentran en zona de Lago.

La **Figura 6.4** muestra las gráficas de las estaciones UGOL, UJAL y UIGF, las cuales comparten con UCHI la característica de encontrarse en zonas estables con congruencia de deformación prácticamente nula entre las mediciones de GPS y los PSIs, y que es apreciable en el traslape de las series de tiempo. Estas zonas no presentan magnitud de subsidencia significativo y tampoco la aparición de gradiente en su zona aledaña.

6.3 Correlación subsidencia - abatimiento del nivel estático.

6.3.1 Metodología.

Por cada pozo seleccionado por zona de tasa de subsidencia, se seleccionaron los puntos de PSInSAR dentro de un radio de 120 m y se extrajeron los valores históricos de subsidencia correspondientes. La combinación de las series de tiempo

de abatimiento y de PSInSAR permitieron diseñar gráficas de dos ejes, con el tiempo en el eje “x” medido en años y un doble eje “y”, con valores de profundidad del nivel estático media en metros del lado izquierdo y valores de subsidencia del terreno en la componente vertical medido en milímetros del lado derecho.

6.3.2 Resultados.

Las gráficas resultantes por cada zona de tasa de subsidencia se muestran en las **Figuras 6.5, 6.6 y 6.7**. Las imágenes tienen un identificador por zonas de tasa de subsidencia, Z5 para la zona 5 (de muy alta tasa de subsidencia) hasta llegar a la Z1 para la zona 1 (de muy baja tasa de subsidencia). La escala de colores empleada es la misma que en el mapa de clasificación por tasa de subsidencia mostrada en la **Figura 6.1**. En negro se muestran las series de tiempo obtenidas de los PSIs.

En la **Figura 6.5** se muestra el único histórico de abatimiento para la zona 5 y los 5 históricos disponibles para la zona 4. Las series de tiempo son muy completas excepto para dos de ellas que carecen de mediciones previas al 2006, y para los cuales la tasa de abatimiento registrada es la menor del grupo. Las **Figuras 6.6 y 6.7** muestran los históricos de la zona 3 a la zona 1; los históricos para estas regiones son muy completos. Los correspondientes a la zona 3 muestran congruencia en las mediciones de P.N.E. con variaciones menores de recuperaciones y abatimientos, pero siguiendo la tendencia general de abatimientos del nivel estático, al igual que los históricos en la zona 2. Para el caso de la zona 1 las tendencias se vuelven menos evidentes, las etapas de recuperación y abatimientos se extienden en tiempo y se aprecian tendencias de recuperación del nivel estático a través del tiempo.

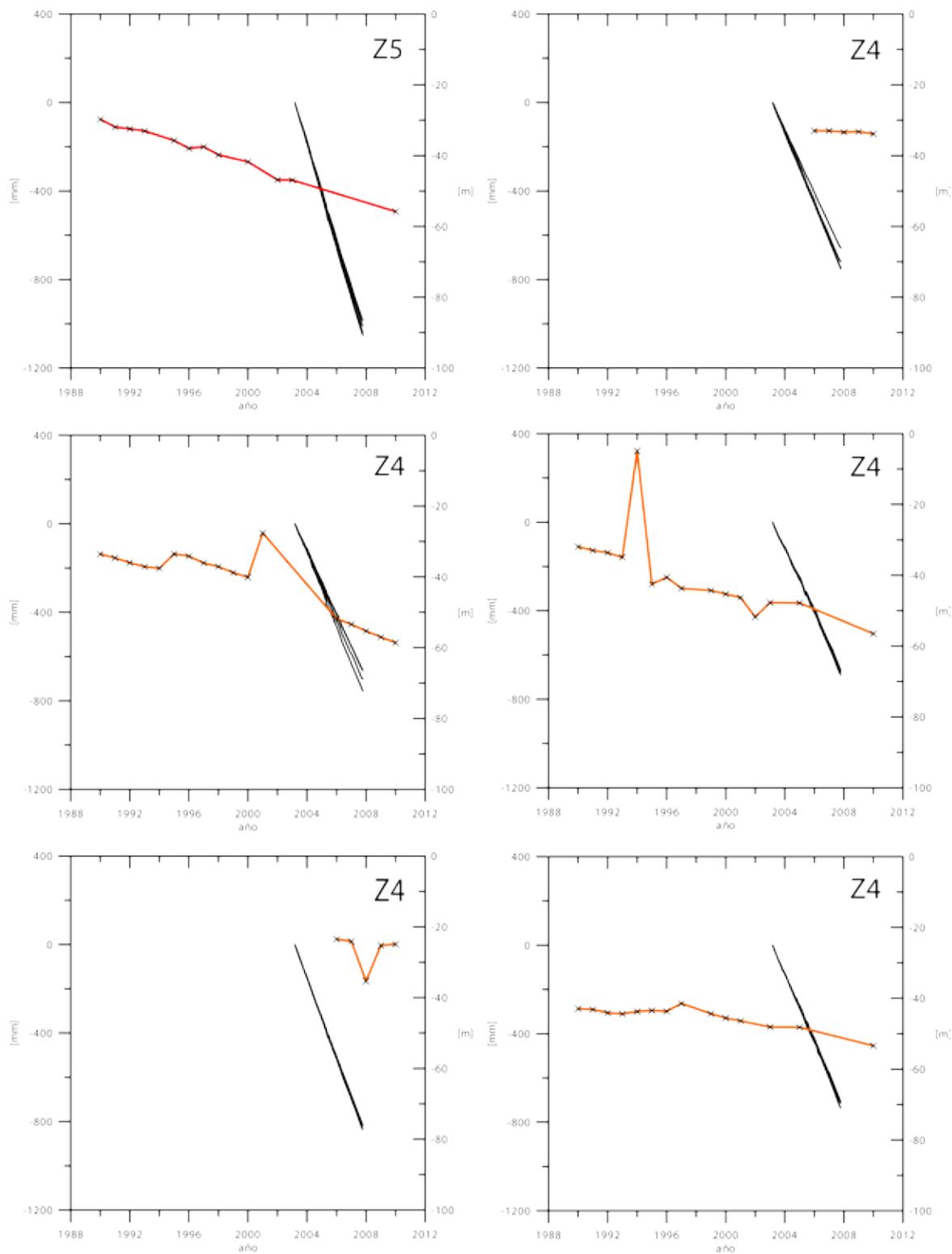


Figura 6.5. Históricos de subsidencia y abatimientos del nivel estático para Z5 y Z4.

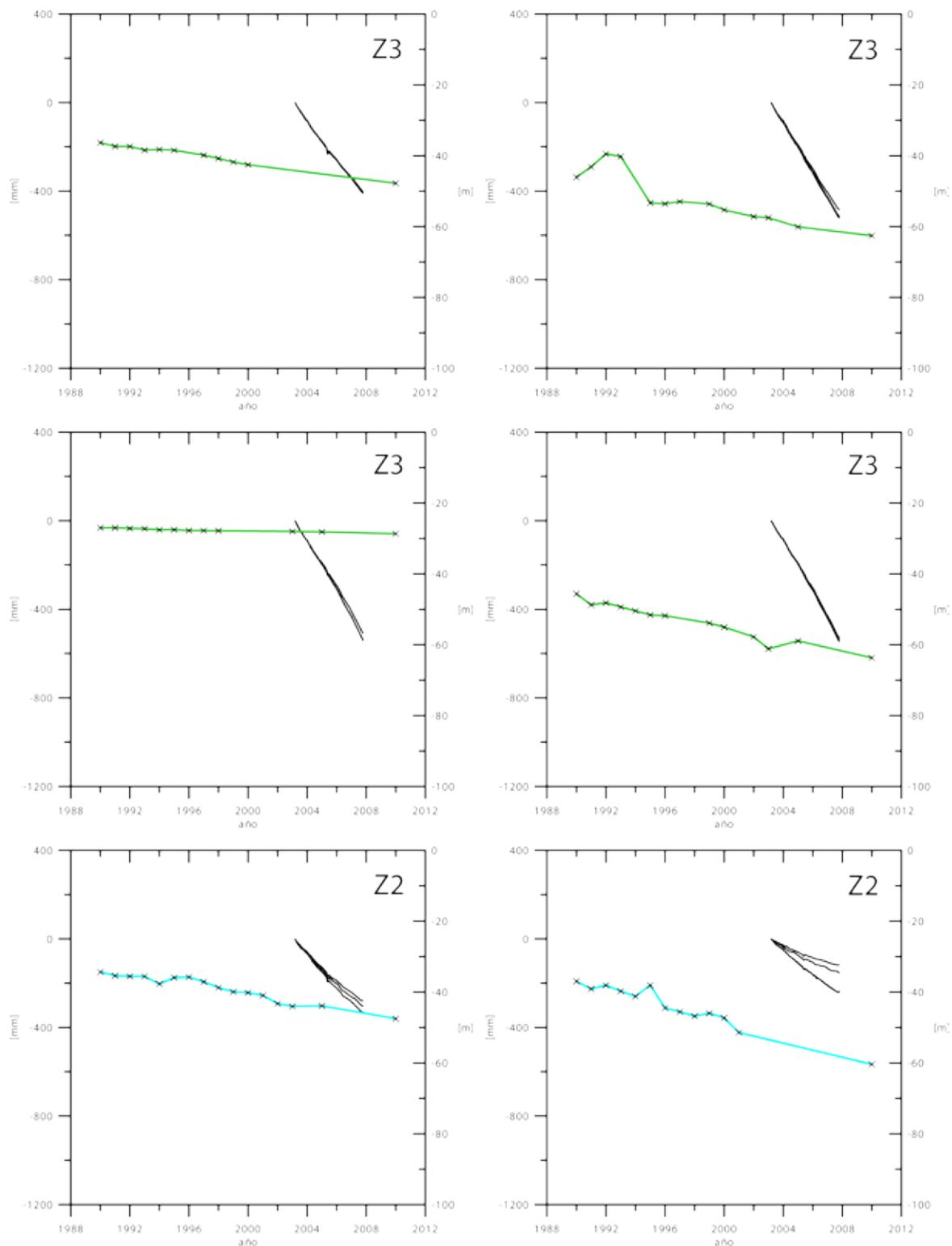


Figura 6.6. Históricos de subsidencia y abatimientos del nivel estático para Z3 y Z2.

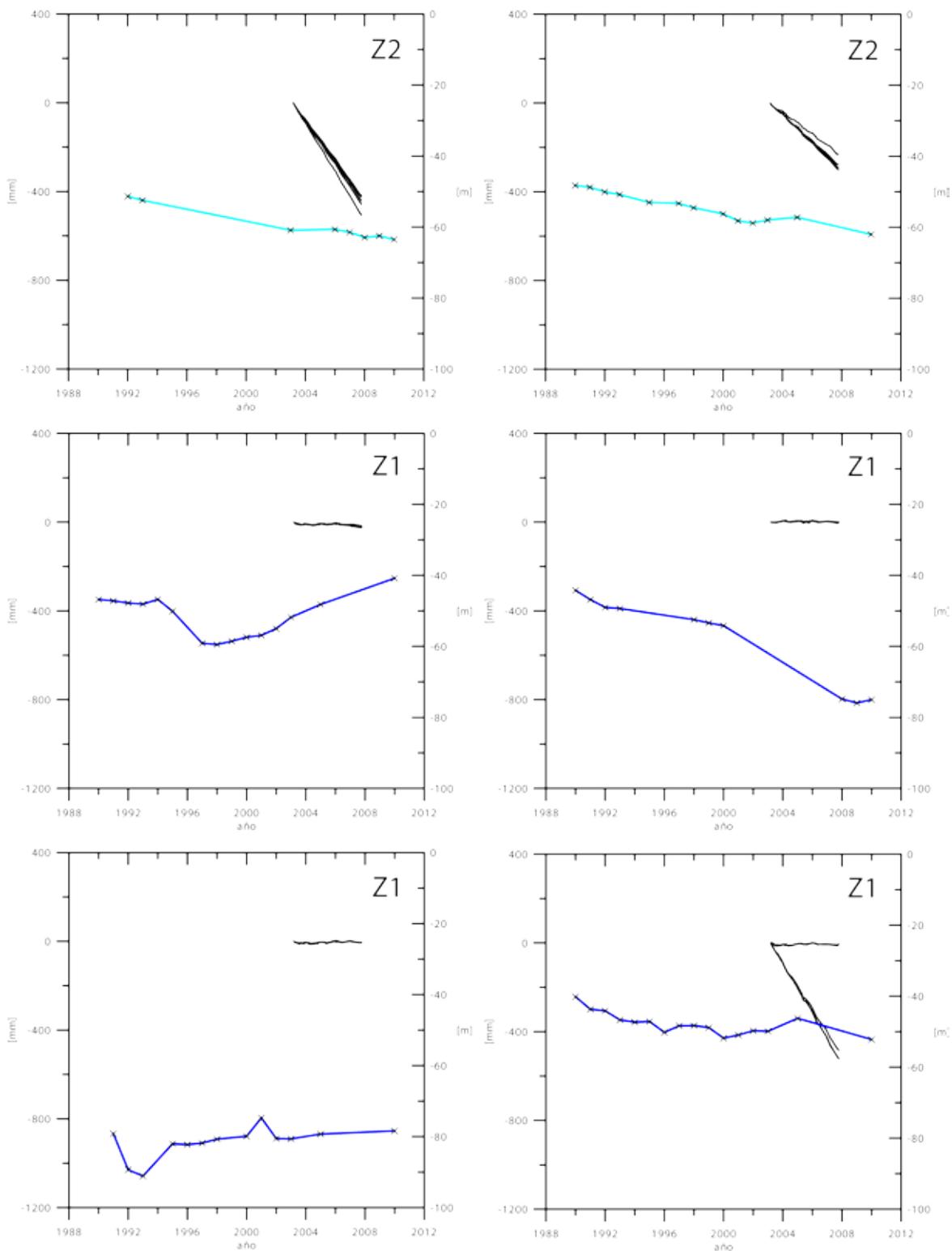


Figura 6.7. Históricos de subsidencia y abatimientos del nivel estático para Z2 y Z1.

En la **Figura 6.8** se agrupan las gráficas por zona, donde se observa que las tendencias de abatimientos para Z5 y Z4 son muy similares, con profundidades del nivel que evolucionan de 40 a 60 metros aproximadamente, salvo para los dos históricos sin datos previos al 2006. En Z3 no se aprecia un agrupamiento de los históricos de P.N.E., cuyo comportamiento incluye un nivel estable en el tiempo. Para Z2, el arreglo se vuelve un tanto más compacto con abatimientos de entre 15 y 22 metros y en Z1 no se aprecia una tendencia clara, pero destaca las recuperaciones del nivel de poca duración y globales. Estas tendencias indican que en zonas subsidentes, a abatimientos similares se asocian tasas de subsidencia diferentes, como se observa en la **Figura 6.9** que muestra los históricos de abatimiento de las 5 zonas.

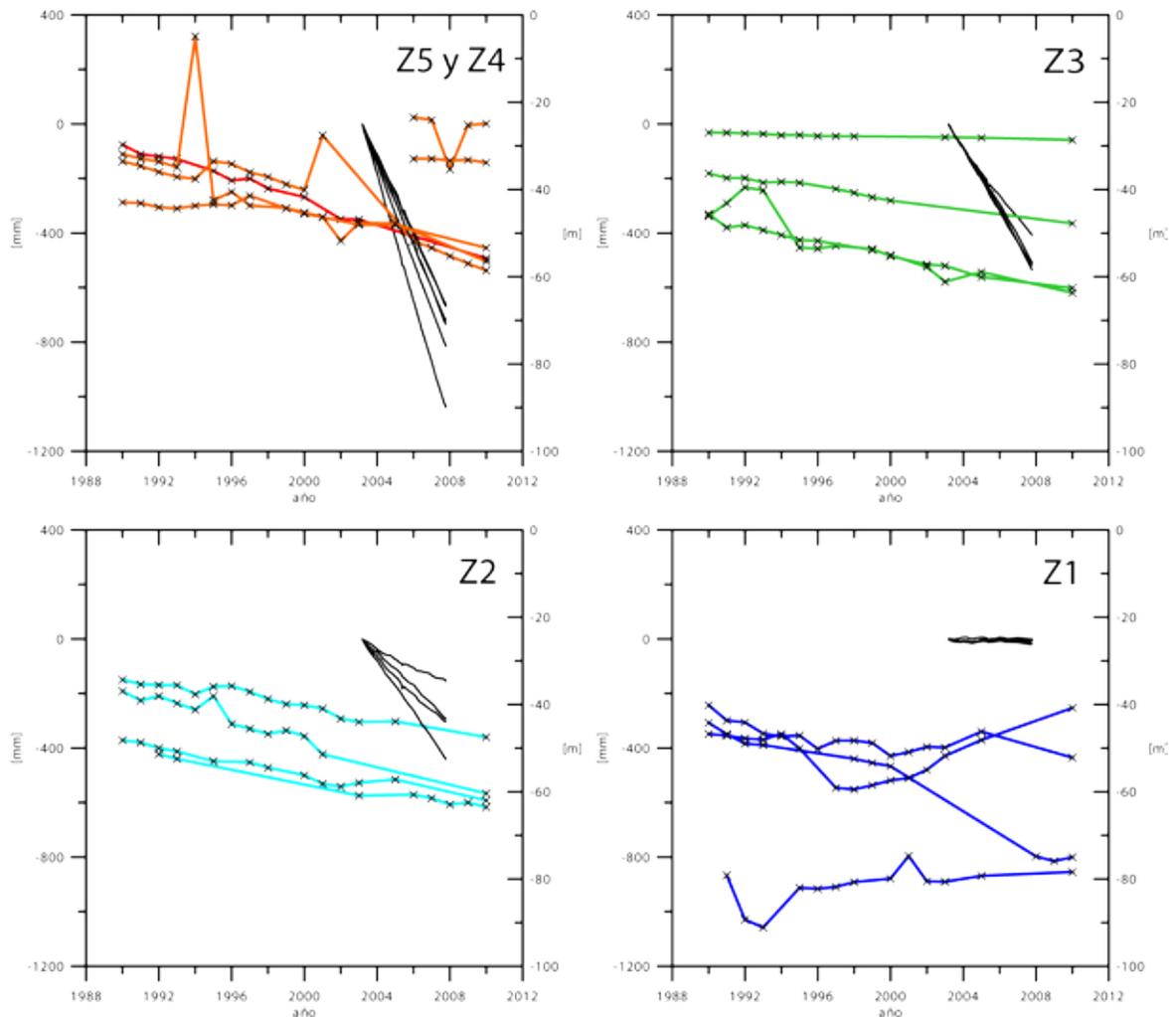


Figura 6.8. Históricos agrupados por zonas.

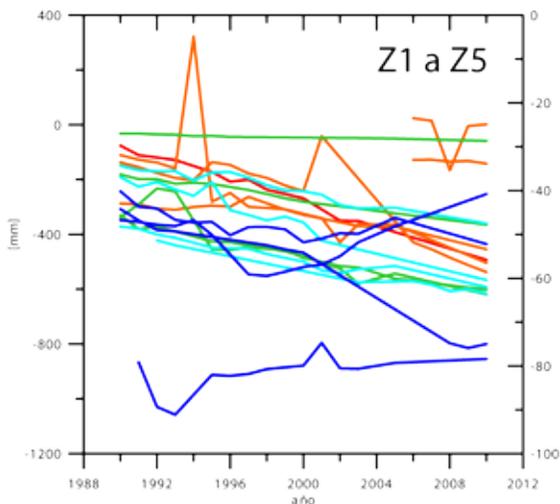


Figura 6.9. Abatimientos Z1 a Z5.

Adicionalmente, se elaboró una gráfica en donde se aprecia en el eje “x” la tasa de abatimiento y en el eje “y” la tasa de subsidencia para cada uno de los pozos con información histórica disponible de P.N.E. y los pozos seleccionados por zona de tasa de subsidencia, como se muestra en la Figura 6.10. En esta gráfica se marcan dos pozos correspondientes a las menores tasas de abatimiento anual para

la Zona 4; estos datos corresponden a los históricos sin datos previos al 2006, por lo que pueden estar mostrando tendencias poco representativas. El agrupamiento de los datos muestra tendencias de mayores abatimientos en las zonas 5 y 4 y menores abatimientos en la zona 3 y 2, en donde los datos se agrupan. Para la Zona 1, los

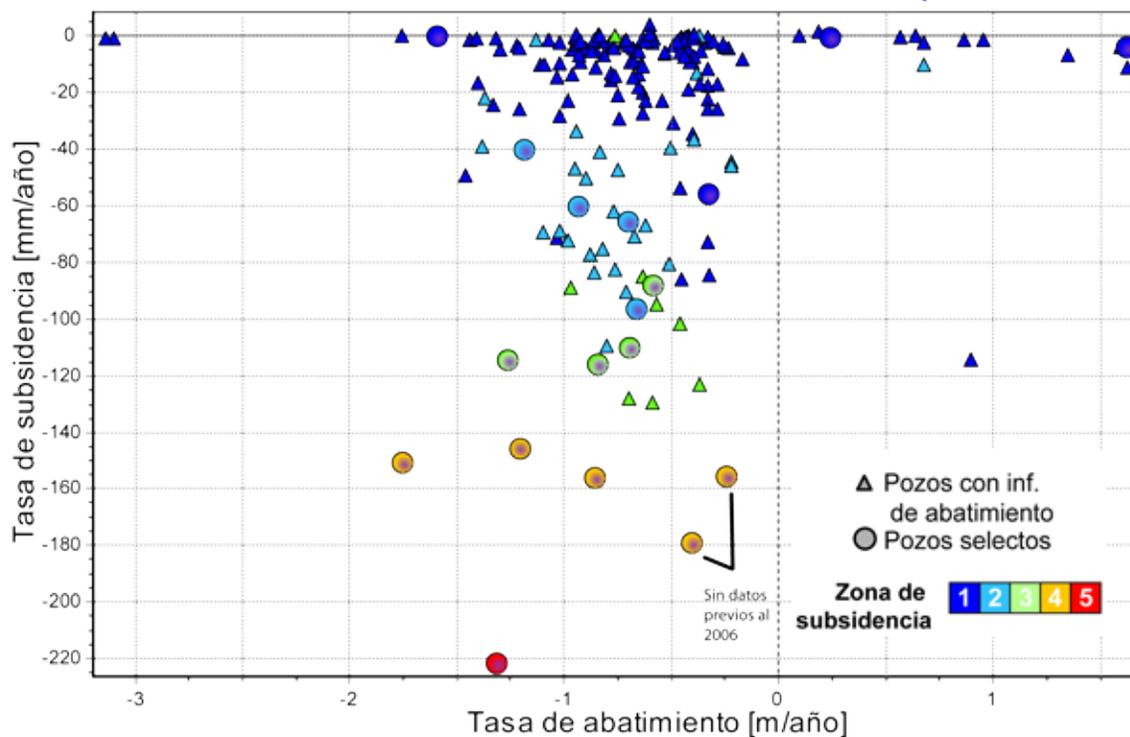


Figura 6.10. Comparativo de tasas de abatimiento y tasas de subsidencia en pozos selectos.

datos muestran una gran variedad de tendencias de tasas de abatimiento, con varios pozos que muestran tendencias de recuperación del nivel estático (valores positivos del eje "x"); en cuanto la tasa de subsidencia, se observan algunos datos dispersos, lo cual quiere decir que en zonas clasificadas como de baja tasa de subsidencia hay algunas regiones subsidentes. Con ellos se observa que las zonas de mayor subsidencia 4 y 5 están relacionadas con mayores abatimientos del nivel estático, dicha relación no se presenta en las zonas de baja subsidencia. Según Figueroa-Vega (1984), tres cuartas partes de la subsidencia en la Ciudad de México se correlaciona con la consolidación del acuitardo y sólo una cuarta parte con la compresión de materiales que conforman el acuífero. Considerando que las características plásticas de la estratigrafía local permite la consolidación y reacomodo de las arcillas de la capa superior al perder agua (Cabral-Cano et al. ,2008) y que el sistema acuífero en la parte superior está compuesto por un acuitardo que cede agua en flujo vertical al acuífero inferior semiconfinado cuando éste último pierde presión de poro (Herrera et al., 1989), es posible concluir que los abatimientos regionales influyen de manera determinante en la subsidencia, más allá de los abatimientos locales, pues generan que las zonas de mayor espesor de arcillas cedan agua y se acumule la deformación en la columna de arcillas. Las zonas subsidentes no necesariamente se correlacionan con las mayores tasas de abatimiento, pero sí con los mayores espesores de arcillas (Cabral-Cano et al. ,2008), los cuales sufren mayor deformación al ceder mayor cantidad de agua debido a los abatimientos. La combinación de espesores potentes de arcillas con abatimientos regionales es la que produce la deformación apreciable en superficie.

Capítulo 7.

CAPÍTULO 7. MAPAS DE PELIGRO POR FALLAMIENTO ASOCIADO A SUBSIDENCIA.

7.1 Contexto del mapa de riesgo.

El problema del fracturamiento y fallamiento superficial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México ha sido de gran importancia por su impacto en los asentamientos y en la infraestructura de servicios urbanos siendo el asociado a la subsidencia de gran relevancia desde la década de los 1950s (Cabral-Cano et al., 2008). Esto incrementa el riesgo de daños a la infraestructura, como se han tenido ejemplos de gran relevancia y afectando considerablemente la vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México al facilitar el acceso al subsuelo de posibles contaminantes. Incluso existe el riesgo de que los ductos de PEMEX para transporte de hidrocarburos sean afectados por el hundimiento diferencial y se produzcan derrames o fugas.

Los geomateriales están sometidos a esfuerzos constantes y de acción a largo plazo, como se refleja en los problemas constantes de baches y discontinuidades en banquetas, asfalto, las líneas de contención y vías del Transporte Colectivo Metro, así como en bardas y casas de particulares, lo que genera costos para la administración pública y particulares. Dichos costos son difíciles de cuantificar, ya que la velocidad de aparición de éstos fenómenos es lenta, lo que permite que éstos fenómenos se incorporen a la vida cotidiana y se minimice su existencia hasta que el problema cobra dimensiones que las colapsan o impiden la realización de las actividades cotidianas y requieren solución inmediata.

Como factor clave en el cálculo de costos a la infraestructura, está la distribución de la densidad de población, que según las estimaciones realizadas con los datos de las AGEBS del INEGI (2011a), llegan a tener densidades de 60 personas por 900 metros cuadrados, es decir, 60 personas por celda cuadrada de 30x30m. Por lo tanto, las altas densidades de población combinados con altos gradientes de subsidencia delimitan las zonas de riesgo en este análisis.

7.2 Mapa de Riesgo del Área Metropolitana de la Ciudad de México 2010.

7.2.1 Procedimiento.

Se elaboraron los mapas de riesgo a partir de dos insumos básicos, que fueron la nube de puntos de datos PSInSAR con datos de magnitud de subsidencia anualizada y las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) del INEGI para 2010 (INEGI, 2011a) que se transformaron en un raster de gradiente de subsidencia y uno de densidad de población.

Ambos insumos fueron integrados a un sistema de información geográfica, en el cual se corregistraron, georreferenciaron y procesaron como se describe a continuación.

La información de magnitud de subsidencia derivados de la nube de puntos de InSAR fueron procesados para generar un raster continuo, con lo que se creó una malla con celdas de 270 m con la herramienta *Point to Raster* de ArcGis 9.3. Esta resolución fue adecuada en función de la densidad de la nube de puntos de InSAR y para asegurar la cobertura del área de estudio. Después se realizó un remuestreo para dividir las celdas de 270 m a 30 m, lo cual me permitió registrar de manera adecuada los pixeles con la geometría de los AGEBS. Debido a que los datos de InSAR presentan discontinuidades en la zona Sur del Distrito Federal se realizó un recorte del raster de magnitud de subsidencia, eliminando algunos valores incongruentes, que se mostraban como un artefacto en forma de un bandeamiento definido, por lo que fueron fáciles de identificar. A pesar del recorte de los datos, la mayor parte de la zona de interés permaneció íntegra. Con esto se generó la capa de gradiente horizontal de subsidencia, es decir, el cómputo entre los valores de magnitud de subsidencia entre celdas adyacentes, que representa las zonas en donde la subsidencia diferencial tiene mayor potencial de producir fallamiento del terreno.

Para el mapa de densidad de población, se correlacionaron tablas de información del censo de población y vivienda 2010 del INEGI en el Distrito Federal y el Estado de México con las geometrías de los AGEBs. Con esta información se generó un mapa temático de densidad de población por AGEB. Posteriormente, se utilizó la herramienta *Feature to Raster* de ArcGis 9.3 para generar un raster continuo con valores de densidad de población por celda de 30 m. Los valores de densidad de población en las celdas variaban de 0 a 60 habitantes por celda de 30x30 m. El procedimiento anterior se resume en la **Figura 7.1**.

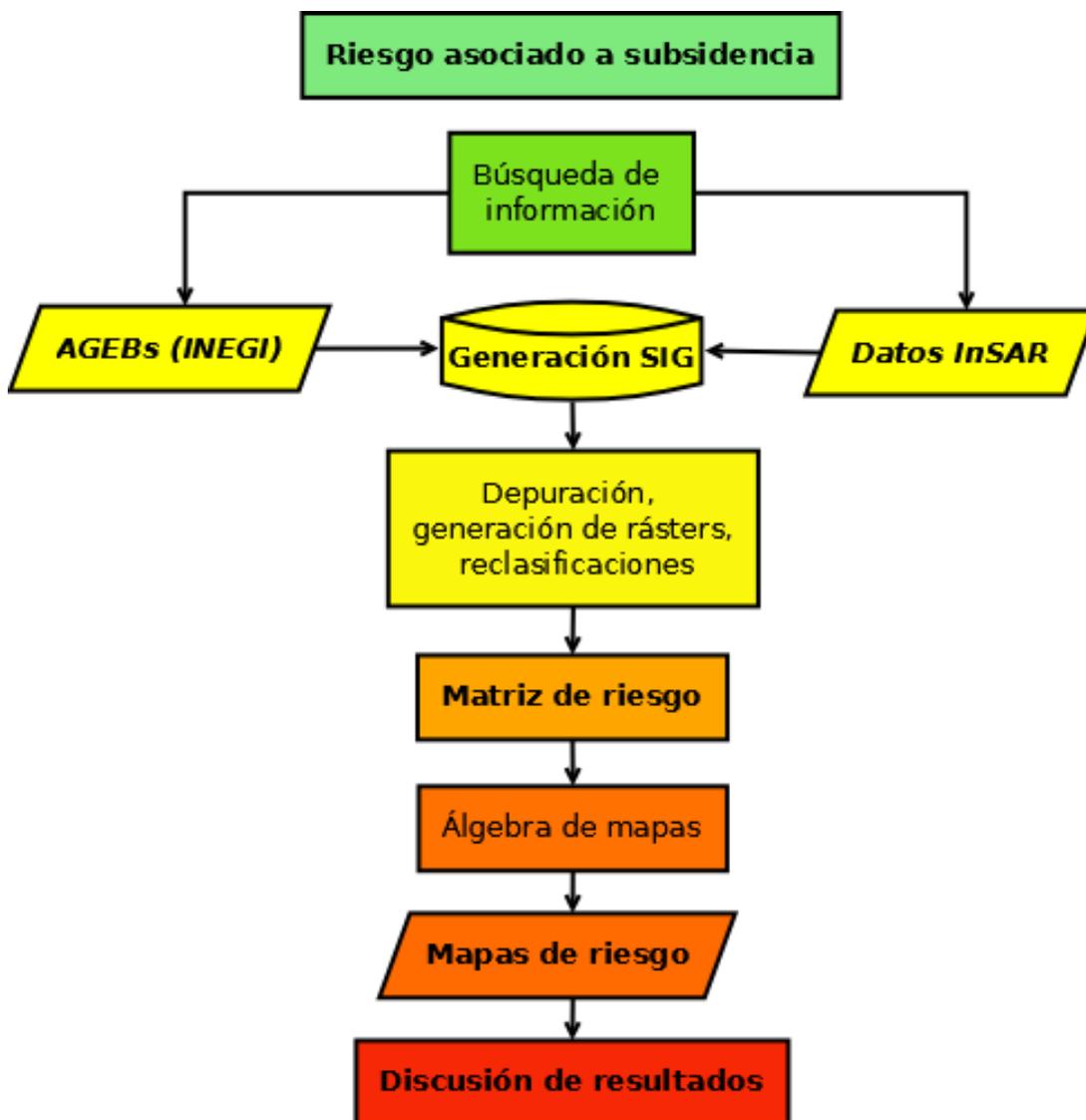


Figura 7.1. Procedimiento para el mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia.

A partir de los valores de los rasters de gradiente de subsidencia y de densidad de población, se establecieron límites que permitieran agrupar los datos dentro de 3 clases, atendiendo a la distribución de los histogramas. Con ello se generó la matriz de riesgo según se muestra en la **Figura 7.2**.

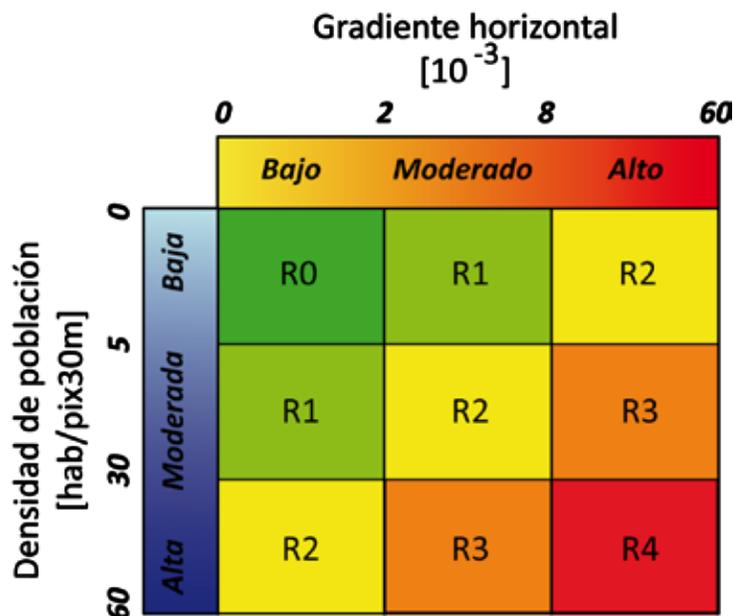


Figura 7.2. Matriz de Riesgo para el Área Metropolitana de la Ciudad de México.

Con dichos valores de corte, se reclasificaron los rasters de gradiente y densidad de población, asignando valores de 0, 1 y 2 (bajo, moderado y alto en la matriz de riesgo) tanto para gradiente horizontal como para densidad de población. A partir de estas reclasificaciones se utilizó álgebra de mapas, operando celda por celda. Con ello se obtuvo un raster de celdas con valores de 0, 1, 2, 3 y 4, que corresponden a R0, R1, R2, R3 y R4 en la matriz de riesgo. Se asignaron valores de muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto al mapa resultante, obteniendo así el mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del Área Metropolitana de la Ciudad de México (**Figura 7.3**). Este mapa usa como escala de las regiones de riesgo los colores de la matriz de riesgo. El recuadro blanco en la figura delimita el área de cobertura del análisis de crecimiento de la mancha urbana descrito en el apartado 7.3.2.

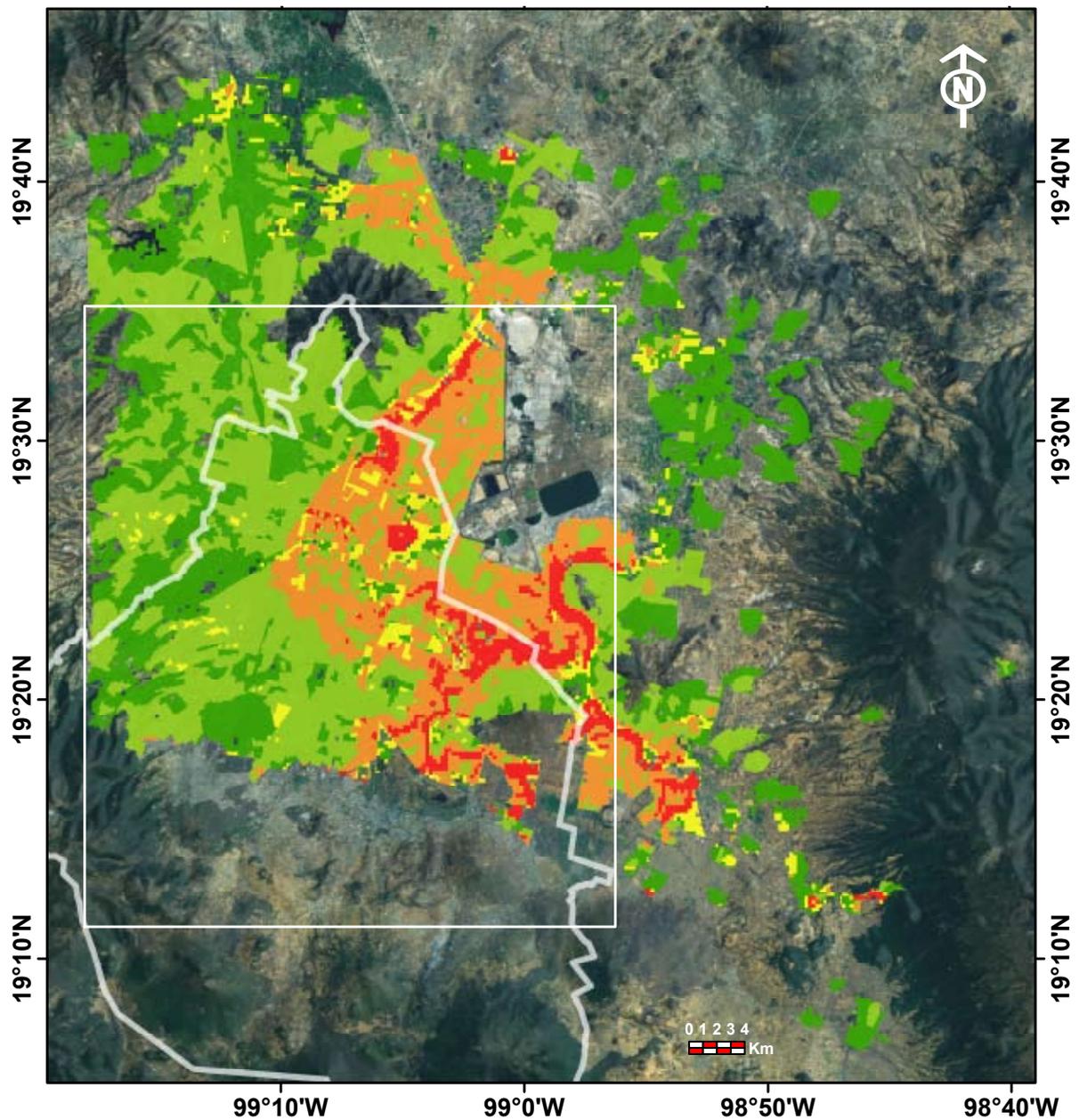


Figura 7.3. Mapa de riesgo por fallamiento asociado a subsidencia del Área Metropolitana de la Ciudad de México.

Zona de riesgo	Área [km ²]	Área [%]	Población [hab.]	Población [%]
R0	536.1	33.2	1300114	7.7
R1	648.9	40.2	9213257	54.7
R2	77.8	4.8	509066	3.0
R3	269.8	16.7	4585714	27.2
R4	81.2	5.0	1232593	7.3

Tabla 7.1. Conteos de área y población por zonas de riesgo.

7.2.2 Resultados.

Los conteos de población y área por zona de riesgo se muestran en la **Tabla 7.1**. De esta tabla se desprende que el 21.8% del área urbana se ubica dentro de una zona de alto y muy alto riesgo, lo que corresponde a 351.1 km². En estas zonas se concentra el 34.5% de la población de la zona de estudio, que corresponde a un poco más de 5.81 millones de habitantes, de los cerca de 16.84 millones en total del área de estudio.

De este mapa se derivan varias zonas de interés por ser de alto y muy alto riesgo. Debido a su importancia y extensión, se describen las de muy alto riesgo como sigue:

a) **El sector al Sureste de la Sierra de Guadalupe**. En especial el delimitado por la Vía José María Morelos, por Ejército del Trabajo, el Río de los Remedios, la ruta 1 Ejército del Trabajo y el Circuito Exterior Mexiquense. Se trata de un sector de geometría alargada, en donde se combinan los altos valores de gradiente de subsidencia en la zona de lago cerca de la zona de transición y los valores de alta densidad de población.

b) **El sector Poniente y Sur del Cerro del Tepeyac**, al Noreste de la Ciudad de México, en la Delegación **Gustavo A. Madero**. Se ubica en una zona de transición muy estrecha, lo que provoca un gradiente de subsidencia pronunciado, lo que se suma con la alta densidad de población en el piedemonte del Tepeyac. Cercana a este sector se encuentra la estación del Metro Martín Carrera.

c) **El sector definido en las cercanías del Metro Tlatelolco**, que engloba las unidades habitacionales Tlatelolco, La plaza de las 3 culturas y el Centro Cultural Universitario y el Teatro Félix Azuela Padilla. Agrupable con esta zona se incluye al sector al Poniente de la estación del Metro Garibaldi, incluida la Procuraduría General de la República y las inmediaciones del Metro Tepito y Canal del Norte. Estas zonas se encuentran en la Zona de Lago y se caracterizan por tener una muy alta densidad de población, en unidades habitacionales y barrios populares, con tendencias de gradiente de subsidencia menos marcadas.

d) **Los alrededores del Peñón de los Baños.** La clasificación geotécnica del Gobierno del Distrito Federal no contempla Zona de Transición en esta región, sino un cambio abrupto de Zona de Lago a Zona de Lomas. Este sector se caracteriza por presentar altos valores de gradiente horizontal de subsidencia. En esta zona se incluye la Terminal Aérea 1 del Aeropuerto Benito Juárez. La alta densidad de población cercana a las estaciones del Metro Terminal Aérea, Romero Rubio y Oceanía es determinante en el carácter de la clasificación como zona de muy alto riesgo. En una evaluación futura de costos asociados a fallamiento por subsidencia, sería adecuado incluir los costos derivados por reparaciones en las pistas de Aterrizaje del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

e) **Los flancos Norte, Sur y Poniente del cerro Chimalhuachi** en Chimalhuacán. Este sector presenta altas densidades de población combinadas con tendencias claras de gradiente horizontal de subsidencia alrededor del cerro Chimalhuachi, en una zona de transición abrupta en la clasificación geotécnica. Se incluyen las cercanías de la estación Chimalhuacán del tren suburbano.

f) **Las inmediaciones del Peñón del Marqués.** Se trata de una zona de lago con cambio abrupto a zona de Lomas. Esta zona incluye las proximidades de la línea A del Metro, incluyendo las 10 estaciones desde Agrícola Oriental hasta Los Reyes. La clasificación de esta área como de muy alto riesgo está dominada por el gradiente horizontal de subsidencia, cuya geometría está bien definida y muestra tendencias claras, concéntricas al Peñón del Marqués.

g) **El sector al sur de la Plaza Benito Juárez** en la delegación Iztacalco. Esta zona se caracteriza por tener muy alta densidad de población, se encuentra en la Zona de Lago. El comportamiento espacial del gradiente de subsidencia no es tan pronunciado y no sigue un patrón reconocible. En este grupo aparece una zona de área menor en las cercanías de la estación del Metro Iztacalco.

h) **Los sectores Este y Sur del Cerro de la Estrella.** La tendencia del gradiente de subsidencia es muy marcada en las zonas Norte, Este y Sur del cerro, en Zona de Lago. Sin embargo, los valores de densidad de población son moderados al Norte, lo que limita las zonas de riesgo a los flancos Este y Sur con valores altos de densidad

de población que se unen con las zonas de alto riesgo en las cercanías de la Sierra de Santa Catarina.

i) **El sector Tláhuac.** Varias zonas, dominadas por altos valores de gradiente horizontal de subsidencia, con densidad de población variable, acentuando regiones críticas en unidades habitacionales. Se encuentra localizado en zona de lago y zona de transición. Se define en las cercanías de las estaciones Nopalera y Zapotitlán, de la Línea 12 del Metro, así como la zona al Oeste del Lago de Chalco.

j) **El sector Xico-Chalco.** En esta zona la distribución espacial del gradiente de subsidencia está bien definida. La densidad de población es variable. Se ubica principalmente en zona de lago, con unos pocos sectores en zonas de transición. Algunas zonas son definidas como las cercanías de las estaciones Tlalpizahuac, Ayotla, Tlapacoya, Ixtapaluca y Chalco del tren Suburbano, el piedemonte al Oeste, Este y Sur del Cerro del Elefante y la porción central de Chalco.

7.3 Crecimiento de la mancha urbana en el periodo 1986-2010.

7.3.1 Marco teórico.

El empleo de técnicas de percepción remota para la identificación de coberturas urbanas es usado ampliamente por la comunidad científica debido a la gran cobertura espacial y temporal de las imágenes satelitales. Diversos autores, con diferentes enfoques, realizan clasificaciones supervisadas de las coberturas en zonas urbanas para realizar análisis de crecimiento de la mancha urbana, haciendo uso incluso de clasificaciones con pocas clases y reclasificaciones para controlar la dispersión de los datos. Entre los trabajos de análisis de crecimiento de la mancha urbana están los de Bhatta et al. (2010 a) en Kolkata-Howrah, India; Sarvestani et al. (2011) en Shiraz, Irán; Jat et al. (2008) en Ajmer, India; DU Peijun et al. (2010) en Xuzhou, China. Otros estudios enfocados a zonas urbanas son los de Dewan y Yamaguchi (2009) en Dhaka, Bangladesh, en donde se estudia cambio del uso del suelo; Weng (2010) que revisa las tendencias de los análisis de datos en superficies urbanas; Bhatta et al. (2010 b) en

donde revisa las tendencias de clasificación en las zonas urbanas y Weber y Puissant (2003) que analiza las tasas de crecimiento de la zona urbana en Túnez.

Para los fines de este trabajo, se realizaron procedimientos de análisis de imágenes con el objetivo de obtener mapas de la mancha urbana de 1986 y de 2010.

7.3.1.1 Definiciones de Percepción Remota.

Según la Agencia Espacial Europea en su artículo *What is Remote Sensing?* (2012, p. 1), la percepción remota es una manera de coleccionar y analizar datos para obtener información acerca de un objeto sin el contacto directo del objeto con el instrumento.

Dentro de esta categoría se encuentran la fotografía aérea, que utiliza cámaras fotográficas para obtener información de los objetos sin tocarlos, representándolos por medio de combinaciones de colores.

En la percepción remota, existen 3 elementos principales, que son:

- 1.- Una plataforma que porta el sensor.
- 2.- Un objeto que será observado.
- 3.- Un sensor para observar al objeto.

Según Natural Resources Canada (Remote Sensing Tutorial, 2012), “percepción remota es la ciencia (y de cierto modo, arte) de adquirir información acerca de la superficie de la Tierra sin estar en contacto con ella. Esto se hace percibiendo y almacenando energía reflejada o emitida y procesar, analizar y aplicar esa información”.

Según la NRC, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones cuando se hacen análisis de imágenes digitales:

1. Se debe analizar la fuente de energía o iluminación, que provee energía electromagnética al objeto de estudio.
2. La interacción de la energía con la atmósfera, ya que al viajar desde la fuente emisora a través de las nubes y las partículas en suspensión hasta el objeto

de estudio y posteriormente al sensor, la energía sufre fenómenos de dispersión y absorción, por lo que es necesario compensar posteriormente estas perturbaciones de la energía.

3. Las interacciones de la energía con los objetos de interés, que dependen de sus propiedades de transmitancia, absorbancia y reflectancia.

4. Después de que la energía es reflejada o emitida al objetivo, se requiere un sensor para registrar la radiación electromagnética.

5. La información debe ser registrada por el sensor que debe ser procesada y convertida en una imagen.

6. A partir de esta información se lleva a cabo la Interpretación y el análisis para extraer información acerca del objetivo que fue iluminado.

7. Finalmente, la información obtenida se aplica para generar un mejor entendimiento de la Tierra, generar nuevo conocimiento o para ayudar a resolver algún problema en particular.

La información de percepción remota se obtiene con los sensores que se montan en diversas plataformas. Hay sensores que se montan a nivel de suelo, que se usan para calibrar y comparar datos obtenidos en aeronaves o satélites, dependiendo de la escala del trabajo a realizar.

En Ciencias de la Tierra, cuando se habla de percepción remota, el objeto observado es la Tierra. Entonces, en términos generales, Percepción Remota es una herramienta para estudiar la Tierra y su superficie, los océanos, la atmósfera y su dinámica desde el espacio.

En percepción remota, la manera de recolectar esta información es por medio de imágenes digitales, que son matrices en donde se asigna un valor con una coordenada geográfica. A menudo contienen valores que varían de 0 a 255, el máximo representable con 8 bits. A este concepto se le llama **resolución radiométrica** (Mapping and satellite data, ESA, 2012).

7.3.1.2 Satélites, sensores y principios de percepción remota.

Los satélites son objetos que orbitan alrededor de otros, como la Luna lo hace alrededor de la Tierra, siendo un satélite natural. Los satélites hechos por el hombre incluyen aquellas plataformas lanzadas para fines de percepción remota, comunicaciones y aquellos con propósitos de localización y navegación. Dependiendo de sus órbitas, los satélites permiten cobertura completa y repetitiva de la superficie de la Tierra (Remote Sensing Tutorial - NRCAN, 2012).

El Sol representa una fuente de energía muy conveniente, ya que es reflejada, como lo es para las longitudes de onda visibles, o absorbida y entonces re-emitida. Los sistemas que miden la energía que está disponible naturalmente son llamados sensores pasivos. Por otro lado, son llamados sensores activos aquellos que generan la energía para su fuente de iluminación, dirigiendo dicha energía al objeto de estudio. Sin embargo, los sistemas activos requieren una gran cantidad de energía para iluminar los objetivos. Esta energía es llamada radiación electromagnética (Remote Sensing Tutorial - NRCAN, 2012).

La radiación electromagnética tiene dos características importantes para nuestro análisis, que son longitud de onda y frecuencia. La longitud de onda es la distancia de un ciclo de onda, que puede ser medido como la distancia entre crestas sucesivas de la onda. Para los fines de percepción remota, la unidad de medida son los micrómetros (μm , 10^{-6} metros). La frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda pasando por un punto fijo por unidad de tiempo. La frecuencia generalmente se mide en hertz (Hz), equivalente a un ciclo por segundo. La longitud de onda y la frecuencia guardan relación inversa, por lo que es posible describir la radiación electromagnética en cualquiera de los dos términos, aunque en el presente trabajo nos referiremos en todos los casos a longitudes de onda. Las imágenes utilizadas en percepción remota miden la calidad de los datos que recaban los sensores con el concepto de **resolución espectral**, que se refiere a los intervalos del espectro electromagnético que los sensores son capaces de captar y registrar (Remote Sensing Tutorial - NRCAN, 2012).

El patrón seguido por un satélite es llamado órbita, que se define según las características del sensor. Hay satélites que están a grandes alturas (~36 000 km) observando siempre la misma porción de la superficie de la Tierra; de ellos se dice que tienen órbitas geoestacionarias. Muchas plataformas están diseñadas para seguir una órbita (prácticamente norte-sur) que en conjunto son el movimiento de rotación de la Tierra que permiten cubrir la superficie de la Tierra en un cierto periodo de tiempo (llamado **resolución temporal**). Éstas son llamadas órbitas polares. Muchos de estos satélites están también sincronizados con el Sol, por lo que se les dice de tipo sincrónicas con el Sol (*sun-synchronous*), que cubren la misma zona del planeta a una hora constante del día llamada tiempo solar local (Remote Sensing Tutorial - NRCAN, 2012).

El tamaño de los píxeles que componen las escenas es determinante en el tipo de información que se extraerá en los análisis. Por ejemplo, con una **resolución espacial** de 30 m (o sea el detalle mínimo detectable) y la cobertura de 185 km por escena de las imágenes Landsat tienen un papel importante para el estudio de procesos de escala humana como crecimiento de la mancha urbana, riego y agricultura y deforestación, lo que se traduce en mapas. Estas imágenes se utilizan también para cartografía de fallas y fracturas a nivel regional.

7.3.1.3 Satélites disponibles.

Actualmente existe una gran variedad de satélites orbitando la Tierra; entre ellos los que tienen fines de recabar información de percepción remota. Landsat es uno de los más importantes, de los cuales es importante mencionar también a SPOT, IRS y Envisat.

SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) tiene una serie de satélites cuyo primer satélite es el SPOT-1, lanzado en 1986. Tienen órbitas cercanas al Ecuador y sincrónicas con el Sol. Tienen dos sensores de alta resolución en el visible (HRV): uno pancromático (PLA) y uno multiespectral de 3 bandas (MLA).

IRS (Indian Remote Sensing) es un proyecto que combina características de los sensores MSS y TM de Landsat y el HRV de SPOT. El tercero de la serie posee tres sensores: uno pancromático (PAN), uno de resolución media de cuatro canales llamado LISS-II y uno de resolución más burda llamado Wide Field Sensor (WiFS).

Otra plataforma de interés en este trabajo es Envisat, de la Agencia Espacial Europea. Fue lanzado en 2002 con 10 instrumentos a bordo, que son: ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer), SCIAMACHY, MIPAS (A Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding), GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars), DORIS (The Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite), RA-2 (Radar Altimeter), MWR (microwave radiometer), LRR (Laser Retro Reflector) (Envisat-10 years in orbit - ESA, 2012). De estos sensores, el ASAR tiene relevancia en este trabajo debido a que es gracias a datos obtenidos con él que se derivó el mapa de subsidencia.

7.3.1.4 RADAR

RADAR es un acrónimo de RAdio Detection And Ranging. Los radares son sensores activos que operan en la porción de microondas del espectro electromagnético. Incluyen longitudes de onda desde 1 mm hasta 1 m. El principio fundamental de los radares es la emisión de un pulso y la posterior recepción del eco generado en el objeto de estudio. Por esta característica es un método activo. El SAR (Synthetic Aperture Radar) es un tipo especial de radar debido al método de procesamiento de la información (Ryerson et al., 1998) y que a través de éste sintetiza una antena de mayor tamaño al que actualmente posee. Gracias a los datos de RADAR del ENVISAT-ASAR es que se obtienen variaciones temporales de deformación del terreno, a partir de los cuales se extrae la componente vertical y con ello se evalúan los mapas de subsidencia.

7.3.1.5 Landsat.

Los satélites Landsat (antes llamados ERTS) fueron los primeros diseñados para monitorear la superficie de la Tierra de manera sinóptica, siendo el Landsat-1 el primero de ellos, lanzado en 1972. Todos los satélites Landsat tienen órbitas cercanas al Ecuador y sincrónicas con el Sol. Sus sensores han sido el Return Beam Vidicom (RBV), el Multi Spectral Scanner (MSS), el Thematic Mapper (TM) y el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Actualmente las imágenes Landsat pueden obtenerse para el usuario final sin costo, lo cual las ha convertido en una herramienta ampliamente usada.

Para definir la ubicación de las escenas, se utilizan sistemas de coordenadas especiales. El Sistema de Referencia Mundial (Worldwide Reference System, WRS) es un sistema de notación de las imágenes de Landsat. Éste permite al usuario consultar las imágenes satelitales sobre cualquier parte del mundo especificando las coordenadas del centro de la imagen designadas por PATH (órbita aproximada del satélite) y ROW (centro nominal de la escena o imagen). El WRS ha demostrado ser de gran utilidad para el uso y organización de las imágenes transmitidas por los sensores de Landsat ("The Worldwide Reference System" par. 1).

Las imágenes utilizadas en este análisis de crecimiento de mancha urbana que se presenta a continuación fueron obtenidas del proyecto Landsat 5, sensor TM (ThematicMapper). Las características del sensor TM se resumen en la **Tabla 7.2**.

Tabla 7.2. Resumen de las características del sensor TM.

Cuadro resumen de las imágenes TM.					
Modo espectral	Resolución espacial	Resolución espectral		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Multiespectral	30 m	Banda 1	0.45-0.52	8 bits	16 días
		Banda 2	0.52-0.60		
		Banda 3	0.63-0.69		
		Banda 4	0.76-0.90		
		Banda 5	1.55-1.75		
		Banda 7	2.08-2.35		
Termal	120 m	Banda 6	10.4-12.5		

7.3.2 Procedimiento.

La metodología empleada se resume en el diagrama de flujo mostrado en la **Figura 7.4** y se describe a continuación.

Se descargaron imágenes Landsat del servidor del Global Visualization Viewer (GloVis) del U.S. Geological Survey (<http://glovis.usgs.gov/>), en formato GeoTIFF. El centro de la escena utilizada corresponde al Path 26 y Row 47, correspondiente a la latitud 18.8° y longitud 99.1°.

Las escenas seleccionadas corresponden al 3 de marzo de 1986 y al 5 de febrero del 2010. Esta selección se hizo con la finalidad de generar contraste de la cobertura de la mancha urbana para el mayor intervalo de tiempo con el sensor TM. Las bandas utilizadas fueron la 1,2,3,4,5 y 7.

De estas escenas se realizaron recortes para la zona de estudio definido por los siguientes límites en coordenadas geográficas:

Latitud N	19.58369°	Longitud W	-99.29853°
Latitud S	19.19196°	Longitud E	-98.94141°

Esta selección se realizó para asegurar la cobertura de la zona de lagos de la Cuenca de México y donde hay cobertura de los datos de subsidencia obtenidos con InSAR, entonces se recortaron las imágenes de Landsat. Sin embargo, es de una cobertura menor a la de los AGEBS del INEGI que corresponden a la totalidad de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Se realizó una corrección atmosférica por ajuste del histograma, extrayendo el número digital mínimo en cada una de las 6 bandas utilizadas. Esto se hace bajo el supuesto de la existencia de un cuerpo profundo de agua limpia en la zona de estudio, cuya extensión excede el área de cobertura espacial mínima de un pixel; debido a su existencia, es posible argumentar un pixel con valores de cero debido a las propiedad de transmisibilidad de la energía electromagnética característica del agua.

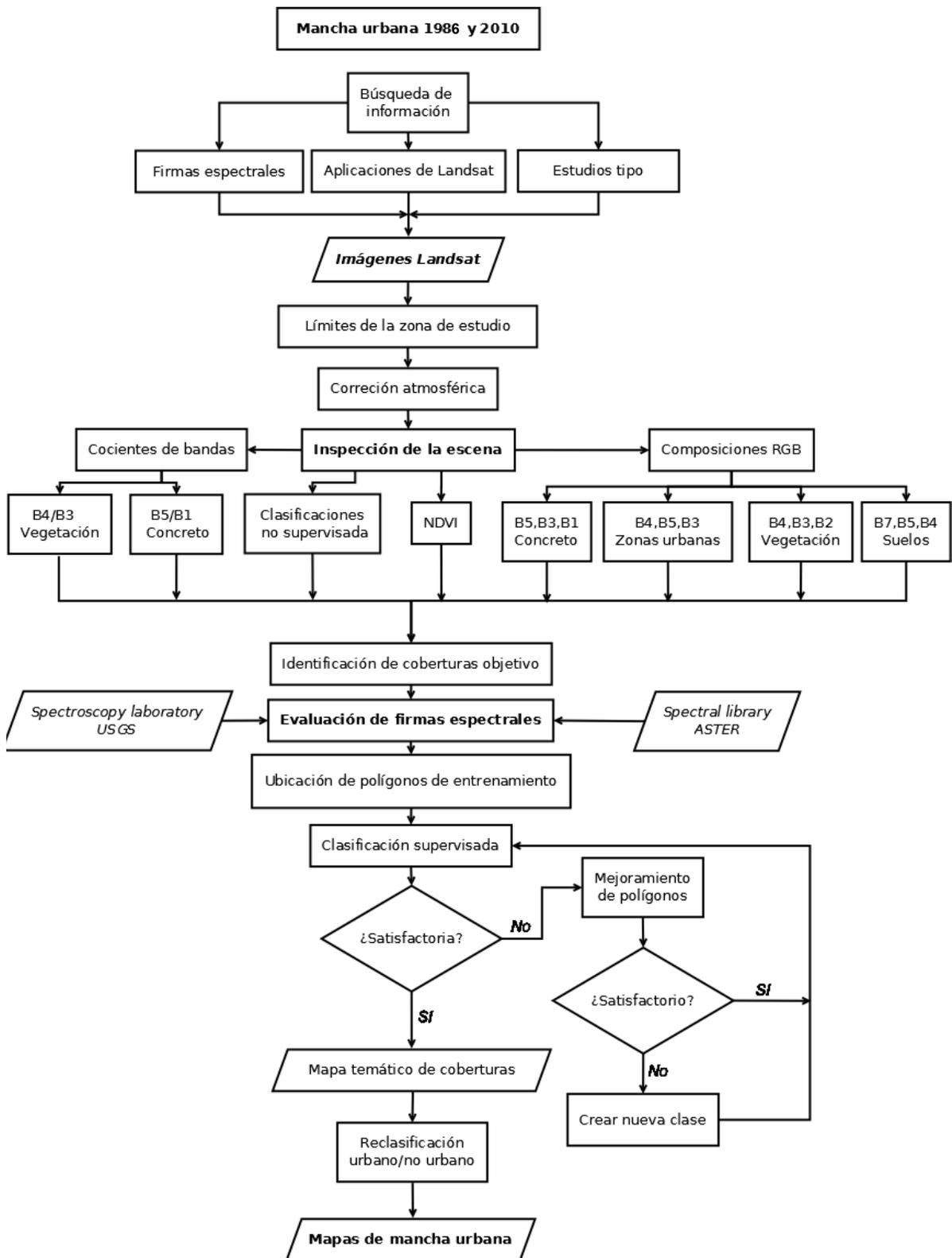


Figura 7.4. Diagrama de flujo de la metodología empleada en la determinación del crecimiento de la mancha urbana 1986-2010.

Posteriormente, se realizaron combinaciones de bandas para resaltar de modo visual las características espectrales de los materiales, según la información de firmas espectrales de materiales conocidos del USGS Spectroscopy Laboratory (USGS, 2011) y del Spectral Laboratory de ASTER (Baldrige et al., 2009) (**Figura 7.5**). Las combinaciones de bandas utilizadas se resumen en la **Tabla 7.3**.

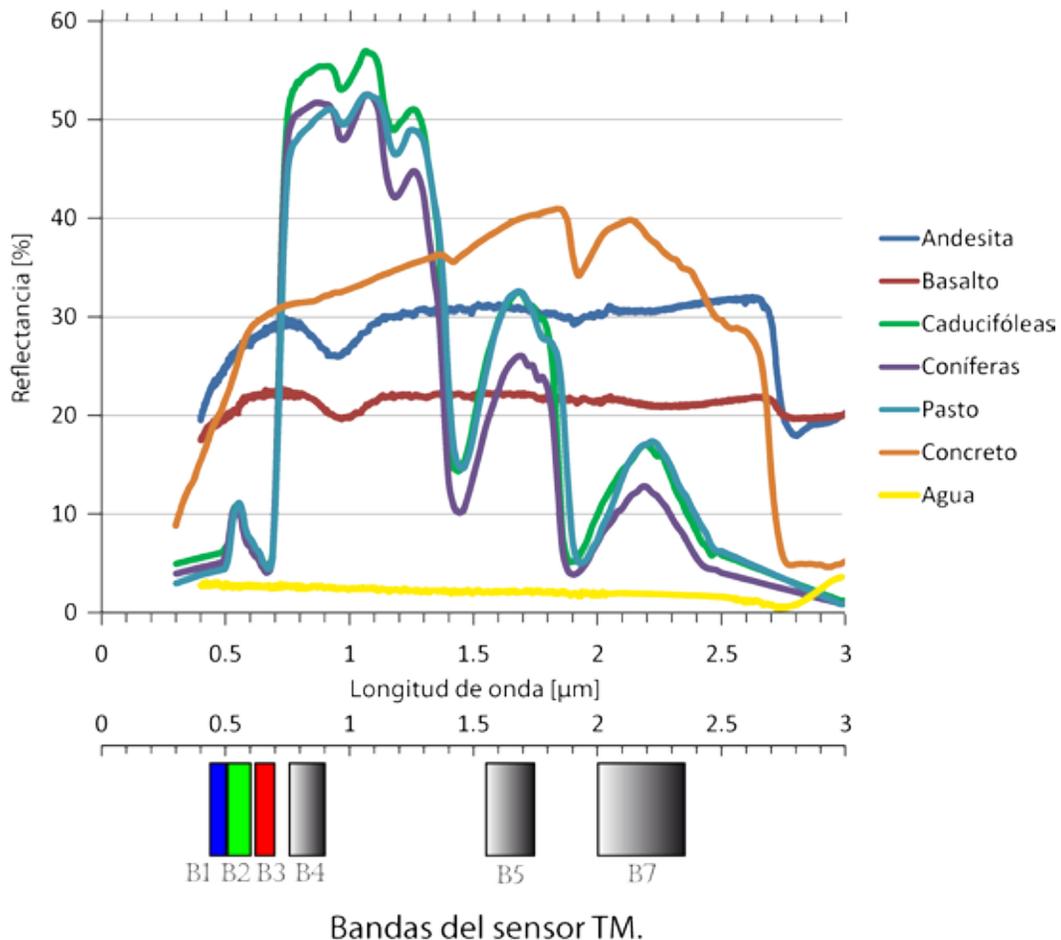


Figura 7.5. Firmas espectrales objetivo de la región (USGS ,2011; Baldrige et al., 2009).

Tabla 7.3. Combinaciones de bandas utilizadas para visualización de coberturas objetivo.

Material Resaltado	Banda TM en R	Banda TM en G	Banda TM en B
Vegetación	4	3	2
Concreto	5	3	1
Zonas Urbanas	4	5	3
Suelos	7	5	4

Además, se realizaron cocientes de bandas para realzar el contraste entre los picos de absorción y reflectancia de los materiales de interés. Los cocientes utilizados fueron $\frac{\text{Banda 4}}{\text{Banda 3}}$ y $\frac{\text{Banda 5}}{\text{Banda 1}}$ para resaltar los contrastes entre las firmas espectrales de la vegetación y el concreto respectivamente.

Posteriormente se realizó un NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que se define como $NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$, en donde NDVI es el valor del índice de vegetación y NIR y Rojo son los valores de las bandas espectrales del infrarrojo cercano y el rojo respectivamente (What is Remote Sensing?, 2012). Este índice se utiliza para diferenciar zonas urbanas, con presencia de agua, con vegetación vigorosa, vegetación estresada y de suelo desnudo. El NDVI se calcula con álgebra de mapas y es utilizado para resaltar los contrastes de las regiones con actividad fotosintética de las que no la tienen, al generar un cociente de la diferencia entre la suma de la banda del infrarrojo cercano y el visible, aprovechando el pico de reflectancia del infrarrojo cercano en la firma espectral de la vegetación, debido a la presencia de clorofila y el pico de absorción en el visible. Para el caso de las imágenes Landsat el cálculo se realizó como sigue: $NDVI = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 3}}$.

Después de generar estas imágenes se procedió con varias clasificaciones no supervisada por medio de análisis de *clusters* con 4, 8 y 12 clases para identificar los grupos de materiales con firmas espectrales similares y tener una idea aproximada de la distribución de los materiales en la zona de estudio. Los análisis de *clusters* son útiles para identificar matemáticamente asociaciones entre los datos. *Cluster analysis* se usa para encontrar estructuras en los datos sin proveer una explicación/ interpretación. *Cluster analysis* simplemente descubre estructuras en los datos sin explicar en principio por qué existen. Será el analista quien *a posteriori* interprete los posibles motivos de esa estructura” (Gimenez, 2010).

A partir de estas primeras clasificaciones y de las imágenes de combinaciones y cocientes de bandas, se definieron las coberturas objetivo. Las firmas espectrales de las coberturas en la zona de estudio se crearon a partir de polígonos de entrenamiento y analizando la dispersión de los valores de brillo. Por ejemplo, la vegetación en la zona sur y en el sector norte de la escena se generaron por los contrastes del NDVI,

que mostraba diferencias considerables en la vigorosidad, así como del análisis de la composición RGB 754 que muestra diferencias en la composición de suelos entre las diferentes formaciones geológicas, que es predominantemente basáltica en la zona sur y andesítica en la zona poniente. También se consideraron las variaciones de saturación de solutos en los cuerpos de agua de la Ciudad de México, como la turbidez del agua de los canales de Xochimilco contra los cuerpos de agua de la zona Noreste en el área del depósito de evaporación solar “El Caracol” de la extinta empresa “Sosa Texcoco”. Del mismo modo se consideraron los fenómenos de eutrofización propios de los cuerpos de agua estáticos de la Cuenca, que requirieron clases especiales para eliminar el traslape con las firmas espectrales de agua y vegetación vigorosa. Se prestó especial atención a los depósitos arcillosos del NE de la zona de estudio, que el software clasificaba como similares cuando se hicieron las primeras clasificaciones supervisadas, dada la resolución espectral de las imágenes TM.

Se comenzó con 8 clases, debido a su abundancia y distribución en la zona de estudio. La recalibración de las clases continuó modificando los polígonos de entrenamiento y añadiendo nuevas, hasta llegar a 21 clases para la imagen de 1986 y el mismo número de clases para la imagen de 2010. A la par se realizaron 11 reclasificaciones a urbano y no urbano para cada año, considerando como urbano a todas las clases correspondientes a infraestructura, concreto de las casas en zonas urbanas de alta densidad y en zonas residenciales. En esta última zona la firma espectral se modifica por la presencia de vegetación saludable gracias al riego. Algunas de las firmas espectrales obtenidas con los polígonos en la zona de estudio se muestran en las **Figuras 7.6 y 7.7**.

Las recalibraciones consideraron la modificación de los polígonos de modo que las firmas espectrales tuvieran un rango de variación de los números digitales de las imágenes de ± 10 . Las composiciones de imágenes sirvieron de apoyo para diferenciar adecuadamente los materiales de la zona. Algunas de estas imágenes se muestran en las **Figura 7.8**.

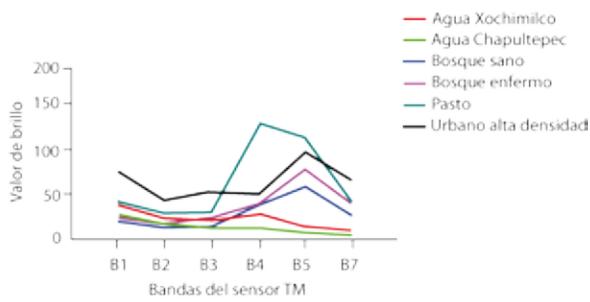


Figura 7.6. Firmas espectrales de la zona de estudio.

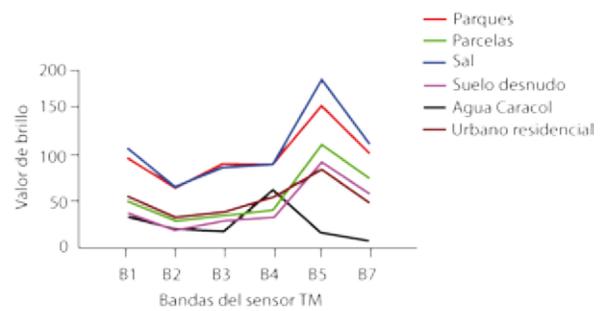


Figura 7.7. Firmas espectrales de la zona de estudio.

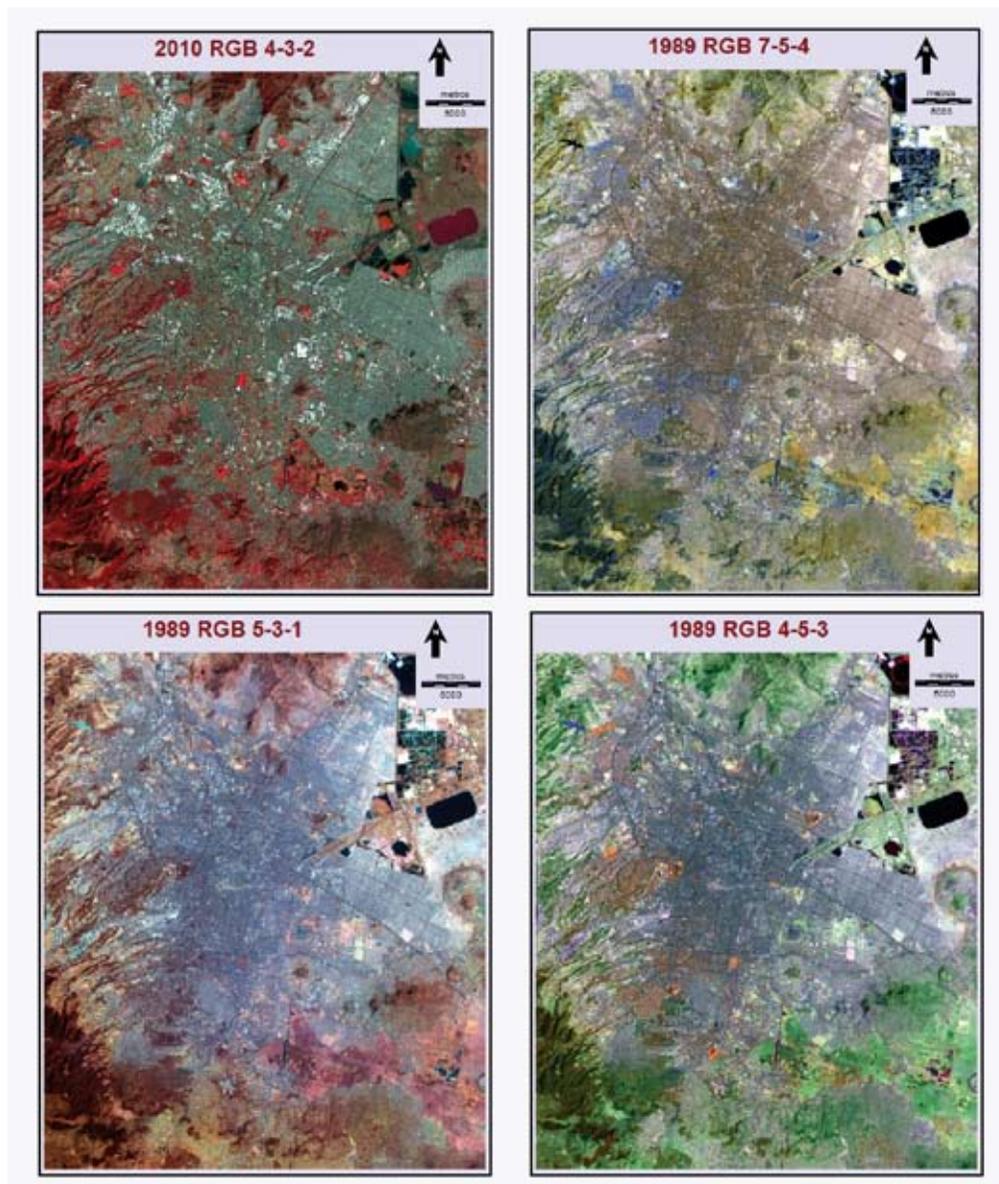


Figura 7.8. Mosaico de algunas de las composiciones RGB utilizadas para determinar las coberturas objetivo y los polígonos de entrenamiento.

Los *rasters* de las reclasificaciones eran registrados a *GoogleEarth* en donde se lograba una mejor visualización de las zonas urbanas-no urbanas debido a sus imágenes de alta resolución, ayudando a mejorar la sensibilidad de los polígonos de entrenamiento así como a la generación de nuevas clases.

Las dificultades más notables, al momento de generar las clases en la clasificación supervisada, se originaron por el traslape persistente de las firmas de sal, arcillas y concreto; este traslape se corrigió con la recalibración sucesiva que permitió disminuir la dispersión de las firmas y la generación de nuevas clases y polígonos de apoyo. En algunos casos la clasificación tuvo traslapes persistentes dado que la resolución espectral de las imágenes TM no permite generar una discriminación más rigurosa. Debido a esto, algunos pixeles muestran cambio de urbano a no urbano, lo cual no es congruente con la evolución de la ciudad. Sin embargo, se considera parte de las limitantes del método que no tiene repercusiones de impacto significativo en el análisis a la escala que se maneja en la zona de estudio.

Los *rasters* resultantes fueron exportados a ArcGis 9.3, en donde se generó un polígono que fungiera como mancha urbana permanente del centro de la Ciudad, en donde las variaciones entre los años 1986 y 2010 no son significativos.

A partir de los *rasters* generados se construyó un polígono de la envolvente de la mancha urbana, para hacer un análisis de área más grueso, en el que aunque haya pixeles clasificados como no urbano, aún así se consideran como área urbana dada la densidad de los pixeles de urbano. Algunas zonas como el lago de Chapultepec, el parque Cuitláhuac, el bosque de Tláhuac y el volcán de la Caldera por su extensión muestran congruencia en la no-urbanización y son considerados como no urbanos en ambas escenas.

7.3.3 Resultados.

Las clasificaciones de 1986 y de 2010 definitivas se muestran en las **Figuras 7.9** y **7.10**. Las respectivas reclasificaciones son las **Figuras 7.11** y **7.12**.

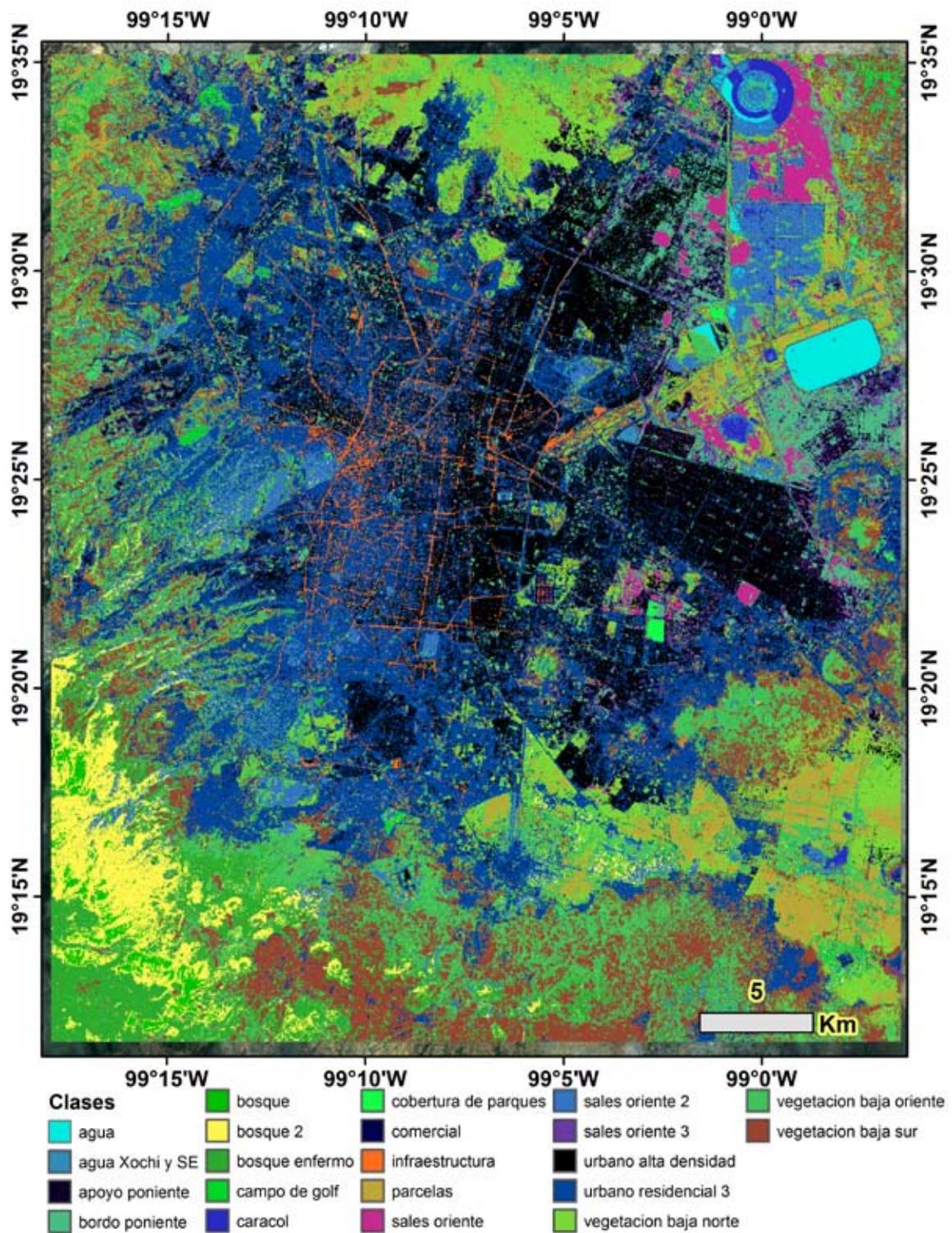


Figura 7.9. Clasificación de coberturas para 1986..

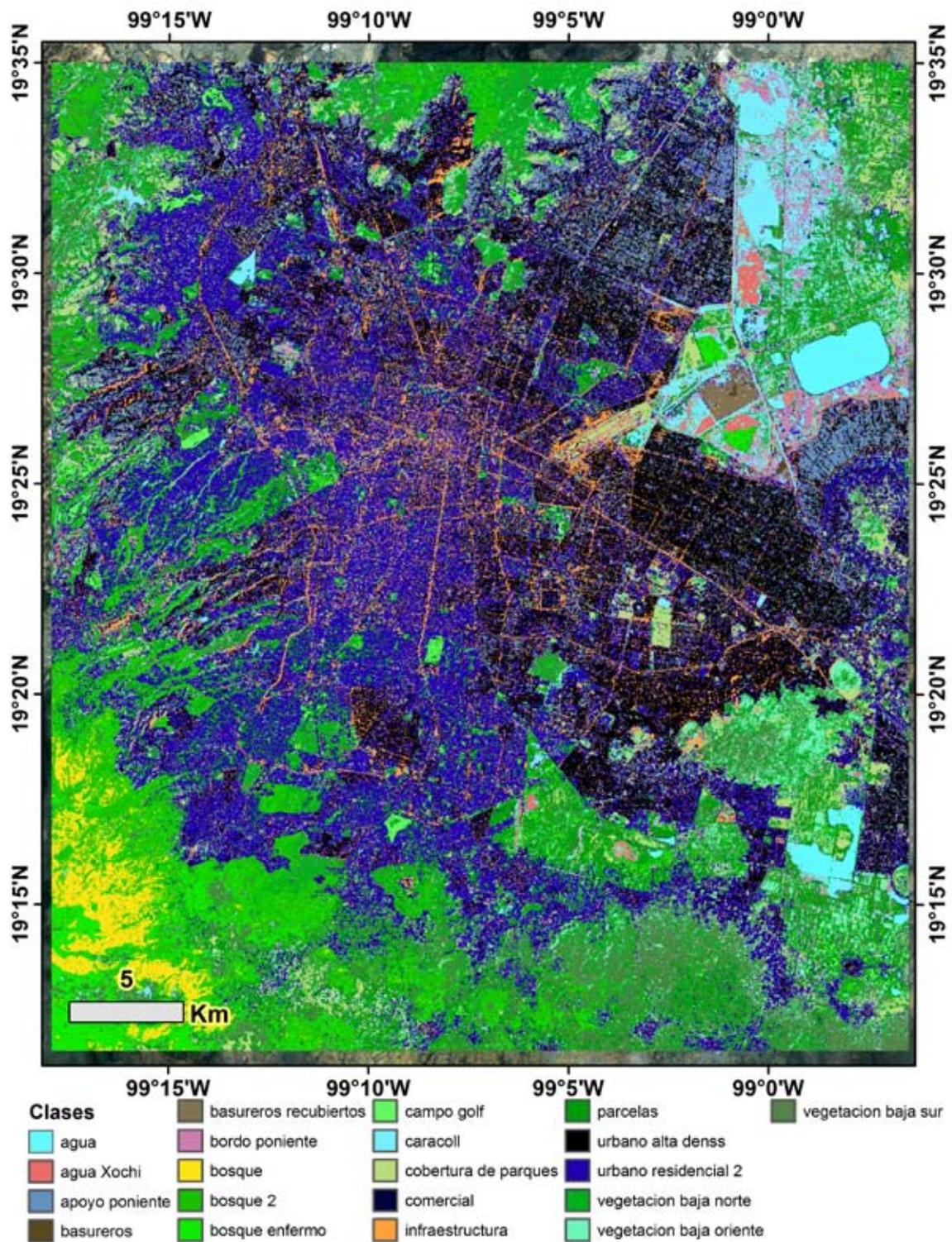


Figura 7.10. Clasificación de coberturas para 2010.

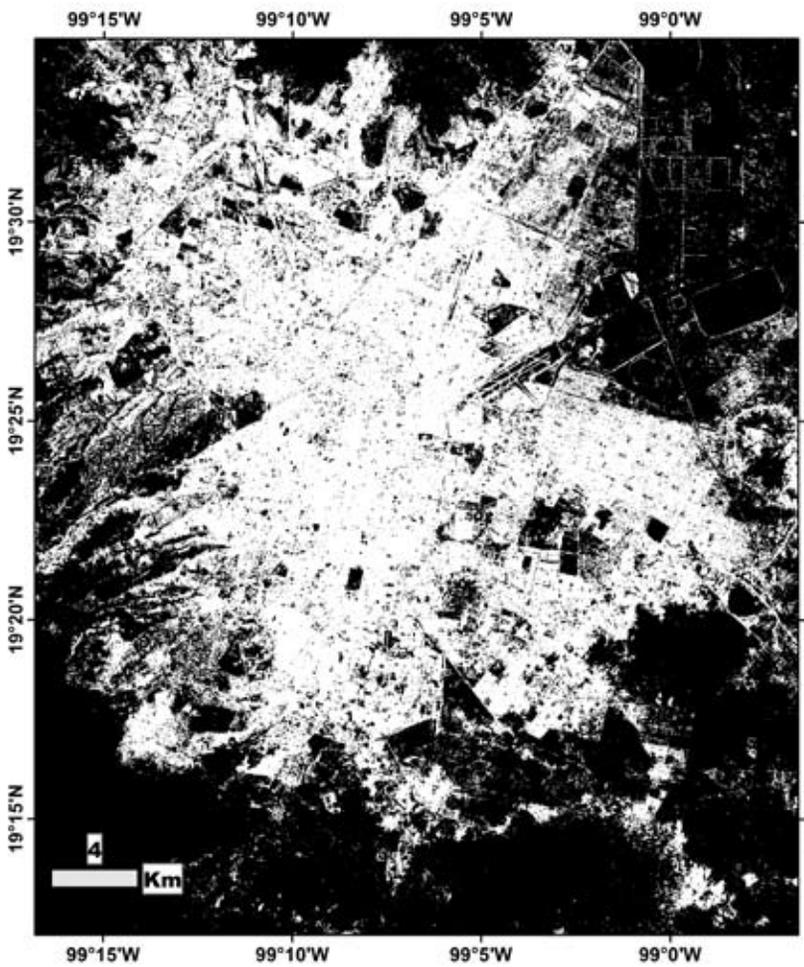


Figura 7.12. Reclasificación urbano-no urbano 1986.

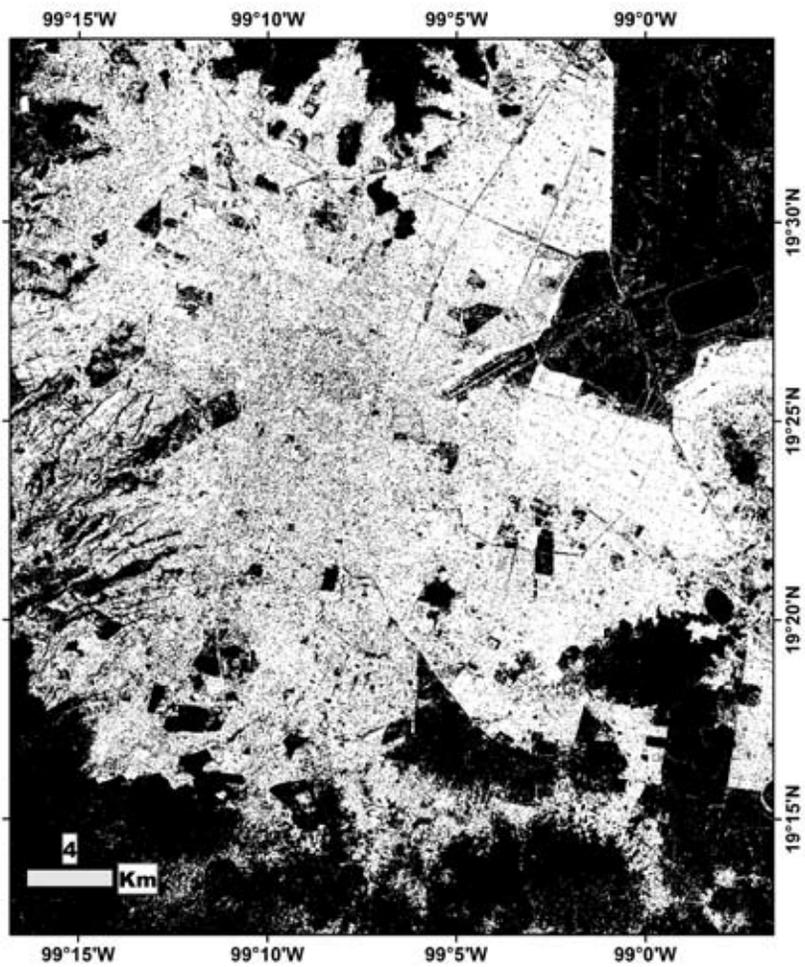


Figura 7.11. Reclasificación urbano-no urbano 2010.

Los polígonos hechos a partir de las reclasificaciones, así como la zona de crecimiento entre el periodo de tiempo estudiado se observan en la **Figura 7.13**.

El crecimiento en el Distrito Federal se encuentra enfocado a la parte Sur en regiones que anteriormente eran destinadas a fines de agricultura inmersas en la mancha urbana y al Oeste, en la zona de Lomas, antes considerada como no urbana, en zonas residenciales. En el periodo de 24 años se definen los contornos de la actual mancha urbana en el Distrito Federal y las partes circundantes correspondientes al Estado de México se aprecia la expansión sobre territorio dedicado a la agricultura, tanto al Este como al oeste del Distrito Federal. La ocupación refleja un comportamiento más invasivo con respecto a lo observado dentro del D.F.

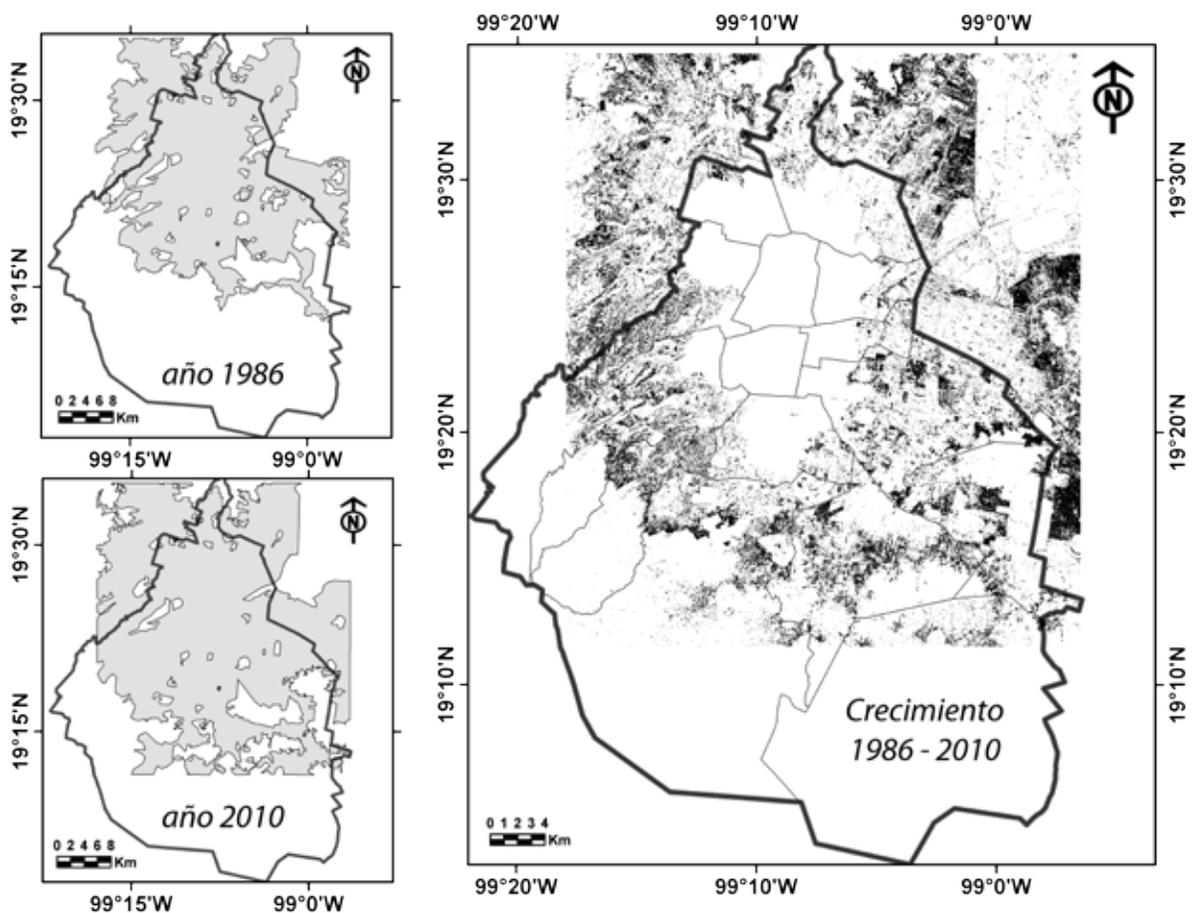


Figura 7.13. Miniaturas izquierda: polígonos de mancha urbana elaborados a partir de las reclasificaciones. Derecha: Raster de crecimiento urbano 1986-2010.

De los análisis anteriores, se realizaron conteos de área y encontrando un crecimiento de la mancha urbana de 23.4% con el análisis de rasters y de 29.2% con el análisis de los polígonos generados a partir de los rasters. Los 5.8 puntos porcentuales de diferencia se deben a las áreas contenidas entre píxeles urbanos al momento de crear la poligonal; como era de esperarse, los conteos de área en la poligonal son mayores. Estos resultados se muestran en la **Tabla 7.4**.

Tabla 7.4. Conteos de aumento de área urbana.

Resultados de conteos de áreas urbanas 2010 y 1986 obtenidas con imágenes Landsat.				
Fuente	Área Urbana 1986 [km ²]	Área Urbana 2010 [km ²]	Diferencia [km ²]	% respecto 1986
Raster	679.57	838.64	159.08	23.4
Polígono	858.34	1108.76	250.42	29.2

7.4 Las zonas de riesgo en la mancha urbana 1986-2010.

Con el objetivo de analizar el desarrollo de la distribución de las áreas de riesgo a través del tiempo, se realizó un mapa de las zonas de riesgo creadas de 1986 a 2010, a partir de la combinación de la información de mancha urbana y del mapa de riesgo.

7.4.1 Procedimiento.

Con los *rasters* de mancha urbana de 2010 y 1986 como insumos, se realizó una resta celda por celda con el módulo de *Raster Calculator* de ArcGis. El resultado de este procedimiento fue un mapa que refleja las celdas que presentan cambio de no urbano a urbano. Este mapa se utilizó como máscara para extraer las celdas de la matriz de riesgo del 2010 correspondientes a la expansión urbana. El mapa resultante se muestra en la **Figura 7.14**.

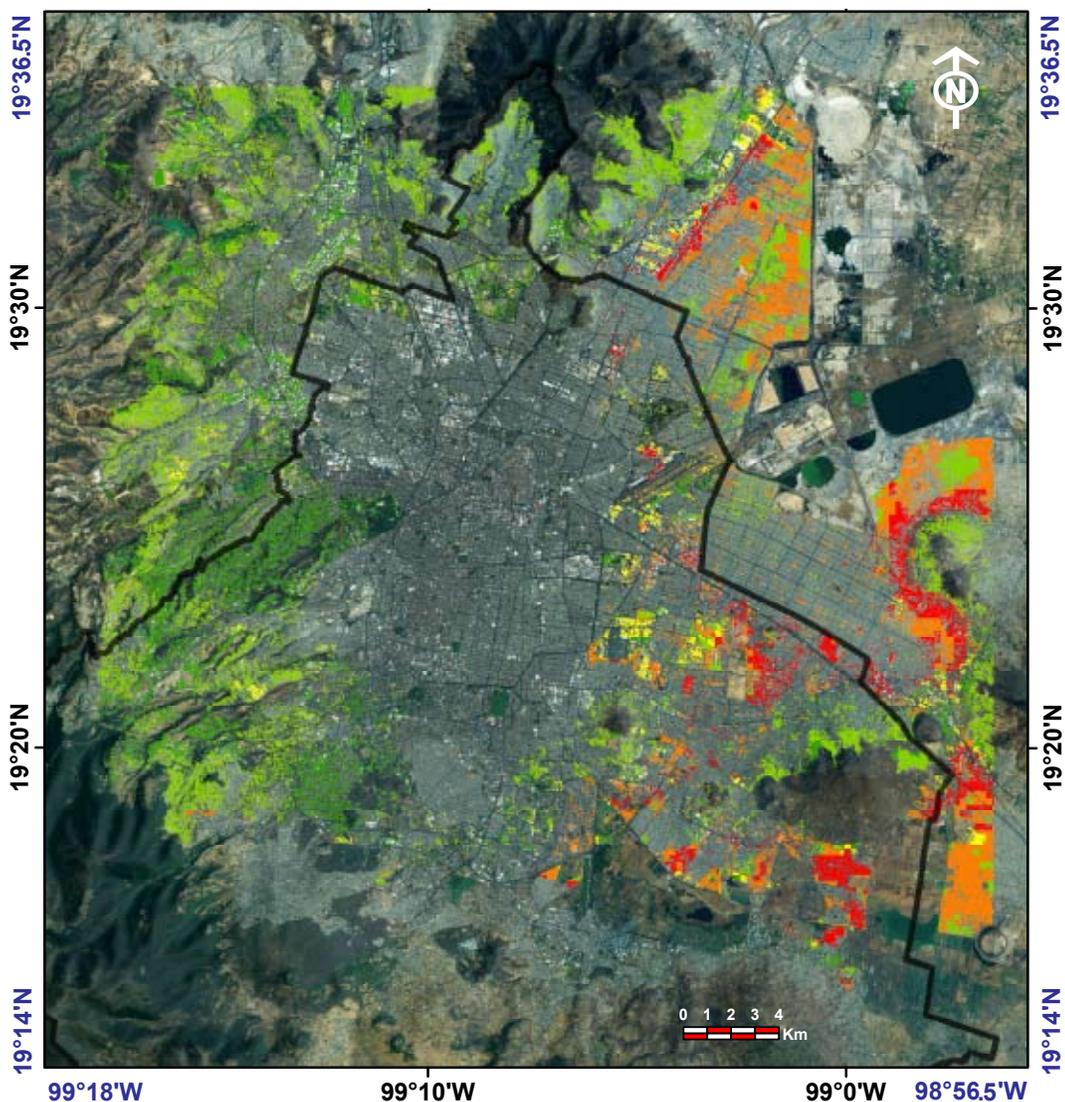


Figura 7.14. Mapa de crecimiento de las zonas de riesgo 1986-2010.

Tabla 7.5. Conteos de área y población para el área de cobertura de las imágenes Landsat y el área de crecimiento de la mancha urbana.

Zona de riesgo	Sub-área zona de estudio mancha urbana		Zona de crecimiento 1986-2010	
	Área [km ²]	Población [hab.]	Área [km ²]	Población [hab.]
R0	225.7	528448	41.1	106719
R1	438.3	6714656	80.1	1231713
R2	45.6	402466	7.9	64200
R3	214.3	3803863	41.5	697114
R4	69.9	1136176	19.2	278224
Total	993.8	12 585 609	189.9	2 377 970

Dado que el área de cobertura del análisis de mancha urbana es menor que la del mapa de riesgo, se trabaja sobre una población total de 12'585,609 personas y un área de 993.8 km², lo cual es una sub-área del mapa de riesgo. Posteriormente fueron comparados los resultados del área de crecimiento de 1986 a 2010 con la sub-área de la matriz de riesgo.

7.4.2 Resultados.

De los conteos derivados de la sub-área del mapa de riesgo, correspondiente a la cobertura de las imágenes Landsat, y de la extracción correspondiente al crecimiento de la mancha urbana en el periodo 1986 - 2010, se obtuvo la **Tabla 7.5**. De esta tabla se contabiliza que de los 993.8 km² del área analizada, 189.9 km² se generaron en el periodo comprendido entre 1986 y 2010; de los 12.585 millones de personas que habitaban en el sub-área de la matriz de riesgo, 2.377 millones se establecieron en las nuevas áreas urbanizadas en el periodo de tiempo mencionado.

Se contabiliza además que de los 189.9 km² de área urbana creados en el periodo 1986-2010, 32% corresponden a zonas de alto y muy alto riesgo (60.73 km²). Se calculó que de los 2.377 millones de habitantes que habitan en estas zonas, 41%, es decir 975,338 habitantes, se encuentran dentro de zonas de alto y muy alto riesgo.

Se calcularon los porcentajes que representan las áreas y la población en la zona de crecimiento de 1986 a 2010 con respecto al sub-área del mapa de riesgo en la zona de estudio de la mancha urbana con imágenes Landsat. Los resultados se observan en la **Tabla 7.6**.

Tabla 7.6. *Tabla de los conteos de área y población establecidos en el periodo 1986-2010 con respecto a 2010.*

Zona de riesgo	Comparativo por ZR	
	Área [%]	Población [%]
R0	18.2	20.2
R1	18.3	18.3
R2	17.3	16.0
R3	19.4	18.3
R4	27.4	24.5

De esta tabla se puede observar que en las zonas de crecimiento 1986 -2010 se encuentran cerca del 19% del área y 18% de la población de las zonas actuales de Alto Riesgo. Es aún más contundente lo observado para las zonas de Muy Alto Riesgo, en donde el 27.4% del área y 24.5% de la población actuales, se establecieron en esas regiones en el periodo de tiempo estudiado. En otras palabras, de las actuales zonas de Muy Alto Riesgo, más de la cuarta parte se establecieron en el periodo de 1986 a 2010, con su respectiva demografía.

7.5 Conclusiones.

La distribución del gradiente de subsidencia en la Ciudad de México está estrechamente relacionada con la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, en general, se presenta con mayor intensidad en zonas de transición abrupta, en donde los sedimentos de la zona de lago sobreyacen a las rocas más competentes de la zona de lomas. Cuando los sedimentos experimentan una consolidación por la carga de la mancha urbana o por pérdida de masa generada por la extracción de agua, provocando ruptura de los geomateriales. Otros sectores tienen patrones que corresponden a estructuras en el subsuelo o debido a la heterogeneidad del subsuelo.

La densidad de población en los sectores críticos de la Ciudad de México está relacionada a los vectores de crecimiento poblacional como la generación de unidades habitacionales o el crecimiento descontrolado de barrios, así como la creación de vías de comunicación que permiten el acceso a diferentes regiones y aumentan la densidad de población en las inmediaciones.

Los asentamientos urbanos no planeados en la ZMCM han permitido zonas de alta densidad de población en regiones vulnerables, principalmente en la zona de lago y en los piedemontes de altos topográficos, en donde se han desarrollado regiones de alto gradiente horizontal de subsidencia y alta densidad de población.

De este análisis se evidencia una clara ausencia de la planeación urbana en el periodo 1986-2010, pues en un lapso de 25 años se han establecido 27.4 (más de la cuarta parte) de las áreas de Muy Alto Riesgo junto con el 24.5% de la población

actual en esa zona de riesgo. Los porcentajes de área y población corresponden a cerca de la quinta parte (19.4 y 18.3 respectivamente) de los actuales para el caso de la Zonas de Alto Riesgo. El crecimiento de las zonas de Alto y Muy Alto Riesgo ha sido sustancialmente mayor cuando se compara con las zonas de Riesgo Muy Bajo, Bajo y Moderado, en donde el crecimiento en área corresponde a porcentajes menores.

Las zonas con mayor riesgo tenderán a incrementarse, considerando que el gradiente de subsidencia sea constante y que la densidad de población irá en aumento, por lo cual la planificación del crecimiento urbano es crítica.

Capítulo 8.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.

Un resultado no previsto de la implementación de la Metodología DRASTIC en el Distrito Federal es el sesgo de las zonas más vulnerables hacia las zonas urbanas, con un incremento en área de las zonas más vulnerables cuando se genera la metodología DRASTIC-Sg. Además, en las zonas más vulnerables obtenidas con DRASTIC-Sg la densidad de población es mayor, lo que quiere decir que los nuevos sectores definidos por el gradiente de subsidencia (que genera fallamiento y por lo tanto zonas de mayor conductividad hidráulica que podrían transportar con facilidad contaminantes desde la superficie), abarcan una mayor población que potencialmente puede verse afectada. Se calculan ~1.76 millones de habitantes en las zonas de Alta y Muy Alta vulnerabilidad acuífera en DRASTIC-Sg contra ~1.0 millón considerado en DRASTIC y que mejora las aproximaciones en los análisis de riesgo, resultado indirecto de la metodología.

De los resultados de los conteos de magnitud y gradiente de subsidencia considerando el área delimitada por los límites políticos del Distrito Federal se observa que las zonas de mayor vulnerabilidad en el mapa DRASTIC se presentan en zonas de menor subsidencia y menor gradiente de subsidencia, lo que representa en general zonas de bajo nivel de fallamiento superficial asociado. Con lo que respecta a DRASTIC-Sg, no se observa una relación entre el grado de vulnerabilidad y la magnitud de subsidencia, pero sí queda claro que a mayor vulnerabilidad, mayor gradiente horizontal de subsidencia y es debido a la incorporación del parámetro Sg en la metodología DRASTIC. Esto es, la metodología DRASTIC-Sg relaciona las zonas de mayor vulnerabilidad con mayor gradiente, o sea, mayor fallamiento asociado a subsidencia, por lo tanto, regiones de mayor conductividad hidráulica.

En el área delimitada por las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) dentro del Distrito Federal se aprecia que para DRASTIC existe un relación de mayor subsidencia-bajo gradiente de subsidencia-mayor vulnerabilidad. Comparado con los resultados del área que contempla toda el área delimitada por los límites políticos del Distrito Federal,

se observa que existe un promedio menor de magnitud de subsidencia aunado con un mayor gradiente en la clase de Muy Baja Vulnerabilidad, debido a la redistribución espacial en el mapa DRASTIC. Los conteos para DRASTIC-Sg en el área delimitada por las AGEBS dentro del Distrito Federal no muestran una relación directa entre zonas de vulnerabilidad y la magnitud subsidencia, pero sí una relación directa entre zonas de vulnerabilidad y el gradiente horizontal de subsidencia. Esto es lógico bajo la premisa de que el gradiente horizontal de subsidencia tiende a incrementarse en las zonas en donde la tasa de subsidencia muestra mayor contraste en áreas contiguas.

La incorporación del parámetro Sg al mapa DRASTIC de vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México (Hernández-Espriú, et al. 2012; Hernández-Espriú, et al. 2013) genera que los conteos de área y población presenten un decremento en las Zonas de Muy Baja y Baja Vulnerabilidad y un incremento en las zonas de Moderada, Alta y Muy Alta Vulnerabilidad en DRASTIC-Sg.

Del análisis de la cobertura porcentual de las Zonas de Vulnerabilidad en el mapa DRASTICSg, resalta una disminución sustancial del porcentaje de área de Muy Baja Vulnerabilidad cuando se considera el área delimitada por las AGEBS dentro del Distrito Federal en la metodología en lugar del área de todo el Distrito Federal. Esto es, el área urbana delimitada por las AGEBS se clasifica en su mayoría como más vulnerable que el área total del Distrito Federal. Se infiere que además de ser clasificada como una región de mayor vulnerabilidad, el área urbana contiene en sí la mayoría de las zonas más vulnerables (142 de los 204 km² de Alta y Muy Alta Vulnerabilidad) y muy pocas de las zonas de Muy Baja Vulnerabilidad (solamente 34 de los 296 km² clasificados en esta Zona de Vulnerabilidad). Se puede concluir que una parte significativa del desarrollo de la zona urbana se ha llevado a cabo directamente en regiones de mayor vulnerabilidad acuífera.

Las tendencias de orientación de las familias de fracturas en zonas bajas no presentan una tendencia regional definida. Cada estación de muestreo en zonas bajas tiene condiciones particulares que determinan la orientación de las familias de fracturas modales, sin embargo, en todas el factor común es el gradiente de subsidencia, por lo que se sabe que su aparición está condicionada al hundimiento diferencial y que

su emplazamiento continuará y se propagará a zonas en donde aún no se presenta el fenómeno o donde su presencia aún no ha tenido gran impacto por las afectaciones a las obras civiles al día de hoy. Alrededor de los altos topográficos se forman familias de fracturas congruentes con la orientación de las pendientes pronunciadas, que son las zonas en las cuales el gradiente de subsidencia es influenciado por la magnitud de subsidencia diferencial en el piedemonte.

El mapa de López-Mendoza (2012) (**Figura 5.8**) muestra en color amarillo las zonas de fracturas y en verde las zonas de fallas en el Distrito Federal producto de su estudio. Además señala que la aparición de éstas, en su mayoría, se encuentran en zonas de lago y de transición. Al comparar este mapa con la zonificación geotécnica del D.F. (GODF, 2004) (**Figura 5.2**); se aprecia que efectivamente la aparición de algunas de sus zonas de estudio se ubican en cambios abruptos entre zona de lago y zona de lomas, como es el caso del Peñón de los Baños y el Peñón del Marqués, así como en el piedemonte al norte de la Sierra de Santa Catarina. De la misma manera, se muestra congruencia con el mapa de gradiente de subsidencia (**Figura 5.7**), salvo por la zona Sur, en donde se tienen las limitantes de la cobertura InSAR expuestas en el Capítulo 4. Es decir, por un lado, se delimitaron zonas propensas al fracturamiento por actividades directas en campo como lo expone López-Mendoza y por el otro según los datos del mapa de gradiente horizontal de subsidencia derivado de InSAR, encontrando congruencia, lo que valida la ubicación de zonas vulnerables al fracturamiento por tratarse de técnicas y criterios independientes que generan resultados congruentes.

Del mismo modo, de la **Figura 5.3** se aprecia que en los alrededores del Peñón del Marqués existen pozos con volúmenes de extracción de agua anuales superiores a los 1.8 millones de metros cúbicos, cuyos conos de abatimiento influyen en el comportamiento local del gradiente de subsidencia. Sin embargo, la presencia de pozos de extracción en otras zonas de la Ciudad no condicionan la aparición de gradiente de subsidencia, ni viceversa. La presencia de un mayor gradiente de subsidencia está también condicionada al entorno geológico local y al abatimiento del nivel estático a nivel regional.

El análisis estadístico del fracturamiento en la Ciudad ayuda a mejorar la visualización de las tendencias generales, en los materiales geológicos y en los materiales de origen antropogénico, que heredan el comportamiento del subsuelo, así como a prever escenarios futuros.

Las observaciones de subsidencia del terreno en las inmediaciones de las estaciones GPS muestran que no hay deformación significativa en UGOL, UJAL, UIGF y UCHI, mostrando traslape en las series de tiempo de los PSIs. En UPEC, la deformación registrada por el GPS es alrededor de -80 mm/año, mientras que en MPAA es cercana a los -220 mm/año; sin embargo, el gradiente de subsidencia es mayor en UPEC que en MPAA pese a que en MPAA la tasa de subsidencia es 2.75 veces la de UPEC. Las estaciones GPS MRRA y MMX1 registran tasas de subsidencia similares con valores entre -240 y -260 mm/año, sin embargo en MRRA el gradiente de subsidencia es mayor para las zonas vecinas. MOCS presenta el mayor gradiente de subsidencia, el GPS registra tasas del orden de -160 mm/año y los PSIs registran valores entre -60 y -210 mm/año, lo que genera el mayor gradiente de subsidencia observado en las estaciones. Esto es claramente debido a que la estación se localiza en las cercanías del Peñón de los Baños. De la ubicación de las estaciones se deduce que los mayores gradientes de subsidencia se presenta en las transiciones entre zonas de piedemonte y de Lago por la heterogeneidad de consolidación de los materiales granulares y por este contraste entre zonas con deformación (lago) y zonas estables en los altos topográficos.

Para las zonas altamente subsidentes se observan abatimientos del nivel estático mayores y con pocas variaciones en el tiempo, con tendencias claras y continuas, tendencia que no se conserva en las zonas menos subsidentes. En estas el comportamiento histórico de los niveles estáticos del acuífero presenta variaciones mayores e incluso se conserva el nivel o se recupera, demostrando que en las regiones menos subsidentes no hay relación directa subsidencia-abatimiento.

En general, se puede decir que en las zonas altamente subsidentes se han subestimado de manera significativa los abatimientos del nivel estático. En un caso hipotético, las lecturas iniciales (p. ej. de 1990) de la profundidad del nivel estático

(PNE) en un pozo en las zonas más subsidentes se pueden considerar sin deformación, pero las lecturas hechas 20 años después (en 2010), con una tasa de subsidencia constante de 225 [mm/año] tienen un error cercano a los 5m: es decir, el nivel estático ha descendido 5 metros más de lo estimado en las mediciones recientes con respecto a la cota cero de las mediciones iniciales. Se pueden realizar correcciones más complejas cuando se considera la carga hidráulica, cuyo cálculo involucra el nivel del terreno en el pozo, para lo cual se mide la cota del brocal del pozo y se le resta la distancia al nivel del suelo. Para el cálculo de la carga hidráulica se usa la fórmula:

$$\text{Carga Hidráulica} = \text{Elevación del Terreno} - \text{Profundidad del Nivel Estático.}$$

Entonces, para calcular la carga hidráulica se debe considerar la tasa de subsidencia correspondiente para la ubicación del pozo, el tiempo transcurrido desde el cálculo de la cota para el brocal del pozo a partir de la fecha de construcción del mismo, por ejemplo 1985, a la primera medición de la PNE, que en el caso planteado es 1990 y la corrección hecha a la PNE en 2010. De este modo se contempla la deformación del terreno de 1985 a 1990 y el error de medición de la PNE de 1990 a 2010 anteriormente discutido, asumiendo una subsidencia lineal, con lo que se tendrían 6.25 metros no considerados de la PNE. en 2010 para el ejemplo planteado. Estas correcciones convierten los datos en mediciones efectivas desde la cota inicial real del terreno y no desde el brocal que presenta movimiento vertical en el tiempo. Las consideraciones anteriores repercuten en la interpretación de las redes de flujo del sistema acuífero así como en la estimación de volúmenes de las reservas de agua. Correcciones análogas se pueden realizar a las series de tiempo disponibles.

El mapa de riesgo del Capítulo 7 permite visualizar en el contexto actual de la distribución de la densidad de población con respecto a las zonas vulnerables a fallamiento asociado a subsidencia.

La distribución del gradiente de subsidencia en la Ciudad de México está estrechamente relacionada con la zonificación geotécnica de la Ciudad de México que en general, se presenta con mayor intensidad en zonas de transición abrupta, en donde los sedimentos de la zona de lago sobreyacen a las rocas más competentes de la

zona de lomas. Cuando los sedimentos experimentan una consolidación por la carga de la mancha urbana o por pérdida de presión de poro generada por la extracción de agua, provocan eventualmente la ruptura de los geomateriales. Otros sectores tienen patrones que corresponden a estructuras en el subsuelo o debido a la heterogeneidad del subsuelo.

La delimitación de la zona metropolitana de la Ciudad de México ha requerido la utilización de predios no aptos para la construcción, así como vías de comunicación y ampliaciones de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo, generando vectores de crecimiento de zonas de alta densidad de población.

Los asentamientos urbanos no planeados en la ZMCM han permitido zonas de alta densidad de población. Muchos de los cuales se localizan en regiones vulnerables, principalmente en la zona de lago y en los piedemontes de altos topográficos, en donde se presentan zonas de alto gradiente horizontal de subsidencia y alta densidad de población.

De este análisis se evidencia una clara ausencia de la planeación urbana que considere el fenómeno de subsidencia y fallamiento asociado en el periodo 1986-2010. En un lapso de 25 años se han establecido 27.4% (más de la cuarta parte) de las áreas de Muy Alto Riesgo junto con el 24.5% de la población total actual en esa zona de riesgo. Los porcentajes de área y población corresponden a cerca de la quinta parte (19.4% y 18.3% respectivamente) de los valores actuales para el caso de la Zonas de Alto Riesgo. El crecimiento de las zonas de Alto y Muy Alto Riesgo ha sido sustancialmente mayor cuando se compara con las zonas de Riesgo Muy Bajo, Bajo y Moderado, en donde el crecimiento en área corresponde a porcentajes menores.

Las zonas con mayor riesgo tenderán a incrementarse, asumiendo que el gradiente de subsidencia sea constante y que la densidad de población irá en aumento, por lo cual la planificación del crecimiento urbano es crítica y necesaria.

Capítulo 9.

CAPÍTULO 9. RECOMENDACIONES.

Teniendo en cuenta que el comportamiento temporal de la magnitud de subsidencia muestra una tendencia lineal, sin aparente variabilidad estacional, por lo que las zonas de alto gradiente de subsidencia se mantienen sin cambios y que la población muestra tendencias de crecimiento (CONAPO, 2012), la administración de nuevos asentamientos urbanos y la licitación de obras en las zonas de mayor riesgo debe ser hacerse teniendo en cuenta estos parámetros.

Las actividades para la mitigación de generación de fracturas requieren de planeación a largo plazo, pues aún suspendiendo la extracción de agua subterránea no se detendrán los efectos de propagación de fallas y fracturas a corto plazo, debido a la compresibilidad de los sedimentos en la zona y su lenta respuesta a los cambios de sistemas de esfuerzos.

Debido a la importancia de las mediciones de la profundidad del nivel estático puede generarse una corrección de las lecturas, que se encuentran subestimadas debido a la subsidencia del área en la que se encuentran los brocales, ya que la metodología convencional para determinar el nivel estático implica la medición de la profundidad del nivel estático desde el brocal del pozo, para la obtención de cargas hidráulicas y posteriores cálculos de volúmenes y flujo de agua en el sistema acuífero.

La administración de la extracción de recursos del subsuelo debe evitar el aumento de tasas de extracción y el consecuente abatimiento del nivel freático, así como buscar la estabilización del mismo a largo plazo, pues los cambios en las tasas de extracción y los abatimientos del nivel estático se correlacionan con incrementos en las tasas de subsidencia (Lesser-Illades y Cortés-Pérez, 1998; Cabral-Cano et al., 2000), en especial en las regiones de transición abrupta entre zona de lago y zona de lomas, en donde el gradiente horizontal de subsidencia tiende a acentuarse (Cabral-Cano et al., 2008).

El análisis de establecimiento urbano en zonas de riesgo a través de las últimas décadas muestra limitaciones y omisiones en la planeación urbana y uso de suelo en el periodo estudiado de 24 años. El proceso de crecimiento urbano continúa, así como el establecimiento de obras de infraestructura pública. Muchos de los problemas asociados a las zonas de alto y muy alto riesgo son conocidos y han sido estudiados a lo largo del tiempo; la evolución de las zonas actuales tendrá consecuencias económicas de gran impacto, conforme la densidad de población siga aumentando y con ello las obras de ingeniería públicas y privadas. Es necesario considerar este fenómeno para la regulación y establecimiento de zonas urbanas en desarrollo temprano, así como obras de transporte colectivo y establecimiento de vías principales de comunicación.

El mapa de riesgo presentado en el Capítulo 7 se propone como una herramienta para la observación de las zonas de riesgo y evaluación de costos derivados de las afectaciones en las obras civiles como producto del fallamiento asociado a subsidencia, considerando que las zonas de mayor riesgo implican mayor número de personas con afectaciones en estructuras y mayores costos para mitigar estas últimas. Dicha evaluación deberá incluir los costos asociados a reparaciones críticas en casas, complejos habitacionales, edificios públicos, reparaciones en las vialidades y costos derivados de la suspensión en el Sistema de Transporte Colectivo, obras de asfaltado en vialidades, obras de reparación en las pistas de aterrizaje del aeropuerto y otras que se consideren prudentes. La evaluación de costos permitirá ubicar al problema en un contexto de interés para los organismos encargados de tomar decisiones relacionadas a frenar el deterioro del medio geológico a través de acciones pertinentes en la administración de recursos hídricos, establecimiento de nuevos asentamientos urbanos, obras destinadas a la vivienda, obras del transporte colectivo y prevención de desastres. Del mismo modo, el mapa de riesgo generado en este trabajo proporciona un criterio para la administración del crecimiento urbano en la zona metropolitana de la Ciudad de México, lo que permitirá reducir el asentamiento urbano en zonas que en un futuro representarán Zonas de Alto Riesgo y el aumento de los daños conocidas en la actualidad para dichas regiones.

Referencias.

CAPÍTULO 10. REFERENCIAS.

Aguayo, J., Marín, S., Sánchez, F., 1989, Evolución geológica de la Cuenca de México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Memorias del Simposio sobre tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México, pp. 25-41.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035.

Baldrige, A. M., S.J. Hook, C.I. Grove and G. Rivera, 2009, The ASTER Spectral Library Version 2.0: Remote Sensing of Environment, vol 113, pp. 711-715:
<http://speclib.jpl.nasa.gov/>
(Consultado en Junio del 2012).

Bhatta, B., Saraswati, S. and Bandyopadhyay, D., 2010 a, Quantifying the degree-of-freedom, degree-of-sprawl and degree-of-goodness of urban growth from remote sensing data: Elsevier, Applied Geography, vol. 30, p. 96-11.

Bhatta, B., Saraswati, S. and Bandyopadhyay, D., 2010 b, Urban sprawl measurement from remote sensing data: Elsevier, Applied Geography, vol. 30, p. 731-740.

Berardino, P., Fornaro, G, Lanari, R., Sanstori, E., 2002, A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, no. 11, p. 2375-2383.

Bürgmann, R., Rosen, P., Fielding, E., 2000, Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation: Earth Planet Sciences, 28: p. 169-209.

Cabral-Cano, E., Lugo-Hubp, J., Ortega, A., Duran, V., 2000, Análisis de fallas y fracturas en la Delegación Iztapalapa; Reporte de Avances 1, Instituto de Geofísica: UNAM, 102 p.

Cabral-Cano, E., Dixon, T., Millares-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., Carande, R., 2008, Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City: GSA Bulletin, v. 120, no. 11/12, p. 1556-1566.

Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Dements, C., Cigna, F., Díaz-Molina, O., 2010, Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in Central Mexico: Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development, IAHS, publ. 399, p. 255-259.

Cabral-Cano, E., Diaz Molina, O., Delgado-Granados, H., 2011, Subsistencia y Mapas de Peligro por Fallamiento Superficial: Un Ejemplo en el área Nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, (ISSN 1405-3322), v. 63, no 1, p. 53-60.

Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Hernández-Espriú, J., Cigna, F., Wdowinsky, S., Osmanoglu, B., Falorni, G., Bohane, A., Colombo, D., 2012, Subsidence Induced Faulting Hazard Risk Maps in Mexico City and Morelia, central Mexico: EOS Abstract Presented al 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 dec. 2012.

Carreón-Freyre, D., Hidalgo-Moreno, C., Hernández-Marín, M., 2006, Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana; Número especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, no. 2, p. 237-250.

Carrillo, N., 1948, Influence of artesian wells on the sinking of México City, in Proceedings of the Second International Conference on Soils Mechanics: Rotterdam, Holland, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. VII.

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de Mexico (CHCVM), 1953, Boletín de Mecánica de Suelos, v. 1, México City.

Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2012, Proyecciones de población 2010-2050: CONAPO: <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones> (Consultado en mayo del 2013).

Davis, G., Reynolds S., 1996, Structural Geology of Rocks and Regions, John Wiley & Sons ed., USA.

De Cserna, Z. D., De la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L. M., & Mota-Palomino, R., 1988, Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 104, 71.

Dewan, A. M., Yamaguchi, Y., 2009, Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization: Elsevier, Applied Geography, vol. 29, 390-401.

DU Peijun, LI Xingli, CAO Wen, LOU Yan, ZHANG Huapeng, 2010, Monitoring urban land cover and vegetation change by multi-temporal remote sensing information: Elsevier, Mining Science and Technology, vol. 20, p. 992-932.

Envisat-10 years in orbit, 2012, esa - European Spatial Agency: http://www.esa.int/SPECIALS/Envisat/SEMHV05Y1ZG_0.html (Consultado en Septiembre del 2012). (Envisat-10 years in orbit - esa, 2012).

Espinoza, J., 2011, Conjunto Villas de San Martín: Oficina contra desalojos habitacionales: <http://oficinacontradesalojos.blogspot.mx/2011/09/conjunto-habitacional-villas-de-san.html> (Consultado en diciembre del 2012).

ESRI, 2008, ArcGIS Desktop, Versión 9.3, Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Figueroa-Vega, F., 1984, Case history no. 9.8, Mexico, in Poland, J.F., ed., Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-Water Withdrawal: Paris, France, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, p. 217-232.

Galloway, D. L., & Hoffmann, J., 2007, The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology: Hydrogeology Journal, 15(1), 133-154.

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

Gimenez, Y., 2010, Clasificación no supervisada: el método de k-medias, Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 35 pp. : http://cms.dm.uba.ar/academico/carreras/licenciatura/tesis/2010/Gimenez_Yanina.pdf (Consultado en Septiembre del 2012).

Gobierno del Distrito Federal (GDF), 2004, Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones: Gaceta Oficial del Distrito Federal, v. II,103-BIS, p. 11–39.

Grohmann, C.H. and Campanha, G.A.C., 2010. OpenStereo: open source, cross-platform software for structural geology analysis. Presented at the AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, CA.: <http://www.igc.usp.br/index.php?id=openstereo> (Consultado en enero del 2012).

Guzmán, S., 2012, Alerta por Grietas en Iztapalapa: El universal: <http://www.eluniversaldf.mx/home/nota46881.html>

Hernández-Espriú, A., Goya-Sánchez, J., Macías-González, H., Carrera-Hernández, J. (2011). Mapa de la vulnerabilidad del acuífero de abastecimiento de la Ciudad de México: Aprovechamiento del agua subterránea en la Cuenca de México, Editado por Gómez, E., UAM-Editorial Porrúa. Obra en proceso de publicación.

Hernández-Espriú, A., Cabral-Cano, E., J. Antonio Reyna-Gutiérrez, Sánchez-León, E., Macías-González, H., Macías-Medrano, J., Carrera-Hernández, (2012). Modification of the DRASTIC methodology for assessing groundwater vulnerability in urban areas affected by land subsidence effects: Application to Mexico City Aquifer System. 39th International Association of Hydrogeologists (IAH) Congress “Confronting Global Change”, 16-21 septiembre, Niagara Falls, Canadá.

Hernández-Espriú, A., Reyna-Gutiérrez, J.A., Sánchez-León, E., Cabral-Cano, E., Carrera-Hernández, J., Martínez-Santos, P., Goya-Sánchez, J., Macías-Medrano, E. DRASTIC-Sg Model: A modified DRASTIC methodology for assessing groundwater vulnerability in urban areas affected by differential land subsidence effects. Application to Mexico City Aquifer-Aquitard System. Sometido al Hydrogeology Journal.

Herrera, I., Martínez, R., Hernández, G., 1989, Contribución para la administración científica del agua subterránea de la Cuenca de México: Geofísica Internacional, 28, 2.

INEGI, 2011a, Censos de población y vivienda 2010: INEGI: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/default.aspx> (Consultado en mayo del 2013).

INEGI, 2011b, Medio Ambiente, Censos económicos 2009: INEGI: <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=21385> (Consultado en mayo del 2013).

INEGI, 2012a, Provincias Fisiográficas: Datos vectoriales escala 1:1000000: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/fisiografia/InfoEscala.aspx> (Consultado en enero del 2013).

INEGI, 2102b, Contenido: Documento adjunto a las geometrías AGEBS.

- Jat M. K., Garg, P. K. and Khare D., 2008, Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques: Elsevier, International journal of Applied Earth Observations, vol. 10, p. 26-43.
- Lesser-Illades, J. y Cortés-Pérez, M., 1998, El hundimiento del terreno de la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema drenaje: Ingeniería Hidráulica en México, 13(3), 13-18.
- Lesser-Illades, J. M., González-Posadas, D., 2005a, Evolución Piezométrica del acuífero de la Ciudad de México: Congreso de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., Memorias.
- Lesser-Illades, J. M., González-Posadas, D., 2005b, El agua subterránea de la Ciudad de México: Congreso de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., Memorias.
- Llanos, R., 2008, Grietas de un kilómetro surcan la Línea A del Metro, revela estudio de la UNAM, La Jornada: <http://www.jornada.unam.mx/2008/12/11/index.php?section=capital&article=047n1cap> (Consultado en diciembre del 2012).
- López-Mendoza, E., 2012, Análisis del fracturamiento de las zonas de topografía baja del Distrito Federal para Evaluar Áreas Vulnerables a la Contaminación de los Acuíferos [tesis de licenciatura]: UNAM, Facultad de Ingeniería, 218 p.
- Mapping and satellite data, 2012, Eduspace, ESA European Space Agency: http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_EN/SEM1VX3Z2OF_0.html (Consultado en septiembre del 2012).
- Mazari, M., and Alberro, J., 1991, Hundimiento de la Ciudad de México: in Mazari, M., y Kumate, J., eds., Los Problemas de la Cuenca de México: Ciudad de México, Mexico, El Colegio Nacional, p. 83–114.
- Mazari, M., Mazari, H. M., Ramírez, C., Alberro, J., 1992, Efectos de la extracción de agua en la zona lacustre del valle de México: *Volumen Raúl J. Marsal*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. México, 37-48.
- Morales, A., 2009, Piden restringir edificación de casas en zona de grieta: Milenio: <http://www.milenio.com/cdb/doc/impreso/8619814> (Consultado en diciembre del 2012).
- Mooser, F., 1975, Historia geológica de la Cuenca de México: Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal: Mexico, DF, Departamento del Distrito Federal, Tome 1, p. 7–38.
- Natural Breaks (Jenks), 2007, ESRI, ArcGIS 9.2 Desktop Help: [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural_breaks_\(jenks\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural_breaks_(jenks)) (Consultado en Marzo del 2013).
- Ortega, A., Cherry, J.A., and Rudolph, D.L., 1993, Largescale aquitard consolidation near Mexico City: Ground Water, v. 31, p. 708–718, doi: 10.1111/j.1745-6584.1993.tb00841.x.
- Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Yan Jiang, 2011, Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR: Elsevier, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13, p. 1-12.

Ramón, R. y Salinas, J., 2009, Grietas en Chalco, por desmedida extracción de agua: especialistas: La jornada: <http://www.jornada.unam.mx/2009/07/25/index.php?section=estados&article=025n1est> (Consultado en diciembre del 2012).

Remote Sensing Tutorial, 2012, NRCAN Natural Resources Canada: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-ensing/fundamentals/1924> (Consultado en Septiembre del 2012).

Romero-Miranda, E., 2011, Importancia de las fracturas en diferentes aplicaciones de la Geología, [tesis de licenciatura]: UNAM, Facultad de Ingeniería.

Ryerson, R. A., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, Manual of Remote Sensing vol. 2: Principles and Applications of Imaging Radar: John Wiley and Sons, Inc., 3rd ed., 866 pp.

Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., & León, E., 2005, Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México: Publicaciones TGC, México.

Sarvestani, M. S., Ibrahim, A. L. and Kanaroglou P., 2011 Three decades of urban growth in the city of Shiraz, Iran: A remote sensing and geographic information systems application: Elsevier, Cities, Vol. 28, p. 320-329.

SqueeSAR, 2011, Tele-Rilevamento Europa (TRE): <http://treuropa.com/technique/squeesar> (Consultado en Marzo del 2013).

Solano-Rojas, D., Cabral-Cano, E., Hernández-Espriú, J., Cigna, F., Wdowinsky, S., Osmanoglu, B., Falorni, G., Bohane, A., Colombo, D., 2012, Mapas de Riesgo por Fallamiento Asociado a subsidencia en las ciudades de México y Morelia: Unión Geográfica Mexicana, Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jal., Resúmenes.

Strozzi, T., Werner, C., Wegmüller, U., Wiesmann, A., 2004, Monitoring Land Subsidence in Mexico City with ENVISAT ASAR Interferometry: GAMMA Remote Sensing, Envisat and ERS Symposium: http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/3P04_3_strozzi_234.pdf (Consultado en Marzo del 2013).

The Worldwide Reference System, 2011, NASA portal: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/wrs.html> (Consultado en Septiembre del 2012).

United States Geological Survey (USGS), 2011, Spectral Laboratory, USGS Spectral Libraries: <http://speclab.cr.usgs.gov/> (Consultado en Junio del 2012).

UAM, 2005, Expansión histórica del Área urbana de la Ciudad de México: Observatorio Urbano de la Ciudad de México: <http://www.ocim.azc.uam.mx/EXPAN%20MET/mwf/EXPAN%20ZMVM.mwf> (Consultado en mayo del 2013).

Valdéz, I., 2012, Se hundan 5 estaciones de la Línea A del Metro: Milenio: <http://www.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/9ef300a600d481e6b120016e7222b077>
(Consultado en diciembre del 2012).

Vázquez-Sánchez, E., y Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: Geofísica Internacional, v. 28, p. 133–190.

WENG Qihao, 2010, Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends: Elsevier, Remote Sensing of Environment. (In Press, consultado en Septiembre del 2011).

Weber, C. and Puissant., A., 2003, Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area: Elsevier, Remote Sensing of Environment, vol. 86, p. 341-352.

What is Remote Sensing?, 2012, Eduspace, ESA European Space Agency: http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_EN/SEMF9R3Z2OF_0.html
(Consultado en septiembre del 2012).