



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“SIMULACIÓN DE INUNDACIONES EN LA PLANICIE LACUSTRE
DE SAN MIGUEL XICO, MUNICIPIO DE VALLE DE CHALCO
SOLIDARIDAD, ESTADO DE MÉXICO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

CAROLINA RAMÍREZ NÚÑEZ

JURADO EXAMINADOR

- 1) DR. JEAN-FRANÇOIS PARROT (DIRECTOR DE TESIS)
- 2) DR. JORGE LÓPEZ BLANCO (PRESIDENTE)
- 3) MTRA. ORALIA OROPEZA OROZCO (VOCAL)
- 4) DR. OSCAR ARNOLDO ESCOLERO FUENTES (SUPLENTE)
- 5) DRA. BLANCA LUCIA PRADO PANO (SUPLENTE)



MÉXICO D.F. OCTUBRE DE 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*A mi Padre celestial,
estabas en el silbo apacible y delicado*

*A mi familia y amigos,
siempre están en mi mente y corazón*

*A mis profesores y mentores,
gracias por sus enseñanzas*

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM por el apoyo recibido, en especial a la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Gloria Benítez Alba, María Luisa Reyes Ochoa, Rosario Flores, Graciela Solache y Araceli Chaman.

Gracias al Dr. Jean-François Parrot, quien con paciencia, creatividad y chacoteo me enseñó y orientó durante esta etapa de mi vida.

Al jurado examinador, integrado por la Dra. Blanca Prado, la Mtra. Oralia Oropeza Orozco, el Dr. Jorge López-Blanco y el Dr. Oscar Escolero Fuentes, quienes hicieron comentarios y preguntas valiosas para mejorar este trabajo, gracias.

Gracias al Instituto de Geología y al Dr. Oscar Escolero Fuentes por su apoyo y préstamo del equipo necesario para el trabajo en campo, y por supuesto a Oscar Mario Salas y Marina Ferreira Ocaña quienes me ayudaron en el levantamiento con GPS, ¡gracias otra vez chicos!

A la Dra. Verónica Ochoa Tejeda y a la Mtra. Antonia Santos, sus comentarios y recomendaciones siempre han sido valiosas.

A mis profesores del posgrado, gracias por su esfuerzo en preparar las clases, organizar prácticas de campo y revisar los trabajos o exámenes con los que enriquecieron mi formación.

Gracias a todo el personal de la Biblioteca Conjunta de Ciencias de la Tierra y de la Biblioteca del Instituto de Geografía, siempre brindaron un servicio excelente en la consulta y préstamo de materiales.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la información provista por el Dr. Lorenzo Vázquez Selem, el Laboratorio de Análisis GeoEspacial del Instituto de Geografía, el Servicio Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua, gracias por su apoyo.

Índice

Índice de figuras y tablas	5
Índice de abreviaturas	10
Resumen	15
<i>Introducción</i>	16
Capítulo I. Antecedentes históricos	18
I.1 Deseccación del Lago de Chalco	19
I.2 Extracción de agua en la planicie lacustre de Chalco	20
I.3 Estudios realizados sobre subsidencia, inundación y características químicas del agua.....	22
Capítulo II. Características geográficas generales de la zona de estudio	24
II.1 Ubicación	24
II.2 Geología.....	25
II.2.1 <i>Geología regional</i>	25
II.2.2 <i>Geología de la zona de estudio</i>	27
II.2.2.1. <i>Vulcanitas del Cuaternario (Sierra Nevada)</i>	28
a) <i>Formación Llano Grande</i>	28
b) <i>Formación El Pino</i>	29
c) <i>Formación Tláloc</i>	29
d) <i>Formación Iztaccíhuatl</i>	30
e) <i>Formación Popocatepetl</i>	30
II.2.2.2. <i>Vulcanitas del Cuaternario Superior (Formación Chichinautzin)</i>	31
II.2.2.3. Planicie lacustre	32
a. Costra Superficial (CS).	32
1. Relleno Artificial (RA).	33
2. Suelo Blando (SB).....	33
3. Costra Seca (CS).	33
b. Formación Arcillosa Auperior (FAS).	33
1. Arcilla Preconsolidada Superficial (APS).....	33
2. Arcillas Normalmente Consolidadas (ANC).	33
3. Arcilla Consolidada Profunda (ACP).....	33

4. Lentes Duros (LD).....	33
c. Capa dura.....	34
d. Formación arcillosa inferior (FAI).....	34
e. Depósitos profundos (DP).....	34
II.2.2.4. Planicie aluvial.....	34
II.3 Tectónica.....	35
II.3.1. Fracturamientos al NNE.....	35
II.3.2. Arco Volcánico Chichinautzin.....	35
II.3.3. Fracturamientos en Z.....	35
II.3.4. Transcurrencias.....	36
II.4 Hidrogeología.....	37
1. Sedimentos lacustres.....	38
2. Depósitos volcánicos cuaternarios.....	38
3. Depósitos piroclásticos y aluviales.....	39
4. Rocas volcánicas del Terciario.....	39
II.5 Geomorfología.....	40
1. Planicie lacustre.....	40
2. Planicie aluvial-lacustre.....	40
3. Planicie aluvial.....	40
4. Piedemonte.....	41
5. Laderas inferiores de montaña.....	41
II.6 Hidrología.....	42
II.7 Suelos.....	42
1. Solonchack.....	42
- Solonchak gléyico.....	42
- Solonchak mólico.....	42
2. Regosol.....	43
- Regosol dístrico:.....	43
- Regosol éútrico:.....	43
3. Andosol.....	43
4. Cambisol.....	43
5. Phaeozem.....	43
6. Fluvisol.....	44

7. <i>Gleysol</i>	44
8. <i>Leptosol</i>	44
II.8 Vegetación	45
II.9 Clima.....	46
II.10 Subsistencia	47
II.10.1 <i>Extracción de agua subterránea</i>	48
II.10.2 <i>Características químicas del agua subterránea</i>	49
Capítulo III. Datos utilizados para los pre-tratamientos y la simulación de inundaciones	50
III.1 Mapas topográficos, geológicos y geomorfológicos	50
III.2 Imágenes de satélite.....	51
III.2.1. <i>Imágenes Landsat</i>	51
III.2.2. <i>Imágenes Google Earth</i>	56
III.3 <i>Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución (MDE-AR)</i>	56
III.3.1. <i>MDE</i>	56
III.3.2 <i>Datos utilizados para la interpolación</i>	59
III.3.2.1. <i>Datos vectoriales de INEGI</i>	59
III.3.2.2. <i>Puntos acotados</i>	60
- <i>Equipo</i>	60
- <i>Posprocesamiento de datos</i>	62
- <i>Procesamiento de líneas base</i>	62
- <i>Ajuste de red</i>	62
- <i>Resultados</i>	62
III.4 Interpolación.....	64
Capítulo IV. Pre-tratamientos de datos climatológicos e imágenes de satélite	67
IV.1 Análisis de datos de la precipitación pluvial	67
IV.1.1 <i>Coefficiente de Hurst</i>	68
a) <i>Generalidades</i>	68
b) <i>Datos utilizados</i>	71
c) <i>Cálculo del Coeficiente de Hurst (H)</i>	71
d) <i>Resultados</i>	73

IV.1.2 <i>Análisis de Frecuencia</i>	73
a) <i>Generalidades</i>	75
b) <i>Resultados</i>	76
IV.2 <i>Extracción de la zona urbana</i>	76
IV.2.1. <i>Zona urbana</i>	77
IV.2.2. <i>Tratamientos para la extracción de la zona urbana</i>	77
a) <i>Normalized Difference Built-up Index (NDBI)</i>	77
b) <i>Adaptación del Double-Window Flexible Pace Search (DFPS) al NDBI</i>	78
c) <i>Dimensión Fractal Local (Local Fractal Dimenssion)</i>	79
Capítulo V. Simulación de inundaciones	85
V.1 <i>Tipos de inundación</i>	85
V.1.1 <i>Pluvial</i>	85
V.1.2 <i>Ruptura de presas</i>	86
V.1.3 <i>Sobrecarga</i>	86
V.2. <i>Simulación de inundaciones</i>	86
V.2.1 <i>Tipo de algoritmos</i>	87
V.2.2 <i>Escenarios y algoritmos de simulación de inundaciones</i>	89
a) <i>Flooding</i>	90
b) <i>Sim_filling</i>	93
c) <i>Water Filling</i>	96
d) <i>Derrame</i>	96
e) <i>Charcos</i>	99
f) <i>Subsid</i>	105
V.2.3. <i>Observaciones</i>	114
Conclusiones	117
Referencias	118
Anexo I. Programas ejecutables utilizados	134
Anexo II. Dendrogramas para la caracterización de las zonas de encharcamiento	137

Índice de figuras y tablas

Figura I. 1. Poblados afectados en el Estado de México y Distrito Federal por la desecación del antiguo Lago de Chalco.....	21
Figura II. 1. Localización de la zona de estudio en el Municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México.....	24
Figura II. 2. Geología del sureste de la Cuenca de México.....	28
Figura II. 3. Rasgos tectónicos de la zona de estudio: a) Fracturamientos del Plio-Pleistoceno al NNE; b) Fracturamientos y Fosas del arco Chichinautzin del Pleistoceno; y c) Fracturamientos en “Z” de las Sierras Mayores del Plioceno Superior al Pleistoceno (Mooser <i>et al.</i> , 1996).....	37
Figura II. 4. Unidades hidrogeológicas de la subcuenca de Chalco; a) vista en planta, b) perfil que muestra el espesor de cada unidad así como la posición del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina (Ortega-Guerrero <i>et al.</i> , 1993).	40
Figura II. 5. Unidades geomorfológicas principales de la zona en estudio.....	41
Figura II. 6. Unidades cartográficas de suelo. Fuente: Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP, 1979), modificado con WRB (2006).....	45
Figura II. 7. Vegetación y uso de suelo en la zona de estudio. Fuente: Inventario Nacional Forestal 2004-2009.....	46
Figura II. 8. Precipitación y temperatura promedio en la estación climática Chalco 1971-2000, 2240 msnm.....	47
Figura III. 1. Etapas de la simulación de inundaciones utilizando un MDE-AR.....	50
Figura III. 2. Desarrollo del Nuevo Lago de Chalco. Fuente: Imágenes <i>Landsat MSS</i> (1973, 1985, 1989), <i>ETM</i> (2000) y <i>Google Earth</i> (2008).	53
Figura III. 3. Mapa de peligro de inundación (Ortiz-Zamora, 2006)	54
Figura III. 4. Traza urbana de la zona en estudio que comprende las colonias de San Miguel Xico, las Américas I y II. Fuente: INEGI (2009), <i>Google Earth</i> (2009).....	55
Figura III. 5. Canal General: a) revestimiento del dique hacia la zona urbana a la altura de la calle Cuitláhuac y b) bombeo del agua residual hacia el Canal General y el Nuevo Lago de Chalco.....	56

Figura III. 6. Aumento de escala y disminución de escala en una malla; S indica escala, S ⁻ escalas pequeñas y S ⁺ escalas grandes. En Hengl (2006), basado en McBratney (1998)....	58
Figura III. 7. Puntos acotados con GPS de precisión en la zona de San Miguel Xico, Municipio de Valle de Chalco, Estado de México.	61
Figura III. 8. Mediciones en la colonia San Miguel Xico, municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Edo. de México. a) Canal General y Nuevo Lago de Chalco, b) medición en la calle Tezozomoc y, c) vía del ferrocarril Cuernavaca-México.....	63
Figura III. 9. Cálculo de la interpolación de las curvas de nivel de 1000 y 1100 msnm.....	65
Figura III. 10. Elemento estructural utilizado por dilatación de curvas. En Parrot y Ochoa-Tejeda (2005).....	66
Figura IV. 1. Relación de la dimensión fractal (rugosidad) y el Coeficiente de <i>Hurst</i> (<i>H</i>), en Barnsley <i>et al.</i> (1988).....	70
Figura IV. 2. Precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco durante el periodo 1961-2008. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2010).....	71
Figura IV. 3. Análisis <i>R/S</i> con la función $y = 3.55x^{0.117}$ para los datos de precipitación para los datos de precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco de 1961-2008 (SMN, 2010).....	73
Figura IV. 4. Escenario climático A2 en relación con la precipitación pluvial para la Región Centro de México para las temporadas seca y húmeda del año.....	74
Figura IV. 5. Resultados de la Adaptación del <i>Double-Window Flexible Pace Search (DFPS) al NDBI</i> utilizando el algoritmo <i>Building_extraction</i> (Parrot, 2009).....	80
Figura IV. 6. Dimensión fractal 3D usando el conteo de cajas, ejemplo $s=12$ y distintos tamaños de malla equivalentes A: $q=1$; B: $q=2$; C: $q=3$; D: $q=6$. En Taud y Parrot (2005).....	82
Figura IV. 7. Dimensión Fractal Local 3D de una línea y un plano con $s=12$ y $q=1, 2, 3, 6$; en Taud y Parrot (2005)	83
Figura IV. 8. Resultado del tratamiento de Dimensión Fractal Local con un tamaño de caja 24 y un coeficiente flotante de 0.2 (a) y 0.7 (b)	84
Figura V. 1. Ejemplo de la localización de la zona de menor altitud en la máscara de la zona urbana cuyo límite comprende el Canal General al Oeste, y la vía de ferrocarril al Este.....	91

Figura V. 2. Resultados del cálculo con el algoritmo <i>Flooding</i> para a) 50 mm y b) 88 mm de precipitación pluvial.....	92
Figura V. 3. Zona de acumulación en la Av. Acapol casi esquina con Av. Tezozomoc.....	93
Figura V. 4. Cálculo del algoritmo <i>Sim_filling</i> con dos puntos iniciales de valor <i>Atp</i> ; la lámina se distribuye hacia los píxeles vecinos (colores fríos a cálidos) que cumplen con la condición de desplazamiento.....	94
Figura V. 5. Resultados del algoritmo <i>Sim_filling</i> con tres puntos iniciales de llenado para a) 5, b) 50 y c) 88 mm de lluvia; y d) 50, e) 150 y f) 180 cm de ascenso.....	95
Figura V. 6. Escenario considerado en el algoritmo <i>Water_filling</i>	96
Figura V. 7. Resultados del algoritmo <i>Water_filling</i> con una lámina total de a) 2226, b) 2226.50 y c) 2226.80 msnm.....	97
Figura V. 8. Llenado progresivo de píxeles, algoritmo desarrollado por Parrot (2009).....	98
Figura V. 9. Resultados del programa <i>Derrame.exe</i>	99
Figura V. 10. Llenado progresivo del algoritmo <i>Charc</i> en función de la altitud, a partir del punto más bajo (rojo), conforme se incrementa la profundidad, el charco comienza a llenarse (punto verde) (a) y la codificación posterior de los diferentes charcos hasta que se unen (colores más claros) (b).....	100
Figura V. 11. Resultados de la simulación con el algoritmo <i>Charc</i> que muestra las zonas de encharcamiento (rojo) (a) y las micro-cuencas lacustres definidas en función del punto más bajo (matiz de azul).....	101
Figura V. 12. Profundidad de la lámina de agua en cada micro-cuenca lacustre para una precipitación pluvial de 50 y 88 mm (b y d, respectivamente).....	102
Figura V. 13. Relación entre la profundidad con la superficie (a) y el volumen (b) de las zonas de encharcamiento con 88 mm de lluvia.....	103
Figura V. 14. Grupos de charcos (1(a), 2(b) y 3(c)) obtenidos con el algoritmo de <i>Johnson</i>	105
Figura V. 15. Ubicación de los piezómetros NP2 y NP3 utilizados en el modelo de subsidencia de Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2010). En Ortega-Guerrero <i>et al.</i> (1999).	106

Figura V. 16. Ejemplo de la máscara de profundidad del acuífero en el que se calcula el eje principal (EP), el punto de entrada (PE), el punto de salida (PS) y el punto más bajo de subsidencia (PB).....	108
Figura V. 17. Resultado de los tratamientos con los algoritmos <i>Subsid</i> y <i>Flooding</i> a) en el MDE-AR con 19 m de subsidencia y b) en el MDE-AR con 23 m de subsidencia.....	109
Figura V. 18. Resultado de los tratamientos con los algoritmos <i>Subsid</i> y <i>Water_filling</i> a) en el MDE-AR con una subsidencia de 19 m y láminas de 50 cm y b) 80 cm; y c) en el MDE-AR con la subsidencia de 23 m y láminas de 50 cm y d) 80 cm.....	110
Figura V. 19. Resultados de los tratamientos aplicados a los MDE-AR obtenidos con el algoritmo <i>Subsid</i> aplicando el algoritmo <i>Derrame</i> en el MDE-AR con 19 m de subsidencia.	111
Figura V. 20. Puntos acotados de subsidencia en 1986, 1991, 1997 y 2006 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) obtenidos en la Carretera Chalco-Mixquic (CCh-M); Avenida Cuauhtémoc (AvCua); Carretera Chalco-Tláhuac (CCh-T) y el Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina (SPM-SC).....	112
Figura V. 21. Puntos acotados de subsidencia en el periodo 1997-2006 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) en los municipios de Valle de Chalco y Chalco Díaz de Covarrubias: Av. Cuauhtémoc (AvCua), Carretera a Cuautla (CCuaut), Carretera a Chalco (CCh), Calle Morelos (CMor), Calle Hidalgo (CHgo), Carretera Chalco-Xico Nuevo (CCh-XN), Carretera Chalco-Mixquic (CCh-M), Carretera Chalco-Tláhuac (CCh-T), Vía de Ferrocarril (VF), Calle Cuauhtémoc (CCua), Calle Álvaro Obregón (CAO), Av. Vía del Prestigio (AvVP), Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina (SPM-SC), Av. López Mateos (AvLM) y Calle Francisco Sarabia (CFS).....	113
Figura V. 22. Escenarios de peligro de inundación en San Miguel Xico, Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México que considera el máximo de precipitación esperado (88 mm) así como la subsidencia de 25 y 40 cm/año (Escenario de inundación: 1. <i>Charc</i> , 2. <i>Derrame</i> , 3. <i>Flooding</i> , 4. <i>Sim_filling</i> , 5. <i>Water_filling</i> , 6. <i>Subsid&Derrame</i> , 7. <i>Subsid&Flooding</i> , 8. <i>Subsid&Water_filling</i> .).....	116

Tabla III. 1. Valores de altitud máxima y mínima obtenidos en diferentes sitios de la planicie lacustre de San Miguel Xico, Mun. Valle de Chalco Solidaridad.....	63
Tabla IV. 1. Cantidad de precipitación máxima esperada para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años usando la distribución de probabilidad de <i>Gumbel (I)</i>	76
Tabla V. 1. Escenarios y programas para la simulación de inundaciones.....	89
Tabla V. 2. Valores medios por grupo de charcos con una precipitación máxima de 50 mm en 24 hrs.	104
Tabla V. 3. Valores medios por grupo de charcos con una precipitación máxima de 80 mm en 24 hrs.....	104
Tabla V. 4. Subsistencia total acumulada en los sitios de monitoreo.....	107
Tabla V. 5 Superficie urbana en que coinciden los distintos escenarios de inundación (1. <i>Charc</i> , 2. <i>Derrame</i> , 3. <i>Flooding</i> , 4. <i>Sim_filling</i> , 5. <i>Water_filling</i> , 6. <i>Subsid&Derrame</i> , 7. <i>Subsid&Flooding</i> , 8. <i>Subsid&Water_filling</i> , obtenidos con el <i>software Nbpixitem</i> (Parrot, 2001) y <i>Cross_item</i> (Parrot, 2003)	115

Índice de abreviaturas

Avenidas y calles

AvCua	Avenida Cuauhtémoc
AvLM	Av. López Mateos
AvVP	Av. Vía del Prestigio
CAO	Calle Álvaro Obregón
CCh	Carretera a Chalco
CCh-M	Carretera Chalco-Mixquic
CCh-T	Carretera Chalco-Tláhuac
CCh-XN	Carretera Chalco-Xico Nuevo
CCua	Calle Cuauhtémoc
CCuaut	Carretera a Cuautla
CFS	Calle Francisco Sarabia
CHgo	Calle Hidalgo
CMor	Calle Morelos
SPM-SC	Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina
VF	Vía de Ferrocarril

Equipo, herramientas y programas

<i>ASTER</i>	<i>Advance Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
<i>DEMONIO</i>	<i>Digital Elevation Models Obtained by Numerical Interpolating Operation</i>
<i>fBm</i>	<i>fraccional Brownian motion</i>
<i>fGn</i>	<i>fractional Gaussian noise</i>
<i>FROG</i>	<i>Fractal Research On Geosciencies</i>
<i>GPS LI</i>	<i>Sistema de Posicionamiento Global con antena tipo EPOCH LI</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>Landsat ETM+</i>	<i>Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
<i>Landsat MSS</i>	<i>Landsat Multi-spectral Scanner</i>
<i>LiDAR</i>	<i>Light Detection And Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR)</i>
<i>MDE</i>	<i>Modelo Digital de Elevación</i>
<i>MDE-AR</i>	<i>Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución</i>
<i>MDT</i>	<i>Modelo Digital del Terreno</i>
<i>Radar</i>	<i>Radio Detection and Ranking</i>
<i>RMS</i>	

<i>SPOT</i>	<i>Système Probatoire d'Observation de la Terre</i>
<i>TIN</i>	<i>Triangular Irregular Network</i>
<i>TLALOC</i>	<i>Tridimensional Landscape Analysis & Local Operating Computation</i>
<i>WGS84</i>	<i>World Geodetic System 1984</i>

Geología

CVTM	Cinturón Volcánico Transmexicano
CS	Costra Superficial
RA	Relleno Artificial
SB	Suelo Blando
CS	Costra Seca
FAS	Formación Arcillosa Superior
APC	Arcilla Preconsolidada Superficial
ANC	Arcillas Normalmente Consolidadas
ACP	Arcilla Consolidada Profunda
LD	Lentes Duros
CD	Capa Dura
FAI	Formación Arcillosa Inferior
DP	Depósitos Profundos

Instituciones

CEN	Comité Europeo de Normalización
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CHVM	Comisión Hidrológica del Valle de México
CNA	Comisión Nacional del Agua
CNA-GAVM	Comisión Nacional del Agua-Gerencia de Aguas del Valle de México
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DDF	Departamento del Distrito Federal
<i>DHI</i>	<i>Danish Hydraulic Institute</i>
<i>HEC</i>	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
<i>HEC-RAS</i>	<i>Hydrologic Engineering Center River Analysis System</i>
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
LAGE	Laboratorio de Análisis GeoEspacial
RGNA	Red Geodésica Nacional Activa

SARH-CAVM	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión de Aguas del Valle de México
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

Variables

A_i	Altitud inferior
A_n	Altitud del píxel vecino
A_p	Píxel inicial con la altitud mínima
A_p	Valor de altitud
A_s	Altitud superior
A_{tp}	Altitud total del píxel
B_H	Nivel de tiempo
d	Distancia entre nodos
d	Distancia total
d_i	Distancia mínima
d_s	Distancia máxima
D_E	Dimensión euclidiana
DF o FD y Drs	Dimensión Fractal (<i>Fractal Dimenssion</i>)
$DFPS$	<i>Double-Window Flexible Pace Search</i>
D_T	Dimensión topológica
e	Radio de partícula
H	Coefficiente flotante
H	Coefficiente de <i>Hurst</i>
h	Coefficiente de resolución vertical
h'	Carga hidráulica
i, j	Coordenadas de un píxel
I	Distribución de <i>Gumbel</i>
I	Imagen original
I_c	Valor del píxel central
K	Factor de frecuencia
K'	Conductividad hidráulica
LFD	<i>Local Fractal Dimenssion</i>
m	Rango
m_n^*	Déficit ajustado
M_n^*	Excedente ajustado

n	Tamaño de muestra
$NDBI$	<i>Normalized Difference Built-up Index</i>
$NDVI$	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
Np	Número de nodos
NP2	Piezómetro de monitoreo 2
NP3	Piezómetro de monitoreo 3
Ns	Número total de cajas llenas
ps	Tamaño de píxel
P	Pendiente
PBS	Punto más bajo de subsidencia
PE	Punto de entrada
P_j	Cantidad de precipitación máxima para el año j
PS	Punto de salida
P_t	Cantidad de precipitación para un periodo de retorno específico
P_{TM}	Media de la cantidad máxima de precipitación anual
q	Tamaño de caja
R	Imagen resultado de un tratamiento
R^2	Coefficiente de determinación
R_n^*	Rango ajustado
\overline{R}_n^*	Media del rango ajustado
R/S	Análisis R/S
$R/S(w)$	Rango re-escalado
$R(w)$	Rango de los valores de y en el intervalo
$\langle R(w) \rangle$	Promedio de $R(w)$
s	Desviación estándar
s	Tamaño del <i>voxel</i>
s	Desviación estándar de la cantidad de precipitación máxima anual
S_k^*	Suma parcial ajustada k
S_{k-1}^*	Suma parcial ajustada $k - 1$
S_0^*	Suma parcial desde cero
S_n^*	Suma parcial hasta n elementos de la serie temporal
Ss'	Coefficiente de almacenamiento específico
$S(w)$	Desviación estándar de las diferencias de $\Delta y(dy)$
σ_e	Estrés efectivo
σ_n	Desviación estándar de la muestra

T	Espacio bidimensional (i,j)
T_f	Espesor de la lámina
$TM3$	Banda 3 de la imagen <i>Landsat Thematic Mapper</i>
$TM4$	Banda 4 de la imagen <i>Landsat Thematic Mapper</i>
$TM5$	Banda 5 de la imagen <i>Landsat Thematic Mapper</i>
T_p	Tamaño de píxel
$v_s(i, j)$	<i>Voxel</i> interior en el espacio bidimensional (i,j)
V_s	Volumen total de los <i>voxels</i>
w	Longitud de la ventana
Z_i	Cantidad de precipitación en un tiempo discreto con $i = 1,2,\dots,n$ que equivale al tiempo en años
Z_k	Observaciones parciales ajustadas k
\bar{Z}_n	Media de las n observaciones en la serie de tiempo
Z_t	Tiempo discreto de ruido Gaussiano fraccional

Resumen

El Nuevo Lago de Chalco se formó en los años 1980 por el bombeo en el Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina ubicado en el límite del Estado de México y el Distrito Federal. La superficie del lago se ha incrementado por la subsidencia y el bombeo de agua residual hacia la planicie, y los niveles del lago y del Canal General (dique de contención) sobrepasan los de la zona urbana al oriente (San Miguel Xico). El peligro de inundación en San Miguel Xico se identificó a través de la simulación en un Modelo Digital de Elevación; como datos de entrada del modelo se consideró la precipitación pluvial, el ascenso del nivel del lago, la sobrecarga en el sistema de drenaje urbano, la ruptura del dique de contención y la subsidencia proyectada para 2020. El resultado muestra los distintos mapas de inundación en cada escenario y finalmente se resumen en un mapa que muestra no solo el peligro de inundación actual, sino el que resultaría del hundimiento del terreno proyectado para el año 2020.

Abstract

The New Chalco's Lake formed in the 1980's due to the pumping in the Mixquic-Santa Catarina Wells' System, it is located in the boundary of the Estado de Mexico and the Distrito Federal states. The area of the lake has augmented as the subsidence has increased and the residual water from the suburbs is drained to the lake, actually, the height of the lake and the contention dike surpasses the level of the urban ground to the west (San Miguel Xico). Using a DEM, possible flooding has been recognized by means of simulations, the input data used was the return period of a rain event, the surpass of the lake, the breaking of the contention dike and the subsidence. The results are shown in maps of flooding according to each scenario, and they are synthesized to show the areas to be flooded, not only in the present, but as the subsidence continues to the year 2020..

Résumé

Le nouveau Lac de Chalco s'est formé dans les années 1980 par suite du pompage excessif de la nappe phréatique par le Système Mixquic-Santa Catarina situé sur la frontière entre l'État de Mexico et le District Fédéral. Par ailleurs, sa surface a augmenté en raison de la subsidence et du reflux des eaux usées vers la plaine. Le niveau du lac et celui du Canal Général qui court sur la digue de contension sont supérieurs à celui de la zone urbaine (San Miguel Xico) située à l'est de ce canal. La possibilité d'occurrence d'inondations à San Miguel Xico a été évaluée à partir d'un modèle digital d'élévation en tenant compte soit de la précipitation, soit de l'élévation du niveau du lac, soit de la surcharge dans le système de drainage urbain, soit de la rupture du barrage de confinement ou de la subsidence. On obtient ainsi différentes cartes montrant quelle est l'extension des zones affectées par chaque type de scénario. Ces résultats peuvent s'intégrer dans une carte de synthèse qui montre non seulement les risques encourus actuellement mais permet de faire des prospectives pour les années à venir.

Introducción

El Nuevo Lago de Chalco se formó a partir de los años 1980 por la acumulación de agua pluvial en las depresiones ubicadas alrededor del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina en el límite del municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México y la delegación Tláhuac, Distrito Federal. Con el propósito de limitar el crecimiento del lago hacia la zona urbana en el municipio mexiquense, se construyó un dique, que a su vez drena el agua del sur de la ciudad hacia el canal La Compañía. Un tramo de este dique de contención (Canal General) mantiene la construcción original de acumulación de tierra y rocas, y otra parte tiene revestimiento de concreto hacia la zona urbana.

El hundimiento diferencial en la planicie de Chalco continúa y la superficie del lago se ha incrementado por la acumulación de agua residual proveniente de la zona urbana, incluso el nivel del lago supera el del terreno al oriente. Varias organizaciones no gubernamentales consideran una posible inundación en la zona aledaña de San Miguel Xico, y los vecinos han observado el incremento del nivel del lago y del canal a punto del desbordamiento durante lluvias torrenciales. Hasta el momento no se ha registrado una inundación en la zona, sin embargo, la subsidencia del terreno y sus efectos negativos en la infraestructura del dique de contención y la sobrecarga por una cantidad de precipitación extraordinaria podrían generar un evento de este tipo.

El propósito de esta investigación es simular los distintos escenarios de inundación en la zona urbana al oriente del Nuevo Lago de Chalco para identificar zonas de peligro con base en un Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución (MDE-AR) el cual se obtiene mediante el uso de Sistemas de Posicionamiento Global de Precisión y la interpolación de los datos con los métodos multi-direccional (Parrot, 1993 y 2004) y de dilatación de curvas (Taud *et al.*, 1999). Las simulaciones consideran la lluvia, el desbordamiento del lago, la ruptura del dique de contención (Canal General), la subsidencia en la zona urbana proyectada para 2020 y 2030; además se extraen los rasgos urbanos que influyen en el movimiento del agua y se analiza el comportamiento de la precipitación pluvial.

Éste trabajo se desarrolla en cinco capítulos; en el primero se describe la desecación del Lago de la Cuenca de México desde el siglo XVIII, y en forma particular del Antiguo Lago de Chalco, la extracción intensa de agua subterránea para el consumo de la ciudad y sus efectos en la subsidencia e inundación. En el segundo capítulo se detallan las características geográficas de la zona de estudio; los datos para los tratamientos y la metodología de investigación se encuentran en el tercer capítulo. El cuarto capítulo corresponde a los pre-tratamientos de las imágenes de satélite y de los datos climatológicos necesarios en la simulación de inundaciones, en este caso se extraen los rasgos urbanos que intervienen en el movimiento del agua y se analiza el comportamiento de la precipitación pluvial. Por último, en el quinto capítulo, se explican los tipos de inundación a considerar además de los algoritmos utilizados ante los distintos escenarios de inundación.

Capítulo I. Antecedentes históricos

La Cuenca de México de edad Plio-Cuaternaria, se encuentra en el centro-oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). Su origen se atribuye al relleno continuo del territorio más bajo de la cuenca por la actividad volcánica de la Sierra Chichinautzin y la obstrucción del desagüe de los ríos hacia el sur (Mooser, 1975). Las condiciones hidrológicas favorecieron la formación de un cuerpo lacustre con cambios en su profundidad de forma estacional ya que en la temporada de menor precipitación se dividía en al menos seis lagos: Zumpango, Ecatepec, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco (Bribiesca, 1960).

Las modificaciones del lago se iniciaron con el establecimiento de la ciudad de Tenochtitlán sobre un islote en el centro del mismo lago, en 1325. Con el aumento de la población fue necesaria la construcción de acueductos para el abasto de agua, así como la realización de obras hidráulicas para el control de inundaciones ocasionadas por el desbordamiento del lago (Aréchiga, 2004) en la temporada de lluvias y en eventos de precipitación extraordinaria.

Durante el periodo colonial, se construyó el Tajo de Nochistongo por la gran inundación de 1555; en 1789 el interceptor Poniente; en 1867 se autorizó la construcción del primer túnel de Tequixquiac a 100 m de profundidad; para 1898 el Gran Canal; en 1937 y 1942 el nuevo túnel de Tequixquiac; y en 1975 el Emisor Central (Santoyo *et al.*, 2005). Todos ellos conforman el Sistema General de Desagüe que lleva el agua residual y pluvial hacia la cuenca del Río Tula a través del Tajo de Nochistongo y el Drenaje Profundo que drenan hacia el Río El Salto, y a través de los túneles de Tequisquiac que desembocan al Río Salado. Estas obras han reducido las inundaciones mayores.

Sin embargo, el sistema de drenaje presentó problemas debido a la subsidencia. El rápido crecimiento urbano de la Ciudad de México a partir de 1870 incrementó la demanda de agua y con ello la extracción. Los efectos del bombeo se identificaron con la subsidencia y la formación de grietas en distintas partes; el hundimiento mayor se registró en la zona

centro de la ciudad. Sus efectos los documentó Gayol (1929) en el reporte sobre el mantenimiento del sistema de drenaje de la capital y posteriormente Cuevas (1936) y Carrillo (1947) realizaron estudios de tipo geotécnico explicando el fenómeno. Carrillo (1947) consideraba que el volumen de agua extraído se relacionaba con la subsidencia producida por la consolidación de los sedimentos lacustres; por su parte Zeevaert (1953) hizo mediciones detalladas en campo sobre la distribución de la presión de poro en los sedimentos superficiales.

A principios de la década de 1950, la Comisión Hidrológica del Valle de México (CHVM) instaló una red de monitoreo con piezómetros multinivel en la planicie lacustre para medir las variaciones en la presión del agua en los sedimentos lacustres cerca de la superficie y hasta los 100 m de profundidad. Con los datos obtenidos se hicieron distintos estudios; por ejemplo, los de tipo físico, realizados por Marsal y Mazari (1959), determinaron el alto contenido de agua y la gran compresibilidad de los sedimentos, corroborado después, en forma experimental, con la construcción del lago artificial Nabor Carrillo donde la consolidación¹ del acuífero se obtuvo por la despresurización del mismo y con ello la subsidencia inducida de 3 m en las zonas cercanas a los pozos.

La máxima extracción de agua ocurrió en el periodo de 1930 a 1960 y se identificaron daños a construcciones y sistemas de drenaje y transporte. Los pozos ubicados en la zona centro dejaron de funcionar y se perforaron nuevos pozos en los límites de la planicie lacustre, hacia el sur. Aunque el hundimiento disminuyó en el centro de la ciudad, aumentó en las nuevas zonas de bombeo, principalmente en la planicie lacustre de Chalco, la cual se reconoce como una de las zonas de mayor subsidencia urbana en el mundo (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993).

I.1 Desección del Lago de Chalco

La planicie de Chalco era la zona de descarga de los flujos superficiales y sub-superficiales provenientes de la Sierra Chichinautzin y de la ladera sur del Volcán Xico (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993). El agua proveniente de los manantiales en el piedemonte era de

excelente calidad, no así la que surgía en la planicie (Peñafiel, 1884). El lago proporcionaba distintos productos pesqueros, regulaba las condiciones climáticas y se utilizaba para el riego de las chinampas. Sin embargo, su desecación produjo varios cambios en el sistema ambiental; los poblados afectados por las obras de desecación fueron San Juan Ixtayopan, San Andrés Mixquic, (San Francisco) Tlaltenco, (Santiago) Tulyehualco, (San José) Tláhuac, Tlapizahuac, Tecomitl y (San Nicolás) Tetelco, en el Distrito Federal; mientras que en el municipio de Chalco los pueblos de (San Mateo) Huitzilzingo, Santa Catarina Ayotzingo, Ayotla, Chalco, San Martín Xico, San Gregorio Cuautzingo, San Lorenzo Chimalpa, San Lucas Amalinalco y San Martín Cuautlalpan resultaron afectados (Figura I.1); fue hasta 1940 cuando se terminó el drenado del lago y se extendió el uso de suelo urbano y agrícola.

I.2 Extracción de agua en la planicie lacustre de Chalco

La subcuenca de Chalco se encuentra al sur de la Cuenca de México, su formación se atribuye a la obstrucción completa del drenaje hacia el sur por la sedimentación alternada de aluvión y depósitos de arenas finas volcánicas emitidas por la Sierra Chichinautzin y la Sierra de Santa Catarina (Mooser, 1975). Se conoce que el relleno de mayor espesor se encuentra al centro de la planicie lacustre, con casi 300 m de profundidad y disminuye en forma gradual hacia las orillas. Los estudios detallados del sistema hidrológico identifican por lo menos cuatro unidades hidrogeológicas; la primera se trata de un acuitardo formado en los sedimentos lacustres; la segunda, la conforman los depósitos aluviales y volcánicos; la tercera, es una secuencia alternada de depósitos piroclásticos y lavas basálticas de la Sierra Chichinautzin y Santa Catarina; y por último, la más profunda, se asocia con las rocas del Terciario correspondientes con la Sierra Nevada (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993).

La extracción de agua en la subcuenca de Chalco inició en 1940, siendo el acuífero granular no confinado el principal proveedor. En 1950 se extraían cerca de 1.3 m³/s para consumo humano y la actividad agrícola (Molina, 1956); en 1960 se hicieron los primeros pozos en el acuífero de rocas basálticas en el piedemonte de la Sierra Chichinautzin y Santa Catarina

con una profundidad superior de 200 m para abastecer a la Ciudad de México; en 1970 se incrementó el número de pozos en la zona y se extrajeron cerca de 5 m³/s.

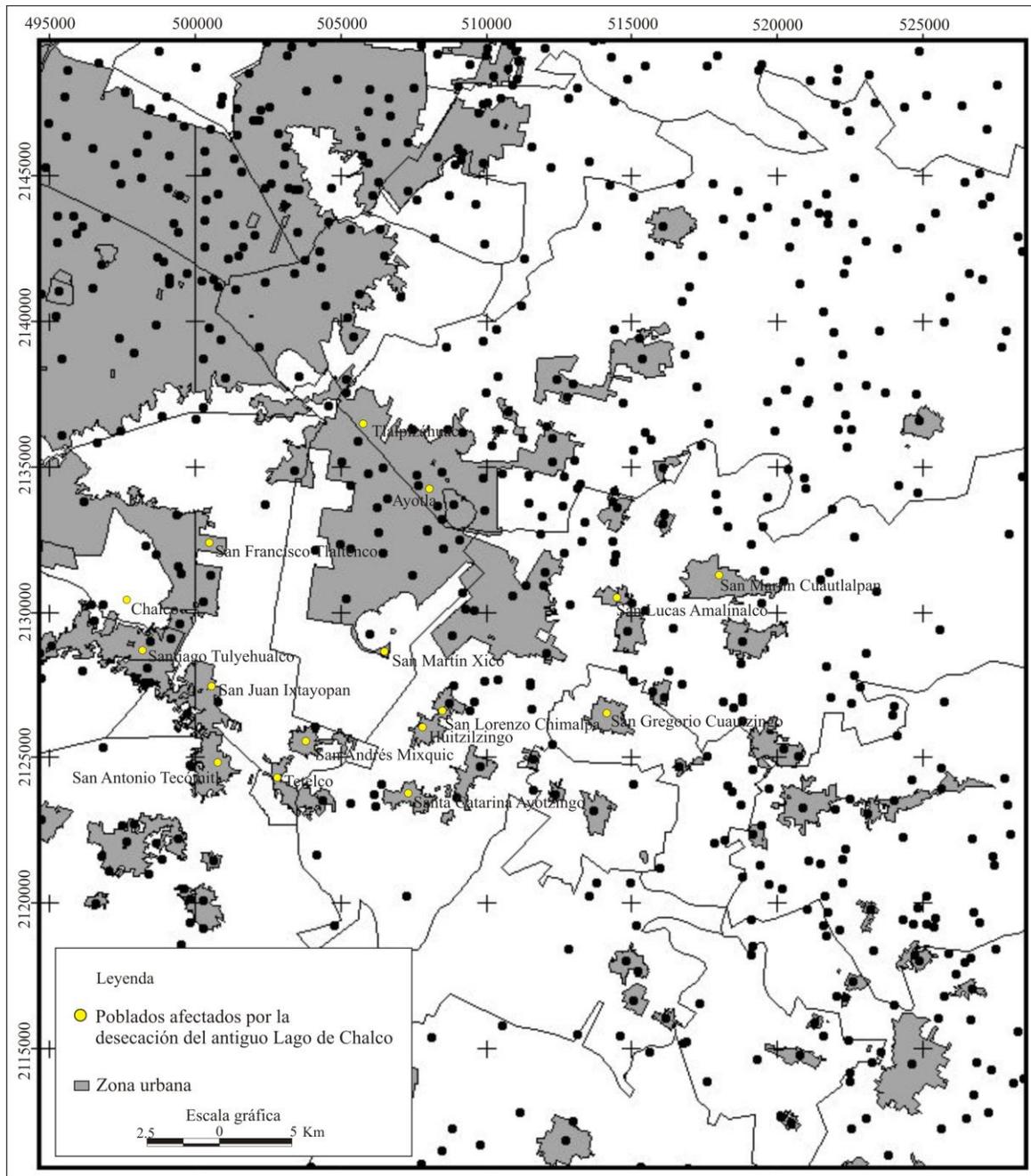


Figura I. 1. Poblados afectados en el Estado de México y Distrito Federal por la desecación del antiguo Lago de Chalco

Con el propósito de abastecer la demanda de agua en la Ciudad de México, en 1980 se construyeron 14 pozos con profundidad de 400 m y una extracción de entre 1.4 y 1.73 m³/s. En 1989, la cantidad de agua extraída de la cuenca de Chalco para la ciudad era de aproximadamente 7.75 m³/s (Huizar, 1989). No obstante, la construcción de 3 pozos más para consumo local incrementó la extracción total a 8 m³/s (SARH-CEAS, 1989). Para los años 80 la cantidad total de agua subterránea de la Cuenca de México para consumo de la misma era de 40 a 52 m³/s (Mendoza, 1983 y Robledo, 1983);y para 1996 Mazari (1996) estimó 73.3 m³/s.

I.3 Estudios realizados sobre subsidencia, inundación y características químicas del agua

Los cambios producidos por la desecación del antiguo lago de Chalco y el bombeo intensivo se han documentado en distintos trabajos; la fuente de información básica sobre datos de pozos pertenece a los organismos gubernamentales tales como la Comisión Nacional del Agua (CNA), el antiguo Departamento del Distrito Federal (DDF) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). En cuanto a las características regionales del acuífero, Molina (1956) estudió el acuitardo; Ortega-Guerrero y Farvolden (1989) analizaron el flujo del agua subterránea y sus condiciones límite en una sección vertical; Huizar (1989) analizó las características químicas del agua de los pozos y del acuífero regional; y Rivera y Ledoux (1991) hicieron un análisis matemático de la consolidación del acuitardo regional en la zona centro de la Ciudad de México. Por medio de sondeos eléctricos, Ortega-Guerrero *et al.* (1993) identificaron las unidades hidrogeológicas en la zona de Chalco y con ellas el acuífero regional del cual se extrae el agua; compararon el nivel piezométrico del acuitardo y su relación con la inversión del gradiente por el bombeo del acuífero granular; además realizaron mediciones y comparaciones de la subsidencia con el bombeo en el periodo de 1960 a 1980, así como el contenido de cloruros en el acuitardo, el acuífero profundo y el de aluvión-piroclastos de la zona de recarga y del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina.

En otro estudio detallado, Ortega-Guerrero *et al.* (1999) hicieron un modelo considerando los parámetros físicos del acuífero para hacer una proyección de la subsidencia máxima en 2010 y por último Ortiz (2007) estudió las grietas en la zona del Nuevo Lago de Chalco y Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2010) analizaron la subsidencia para 2010, 2020 y 2030 para delimitar en forma radial la zona de inundación en la región de San Miguel Xico, al oriente del nuevo lago.

Estos trabajos muestran los cambios en el sistema hidrogeológico de la subcuenca Chalco de los cuales resultan de interés para la simulación de inundaciones, no solo el proceso de desecado del lago y el bombeo, sino la subsidencia estimada para los años 2020 y 2030. Aunque en la zona de San Miguel Xico no ha ocurrido una inundación, la delimitación de las áreas susceptibles a dicho peligro puede simularse con base en un Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución (MDE-AR). En los siguientes capítulos se explican las características de la zona de estudio a nivel regional y local así como la metodología para obtener las áreas susceptibles de inundación.

¹ La deformación de las arcillas por consolidación inducida ocurre por la aplicación de cargas o la extracción de agua, casi incompresible, de la estructura del suelo. El agua que ocupa los poros del suelo ejerce una presión que disminuye progresivamente con el bombeo, como consecuencia la carga aplicada externamente la recibe dicha estructura, lo que se conoce como presión efectiva o de los sólidos. La pérdida del volumen de agua es la que se transforma en deformación vertical o asentamiento.

Capítulo II. Características geográficas generales de la zona de estudio

II.1 Localización

La zona de San Miguel Xico pertenece a la subcuenca de Chalco, al sur de la Cuenca de México. La subcuenca está limitada al este por la Sierra Nevada, al norte por la Sierra de Santa Catarina y al sur por la Sierra Chichinautzin, mientras que al occidente se considera como límite la antigua isla de Tláhuac, que separaba al Lago de Chalco del Lago de Xochimilco (Figura II.1). La formación del antiguo Lago de Chalco inició posiblemente en el Plioceno (5.3 M.a.) como resultado del bloqueo de drenaje de la Cuenca de México y de la acumulación de los productos volcánicos de la actividad de la Sierra Chichinautzin durante el Plioceno (Mooser, 1990).

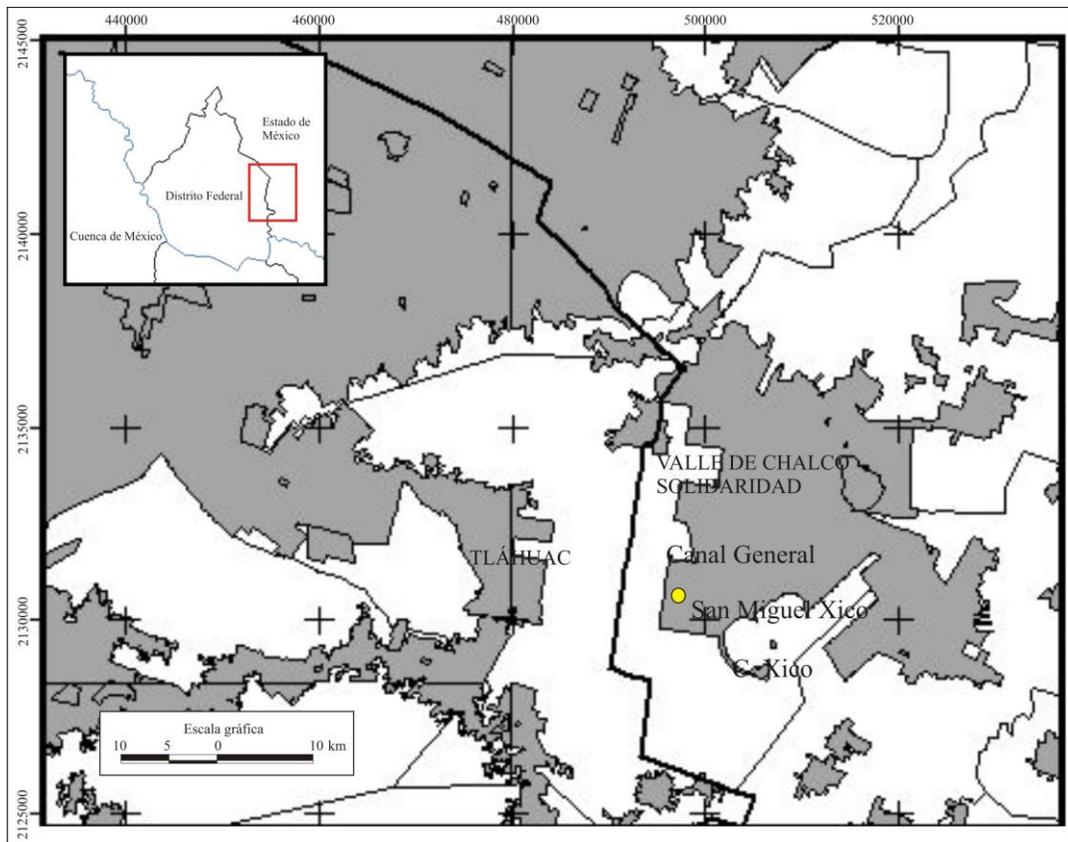


Figura II. 1. Localización de la zona de estudio en el Municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México.

II.2 Geología

La Cuenca de México se encuentra en el sector centro-oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) con una orientación casi W-E en la región central de México. Se trata de un arco volcánico que se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa Norteamericana como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la Trinchera de Acapulco (Ferrari, 2000). A continuación, se explica la geología regional, tectónica y unidades geológicas principales de la sub-cuenca de Chalco.

II.2.1 Geología regional

Mooser (en Santoyo *et al.*, 2005) sintetiza la formación de la Cuenca de México desde el Jurásico hasta el Reciente; considera que en el periodo Jurásico, una antigua geosutura dividía la región sur de México del resto del continente y que a través de esta zona de debilidad cortical se generó un volcanismo extenso que abarcó el centro y poniente meridional de México. Este volcanismo se identifica como la formación Taxco Viejo.

Con la apertura del Golfo de México, en el Jurásico Superior, se ejercen esfuerzos de cuña al suroeste del mismo que corresponde a una zona al norte de Veracruz, lo que produjo fracturas profundas, paralelas y ligadas a la antigua geosutura, a través de las cuales se emplazaron magmas que integraron un proto-eje volcánico. Después de este volcanismo, inicia la formación de las sierras al oriente y poniente de México; a fines del Cretácico e inicio del Terciario Inferior inicia la orogenia Laramide, que en México culmina con la formación de la Sierra Madre Oriental, y posteriormente, en el Oligoceno, con la subducción de la placa Farallón en el Pacífico, la Sierra Madre Occidental con una amplia manifestación de vulcanitas. Durante este periodo Centroamérica se desplaza al oriente ya que la subducción cambia hacia la Trinchera de Acapulco. Posteriormente, en el Mioceno Inferior, el terreno Oaxaca se desplaza al norte y cabalga en su frente formándose los pliegues Oaxaqueños.

Finalmente, Mooser (en Santoyo *et al.*, 2005) considera que el CVTM es una estructura compleja de arcos volcánicos terciarios sobrepuestos a una corteza originalmente resquebrajada en el Jurásico. En cuanto a la formación de la Cuenca de México, inicia en el Paleoceno con la manifestación de volcanismo de tipo andesítico y basáltico, aunque debajo de esta secuencia se reconoce la zona de choque de los pliegues Laramídicos y de los pliegues Oaxaqueños del Mioceno Inferior. Mooser (1975) explica que éste es el sustrato más antiguo de la cuenca conocido mediante sondeos y se trata del basamento de rocas cretácicas marinas expresadas en las formaciones que afloran al sur y norte de la cuenca que corresponden a la formación Morelos, Cuautla y Mezcala (Fries, 1960 y Enciso de la Vega, 1992). Después de esta actividad tectónica, en el Eoceno inicia la actividad volcánica de la cual se han identificado al menos siete fases distintas, Gutiérrez de McGregor *et al.* (2005) las resumen de la siguiente manera.

La primera fase del volcanismo ocurre a principios del Paleoceno con la manifestación de rocas volcánicas de composición intermedia-félsica que no afloran en la cuenca pero que se han identificado a 2,265 m de profundidad en el pozo Texcoco 1. A este volcanismo corresponde la Sierra de Tilzapotla o formación conocida como Rioluta Tilzapotla.

En la segunda fase, durante el Oligoceno Medio, se manifiesta un volcanismo con lavas de composición intermedia y félsica con materiales volcanoclásticos y acarreados por los ríos. Presentan una densidad de fracturas y fallas considerable que en conjunto tienen una dirección preferencial NE. Los afloramientos de esta etapa se localizan hacia la región norte de la Sierra de Tepetzotlán, continúan hacia Huehuetoca y terminan en la zona del Cerro de Sincoque, al NW del poblado de Coyotepec.

La siguiente fase, en el Oligoceno Superior, se forma la Sierra Xochitepec, estas rocas subyacen a las sierras mayores al este y oeste de la Cuenca de México. Durante esta época se manifiesta volcanismo al interior de la cuenca formándose los cerros del Peñón de los Baños, El Tigre y algunas elevaciones al SE de la Sierra Guadalupe.

El volcanismo del Mioceno Inferior está representado por la Sierra Guadalupe con productos de composición intermedia y félsica. Las estructuras asociadas a esta unidad mayor son la Sierra de Tepetzotlán, los Pitos, Patlachique y El Tepozán.

Las sierras mayores al este y oeste de la cuenca son rasgos distintivos de la quinta fase del volcanismo al final del Mioceno con materiales de composición intermedia y félsica emitidos por estructuras mayores (estratovolcanes) como los volcanes Popocatepetl y Ajusco. Al oeste se encuentran las sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo; y al este, la Sierra Nevada y Río Frío. Durante este periodo es importante el intemperismo y erosión en estas sierras lo que conlleva a la formación de un amplio piedemonte.

Durante el Cuaternario se presenta la sexta y séptima fase del volcanismo, aunque sin claridad en su fechamiento. Se considera la composición de sus productos volcánicos y las formas del relieve para distinguir entre uno y otro evento. En la sexta etapa domina el material de composición andesítico-basáltica en los volcanes de Chimalhuacán, La Estrella, Los Pinos, Peñón del Marqués, Chiconautla y Gordo. En esta fase también se manifiesta volcanismo monogenético de composición fenobasáltica y andesítica entre los poblados de Tizayuca y Apan.

La séptima etapa, que corresponde al Cuaternario Superior, se caracteriza por volcanismo de tipo monogenético, pero de gran cobertura espacial pues la formación Sierra Chichinautzin cubrió el sur del antiguo valle con drenaje hacia el sur, formando así la cuenca endorreica. Estas rocas de composición basáltica dominante sobreyacen a distintas unidades geológicas, desde las rocas marinas plegadas hasta los sedimentos lacustres.

II.2.2 Geología de la zona de estudio

Los eventos geológicos regionales se interpretan a través de las formaciones geológicas identificadas con los estudios en campo, dataciones radiométricas, pozos y métodos geofísicos como la reflexión sísmica. A continuación, se describen las formaciones

geológicas de la subcuenca de Chalco formada esencialmente durante el Cuaternario (Figura II.2).

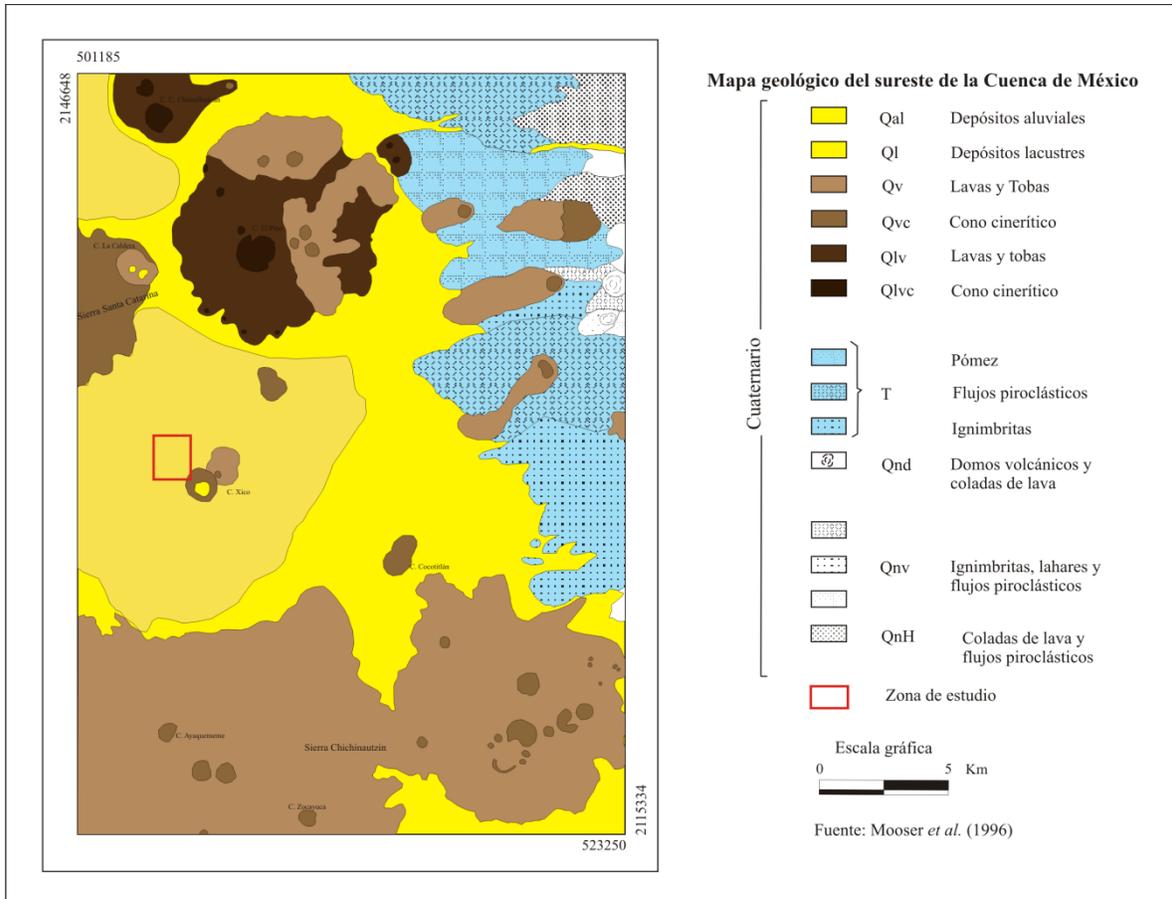


Figura II. 2. Geología del sureste de la Cuenca de México.

II.2.2.1. Vulcanitas del Cuaternario (Sierra Nevada)

En la Cuenca de México, durante el Pleistoceno, se forman las cadenas montañosas mayores: Sierra de las Cruces y Sierra Nevada, no obstante el inicio de la actividad volcánica se puede considerar en el Plioceno Superior. Las formaciones geológicas principales para la Sierra Nevada son las siguientes.

a) Formación Llano Grande

Se trata de secuencias eruptivas de composición variable, de andesítica a riodacítica, que afloran en la base noroccidental de la Sierra Nevada. Vázquez y Jaimes (1989) identifican capas delgadas de lapilli pumítico y lítico de caída, oleadas de piroclastos (*surges*) laminares y de olas de arena (*sand waves*), flujos de ceniza no soldadas, con o sin bloques accidentales y brechas soldadas de flujo, cubierto por derrames lávicos de andesita. Esta actividad termina con la formación de domos. La unidad está cubierta en forma discordante por las Formaciones Telapón e Iztaccíhuatl y sobreyacen de la misma manera a las rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno. Al considerar estas relaciones estratigráficas la secuencia puede clasificarse del Pleistoceno Temprano.

b) Formación El Pino

Vázquez y Jaimes (1989) agrupan a las rocas máficas manifestadas en los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla, Gordo y otras elevaciones menores aisladas, además de los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba y la Traquita Guajolote del Distrito Minero de Pachuca, Hidalgo en esta formación.

En el relieve se expresan como volcanes de tipo escudo, conos cineríticos y coladas de lava. Los espesores máximos son de 750 m en los centros eruptivos con las lavas de composición andesítica-basáltica, con intercalaciones delgadas de tefra no consolidada, de caída, formada por ceniza, lapilli y escoria. Esta formación cubre discordantemente unidades volcánicas del Oligoceno, Mioceno, Plioceno y la Formación Llano Grande del Pleistoceno Temprano y cubierta de la misma manera por las Formaciones Chichinautzin y Telapón (Vázquez y Jaimes, 1989).

c) Formación Tláloc

Esta unidad del Pleistoceno se refiere a las coladas de lava de la Sierra Río Frío así como flujos piroclásticos lobulados en forma de mesetas inclinadas, de composición andesítica, latítica y dacítica, con varias sucesiones en la base de pómez, líticos accidentales del tamaño de lapilli de gradación inversa con un metro de espesor, indicio de una erupción de

tipo pliniana de caída; además de los depósitos producto de oleadas piroclásticas (*surges*) y olas de arena (*sand waves*), flujos de cenizas y pómez con o sin lapillis, de composición mixta andesítica y dacítica. Los flujos piroclásticos son cubiertos por derrames lávicos de composición andesítica a dacítica (Vázquez y Jaimes, 1989).

La formación Tláloc cubre discordantemente rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y del Plioceno Temprano y las formaciones El Pino y Llano Grande y de igual manera le sobreyacen las Formaciones Chichinautzin e Iztaccíhuatl (Vázquez y Jaimes, 1989).

d) Formación Iztaccíhuatl

Se trata de afloramientos del volcán Iztaccíhuatl con un espesor máximo aproximado de 2,500 m de una secuencia que inicia con lavas de composición andesítica-basáltica a dacítica y termina con extrusiones dómicas (Vázquez y Jaimes, 1989). En el volcán Nexpayantla se identifica una secuencia de 1600 m de espesor formada por derrames lávicos de andesitas basálticas y andesitas, dacitas en la cima y algunos derrames autobrechados que contienen intercalaciones de tobas líticas y brechas tobáceas (Carrasco-Núñez, 1985). Por otra parte, en el flanco nororiental del volcán Iztaccíhuatl se han observado debajo de los flujos lávicos, flujos lávicos y de cenizas no solidificados con niveles de oleadas de piroclastos (*surges*) mientras que en el flanco sudoriental Robin (1964) reconoció lahares relacionados con flujos piroclásticos de pómez. Esta formación se encuentra con ligera discordancia encima de las formaciones Llano Grande y Tláloc y le sobreyacen de igual manera las Formaciones Chichinautzin y Popocatépetl.

e) Formación Popocatépetl

Esta formación descrita por Carrasco-Núñez (1985) conforma cuatro secuencias eruptivas. La primera es un *blast* piroclástico con espesor de 8 m de oleadas piroclásticas (*surges*) planares y olas de arena (*sand waves*) ricos en cristales y líticos con bloques lávicos e imbricados, no clasificados y de composición heterogénea. El *blast* precede a una brecha volcánica de avalancha en el flanco meridional del volcán Popocatépetl con espesores de

entre 200 y 450 m cuya morfología es de tipo *hummocks* (jorobas o mogotes). Los bloques lávicos heterométricos se encuentran en una matriz fina, del tamaño de lapillis. A esta secuencia le suceden piroclastos de lapillis de pómez y líticos accidentales, que alcanzan espesores de 2 m y con gradación inversa. Se distinguen además oleadas de piroclastos (*surges*), olas de arena (*sand waves*) y flujos de ceniza, con lapilli y materia orgánica carbonizada.

La segunda secuencia es de lavas andesíticas básicas ricas en olivino, andesitas félsicas con olivino, piroxenos, andesitas y dacitas (Robin y Boudal, 1987)

La siguiente secuencia forma el volcán noroccidental El Fraile. La secuencia inicia con lavas andesíticas y continúa con tres periodos explosivos de pómez, cenizas plinianas, oleadas de piroclastos (*surges*), flujos no soldados de ceniza con bloques pumíticos, de composición mixta andesítica y dacítica que indica una mezcla probable de magmas, lahares hacia el suroeste y muchos de ellos asociados a tres etapas de flujos piroclásticos; la primer etapa ocurrió hace más de 10,000 años, la segunda entre $\approx 9,500$ y 8,000 años y la tercera entre $\approx 5,000$ y 3,800 años.

La cuarta etapa indica actividad inicialmente efusiva y posteriormente explosiva y por último sucesiones piroclásticas con un mayor contenido de derrames lávicos intercalados; el cono terminal se formó durante 3,800 y 900 años, y se considera una etapa aún activa.

El espesor total del afloramiento se estima en 3,500 m y cubre en forma discordante la zona meridional de la formación Iztaccíhuatl y probablemente se interdigita con la Formación Chichinautzin y con clastos aluviales hacia las llanuras aluviales de Cuautla y Amecameca. Con base en fechamientos isotópicos su edad se considera del Pleistoceno tardío al Holoceno.

II.2.2.2. Vulcanitas del Cuaternario Superior (Formación Chichinautzin)

Fries (1960) considera a la Formación Chichinautzin como el conjunto de corrientes lávicas, estratos de toba y brecha, y materiales clásticos interestratificados depositados por agua, de composición andesítica y basáltica que descansan con discordancia encima de la Formación Cuernavaca o de unidades del Cretácico, Terciario, la formación El Pino y los depósitos lacustres y aluviales. Esta unidad indica el volcanismo monogenético, principalmente estromboliano, cuyos afloramientos más significativos se encuentran en la porción meridional de la Cuenca de México. Consta de 221 conos monogenéticos de ceniza, lavas y productos piroclásticos de composición basáltico andesítica con edades de 690,000 años (Mooser *et al.*, 1974), 38,500 (Bloomfield, 1975), 2,400 (Arnold y Libby, 1951), 2,260 años (Enciso de la Vega, 1992), y de 50,000 años y 1,670 a.C., esta última corresponde con la erupción del volcán Xitle (Siebe *et al.*, 2004 y Siebe *et al.*, 2005).

II.2.2.3. Planicie lacustre

Se trata de sedimentos clásticos y productos piroclásticos con espesores entre 30 y 300 m, siendo los mayores en la Ciudad de México, Texcoco y Chalco, relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin depositados en un ambiente lacustre cuya altitud promedio se definió en 2,200 msnm que se extienden en superficie desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro Chapultepec. De acuerdo con Urrutia-Fucugauchi (1995) los sedimentos lacustres se acumularon durante 700,000 años mientras que Vázquez y Jaimes (1989) proponen el rango de edad de 4,800 a 46,000 años por el método Carbono-14, ambos periodos indican un tiempo de formación del Pleistoceno tardío al Holoceno.

Desde el punto de vista geotécnico y mediante el análisis de los resultados de sondeos eléctricos, Marsal y Mazari (1959) describen la siguiente secuencia estratigráfica de la zona lacustre:

- a. Costra Superficial (CS). Consta de rellenos artificiales heterogéneos de espesor variable y otras secuencias de material natural. Es prácticamente inexistente en las orillas del lago y en general, se divide en 3 substratos.

1. Relleno Artificial (RA). Es un relleno característico de la zona lacustre con espesor variable, entre 1 y 7 m en el centro de la ciudad y máximo de 15 m como ocurre debajo de la Catedral.
 2. Suelo Blando (SB). Es un depósito aluvial blando con algunas intercalaciones de material eólico de espesor muy reducido y a veces no identificable en los sondeos eléctricos. Este depósito resulta evidencia del último lago.
 3. Costra Seca (CS). Esta capa se formó por el descenso del nivel lago y la consecuente exposición solar de los sedimentos en algunas zonas del fondo lo que implicó una fuerte consolidación.
- b. Formación Arcillosa Superior (FAS). Serie de estratos, generalmente uniformes, con espesor variable entre 25 y 50 m, en la que según su origen geológico y los efectos de consolidación inducida por sobrecargas superficiales y bombeo profundo se distinguen cuatro estratos principales con intercalación de lentes duros. Los estratos principales son los siguientes:
1. Arcilla Preconsolidada Superficial (APS). Es un estrato endurecido por efecto de secado solar, ascenso capilar del agua sobrecargas externas, así como rellenos.
 2. Arcillas Normalmente Consolidadas (ANC). Se consideran arcillas normalmente consolidadas porque continúan expuestas a la consolidación inicial a partir de su condición inicial.
 3. Arcilla Consolidada Profunda (ACP). Corresponde con la zona de extracción de agua por bombeo, por lo que la consolidación es producto de la pérdida de presión de agua en los poros.
 4. Lentes Duros (LD). Son estratos intercalados en los anteriores de espesor variante de centímetros al par de metros producto del secado solar o bien capas de arena basáltica o vidrio pómez.

- c. Capa Dura (CD). Es un depósito heterogéneo con predominio de limos, arenas, arcillas, algunas gravas e intercalaciones de arcillas, formado durante el periodo interglacial *Sangamon*. Su espesor es variable y de cementación disímil aunque aumenta su espesor y presencia hacia las orillas de la planicie lacustre.
- d. Formación Arcillosa Inferior (FAI). Es una secuencia de estratos de arcilla separados por lentes duros con espesor variante de 15 m en el centro del lago y disminución gradual en las orillas.
- e. Depósitos Profundos (DP). Corresponde a una serie de arenas y gravas aluviales limosas, cementadas con arcillas duras y carbonatos de calcio. La sección superior (de 1 a 5 m) presenta mayor endurecimiento que la inferior pues incluso se encuentran arcillas preconsolidadas.

II.2.2.4. Planicie aluvial

Consiste en un relleno aluvial con espesores máximos de entre 300 y 500 m que se adelgazan hacia las márgenes de las planicies. En los pozos Roma, Mixhuca-1, y Tulyehualco a profundidades de 74 a 330, 167 a 520 y 330 a 550 m respectivamente, se encontraron conglomerados y brechas con intercalaciones de arcillas, toba, y derrames de lava de tipo andesítico y basáltico en el pozo Mixhuca-1. En otros pozos dentro de la cuenca, Fries (1962) describió derrames lávicos intercalados con aluvión (suroeste de Pachuca) mientras que en la región de Texcoco se encontraron arcillas, limos y arenas interestratificadas con tobas y hacia la base margas y calizas lacustres.

Los depósitos aluviales se encuentran en forma discordante encima de los piroclásticos y clásticos del Plioceno, y localmente, de la misma forma, sobre rocas volcánicas más antiguas y sedimentarias del Cretácico. Se interdigitan con formaciones volcánicas de la misma edad así como con los sedimentos lacustres. Su edad se considera del Pleistoceno al Holoceno.

El origen de estos sedimentos se relaciona con la obstrucción del antiguo drenaje de la cuenca por la actividad de la Sierra Chichinautzin o bien por el fallamiento normal del Cuaternario que favoreció los cambios de velocidad y dirección de los cauces fluviales y con ello, la distribución diferente de las partículas en los depósitos. Este material poco consolidado está compuesto de materiales del tamaño de grava a arcillas, además de marga, tierra diatomácea, turba, loess y travertino (Fries, 1960 y Fries, 1962).

II.3 Tectónica

Las zonas volcánicas indican también fracturas profundas; en la Cuenca de México se reconocen las siguientes estructuras o rasgos geológicos interpretados por Mooser *et al.* (1996) como fracturas y transurrencias en relación a su vez con la zona de Chalco (Figura II.3).

II.3.1. Fracturamientos al NNE

Estas fallas y fracturas de dirección dominante NNE se consideran probablemente del Plioceno Tardío y persisten hasta el Pleistoceno Superior. Presentan evidencia de tensión y cizalleo lateral-izquierdo y se distinguen en la Fosa de Cuauhtepic, la Fosa Atlixco, las sierras de Las Cruces y Nevada, el Volcán El Rehilete y en el cerro Temascalcingo en la Fosa de Acambay.

II.3.2. Arco Volcánico Chichinautzin

Las fallas y fracturas de este arco controlan la tectónica del sur de las cuencas de Toluca, México y Puebla así como de los volcanes Zinacantépetl, Popocatépetl, Iztaccíhuatl y La Malinche.

II.3.3. Fracturamientos en “Z”

La dirección de estas fracturas en forma de “Z” alargada es SSE en su porción central y curvos en sentido opuesto en sus extremos, su origen está ligado a una interacción entre los lineamientos plio-pleistocénicos del Arco Tarasco y los lineamientos de las fallas profundas del Arco Oligocénico. Se encuentran en la base de la formación de las Sierras Mayores. Se desprenden de los lineamientos del Arco Tarasco y se introducen a la Sierra de Las Cruces, partiendo de la Fosa Jocotitlán y a la Sierra Nevada, de las inmediaciones del Cerro Chiconautla, así como en la falla curva al norte de Atizapán.

II.3.4. Transcurrencias

En el estudio realizado por Mooser *et al.* (1996) sólo se distingue un movimiento de transcurrencia de tipo lateral-izquierdo de aproximadamente 200 m en la Caldera del Iztaccíhuatl, al sur de Llano Grande.

Mooser y Maldonado (1961) describieron los movimientos de tipo lateral-izquierdo y lateral-derecho en el CVTM en relación con el empuje de la Placa de Cocos al NE con una ligera componente vectorial E; y por su parte, Suter (1991) corroboraron la existencia de movimientos de tipo lateral-izquierdo y lateral derecho en alternancia en ciertas fallas de la Fosa de Acambay. En general, los movimientos de tipo lateral-derecho se asocian a la desviación tensional e introducción de fracturas del Arco Tarasco en las fallas del arco Oligocénico. Por su parte, los movimientos alternos lateral izquierdo implican la formación de fallas y fracturas al NNE en el Pleistoceno.

Mediante datos gravimétricos Urrutia-Fucugauchi y Chávez-Segura (1991) identificaron una estructura volcánica sepultada con falla normal de rumbo NE que en la superficie se expresa en los volcanes Xico y Tlapacoya. Esta estructura divide a la planicie de Chalco en dos sectores, siendo el noreste el de mayor elevación y el sureste el bloque de techo, con una diferencia de altura estimada entre 2 y 3 m. La presencia de esta estructura se corrobora con la interpretación de los datos paleolimnológicos de Lozano-García *et al.* (1993) que indican una secuencia lacustre-aluvial de mayor espesor en el sector sureste que en el bloque elevado o sector noroeste. Al parecer, el ascenso fue gradual hasta 4,000 años A.P.,

esto por la ausencia de la Pómez Marcadora Superior de la actividad del volcán Tlapacoya caracterizada por Lambert (1986) en 4,900 años A.P., los niveles bajos del lago identificados por los análisis de diatomeas y una reducción en la tasa de sedimentación.

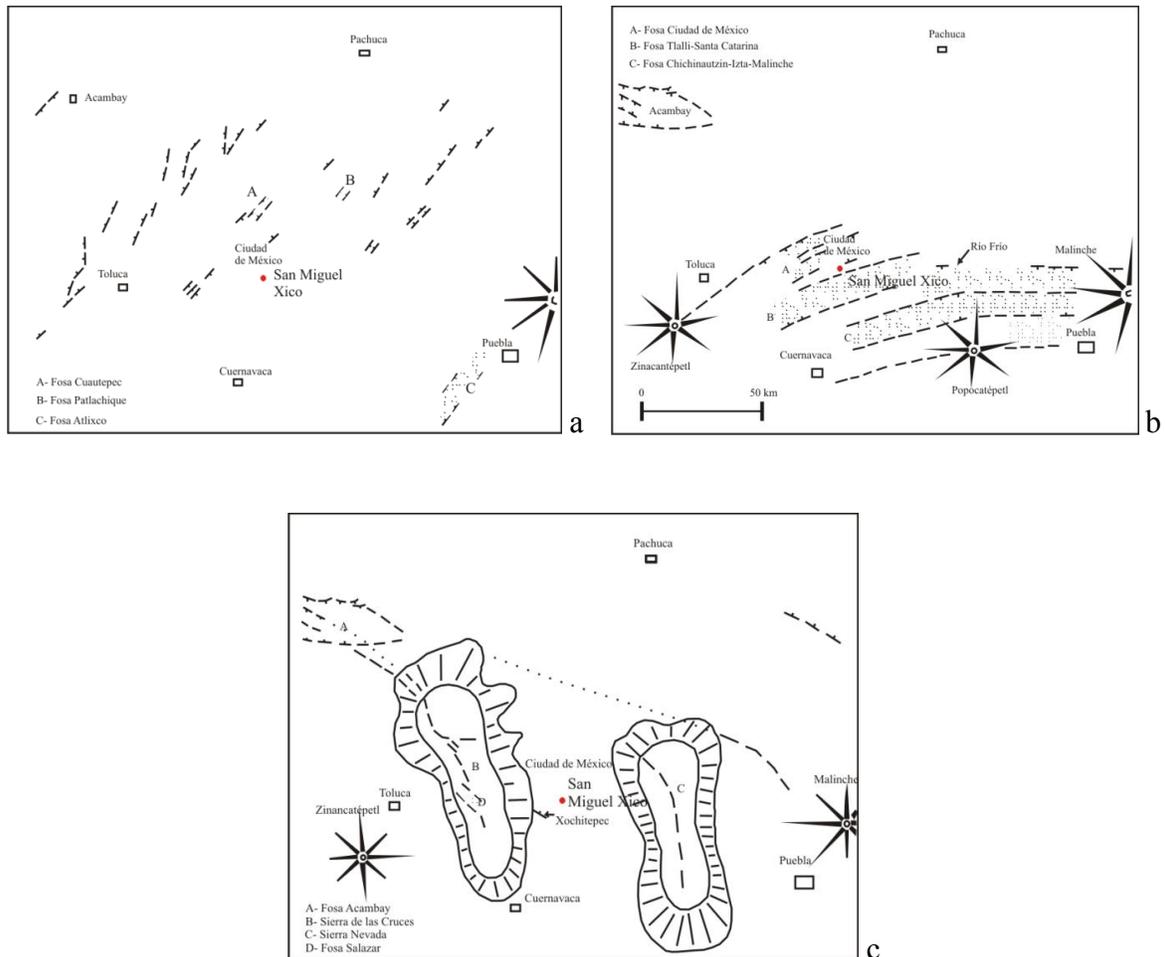


Figura II. 3. Rasgos tectónicos de la zona de estudio: a) Fracturamientos del Plio-Pleistoceno al NNE; b) Fracturamientos y Fosas del arco Chichinautzin del Pleistoceno; y c) Fracturamientos en “Z” de las Sierras Mayores del Plioceno Superior al Pleistoceno (Mooser *et al.*, 1996).

II.4 Hidrogeología

Por medio de sondeos eléctricos, Ortega-Guerrero *et al.* (1993) identificaron cuatro unidades hidrogeológicas principales en la zona de Chalco, mostrando el espesor y la distribución de cada una, así como la posición estratigráfica del Sistema de Pozos Mixquic-

Santa Catarina. Según las características geológicas e hidráulicas de las rocas y sedimentos, las cuatro unidades hidrogeológicas regionales son las siguientes (Figura II.4 a y b):

1. *Sedimentos lacustres*. Forman un acuitardo de espesor considerable con aumento gradual de la periferia al centro de la planicie de Chalco, registrándose ≈ 300 m de espesor. El material que lo conforma son depósitos de capas de arcilla con un alto contenido de materia orgánica, remanentes de plantas y fósiles pequeños, con espesor de 10 a 30 m, alternadas con arenas volcánicas finas de 1 a 3 m de grosor, conocidas como “Capas Duras”. Dicha intercalación muestra que la actividad volcánica de las sierras Chichinautzin y Santa Catarina, y el ambiente lacustre fueron contemporáneas.

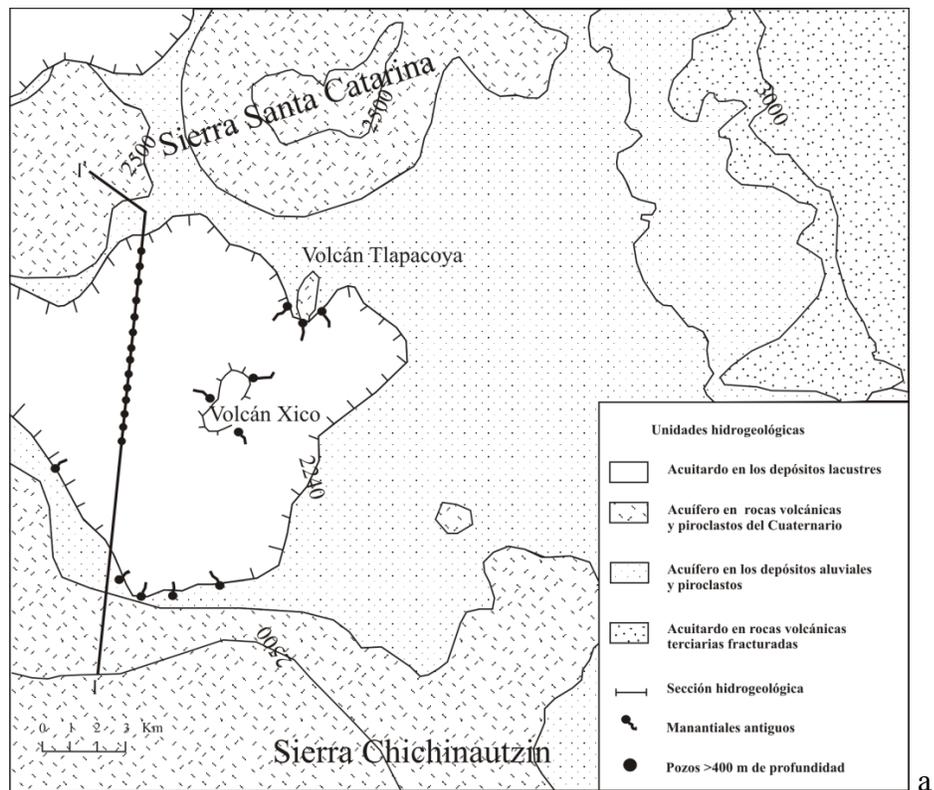
Los depósitos lacustres son heterogéneos, de acuerdo con Marsal y Mazari (1959) contienen entre 20 y 65% de la fracción mineral, la arcilla es de tipo esmectita y montmorillonita, dominando esta última; mientras que los análisis de Mesri *et al.* (1975) y Warren y Rudolph (1977) consideran que 10% de la fracción mineral es de arcilla del tipo esmectita y que puede estar alternada con complejos de hidróxido de aluminio, hierro, y posiblemente magnesio. La fracción remanente es sílice de cristobalita, alofano y fragmentos de sílice de opalina y diatomeas.

El acuitardo regional de la Ciudad de México tiene fracturas en los primeros 15 m (Marsal y Mazari, 1959; Hiriart y Marsal, 1969; Resendiz y Solana, 1969; Juárez-Badillo, 1978; Murillo y García, 1978; Alberro, 1988) y las más pequeñas en la zona de Chalco han sido reportadas por Ortega-Guerrero *et al.* (1993) mismas que influyen en el transporte de solutos a una profundidad de por lo menos 20 m.

2. *Depósitos volcánicos cuaternarios*. Es un acuífero formado por rocas basálticas y depósitos piroclásticos en el piedemonte de las sierras Chichinautzin y Santa Catarina (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993).

3. *Depósitos piroclásticos y aluviales.* Forman un acuífero no confinado debajo del límite oriental de la planicie y un acuífero semiconfinado debajo del acuitardo lacustre en la planicie de Chalco. De acuerdo con los datos obtenidos del sondeo del pozo Xico II, los materiales que conforman este acuífero granular son los depósitos volcánicos re TRABAJADOS alternados con tobas, con un espesor general de 200 m o más. Se trata del acuífero regional de la subcuenca de Chalco (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993).

4. *Rocas volcánicas del Terciario.* Afloran en la Sierra Nevada y son el límite hidrogeológico más bajo del sistema.



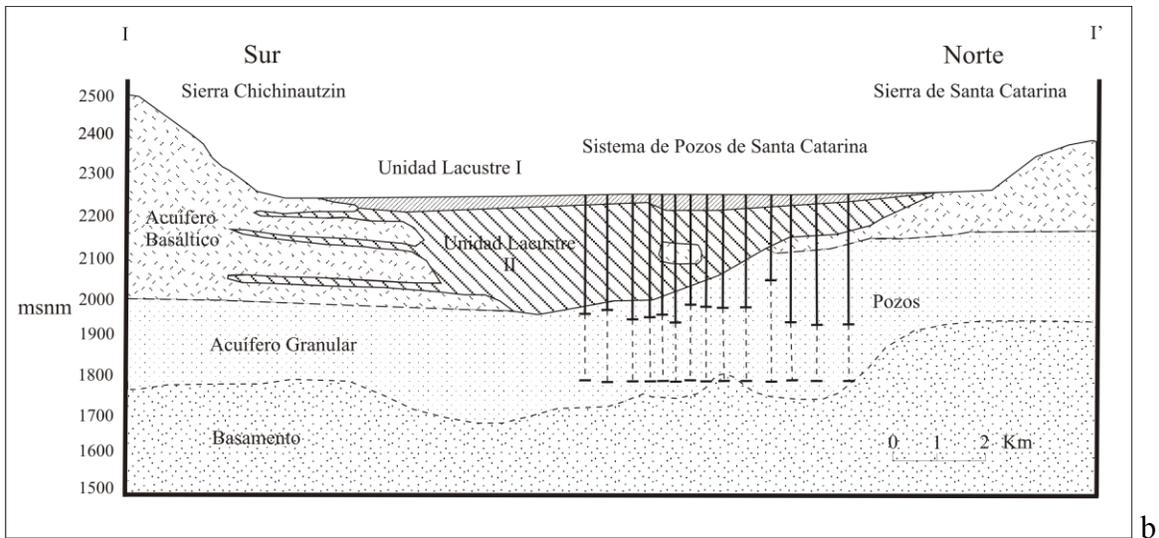


Figura II. 4. Unidades hidrogeológicas de la subcuenca de Chalco; a) vista en planta, b) perfil que muestra el espesor de cada unidad así como la posición del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993).

II.5 Geomorfología

Las unidades geomorfológicas principales en la subcuenca de Chalco son las siguientes (Figuroa, 2007) (Figura II.5):

1. *Planicie lacustre.* Esta unidad ocupa el nivel altitudinal más bajo de la subcuenca de Chalco y se produjo por el relleno continuo y alternado de sedimentos lacustres y cenizas volcánicas de la actividad de la Sierra Chichinautzin, misma que fungió como una represa natural.
2. *Planicie aluvial-lacustre.* Es una superficie formada por los depósitos proluviales que se acumularon en el fondo del Lago de Chalco y de inclinación menor a 1° .
3. *Planicie aluvial.* Está formada por depósitos aluviales heterogéneos como una superficie alrededor de la Sierra de Santa Catarina, el Complejo Volcánico El Pino, la Sierra de Río Frío y de elevaciones menores sobre la planicie lacustre, con una pendiente menor a 3.5° .

4. *Piedemonte*. Se trata de una superficie marginal entre el Complejo Volcánico El Pino y la Sierra de Río Frío, así como en el flanco norte de la Sierra Chichinautzin donde es discontinuo y de menor desarrollo, la pendiente es de 3.5 a 5°.
5. *Laderas inferiores de montaña*. Consiste de terrenos heterogéneos en longitud, geometría y orientación con una pendiente general menor a 5°, que en una corta distancia presenta un contraste de altura grande y con ello se distingue de las superficies adyacentes limitantes. Su composición varía ya que en la Sierra de Río Frío son flujos piroclásticos y en los demás volcanes, son coladas lávicas.

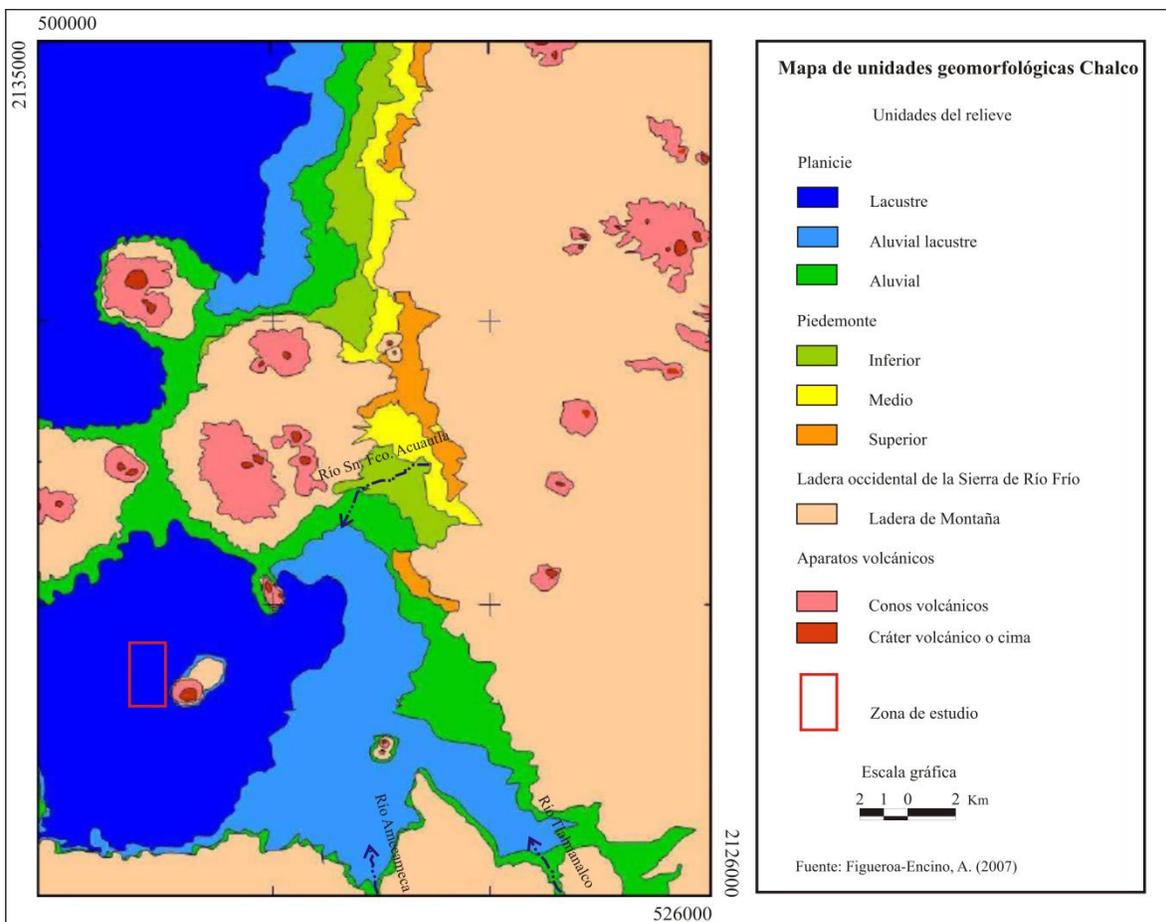


Figura II. 5. Unidades geomorfológicas principales de la zona en estudio.

II.6 Hidrología

Los ríos principales, canalizados en la zona de la planicie lacustre de Chalco, son Amecameca, Tlalmanalco y San Francisco Acuautla (Figura II.5). El antiguo Lago de Chalco recibía el aporte de los arroyos provenientes de la Sierra Chichinautzin, Santa Catarina, así como de algunos manantiales. El lago fue completamente desecado hacia fines de 1950 y el Nuevo Lago de Chalco se formó por la subsidencia del terreno, así como por el bombeo de agua residual proveniente del sur, por el Canal General, y de las colonias cercanas, y en menor cantidad por los aportes de agua pluvial y escurrimientos (Peñafield, 1884 y Ortega-Guerrero *et al.*, 1993).

II.7 Suelos

Los principales grupos de suelo y sus asociaciones (*IUSS Working Group WRB*, 2006) en la zona en estudio se describen a continuación (Figura II.6).

1. *Solonchack*. Este tipo de suelo tiene una alta concentración de sales solubles en un periodo del año, en algún horizonte o en todo el perfil por lo que su pH es alcalino. Se encuentra en la planicie lacustre de Chalco donde las condiciones de inundación varían según la temporada de lluvia. De acuerdo con la cartografía elaborada por la SPP (1979) el Solonchak gléyico está asociado con el Solonchak mólico y el Phaeozem háplico.
 - *Solonchak gléyico*. Tiene un horizonte gléyico en los primeros 50 cm de profundidad, saturado de agua y con propiedades hidromórficas caracterizadas por coloraciones grises-azulosas y que al estar expuesto cambia a color rojo.
 - *Solonchak mólico*. Posee un horizonte A mólico o de mayor contenido de materia orgánica en los primeros 50 cm y textura más fina. Su drenaje es de moderado a deficiente y su uso agrícola depende del contenido de sales.

2. *Regosol*. Es un suelo poco desarrollado que deriva de materiales no consolidados, cuyo horizonte de diagnóstico, si lo tiene, es el epipedón ócrico. Se encuentra como unidad principal hacia el piedemonte inferior y ladera de la Sierra de Santa Catarina, además del Complejo Volcánico Los Pinos, el piedemonte inferior de la Sierra de Río Frío y en la planicie aluvial-lacustre al sureste de San Miguel Xico. Se asocia con las unidades de Cambisol éutrico y dístrico, mientras que hacia la planicie aluvial-lacustre se asocia con el Andosol húmico. Hacia el norte, en la Sierra de Santa Catarina, se asocia con el Phaeozem háplico y con el Leptosol. Los principales subtipos que se distinguen son los siguientes:
 - *Regosol éutrico*: con un horizonte A ócrico, saturación de bases mayor al 50%, de reacción débil o nula al ácido clorhídrico.
 - *Regosol dístrico*: la saturación de bases es menor al 50% y tiene entre 20 y 50 cm de profundidad con una textura más gruesa.
3. *Andosol*. Suelo que se desarrolla a partir de ceniza volcánica en casi cualquier clima o materiales ricos en sílice en climas húmedos. La intemperización de estos produce complejos órgano-minerales de rango corto como el alofano, imogulita y ferrihidrita que favorecen el potencial agrícola al mejorar la porosidad y el contenido de nutrientes. Sin embargo, pueden fijar Al y Fe en exceso, por lo que se debe aplicar limo, sílice, materia orgánica o fertilizantes fosfatados. En la zona se encuentra como unidad asociada al Litosol y Phaeozem háplico en la Sierra Chichinautzin.
4. *Cambisol*. Este tipo de suelos muestra en el perfil una diferencia evidente por la formación de estructura, coloración más clara, aumento del contenido de arcilla y la remoción de carbonato. Se encuentra como unidad asociada al Regosol dístrico hacia la zona superior de la planicie aluvial-lacustre con distinta saturación de bases.
5. *Phaeozem*. Estos suelos tienen un horizonte de diagnóstico A mólico, un mayor contenido de bases (>50%) y no tienen carbonatos. El Phaeozem háplico se encuentra como unidad menor en la planicie lacustre de Chalco, así como en la

Sierra de Santa Catarina y el piedemonte de la Sierra de Río Frío. Su uso es principalmente agrícola, aunque hay amplios pastizales.

6. *Fluvisol*. Es un suelo desarrollado en depósitos aluviales, carece de estructura y presenta evidencia de estratificación pero es evidente el horizonte superior. En la zona se distingue el Fluvisol éútrico que se utiliza para la agricultura en la planicie aluvial-lacustre, al sureste de San Miguel Xico.
7. *Gleysol*. Son suelos húmedos, que a menos que sean drenados, están saturados por el nivel freático lo que permite el desarrollo de un patrón de color gléyico (rojo, café o amarillo en la superficie de los *peds* y/o en los horizontes superficiales, en combinación con colores grisáceos-azules en el interior de los *peds* o bien a profundidad en el perfil). Se encuentran hacia el sur del Nuevo Lago de Chalco y presentan saturación de agua durante una temporada del año, o bien, algunas zonas permanecen cubiertos de agua en superficie. Presentan una o varias capas de colores azules, grises y verdes; el horizonte A es de tipo mólico por lo que su aptitud agrícola es mayor. Su limitante es el drenaje, aunque se mantiene la agricultura de chinampas.
8. *Leptosol*. Es un suelo somero (<25 cm), limitado por un estrato continuo o bien suelos con un mayor contenido de bloques. Se encuentra como unidad principal en una porción de la Sierra Chichinautzin y como unidad asociada en la Sierra de Santa Catarina y piedemonte superior de la Sierra Nevada. Su limitante principal es la profundidad y erodabilidad cuando se elimina la cubierta vegetal.

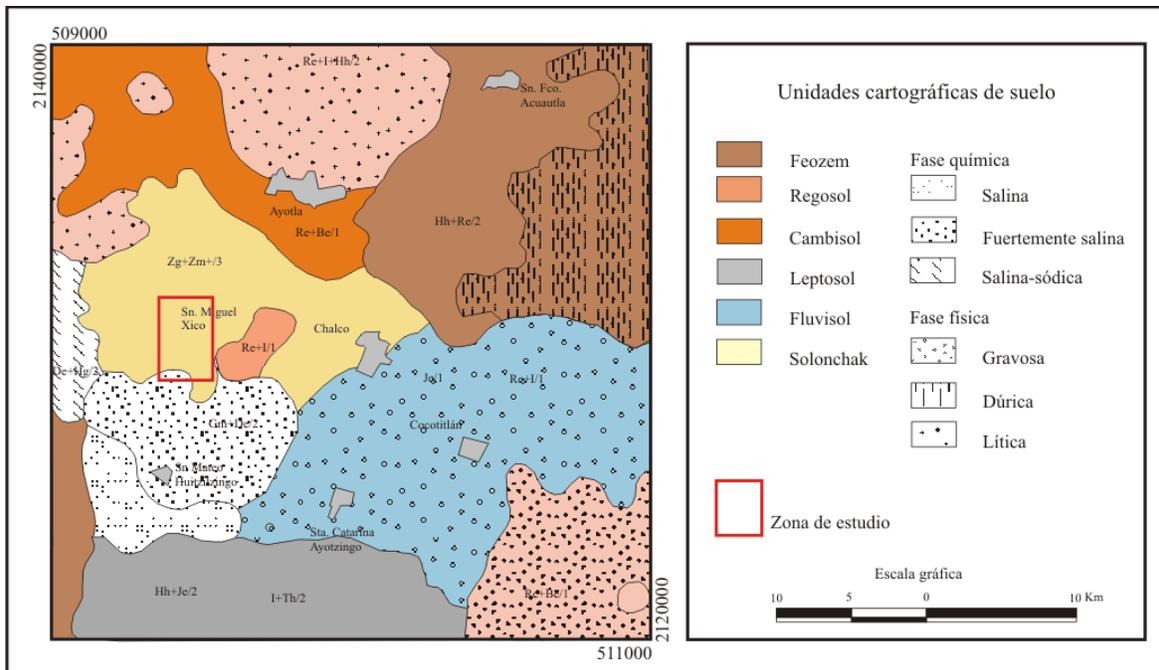


Figura II. 6. Unidades cartográficas de suelo. Fuente: Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP, 1979), modificado con WRB (2006).

II.8 Vegetación y uso de suelo

El uso de suelo al oriente del Nuevo Lago de Chalco corresponde al de tipo urbano; al poniente y sur continua la agricultura de riego (zona chinampera de la delegación Tláhuac y del municipio de Valle de Chalco Solidaridad), en tanto que la agricultura de temporal se halla al noroeste del nuevo lago; por último, en el cráter Xico se extiende el pastizal inducido y existen varias plantaciones forestales en la Sierra Chichinautzin.

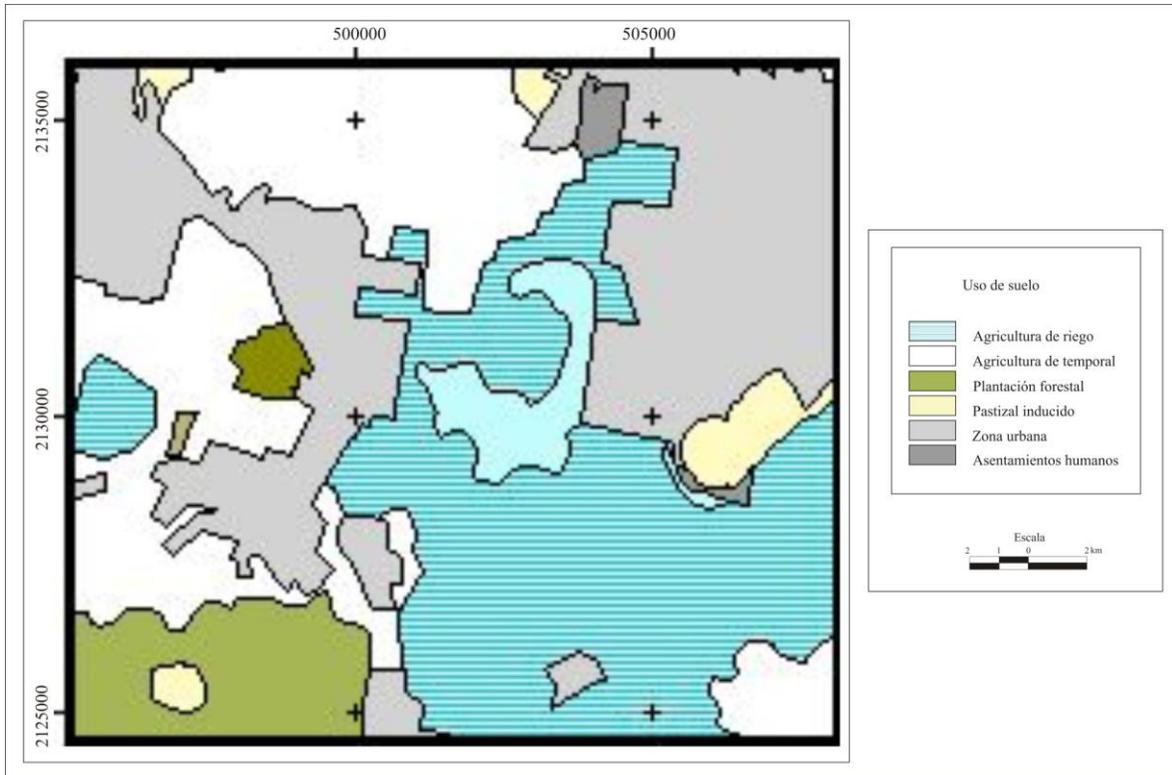


Figura II. 7. Vegetación y uso de suelo en la zona de estudio. Fuente: Inventario Nacional Forestal 2004-2009.

II.9 Clima

El clima en la subcuenca de Chalco se considera templado con lluvias en verano (Jáuregui, 2000). De acuerdo con los datos de la estación Chalco (2,240 msnm) (Servicio Meteorológico Nacional, 2009) el mes más cálido es mayo con 17.5°C y el mes más frío es enero con 11.1°C por lo que la oscilación de la temperatura es ligera (6.4°C). En cuanto a la precipitación, julio es el mes más húmedo en tanto que diciembre es el mes más seco. La mayor cantidad de precipitación ocurre en el verano mientras que en el invierno se presenta apenas el 3% de la lluvia anual. Considerando estos datos, el clima se clasifica como templado con verano fresco largo con lluvias en verano, con poca oscilación de la temperatura, alcanzando la máxima temperatura antes del solsticio de verano (*Cb w₀(w) i'g*) (García, 1988) (Figura II.8).

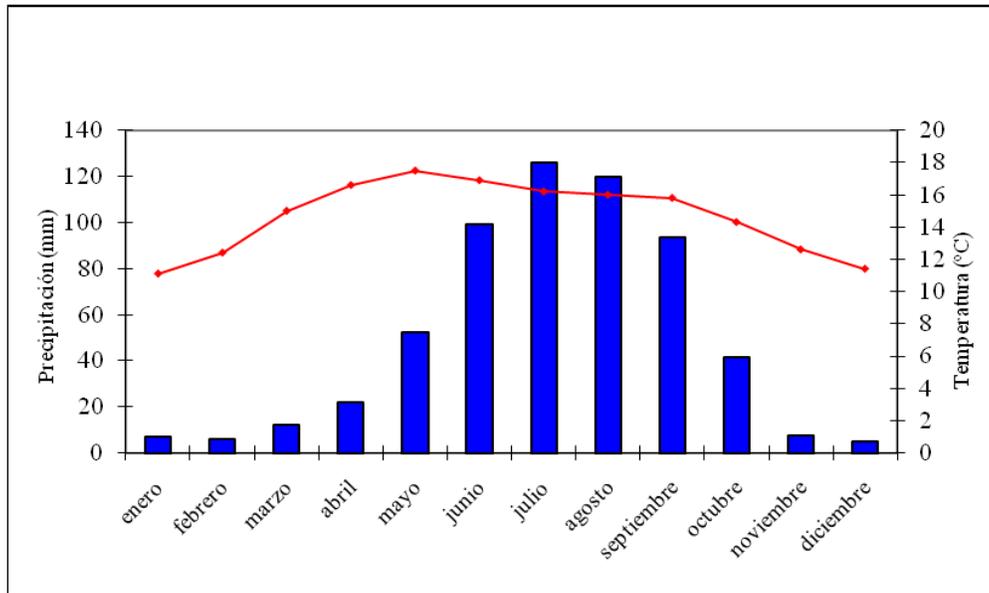


Figura II. 8. Precipitación y temperatura promedio en la estación climática Chalco 1971-2000, 2240 msnm.

II.10 Subsistencia

En Septiembre de 1960, la elevación de la zona centro de la planicie de Chalco era de 2,240.3 msnm (SARH-CAVM, 1981), a fines de 1970, disminuyó a 2,238 y 2,237 msnm como nivel promedio (SARH-CAVM, 1979), lo que representa una subsidencia de 0.1 m/año a 0.15 m/año.

La subsidencia se relaciona con la disminución en el nivel piezométrico del acuífero que subyace al acuitardo durante el bombeo anterior a 1980 en el perímetro de la planicie, ya que cuando se hicieron los pozos del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina, el nivel piezométrico estaba cientos de metros por debajo de la superficie del terreno. La subsidencia medida entre 1960 y 1989 fue de 6 m o una tasa de 0.3 a 0.4 m/año en tanto que la superficie piezométrica del acuífero medida en 1982 disminuyó de 2,220 msnm a 2,210 msnm cerca del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina.

La tasa de subsidencia en la parte centro de la planicie es de 0.4 m/año, la más alta en toda la Cuenca de México. Ortega-Guerrero *et al.* (1999) utilizaron el índice de compresión

($C_c = 3$), la pendiente ($m = 3$) y la conductividad hidráulica cerca de la superficie ($K'_0 = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) para simular la subsidencia en el año 2010, donde el acuífero tiene un espesor mayor, y consideraron el mismo abatimiento, lo que resultó en una subsidencia total de 15 m. Sugieren que aunque disminuya el bombeo, para 2010 la elevación de la planicie lacustre habrá disminuido otros 10 m.

II.10.1 Extracción de agua subterránea

La extracción de agua en la subcuenca de Chalco inició de forma intensiva en 1940 por el incremento en la demanda de agua para consumo en la Ciudad de México y para 1989 la extracción total era de $8 \text{ m}^3/\text{s}$. La extracción de agua ha producido cambios en el nivel freático y piezométrico del acuífero, así como en la carga hidráulica del acuitardo.

El nivel piezométrico del acuífero aluvial-piroclástico y basáltico al este de la subcuenca de Chalco era de 2,228 msnm; en los límites de la planicie lacustre se mantenía en 2,223 msnm; al norte se registraban 2,218 msnm, y al centro de la planicie disminuía a 2,217 msnm (SARH-CAVM, 1984 y Huizar, 1989). Durante el periodo 1978-1986, la tasa de disminución en el acuífero no confinado fue de 0.5 m/año a 1 m/año (SARH-CAVM, 1981; CNA-GAVM, 1991). Según Ortega-Guerrero *et al.* (1993) dicha tasa se mantenía en 1991.

En el acuífero semi-confinado con pozos de 400 m de profundidad, el nivel estático inicial era de 2,218 a 2,220 msnm, lo que equivalía a un nivel de 17 a 20 m por debajo del terreno, parecidos a los del acuífero no confinado al norte de la planicie lacustre, pero muy por debajo de los niveles observados a sur y este de la planicie. Ya que el bombeo se limitaba a la periferia de la planicie lacustre, sorprendía que el nivel piezométrico en el centro de la planicie era más bajo que los de bombeo activo, cerca de los pozos (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993).

Las mediciones de la carga hidráulica del acuitardo muestran que aún se mantienen el régimen trascendente, por lo menos en la planicie de Chalco; en áreas donde el espesor se mantiene en 100 m, los niveles piezométricos no han sido afectados por el bombeo en el

acuífero regional. Sin embargo, donde el espesor disminuye, se presentan las condiciones de flujo descendente. Como consecuencia, el gradiente hidráulico aumentará y se mantendrán las condiciones de flujo trascendente (Ortega-Guerrero *et al.*, 1999).

II.10.2 Características químicas del agua subterránea

El efecto en las condiciones del agua subterránea por la extracción y subsidencia es la liberación de cloruros y otros compuestos químicos del acuitardo al acuífero. De acuerdo con Ortega-Guerrero *et al.* (1993) la concentración de cloruros en el acuífero de aluvión-piroclastos incrementa de las zonas de recarga hacia la periferia de la planicie de 12 a 36 mg/l; en los pozos del acuífero profundo se registran de 15 a 50 mg/l; y en el acuitardo con profundidad de 70 a 85 m, las concentraciones son del orden de cientos a miles de mg/l.

De manera general, la planicie lacustre de San Miguel se formó por la acumulación de los depósitos de productos clásticos y piroclásticos de la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin en un ambiente lacustre. Según las características geohidrológicas de los depósitos, existe un acuitardo y tres acuíferos regionales en los que la extracción de agua desde 1960 ha favorecido el hundimiento regional, la formación de grietas, los cambios en la composición química del agua subterránea y la acumulación de agua de origen pluvial y residual de las colonias cercanas en un nuevo lago. El uso de suelo principal es de tipo urbano aunque también hay zonas de agricultura de riego y de temporal. Las características de la zona de estudio y los cambios al sistema hidrogeológico se consideran en los pre-tratamientos de datos y las simulaciones que se explican en los capítulos siguientes.

Capítulo III. Datos utilizados para los pre-tratamientos y la simulación de inundaciones

Para la simulación de inundaciones se realizaron pre-tratamientos y tratamientos de los datos. En una primera etapa se requiere de la cartografía temática, principalmente de tipo geológica y geomorfológica, para establecer límites de ejecución del modelo e identificar peligros asociados a las inundaciones; el análisis estadístico de la precipitación pluvial histórica permite conocer el comportamiento y el establecimiento de periodos de retorno; con respecto a los rasgos urbanos que influyen en el movimiento del agua, el pre-tratamiento de las imágenes de satélite facilita su obtención para integrarlo a la simulación. Por último, los datos altimétricos son la base para la aplicación de los distintos algoritmos; en este caso, se utilizaron los obtenidos en el trabajo de campo y los proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) (Figura III.1).

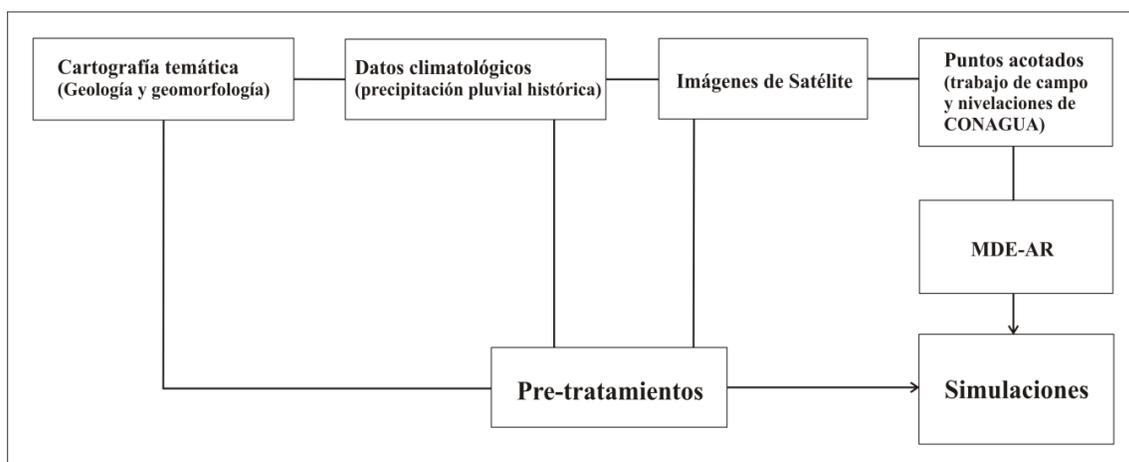


Figura III. 1. Etapas de la simulación de inundaciones utilizando un MDE-AR.

En este capítulo se proporcionan las características de la información utilizada en los pre-tratamientos y la obtención y procesamiento de los puntos acotados obtenidos del trabajo de campo.

III.1 Mapas topográficos, geológicos y geomorfológicos

La zona de San Miguel Xico se encuentra en la carta topográfica Chalco (E14-B31) del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2007c) en la escala 1:50,000. Este mapa se utilizó como base topográfica, la organización del trabajo de campo y para la obtención de la traza urbana de la colonia San Miguel Xico.

Las características geológicas y geomorfológicas son necesarias para la delimitación y caracterización de una zona y con ello la elaboración de un Modelo Digital de Elevación (MDE) en un terreno cuya diferencia altitudinal no es contrastante. La descripción geológica de la planicie lacustre de San Miguel Xico, se obtuvo de la cartografía realizada por Mooser *et al.* (1996) mientras que las unidades geomorfológicas principales de Chalco se consultaron en el mapa elaborado por Figueroa-Encino (2007).

III.2 Imágenes de satélite

Las imágenes de satélite *Landsat MSS (Multi-spectral Scanner)* y *Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)* se utilizaron para identificar el crecimiento del Nuevo Lago de Chalco, y fueron proporcionadas por el Laboratorio de Análisis GeoEspacial (LAGE) del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); el trabajo realizado por Ortiz-Zamora (2007) también reporta el crecimiento del lago desde 1988; y de las imágenes *Google Earth* (2008) se obtuvieron los rasgos urbanos necesarios y propuestos en los pre-tratamientos.

III.2.1. Imágenes Landsat

Las imágenes *Landsat MSS* provienen de un scanner radiométrico multiespectral a bordo de los satélites *Landsat 1* a *5* desde julio de 1972 a octubre de 1992. Generalmente tienen 4 bandas espectrales (verde visible, rojo visible, azul y cercano al infrarrojo) con una resolución temporal de 18 días en los *Landsat 1* al *3* y 16 días en *Landsat 4* a *5*; la resolución espacial es de 79 m y el tamaño aproximado de cada escena es de 185×170 km. En cuanto a las imágenes *Landsat ETM+* consisten de siete bandas espectrales con las que se pueden obtener distintas composiciones de color; las bandas del espectro visible y del

infrarrojo tienen una resolución espacial de 30 m, mientras que las del infrarrojo térmico tienen una resolución de 60 m y la nueva banda pancromática es de 15 m. Su resolución temporal es de 16 días y cada escena cubre un área de 185×185 km (Chuvieco, 2002).

El desarrollo del Nuevo Lago de Chalco se reconoce desde 1988; sin embargo, la planicie lacustre se utilizaba para el cultivo de chinampas y fue en la década de 1980 cuando inició la urbanización hacia el oriente del Canal General. En las imágenes *Landsat* de 1985 se observa un par de zonas de acumulación al norte y sur de la carretera Tláhuac-Chalco (Figura III.2); en 1988, la subsidencia continua permitió la formación de cinco zonas de acumulación, de incluso una hectárea de extensión, alrededor del camino de acceso al Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina, a la altura de los pozos de extracción 11, 12 y 13, y de la carretera Tláhuac-Chalco (Ortiz-Zamora 2007).

De 1989 a 1991 el lago creció a una tasa de 2 km^2 por año, como medida de control se construyeron canales y estaciones de bombeo hacia la Cuenca de Texcoco y hacia el área de chinampas por medio del Canal General. En 1991, el lago tenía una superficie de 100 ha y para 2006 era de 1,000 ha, por lo que la tasa de crecimiento durante ese periodo fue de 60 ha por año (Figura III.2). De continuar esta tendencia se estima que para el año 2015 la superficie será de 1,500 ha (Ortiz-Zamora, 2007).

La forma y extensión del Nuevo Lago de Chalco corresponde con el límite de una colada basáltica somera alternada con los depósitos lacustres. Ortiz-Zamora y Ortega (2010) identificaron los distintos flujos de la actividad volcánica durante el Cuaternario de la Sierra Santa Catarina a través de exploración magnética, datos de núcleos de pozos, registros litológicos y de piezómetros. La profundidad de los basaltos cerca de la Sierra de Santa Catarina es de 20 m con un espesor de 50 m y aumenta a 80 m de profundidad con 600 m de espesor cerca del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina y el Canal General. El límite oriente del lago corresponde al Canal General por el cual se bombea agua en forma escalonada hacia el norte de la planicie de Chalco para evitar inundaciones en el área urbana. Se prevé que el crecimiento posible del lago será hacia el sur y oriente, lo que corresponde con el área de chinampas, y la zona urbana de San Miguel Xico,

respectivamente; los pozos 6, 11 y 12 del Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina continuarán inundados mientras que el pozo 5 tenderá a inundarse. El nivel actual del lago se encuentra 12 m por debajo del nivel original de la planicie lacustre de Chalco.

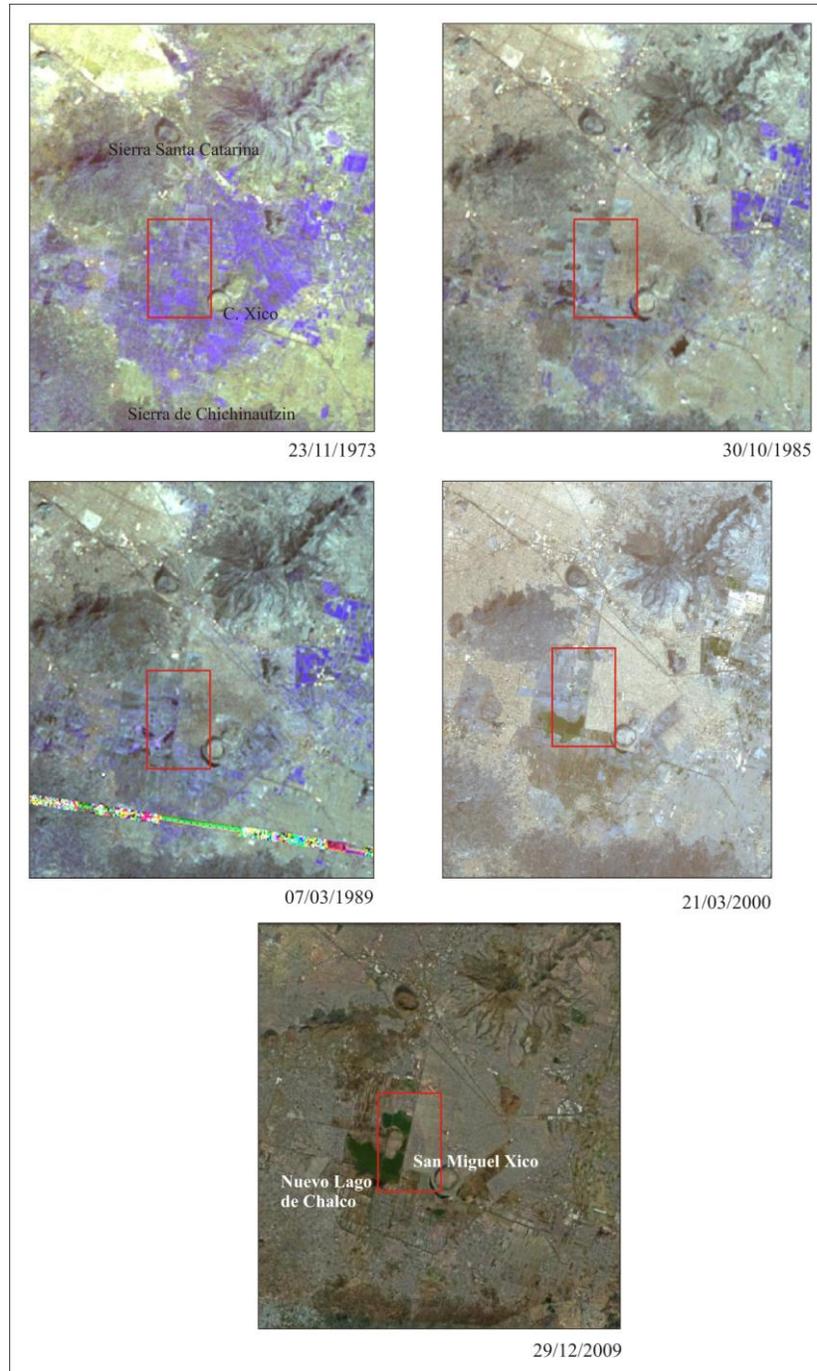


Figura III. 2. Desarrollo del Nuevo Lago de Chalco. Fuente: Imágenes *Landsat MSS* (1973, 1985, 1989), *ETM* (2000) y *Google Earth* (2008).

Ortiz-Zamora (2007) elaboró un mapa de peligro de inundación en la zona urbana del municipio de Valle de Chalco Solidaridad y la delegación Tláhuac. Al considerar la subsidencia progresiva, traza un círculo de 2 km de radio para indicar la superficie del terreno que se encuentra 12 m por debajo del nivel original y susceptible a inundación en el año 2006, y uno más, de 2.5 km donde muestra el límite de inundación en el año 2015 (Figura III.3). El primer círculo abarca las colonias del municipio de Valle de Chalco Solidaridad, mientras que el círculo de 2015 incluye una zona de la delegación Tláhuac.

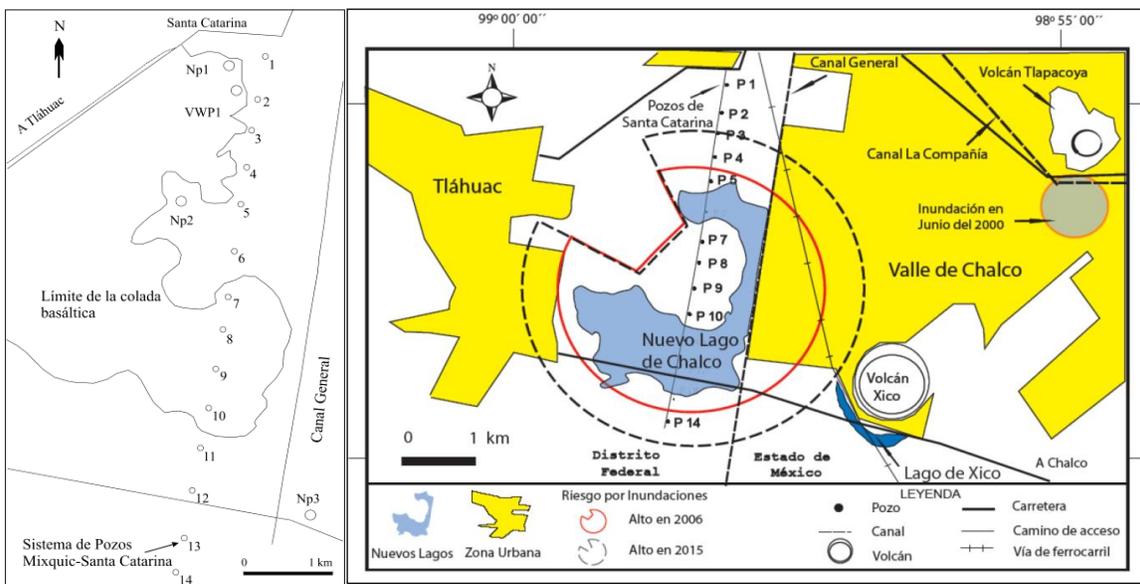


Figura III. 3. Mapa de peligro de inundación (Ortiz-Zamora, 2006)

El Canal General en la zona de estudio tiene una longitud de casi 4 km desde la carretera Tláhuac-Chalco hasta su intersección con la Av. Vicente Lombardo Toledano en la cual se encuentra en forma paralela la vía del ferrocarril México-Cuernavaca (Figura III.4). El dique está revestido hacia la zona urbana en un tramo de casi 2 km, de norte a sur, desde la Av. Vicente Lombardo Toledano y hasta la calle Tezozómoc, mientras que desde esta calle y hasta la carretera Tláhuac-Chalco carece de recubrimiento (Figura III.5).

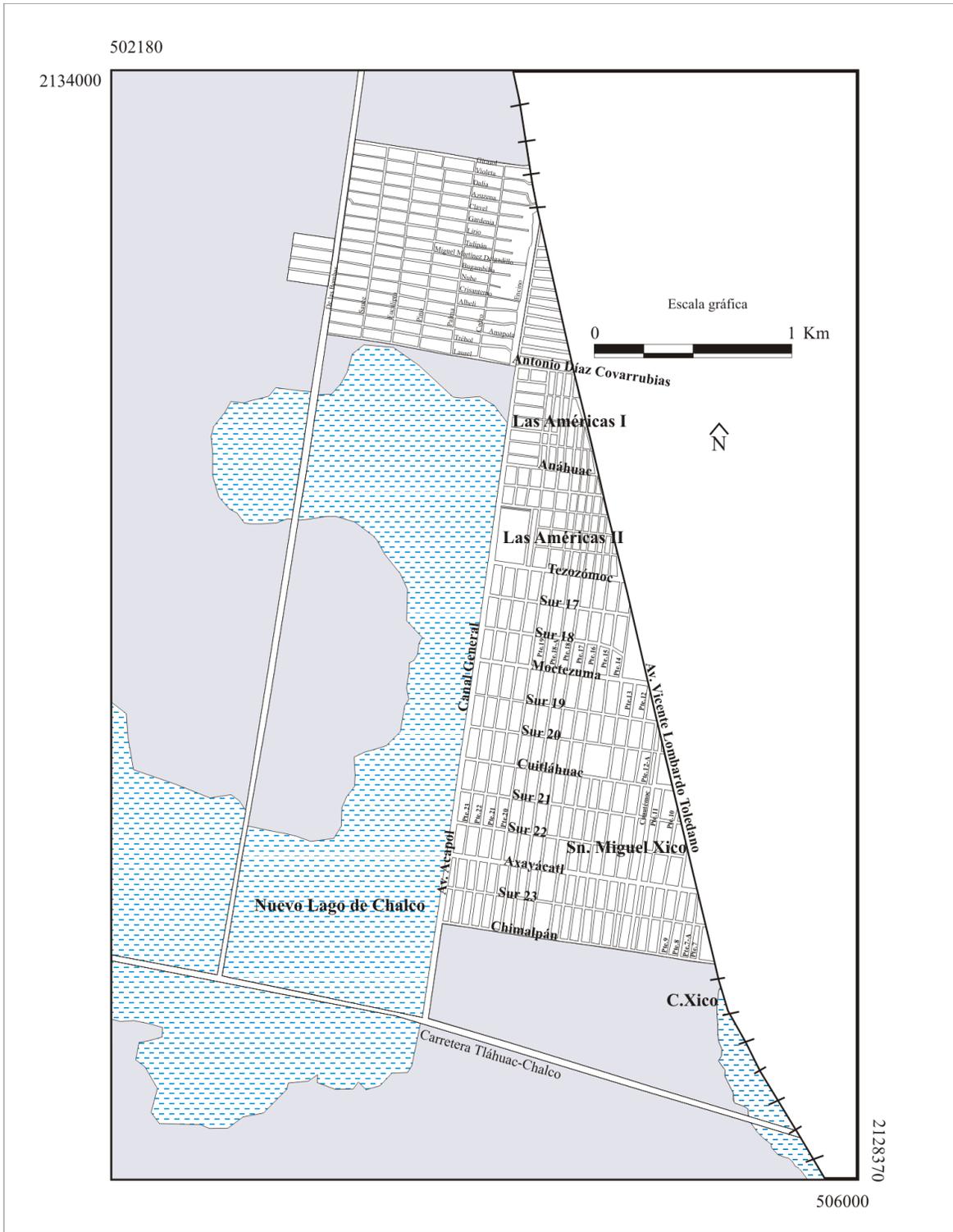


Figura III. 4. Traza urbana de la zona en estudio que comprende las colonias de San Miguel Xico, las Américas I y II. Fuente: INEGI (2009), Google Earth (2009)



Figura III. 5. Canal General: a) revestimiento del dique hacia la zona urbana a la altura de la calle Cuitláhuac y b) bombeo del agua residual hacia el Canal General y el Nuevo Lago de Chalco.

III.2.2. Imágenes Google Earth

El programa *Google Earth* en su versión libre provee imágenes de satélite con el Sistema Geodésico Mundial de 1984 (*World Geodetic System, WGS84*) con un resolución de 15 m en forma general, aunque esto depende del satélite o fotografía aérea utilizada. La base de imágenes se obtuvo de las imágenes *Landsat* aunque algunas zonas urbanas se obtuvieron por medio de ortofotos. La resolución y fecha de las imágenes varía en cada país, incluso en el acercamiento o alejamiento de la imagen. En la zona de San Miguel Xico, las imágenes corresponden al 1 de marzo de 2008 y se exportaron en formato comprimido hacia un editor de imágenes (*Paint Shop Pro 4*) con el cual se descompusieron en sus tres colores (rojo, verde y azul).

III.3 Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución (MDE-AR)

III.3.1. Características de los MDE

Un modelo es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988). En el ámbito de los estudios ambientales se aplica el término de Modelo Digital del Terreno (MDT) a la representación de la superficie terrestre por medio de algoritmos que mantengan una correspondencia; el conjunto de datos numéricos mostrará la distribución espacial de una característica del territorio (Doyle, 1978), por

ejemplo, la pendiente, orientación, curvatura, entre otras. En forma particular, la representación de la altitud se considera como Modelo Digital de Elevación (MDE) y se define como la representación de la superficie terrestre a través de una estructura numérica de datos que corresponden a la distribución espacial de la altitud georreferenciada en un sistema de proyección cartográfico y almacenada en una base de datos digital (Felicísimo, 1994).

Los MDT facilitan la representación cartográfica dinámica de temas ambientales, el análisis integral de las distintas variables asociadas al terreno, y permiten la explicación y previsión de propiedades y fenómenos dinámicos a través de modelos cuantitativos.

La elaboración de un MDE consiste en elegir el muestreo, el tipo de malla, la escala y el método de interpolación de acuerdo con el objetivo del estudio o la problemática (Parrot, 2009). A continuación se explica este proceso.

Los datos altitudinales se obtienen a partir de mediciones directas en el terreno, curvas digitalizadas, fotografías aéreas o bien, pares estereoscópicos de imágenes de satélite como los de *ASTER (Advance Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer)* y *SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre)* o los sistemas *Radar (Radio Detection and Ranking)* y *LiDAR (Light Detection And Ranging o Laser Imaging Detection and Ranking (LIDAR))* con los que se adquiere información topográfica y el MDE en forma directa.

Los datos de altitud pueden ser de tipo vector (puntos y líneas); *TIN (Triangular Irregular Network)* o red irregular de triángulos obtenida por la unión de tres puntos adyacentes; y como *raster* (celdas) que corresponden a datos matriciales. La información utilizada en esta investigación proviene de curvas de nivel y puntos acotados en formato *raster*, por lo que es necesario utilizar un método de interpolación para generar información altitudinal continua entre una curva y otra. A partir de un MDE es posible obtener información confiable y por lo tanto útil, en este caso para la simulación de inundaciones.

El grado de detalle o la precisión espacial de un MDE se relaciona con el tamaño de celda que es la distancia entre dos nodos expresada en metros. Este arreglo se caracteriza por una matriz ortogonal de resolución fija (Hengl, 2006). Aunque los modelos con este tipo de estructura presenta desventajas como el submuestreo o sobremuestreo y un mayor requerimiento para el almacén de información, las características técnicas dependen de la resolución (DeMers, 2001)

La resolución se asocia al tamaño de píxel (Tp) y se obtiene al considerar la distancia entre dos nodos (d) sobre el mapa original y el número de píxeles (Np) correspondiente, así $Tp = d / Np$ Como aproximación, se considera que debe ser 0.5 mm del mapa del que se desea obtener el MDE, por ejemplo, en una carta topográfica de escala 1:50,000, la resolución será de 25 m (Hengl, 2006). Cuando incrementa el tamaño de celda se produce la agregación; los MDE y los mapas derivados tendrán menor información ya que la resolución de la celda es menor. Por el contrario, si disminuye el tamaño de celda se considera como disgregación y los MDE y mapas tendrán más información por el uso de un tamaño de celda fino, aunque con mayor requerimiento de memoria en el procesador (Figura III.6).

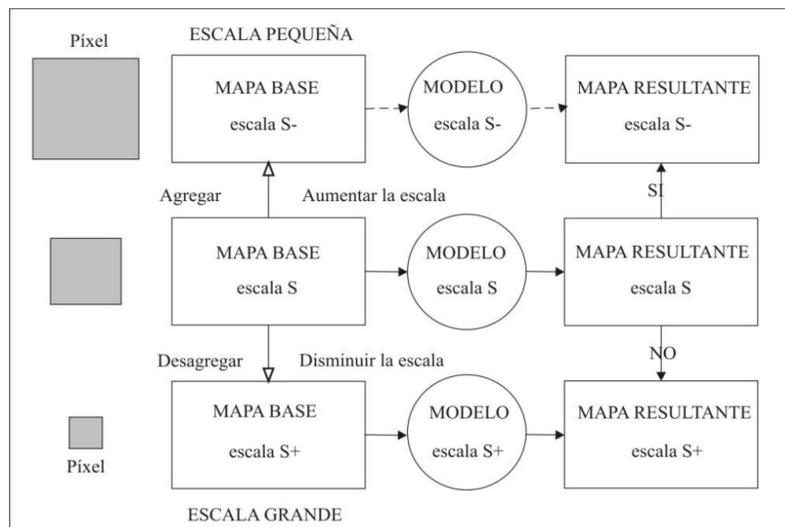


Figura III. 6. Aumento de escala y disminución de escala en una malla; S indica escala, S^- escalas pequeñas y S^+ escalas grandes. En Hengl (2006), basado en McBratney (1998)

En general, se considera que una resolución mayor del MDE proporcionará más información sobre los parámetros de la superficie terrestre. Sin embargo, se pueden introducir artefactos o reducir la capacidad de procesamiento en la computadora. En la elección de la resolución de un MDE es necesario considerar la aplicación o el tipo de estudio ambiental para una mejor interpretación de los resultados. Wilson y Gallant (2000) consideran que la resolución del MDE funciona como índice de la escala, por lo que los estudios generales tienden a ocupar tamaños de píxel del orden de kilómetros, útiles para los modelos generales de circulación atmosférica, mientras que el tamaño de píxel de decenas de metros o menores se utilizan en investigaciones detalladas sobre alguna componente del sistema, por ejemplo los de tipo ecológico e hidrológico.

Un criterio más para elegir la resolución son las formas del relieve en estudio, varios especialistas recomiendan un tamaño de celda que identifique la mayor parte de éstas (Borkowski y Meier, 1994; Kienzle, 2004; Pain, 2005; Smith *et al.* 2006) y además considere la escala original de los datos altitudinales (Weibell y Brandli, 1995) pues algunas características de la superficie terrestre cambiarán de acuerdo con el tamaño de la retícula.

III.3.2 Datos utilizados para la interpolación

III.3.2.1. Datos vectoriales de INEGI

El MDE general de la zona de San Miguel Xico y el Nuevo Lago de Chalco, Estado de México y sus alrededores se elaboró con las curvas digitales en formato vector de las cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) correspondientes a Chalco (E14-B31), Amecameca de Juárez E14-B4, Ciudad de México (E14-A39) y Milpa Alta (E14-A49) en la escala 1:50,000 (INEGI, 2006a, 2006b, 2007a y 2007b) con una equidistancia de 20 m, proporcionadas por el Laboratorio de Análisis GeoEspaciales (LAGE) del Instituto de Geografía de la UNAM.

Los datos vectoriales se transformaron al formato *raster* con el programa *Brod4_mx* (Parrot, 2005) con el cual se obtiene una imagen con extensión *.raw*, y los archivos descriptivos en formato *.txt* de la tabla de correspondencia entre los tonos de gris y sus valores de altitud. Con el programa *DEMONIO* (*Digital Elevation Models Obtained by Numerical Interpolating Operation*) (Parrot, 2010) se corrigieron los errores en el MDE con una resolución de 50 m.

III.3.2.2. Puntos acotados

El MDE de una zona esencialmente plana y con hundimientos diferenciales requiere de una mayor cantidad de información altitudinal; por ello se obtuvieron puntos acotados mediante Sistemas de Posicionamiento Global o GPS (*Global Positioning System*). La interpolación adecuada de estos datos junto con las curvas de nivel permitirá una mejor representación del relieve. En la figura III.7 se muestran los puntos acotados en la zona de estudio.

- *Equipo*

Se utilizó el equipo *EPOCH GPS Receiver-Epoch 10*. Este instrumento opera sin necesidad de una línea de visión (o referencia) entre los puntos, cuenta con un receptor *GPS L1* de búsqueda de grado, así como una antena *GPS L1* y un colector de datos tipo *Recon*. La ventaja de este equipo es que permite una búsqueda satelital eficiente, proporciona mediciones rápidas, una precisión adecuada y tiene un menor requerimiento de batería, además la antena evita la interferencia de señales que pueden generar errores en las mediciones. Los datos de altitud tomados en campo requieren de un post-procesamiento mediante el software provisto en el equipo.

La búsqueda GPS estática horizontal tiene una precisión de $\pm 5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm} \times (\text{longitud de la línea base}) \text{ RMS}$, mientras que la precisión vertical es de $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times (\text{longitud de la línea base}) \text{ RMS}$ (*Spectra Precision, 2005b*)

- ***Posprocesamiento de datos***

El posprocesamiento de los datos requiere del trazo de líneas base y de ser necesario, el ajuste de la red. Se deben considerar los datos de estaciones base para disminuir el error de medición.

○ ***Procesamiento de líneas base***

Se importaron los datos desde cada GPS con el receptor, antena y tipo correcto al software *Spectra Precision Survey Office*, versión 1.11 (*Spectra Precision, 2005a*). Los puntos de control utilizados para el procesamiento de las líneas base se obtuvieron de las estaciones base de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI (2009) del 14 al 16 de diciembre de 2009. Se verificaron los archivos y se descartaron las mediciones incompletas durante el trabajo de campo.

En el procesamiento de las líneas base se revisaron los resultados del procesamiento para cada vector creado a partir de dichas líneas y las no procesadas se revisaron después.

○ ***Ajuste de red***

El ajuste de la red de vectores se realizó utilizando coordenadas geográficas, obteniendo las elipses de error dentro de los límites de confianza.

- ***Resultados***

Las zonas más importantes para establecer los contrastes altitudinales del MDE en la zona de San Miguel Xico y el Nuevo Lago de Chalco son las siguientes: el Canal General, el dique que limita al Nuevo Lago de Chalco, ambos en sentido sur-norte, la vía del ferrocarril Cuernavaca-México con dirección sureste-noroeste, y el nivel de calles y avenidas entre el canal y la vía del ferrocarril y otras más al oriente de las vías (Figura III.8). El Banco de Nivel se colocó a menos de 10 km de distancia de la zona en estudio.



Figura III. 8. Mediciones en la colonia San Miguel Xico, municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Edo. de México. a) Canal General y Nuevo Lago de Chalco, b) medición en la calle Tezozomoc y, c) vía del ferrocarril Cuernavaca-México.

Los valores de altitud obtenidos del posprocesamiento en las distintas zonas de medición se presentan en la siguiente tabla:

Tabla III. 1. Valores de altitud máxima y mínima obtenidos en diferentes sitios de la planicie lacustre de San Miguel Xico, Mun. Valle de Chalco Solidaridad.

Zona de medición	Altitud (msnm)	
	mín.	máx.
Canal General	2227.21	2228.55
Calle Acapol	2224.55	2228.96
Ferrocarril Cuernavaca-México	2227.003	2229.26
Calles	2226.87	2228.91

III.4 Interpolación

Las mediciones directas del terreno y las curvas de nivel corresponden a información altitudinal no continua por lo que es necesario interpolar estos datos y así obtener información para el MDE. Algunos de los métodos de interpolación utilizados con frecuencia son el de ponderación en función inversa de la distancia, superficies de tendencia, *krigging* (krigeado), triangulación, interpolación de parches locales, rasterización adaptada localmente, dilatación de curvas y la interpolación multi-direccional dentro de capas de altitud, entre otros.

Los métodos de interpolación utilizados en este trabajo son la interpolación por dilatación de curvas y la interpolación multi-direccional que producen una morfología más suave en comparación con métodos como el de triangulación, vecinos cercanos o *krigging*. Sin embargo, la interpolación por dilatación de curvas produce zonas planas cuando carece de información. Esto no se presenta en la interpolación multi-direccional, incluso, mejora la calidad del MDE en zonas planas cuando se introducen puntos acotados (Parrot, 2009).

La interpolación multi-direccional del algoritmo *Newmiel* (Parrot *et al.*, 1993; Parrot, 2004) utiliza información *raster* para interpolar en forma lineal las curvas de nivel más cercanas en una imagen (Figura III.9). Para cada píxel ubicado entre dos curvas, el algoritmo considera la distancia mínima (d_i) que los separan de la curva inferior (A_i) y la distancia máxima (d_s) hacia la curva de nivel superior (A_s). Así, el valor de altitud A_p será:

$$A_p = A_i + [(A_s - A_i) \times (d_i / d)]$$

donde

$$d = d_i + d_s$$

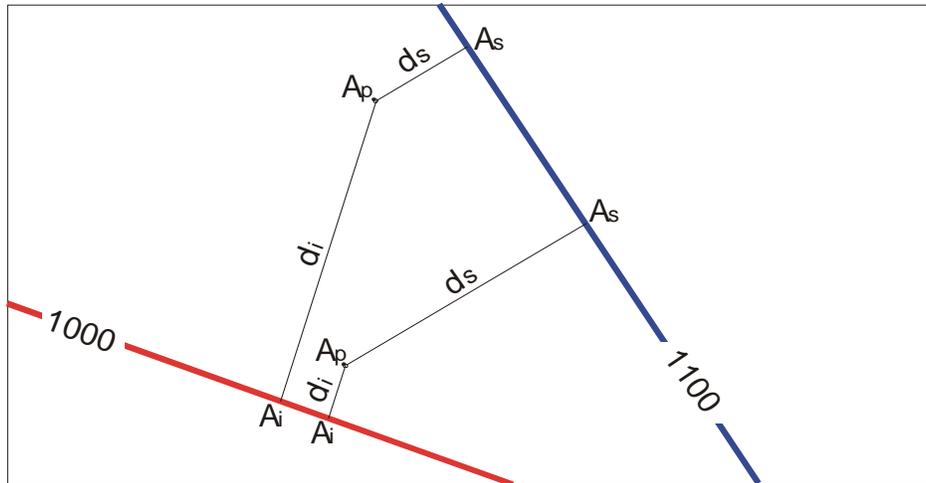


Figura III. 9. Cálculo de la interpolación de las curvas de nivel de 1000 y 1100 msnm.

La interpolación solo se realiza en las capas de altitud con intervalos y en una segunda etapa utiliza el método de dilatación de curvas para calcular los valores del fondo neutro dentro de una curva cerrada (Taud *et al.*, 1999) (Figura III.9).

El método de dilatación de curvas se basa en elementos estructurales de cuadrado, hexágono y diamante, además utiliza curvas de nivel y puntos cotejados para interpolar en forma lineal; ya que los píxeles tienen superficie ésta se puede dilatar con una conectividad 4 u 8 de manera que la dilatación sea casi isotrópica. Tanto los puntos como las curvas se dilatan hasta que las superficies resultantes de la dilatación se junten y todos los puntos tienen un valor de altitud. Las superficies tendrán como límite una curva de altitud intermedio y el proceso continuará hasta que el espacio quede lleno (Figura III.10).

En la planicie de Chalco, en particular, la zona de San Miguel Xico y el Nuevo Lago de Chalco, los puntos acotados se introdujeron al MDE con el programa *Intro_datos_dxf* (Parrot, 2009), este programa requiere de una tabla con las coordenadas UTM y los valores de altitud junto con las curvas de nivel de INEGI. Con el programa *DEMONIO* (Parrot, 2010) se extrajeron las curvas de nivel obtenidas con la interpolación multi-direccional (Parrot *et al.*, 1993) y por dilatación de curvas. El programa *TLALOC (Tridimensional Landscape Analysis & Local Operating Computation)* (Parrot, 2010) se utilizó para la visualización y edición de los MDE.

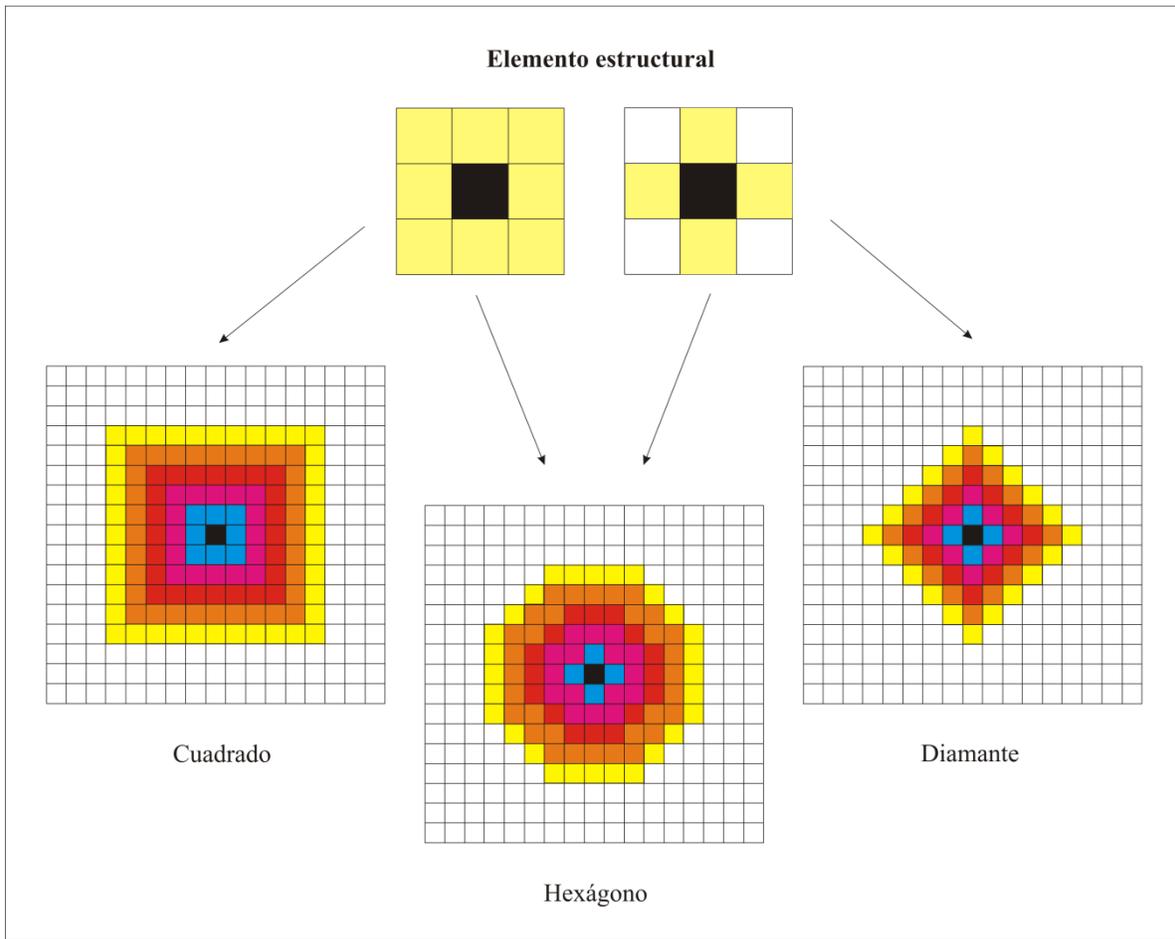


Figura III. 10. Elemento estructural utilizado por dilatación de curvas. En Parrot y Ochoa-Tejeda (2005)

Capítulo IV. Pre-tratamiento de datos climatológicos e imágenes de satélite

El estudio de las inundaciones en zonas urbanas es complejo pues se trata de un sistema altamente heterogéneo en cuanto a las interacciones del suelo (uso y características del mismo); y el ciclo del agua (en relación con la precipitación, escorrentía, infiltración, la red de drenaje, la evapotranspiración, etc.). Para generar un modelo se consideran las variables más importantes que influyen en el proceso de inundación; en este caso, la subsidencia, la cantidad de precipitación pluvial y la traza urbana determinan la dirección del flujo, las zonas de inundación y la lámina en cada una de ellas. En este capítulo se explica la extracción de los rasgos urbanos que intervienen en el movimiento del agua y se analiza el comportamiento de la precipitación.

IV.1 Análisis de datos de la precipitación pluvial

La lluvia es el principal tipo de precipitación que interviene en la hidrología urbana, es importante para el diseño de obras hidráulicas y para la determinación de peligros y riesgos. En el caso de la subcuenca de Chalco, la temporada de lluvia se presenta durante los meses de mayo a octubre, esto por el gran aporte de humedad que llega al continente proveniente de los ciclones tropicales del Océano Pacífico y del Océano Atlántico; y una menor cantidad ocurre durante la temporada seca del año (noviembre-abril). Los eventos de precipitación pluvial son difíciles de predecir por modelos determinísticos ya que la precipitación misma es un fenómeno aleatorio como se verá en este apartado. Sin embargo, existen métodos para considerar su ocurrencia probable en función del tipo de datos climatológicos que se tenga, por ejemplo, el periodo de retorno, el análisis de frecuencia, las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno, y las relaciones matemáticas de intensidad-duración (Osman-Akan y Houghtalen, 2003). Para conocer el comportamiento de la precipitación en la zona de estudio se utilizó el Coeficiente de *Hurst* (H) (Hurst, 1951) y la probabilidad de ocurrencia de fenómenos fuertes de precipitación con el análisis de frecuencia.

IV.1.2 Coeficiente de Hurst

a) Generalidades

Los métodos de análisis de las series de tiempo son herramientas importantes en el manejo de los recursos hídricos, y en el estudio de la precipitación, temperatura, flujos (Hurst, 1951, Bellin *et al.*, 1996; Koutsoyiannis, 2002 y 2003), entre otros fenómenos. El hidrólogo H.E. Hurst desarrolló el Índice de Dependencia o Coeficiente de *Hurst*, el cual sirve para identificar la dependencia o aleatoriedad de una serie de datos continuos. La constante de *Hurst* (H) va de 0 a 1, y es igual a 0.5 para procesos con incrementos independientes. Cuando $H > 0.5$ se considera una dependencia de largo alcance, por ejemplo, en los datos del Río Nilo, Hurst observó que $H > 0.91$, lo que muestra una dependencia mayor de lo que podría esperarse asumiendo incrementos independientes. El análisis *R/S* se utiliza para estudios hidrológicos y utiliza el Coeficiente de *Hurst*, el cálculo es el siguiente.

Se considera, por ejemplo, a la precipitación como un proceso estacionario estocástico en un tiempo discreto Z_i , con $i = 1, 2, \dots, n$ que equivale al tiempo en años; el análisis *R/S* será el rango de sumas parciales de las desviaciones de la serie de tiempo desde su media, reescaladas para su desviación estándar. Las series anuales z_1, z_2, \dots, z_n definen la suma parcial ajustada k con:

$$S_k^* = S_{k-1}^* + Z_k - \bar{Z}_n \quad (1)$$

donde

\bar{Z}_n es la media de las n observaciones en la serie de tiempo

$$S_0^* = S_n^* = 0$$

El rango ajustado R_n^* se define como

$$R_n^* = M_n^* - m_n^* \quad (2)$$

donde

$M_n^* = \max(0, s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$ es el excedente ajustado

$m_n^* = \max(0, s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)$ es el déficit ajustado

En los estudios de almacenamiento de largo plazo, por ejemplo del Río Nilo, Hurst propuso el Rango de Ajuste Reescalado (RAR),

$$R_n^* = \frac{R_n^*}{\sigma_n} \quad (3)$$

donde

σ_n es la desviación estándar de la muestra, pero también propuso una relación empírica:

$$\bar{R}_n^* = \left(\frac{n}{2}\right)^H \quad (4)$$

donde H es el Coeficiente de *Hurst* que se obtiene al calcular el rango promedio re-escalado en varias regiones con datos. Se relaciona con la dimensión fractal, que proporciona una medida de rugosidad de la superficie.

El valor esperado será descrito como una potencia de exponente 0.5, si los datos tienen un comportamiento aleatorio (distribución normal, ruido *Brown* o movimiento Browniano). Si el Coeficiente de *Hurst* en el intervalo de $0.5 < H \leq 1$, el comportamiento es persistente o tiende a presentar series reforzadas. Una línea recta sin gradiente cero tendrá un coeficiente $H = 1$. Cuando el exponente se encuentra en el intervalo de $0 < H \leq 0.5$, se describe un comportamiento anti-persistente, o un sistema en retroceso (*mean reverting system*). En cero, las series de tiempo deberán cambiar la dirección de cada muestra como en el ruido blanco.

Los fenómenos persistentes se conocen como movimientos fraccionarios Brownianos (*fractional Brownian motion, fBm*) y se obtienen por distintos métodos, como la síntesis espectral que usa tanto la transformada de *Fourier* como la transformada de onda. La

densidad espectral es proporcional a la ecuación 2, en relación con la transformada de *Fourier*:

$$B_H(t) - B_H(0) = \int_0^t (t-s)^{H-1/2} dB(s)$$

donde

$t > 0, 0 < H < 1$ y $B_H(0)$ es el nivel de tiempo $t = 0$

Este movimiento fraccional se genera a partir de variables aleatorias y comúnmente se conocen como ruido fraccional *Gaussiano (fractional Gaussian noise, fGn)*, por lo tanto se obtiene de la siguiente manera:

$$Z_t = B_H(t+1) - B_H(t)$$

donde

$t = 1, 2, \dots$

Ya que la dimensión fractal se relaciona con el Coeficiente de *Hurst*, un coeficiente pequeño mostrará una dimensión fractal alta con una rugosidad importante, por el contrario, un coeficiente grande tendrá una dimensión fractal pequeña con una superficie suave (Figura IV.1).

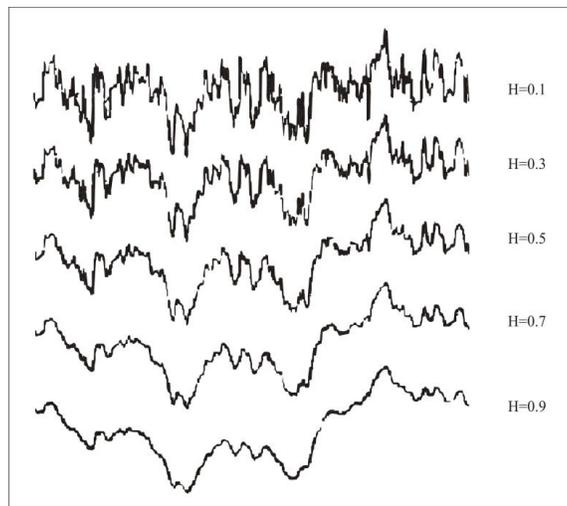


Figura IV. 1. Relación de la dimensión fractal (rugosidad) y el Coeficiente de *Hurst* (H), en Barnsley *et al.* (1988).

b) Datos utilizados

Los datos de pluviometría de la estación climatológica Chalco, Estado de México fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010) organismo dependiente de la Comisión Nacional Agua (CONAGUA) con datos de precipitación diaria (24 hr.) de 1961 a 2008 (Figura IV.2), lo que implica una serie con más de 17,000 datos.

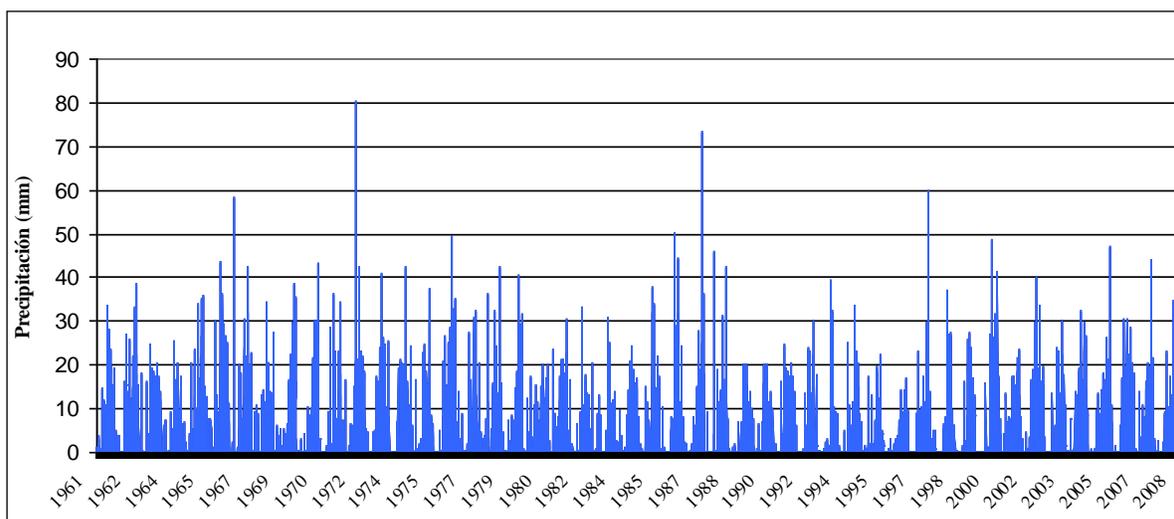


Figura IV. 2. Precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco durante el periodo 1961-2008.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2010).

c) Cálculo del Coeficiente de Hurst (H)

El cálculo del Coeficiente de *Hurst* se realizó de la siguiente manera. En una ventana de longitud w se obtienen los valores de rango y la desviación estándar de la base de datos de precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco de 1961 a 2008. $R(w)$, es el rango que toman los valores de y en el intervalo y se mide con respecto a una tendencia en la ventana; la tendencia será simple en tanto que la línea conecte el primer y último punto de la ventana, lo que elimina la tendencia promedio en la misma.

$S(w)$, es la desviación estándar de las primeras diferencias de Δy (dy) de los valores de y en la ventana. Las primeras diferencias de las y 's se definen como las diferencias entre los valores de y en un punto de x y y en la ubicación previa en el eje x :

$$dy(x) = y(x) - y(x - dx) \quad (1)$$

donde $\Delta x(dx)$ es el intervalo muestreado, por ejemplo el intervalo entre dos valores consecutivos de x .

Una medición adecuada de $S(w)$ requiere datos con un intervalo de muestreo constante dx , ya que la diferencia esperada entre valores sucesivos de y es una función de la distancia que los separa. $S(w)$ en el método de re-escalado se utiliza para estandarizar el rango $R(w)$ y permitir comparaciones de diferentes series: si $S(w)$ no se utiliza, el rango $R(w)$ puede ser calculado en series que no tienen un intervalo constante de muestreo.

El rango re-escalado se define como:

$$R/S(w) = \left\langle \frac{R(w)}{S(w)} \right\rangle \quad (2)$$

donde w es la longitud de la ventana y los corchetes angulares $\langle R(w) \rangle$ denotan el promedio de un número de valores de $R(w)$. La base del método es que, debido a la auto-afinidad, se espera que el rango tomado por los valores de y en una ventana de longitud w sea proporcional a la longitud de la ventana en una potencia igual al Coeficiente de *Hurst* (H). Por ejemplo,

$$R/S(w) = w^H \quad (3)$$

En la práctica, para una ventana de longitud w , se subdivide la serie que se utiliza en un número de intervalos de longitud w , mide $R(w)$ y $S(w)$ en cada intervalo, y calcula $R/S(w)$ con el promedio $R(w)/S(w)$ como en la ecuación 2. Este proceso se repite en un número de ventanas y se grafican en forma algorítmica $R/S(w)$ y w . Si la traza es auto-afin, este gráfico debe seguir una línea recta cuya pendiente es igual al exponente de *Hurst* (H). La

Dimensión Fractal (DF) de la traza puede ser calculada de la relación entre el exponente de $Hurst$ y la dimensión fractal:

$$D_{rs} = 2 - H \quad (4)$$

d) Resultados

El Coeficiente de $Hurst$ ($H = 0.271$) indica que la precipitación pluvial es un fenómeno irregular lo que se corrobora con una dimensión fractal grande ($DF = 1.729$) obtenida del análisis R/S (Figura IV.3) por lo que el desencadenamiento de inundaciones relacionadas con la lluvia representa un fenómeno aleatorio (alea).

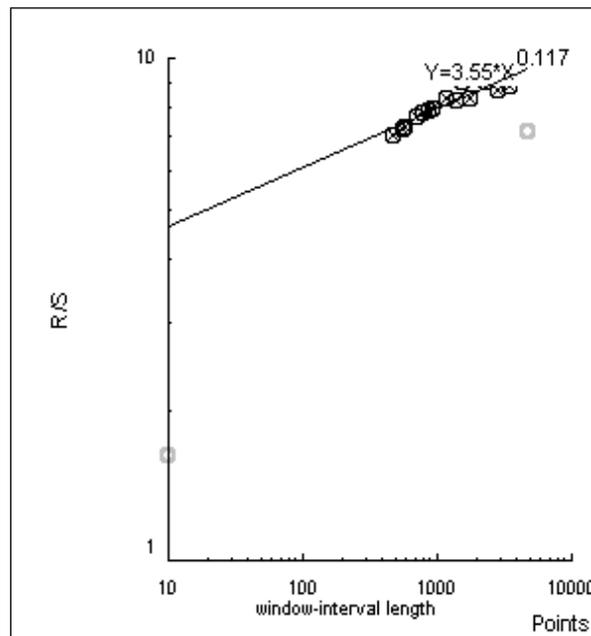


Figura IV. 3. Análisis R/S con la función $y = 3.55x^{0.117}$ para los datos de precipitación para los datos de precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco de 1961-2008 (SMN, 2010).

IV.1.2 Análisis de Frecuencia

El escenario de cambio climático elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2007) para la región centro de México que abarca la Cuenca de México estima una disminución de la cantidad de lluvia mensual durante la temporada seca aunque la precipitación más frecuente de entre 30 y 60 mm durante esta temporada del año disminuirá en menor porcentaje. En la temporada de lluvias, los eventos de precipitación mayores de 150 mm podrán disminuir, en tanto que los eventos de precipitación menor a 150 mm no muestran una tendencia clara (Figura IV.4).

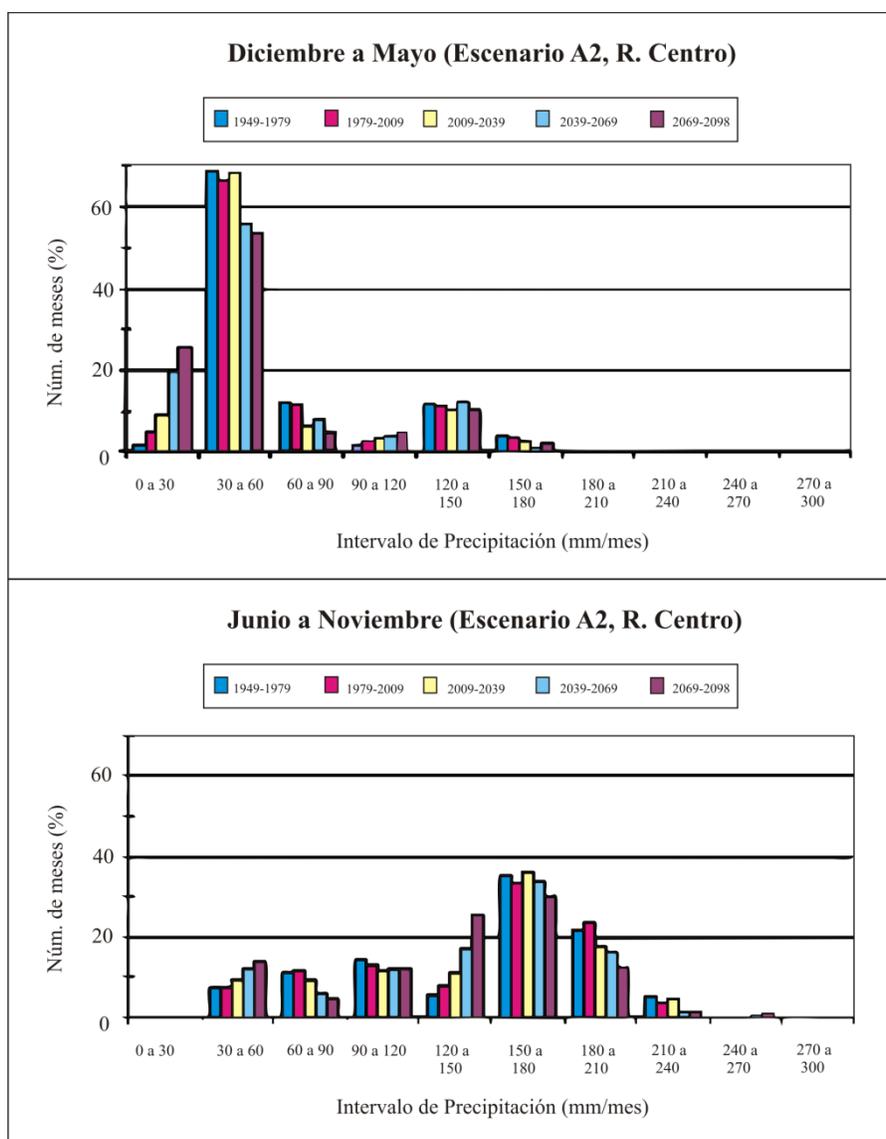


Figura IV. 4. Escenario climático A2 en relación con la precipitación pluvial para la Región Centro de México para las temporadas seca y húmeda del año.

Con los datos de precipitación pluvial local es factible analizar el comportamiento de dicho fenómeno aunque éste sea aleatorio. Un evento de precipitación se caracteriza por la cantidad y duración de la lluvia; un análisis de frecuencia permite determinar los periodos de retorno asociados con distintas magnitudes de la cantidad de lluvia en un tiempo determinado.

a) Generalidades

El análisis de frecuencia se elabora de la siguiente manera:

1. Se reduce la base de datos de precipitación histórica a máximos anuales para el tiempo seleccionado.
2. Es preciso seleccionar una distribución de probabilidad para la serie de máximos anuales. En este caso, se utiliza la distribución de probabilidad de *Gumbel (I)* que ajusta la mayoría de los datos de precipitación.
3. Para un periodo con duración t_d , el máximo de precipitación se expresa como:

$$P_T = P_{TM} + K_S$$

donde

P_T Cantidad de precipitación para un periodo de retorno específico

P_{TM} Media de la cantidad máxima de precipitación anual

S Desviación estándar de la cantidad de precipitación máxima anual

K Factor de frecuencia (Kendall, 1967; Haan, 1977)

El factor de frecuencia K depende de la distribución de probabilidad que se esté usando, el periodo de retorno y el tamaño de muestra de la serie de la cantidad de precipitación máxima anual.

4. La cantidad de precipitación máxima media se determina de la siguiente manera:

$$P_{TM} = \frac{\sum P_j}{n}$$

Y la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (P_j - P_{TM})^2}{n-1}}$$

Donde P_j es la cantidad de precipitación máxima para el año j , cuando j va desde 1 hasta n (tamaño de muestra).

b) Cálculo y resultados

La cantidad de precipitación máxima esperada en 24 hrs. en un periodo de retorno de 5 años es de 49 mm en tanto que para diez años es de 58 mm; por otra parte la máxima cantidad de precipitación estimada para un periodo de retorno de un siglo (88 mm) es cercana a la ya registrada en la estación climática Chalco con 80 mm (Tabla IV.1 y Figura IV.2).

Tabla IV. 1. Cantidad de precipitación máxima esperada para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años usando la distribución de probabilidad de *Gumbel (I)*.

		PT (mm)				
		5	10	25	50	100
		49.0	58.0	70.0	79.0	88.0

IV.2 Extracción de la zona urbana

La zona urbana es el espacio continuo edificado donde el movimiento superficial del agua es diferente ya que la pendiente se incrementa por el sellamiento de la superficie; disminuye la capacidad de infiltración y almacenamiento en el perfil del suelo; e incrementa la escorrentía por la nivelación de la superficie, compactación del suelo y

ausencia de vegetación. En este caso, ante una posible fractura en el Canal General, el flujo de agua de este punto, e incluso del Nuevo Lago de Chalco, hacia San Miguel Xico se relaciona no solo con la diferencia de altitud y orientación de la pendiente, sino con la traza urbana.

IV.2.1. Zona urbana

A continuación se presentan los métodos de extracción de la zona urbana utilizando imágenes de satélite *Landsat* y *Google Earth* (2008) y software especial. Se explican los resultados obtenidos y las ventajas de uno y otro tratamiento.

IV.2.2. Tratamientos para la extracción de la zona urbana

La extracción de la zona urbana se realiza por medio de algoritmos que utilizan imágenes de satélite (Gabet *et al.*, 1994), datos provenientes de *LiDAR* (Ackermann 1978, Haala *et al.*, 1998, Wang y Shenk, 2000) con los que elaboran reconstrucciones en 3D (Wang y Schenk, 2000), y MDE (Haala and Hahn 1995, Schenk 1995, Weidner 1996). En este trabajo se utilizaron dos tipos de tratamiento con imágenes de satélite de *Landsat* y *Google Earth*, el primero es el Índice Diferencia Normalizado de Área Urbana o *Normalized Difference Built-up Index (NDBI)* (Zha *et al.*, 2003) y su mejoramiento a través de la Adaptación del *Double-Window Flexible Pace Search (DFPS)* (Chunyang He y Dingyong Xie, 2008); y la Dimensión Fractal Local (*Local Fractal Dimension*).

a) Normalized Difference Built-up Index (NDBI)

El Índice Diferencia Normalizado de Área Urbana o *Normalized Difference Built-up Index (NDBI)* fue desarrollado por Zha *et al.* (2003) para extraer el área urbana de una imagen de satélite *Landsat* utilizando las bandas 4 y 5. Este índice requiere de la extracción conjunta del *NDVI* (Índice Normalizado de Vegetación o *Normalized Difference Vegetation Index*); así, los valores positivos del *NDBI* mostrarán el espacio construido y los valores positivos del *NDVI* se entenderán como la vegetación.

El *NDVI* se obtiene con las bandas de la imagen de satélite *Landsat* 3 y 4 de la siguiente forma:

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$$

Mientras que el *NDBI* utiliza las bandas 4 y 5.

$$NDBI = \frac{TM5 - TM4}{TM5 + TM4}$$

La interpretación del índice es la siguiente:

Si $NDVI > 0 \Rightarrow NDVI = 255$, Si $NDVI \leq 0 \Rightarrow NDVI = 0$

Si $NDBI < 0 \Rightarrow NDBI = 0$, Si $NDBI > 0 \Rightarrow NDBI = 255$

Si $NDBI - NDVI = 255 \Rightarrow$ área urbana

Si $NDVI \leq 0 \Rightarrow$ resto de la imagen

Finalmente, la diferencia *NDBI-NDVI* se binariza para tener lo siguiente: *NDBI=1-ciudad* y *NDBI=0-resto de la imagen*.

Sin embargo, uno de los problemas de este índice es el reconocimiento de suelos sin vegetación abundante. Por lo que Chunyang He y Dingyong Xie (2008) sugieren el uso de la aproximación de la segmentación semi-automatizada de Ventana de Búsqueda de Doble Paso Flexible (*Double-Window Flexible Pace Search, DFPS*) propuesta por Chen *et al.* (2003).

b) Adaptación del Double-Window Flexible Pace Search (DFPS) al NDBI

Chunyang He y Dingyong Xie (2008) mostraron que es posible, hasta cierto punto, separar las zonas urbanas o espacios construidos de los suelos sin vegetación abundante. La limitante de este análisis semi-automatizado radica en las zonas de entrenamiento que a su

vez depende de la experiencia del analista de imágenes. El procedimiento de Chunyang He y Dingyong Xie (2008) fue el siguiente:

Con la información provista por la cartografía en Sistemas de Información Geográfica (SIG), el trabajo de campo y la interpretación visual de la imagen *Landsat TM*, seleccionaron píxeles correspondientes con áreas sin construcciones alrededor. Posteriormente, en una imagen flotante, extrajeron de manera directa el *NDBI* de la imagen *Landsat TM*. Por último, con la segmentación semi-automatizada *DFPS*, se determinó el segmento umbral de la imagen flotante en una imagen binaria del área construida, siendo ésta igual a 1 y el resto 0. Con este análisis no es necesario darle un valor de 1 a las construcciones en el *NDBI* y el valor de 1 a la vegetación en el *NDVI*.

Para la obtención del *NDBI* se utilizó el algoritmo *Building_extraction* (Parrot, 2009) el cual sigue en forma detallada el procedimiento de Chunyang He y Dingyong Xie (2008). Los resultados del uso del *NDBI* (Zha *et al.*, 2003) y su mejoramiento con la segmentación semi-automatizada *DFPS* (Chunyang He y Dingyong Xie, 2008) no muestran de manera representativa el área urbana ya que las zonas sin vegetación o de vegetación escasa y algunas carreteras tienen la misma respuesta (Figura IV.5). Con este resultado se decidió utilizar el análisis de Dimensión Fractal Local que se explica en el siguiente apartado.

c) Dimensión Fractal Local (Local Fractal Dimension)

La geometría fractal pretende describir la rugosidad de los fenómenos naturales y permite un acercamiento cuantitativo a la descripción de los patrones fragmentados e irregulares que existen en el universo (Mandelbrot, 1982).

Un fractal es un objeto autosimilar ya que al cambiar la escala, un número infinito de veces, se sigue obteniendo una imagen similar a las anteriores. El concepto central de la geometría fractal es la dimensión fractal (Mandelbrot, 1983; Falconer, 1995), un coeficiente fraccionario que describe el grado de ocupación del objeto con una alta rugosidad en un espacio euclidiano uni, bi, tri o *n*-dimensional y a su vez la complejidad del objeto; esta

medida básica es mayor que la dimensión topológica (D_T) correspondiente, y menor que la dimensión euclidiana (D_E) del espacio donde se encuentra embebido el conjunto (Mandelbrot, 1983; Feder, 1988; Addison, 1997). Distintos trabajos de investigación se han dedicado a desarrollar procedimientos prácticos para calcular la dimensión fractal de diversos sistemas, ya sea naturales o artificiales (Pentland, 1984; Turcotte, 1986; Chaudhuri y Sarkar, 1995; Biswas *et al.*, 1998; Bushell *et al.*, 2002, Badadagli y Develi, 2003); en el caso de las imágenes de satélite, la respuesta espectral de los objetos en un tema puede utilizarse para el estudio de las características espaciales y con ello agrupar un conjunto de píxeles. La dimensión fractal describe los componentes de píxeles de las formas en estudio, en este caso se utilizó la Dimensión Fractal Local (*Local Fractal Dimension*) (Taud *et al.*, 1999).

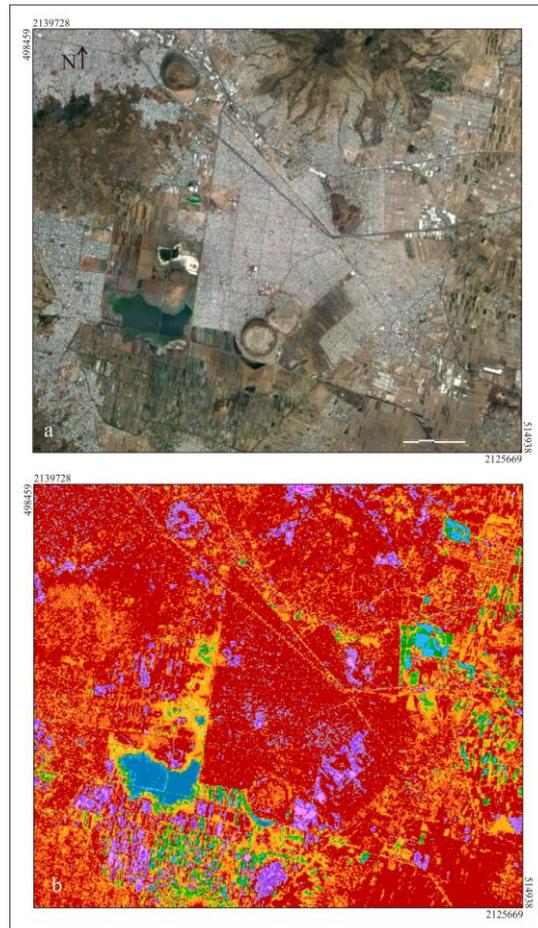


Figura IV. 5. Resultados de la Adaptación del *Double-Window Flexible Pace Search (DFPS)* al *NDBI* utilizando el algoritmo *Building_extraction* (Parrot, 2009)

Una forma con dimensión fractal grande es más complicada e irregular que una con una dimensión pequeña. Existen varios métodos para estimar la dimensión fractal de las superficies, entre ellos el modelo Browniano, las áreas de prismas triangulares, el conteo de cajas y el método de cobertura proyectiva. Las mediciones se realizan en forma directa con los tonos de gris de una imagen, o de manera indirecta cuando se miden isolíneas y perfiles.

La medición fractal local estima la textura y rugosidad de una superficie, al dar categorías a esta variable se hacen las clasificaciones de los distintos objetos en el mismo. Los resultados del tratamiento de textura de una imagen (I) se reportan en otra (R) de manera que los valores (i,j) corresponden a la dimensión fractal calculada en una ventana de tamaño $(2w + 1) \times (2w + 1)$. Así la imagen reportará lo siguiente:

$$R(i, j) = FD[I(i + k, j + k); -w < k < w]$$

Taud y Parrot (2005) consideran una ventana móvil centrada en un píxel de la superficie de un MDE y utilizan el método de conteo de cajas en 3D desarrollado por Cheng *et al.* (1999). Sin embargo, en este caso, el volumen que corresponde a cada caja se relaciona con los valores de altitud de los píxeles que definen la superficie del MDE. El tratamiento no requiere modelación o interpolación de la superficie para calcular la dimensión.

El cálculo consiste en utilizar un cubo o voxel de tamaño $s \times s \times s$ cuyo lado corresponda al mismo del tamaño de píxel del MDE o de la imagen, se estima el volumen total de la siguiente manera:

$$V_s = \sum_{i=1,s} \sum_{j=1,s} v_s(i, j)$$

De forma sencilla, en el espacio bidimensional, puede obtenerse con la siguiente matriz:

$$v_s(i, j) = \begin{cases} T(i, j) - s_i - 1 < T(i, j) < s \\ s - s_i - T(i, j) \geq s \\ 0 - s_i - T(i, j) \leq 0 \end{cases} \quad T(i, j) = \left(\frac{I(i, j) - I_c}{ps} \times h \right) + \frac{s}{2}$$

Donde I es la imagen original, I_c es el valor de píxel central, ps el tamaño de píxel, h un coeficiente que define la resolución vertical y s el tamaño del cubo (Figura IV.6). El cubo se divide en cajas de valor q que varían entre 1 y $s/2$. Cada una de estas cajas se considera llena si por lo menos un voxel está contenido en la caja, el algoritmo es el siguiente:

$$Ns = \sum_{i=1, s/q} \sum_{j=1, s/q} \frac{1}{q} \times \text{Max}\{Vs(i \times q - m, j \times q - m)\} 0 \leq m \leq q$$

Donde Max es la función calculando el máximo. La dimensión fractal se obtiene con el inverso de la pendiente $P = \ln(q)/\ln(Ns)$, donde q es el tamaño de caja y Ns el número total de cajas llenas. Cuando se calcula la pendiente, se obtiene también el coeficiente de determinación (R^2).

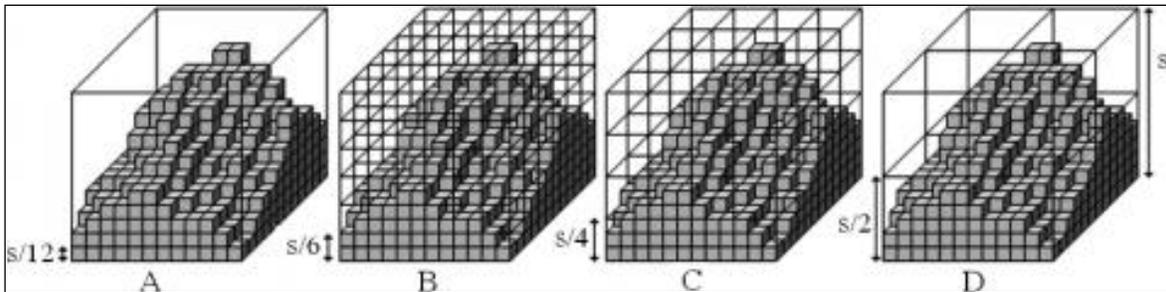


Figura IV. 6. Dimensión fractal 3D usando el conteo de cajas, ejemplo $s=12$ y distintos tamaños de malla equivalentes A: $q = 1$; B: $q = 2$; C: $q = 3$; D: $q = 6$. En Taud y Parrot (2005)

Si el píxel central o píxel en estudio está rodeado de valores más pequeños que la base del cubo se produce una línea vertical y a su vez, un plano vertical y su pendiente se obtendrá con y , lo mismo en un plano horizontal, llenará la mitad del cubo de prueba con z . Si el cubo presenta irregularidades, la dimensión fractal disminuirá (Figura IV.7).

El volumen en el cubo depende del coeficiente h por lo que la transformación en voxels puede suavizar o incrementar la rugosidad; si los valores del coeficiente h son altos, la rugosidad aumentará, por el contrario, los valores bajos generarán superficies suaves. Para estimar la dimensión fractal se utiliza un cubo de tamaño 12 o 24 ya que al calcular la pendiente adquiere valores regulares con divisores exactos

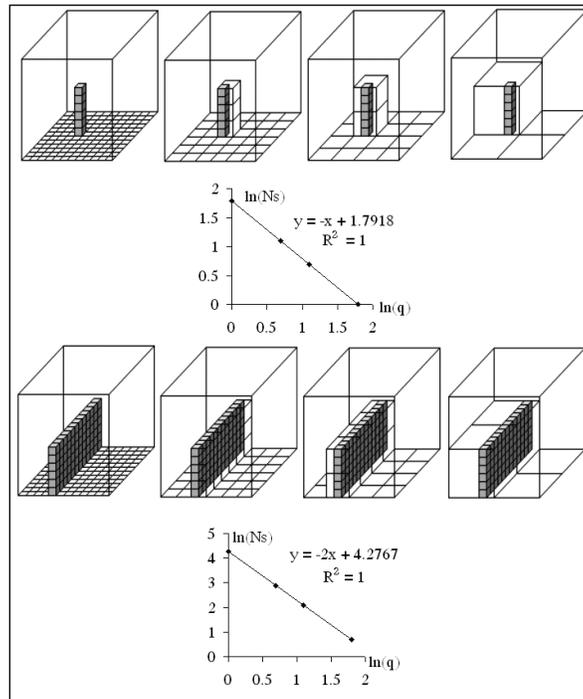


Figura IV. 7. Dimensión Fractal Local 3D de una línea y un plano con $s=12$ y $q=1, 2, 3, 6$; en Taud y Parrot (2005)

La imagen utilizada para la extracción de los rasgos urbanos se obtuvo del programa *Google Earth* (2009), ésta se separó en sus tres bandas (roja, verde y azul) con el editor de imágenes *Paint Shop Pro* y en cada una se realizó el tratamiento de la Dimensión Fractal Local en el programa *FROG (Fractal Research On Geosciences)* (Parrot, 2009). El programa requiere de imágenes en tonos de gris y en formato *raster*, así como definir el tamaño de caja y un coeficiente de tipo flotante (H). La Figura IV.8 muestra los resultados del tratamiento, se observa una mejor distinción de la zona urbana; ambas imágenes se obtuvieron con el mismo tamaño de caja pero con coeficientes flotantes distintos. Si el coeficiente flotante es pequeño, la zona urbana queda mejor definida aunque se obtenga la respuesta de los suelos desnudos y con vegetación escasa, esto implica una mayor rugosidad del objeto en estudio, esto es la textura de la zona urbana, en cambio, si se aumenta el coeficiente la respuesta en la zona urbana será como la de los cuerpos de agua.

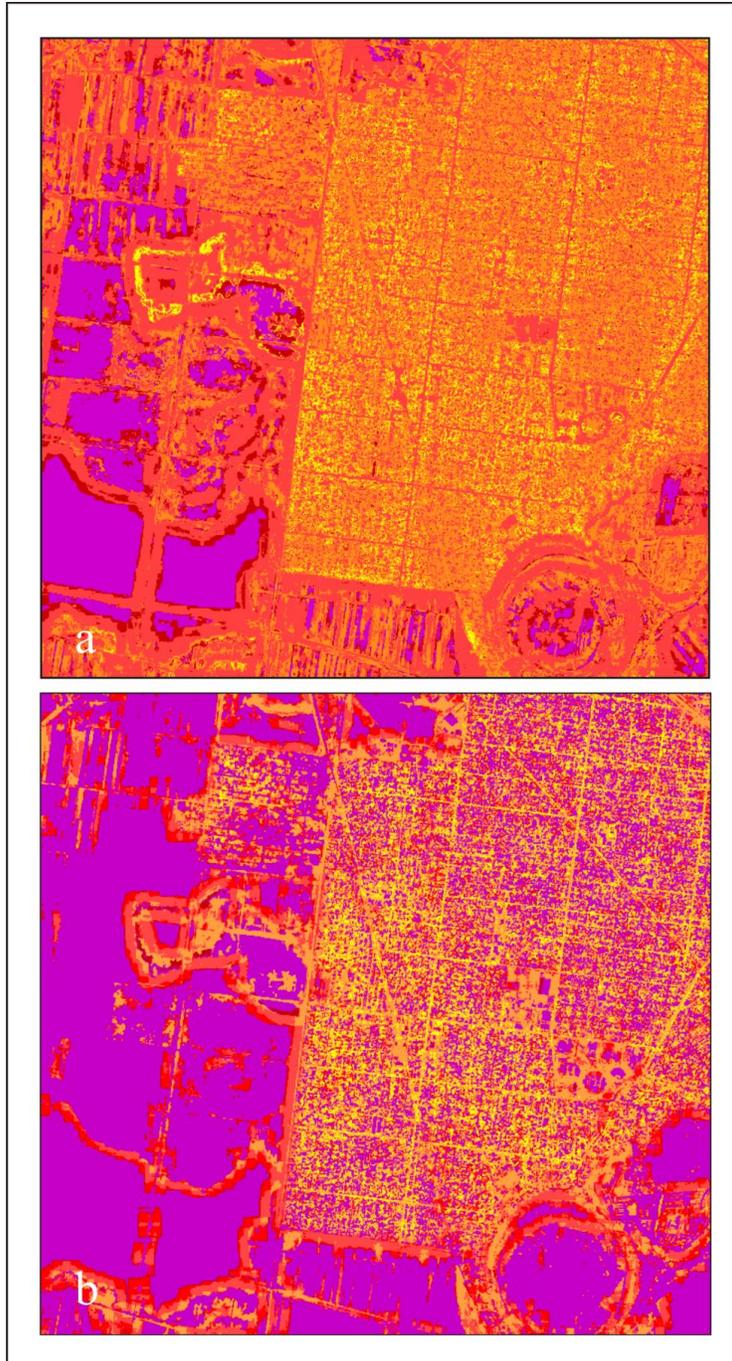


Figura IV. 8. Resultado del tratamiento de Dimensión Fractal Local con un tamaño de caja 24 y un coeficiente flotante de 0.2 (a) y 0.7 (b)

Capítulo V. Simulación de inundaciones

En este capítulo se describen los tipos de inundación a considerar: por precipitación pluvial, ruptura de presas y sobrecarga; y los algoritmos desarrollados para los distintos escenarios de inundación en la zona de San Miguel Xico.

V.1 Tipos de inundación

La inundación es el desbordamiento de ríos, lagos, estuarios hacia tierra generalmente no sumergida, o cuando el nivel del mar asciende en la costa por encima del promedio. Este fenómeno se vuelve un problema cuando los seres humanos se establecen en tierras bajas, planicies de inundación o cauces de ríos lo que ha causado grandes pérdidas humanas y económicas (Fattorelli *et al.*, 1999).

Las inundaciones se clasifican según su tiempo de duración en lentas o rápidas; y según el factor que las genere, pueden ser de tipo pluvial (lluvia), fluvial (desbordamiento de ríos), por marea de tormenta (ciclones tropicales en las costas) o por falla de las obras hidráulicas. En este trabajo se tratan las inundaciones de tipo pluvial y las ocasionadas por fallas de las obras hidráulicas en una zona urbana; y desde el punto de vista hidráulico se trata de la sobrecarga del sistema de alcantarillado que produce acumulaciones locales después de un evento de precipitación pluvial (encharcamientos).

V.1.1 Pluvial

Los sistemas de tiempo que afectan la Cuenca de México son los vientos dominantes del Este o Alisios durante la temporada húmeda del año (mayo-octubre) y los frentes fríos en la temporada seca (noviembre-abril). Los eventos de fuerte precipitación durante una y otra temporada se asocian con las lluvias de huracanes y con zonas de inestabilidad; las tormentas de lluvia intensa, con más de 100 mm en 24 hrs., son las que ocasionan daños mayores por las inundaciones generadas, ejemplo de esto fue la ruptura del Canal La

Compañía en junio de 2000 y febrero de 2010; en este último evento se produjeron 30 millones de m³ en 36 hrs (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

V.1.2 Ruptura de presas

La ruptura de diques y el desbordamiento de los lagos o presas, son eventos de baja probabilidad, pero las consecuencias asociadas son de gran magnitud, por lo que cualquier inundación por esta causa es muy seria.

V.1.3 Sobrecarga

La inundación es una condición en la que el agua residual y/o superficial sale o no permanece en el canal o sistema de alcantarillado por lo que se mantiene en superficie o entra a los edificios (Comité Europeo de Normalización, CEN, 1996 y 1997). A diferencia de la inundación, el término de sobrecarga es un estado en el que el agua residual y/o superficial se mantiene a presión en el sistema de drenaje, pero no escapa a la superficie para producir una inundación. Las condiciones de sobrecarga excesiva pueden producir el ascenso en el nivel del agua por encima de la superficie ya que sale del sistema de alcantarillado o evita que regrese al mismo (Schmitt *et al.*, 2004), o bien, por la acumulación del agua de lluvia en depresiones locales; en estas condiciones se forman las zonas de encharcamiento.

V.2. Simulación de inundaciones

La simulación es una metodología de análisis basada en la construcción de un modelo que pretende describir el comportamiento del sistema de interés a través de un programa de computadora que, con base en ciertos datos de entrada, permita llegar a conclusiones que apoyen la toma de decisiones con los escenarios posibles (Schmeiser, 1990).

La simulación de un sistema se utiliza cuando la experimentación es muy costosa, toma mucho tiempo o bien resulta inapropiado (por ejemplo, de alto riesgo) es necesario detectar

variables o requerimientos importantes para verificar soluciones analíticas, interacciones dentro del mismo sistema, como un aprendizaje del mismo, o bien el sistema aún no existe y se desea conocer su funcionamiento.

Una vez construido el modelo, los experimentos de simulación se adaptan al siguiente esquema (Schmeiser, 1990):

1. Se obtienen observaciones básicas de una fuente de números aleatorios.
2. Se transforman tales observaciones básicas en entradas al modelo, según las especificaciones del mismo.
3. Se pasan las entradas a través del modelo para obtener salidas.
4. A partir de las salidas se calculan estadísticas para estimar medidas del comportamiento del sistema y, eventualmente, emplearlas en la toma de decisiones.

La simulación puede ser de tipo estadística y de eventos de tipo continuo y discreto, las cuales se explican brevemente.

Simulación estadística o Monte Carlo. Se utiliza en problemas con base estocástica o probabilística que utiliza el muestreo sistemático de variables aleatorias.

Simulación de eventos discretos. El sistema a simular se observa únicamente en puntos seleccionados en el tiempo.

Simulación de eventos continuos. El sistema se monitorea en todos los puntos en el tiempo.

V.2.1 Tipo de algoritmos

Las inundaciones en terrazas y planicies de ríos ocurren bajo distintos factores y su análisis teórico resulta complejo; algunos métodos de solución son los de tipo hidrológico e hidrodinámico; los primeros utilizan el principio de balance de masa, y los segundos tanto las leyes de conservación de masa y momento, así como las ecuaciones de flujo completas.

Las ecuaciones de flujo básicas fueron desarrolladas por Barre de Saint-Venant (1871), quien utilizó un modelo matemático de una dimensión en el que simula una inundación de onda con velocidad uniforme, densidad del fluido constante y la fuerza uniforme producida por el efecto de borde y resistencia, en este caso desprecia las aceleraciones verticales y la presión hidrostática. Los métodos actuales de solución de las ecuaciones de flujo son similares y pueden resolverse en forma analógica o digital.

En el caso de las inundaciones en zonas urbanas es necesario considerar las características urbanas y no urbanas, las particularidades del terreno, las estructuras hidráulicas, las tuberías y aspectos del clima, por mencionar solo algunos.

Algunos de los algoritmos desarrollados para la simulación de inundaciones consideran el escaneo de los perfiles en los MDE, el modelado de cauces, la obtención de la curvatura máxima (Peet y Sahota, 1985; Besl y Jain, 1986) que utiliza el cálculo de acumulación de flujo y otros como el método de umbrales del área aportadora (*contributing area*) (Jenson y Domingue, 1988).

En las geociencias existe software especial para cálculos hidráulicos unidimensionales de ríos y canales como el elaborado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center, HEC*) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (*US Army Corps of Engineers*), *HERC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System)* con versiones libres en internet, en tanto que el programa *MIKE URBAN* elaborado por el Instituto de Hidrología Danés (*Danish Hydraulic Institute, DHI*) realiza la simulación de inundaciones en zonas urbanas con la posibilidad de mostrar la extensión del flujo en modelos 2D independientemente de la resolución del MDE; también es posible añadir entradas sobre resistencia, turbulencia y parámetros de inundación y secado, y los resultados pueden visualizarse como series de tiempo, perfiles, mapas y animaciones. El uso del software requiere de un módulo principal con un costo entre 2,000 y 10,000 €, y de los módulos especiales con un valor adicional según el tipo de simulación y el número de tuberías a considerar. En este trabajo se utilizó software libre para los distintos escenarios de inundación.

V.2.2 Escenarios y algoritmos de simulación de inundaciones

En la zona de San Miguel Xico, el área afectada por inundación se obtuvo en forma radial por Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2010) quienes consideran que en 2015 la extensión del lago podría alcanzar entre 1,200 y 1,500 hectáreas, de las cuales 25 hectáreas pertenecen a la zona urbana de Tláhuac y 10 hectáreas al municipio de Valle de Chalco Solidaridad. En este acercamiento se consideran distintos escenarios de inundación en los cuales se utiliza un MDE-AR y la cantidad de precipitación pluvial (Tabla V.1).

Tabla V. 1. Escenarios y programas para la simulación de inundaciones.

Escenario	Programa*
Llenado por precipitación pluvial en la zona urbana.	<i>Flooding</i>
Ascenso del nivel del lago por precipitación pluvial al considerar uno o varios puntos iniciales.	<i>Sim_filling</i>
Llenado a partir de los puntos de altitud más bajos del MDE.	<i>Water_filling</i>
Dirección de un flujo por ruptura del dique.	<i>Derrame</i>
Ubicación de las zonas de encharcamiento y sus láminas.	<i>Charcos</i>
Inundación considerando la subsidencia.	<i>Subsid</i>

* Parrot (2010)

A continuación se describen los programas y resultados obtenidos de los tratamientos y en el anexo I se indican los datos de entrada y el formato para cada programa así como el tipo de archivo que se obtiene. Los resultados del análisis de los periodos de retorno (cantidad de precipitación máxima en mm/24 hr.) se utilizan para los distintos escenarios y la traza

urbana es útil para la ubicación del peligro de inundación, aunque dentro de la metodología se propuso para analizar el cambio en la dirección y tiempo de desplazamiento del flujo.

a) Flooding

La superficie susceptible a inundarse por precipitación pluvial en la zona urbana se estima con el programa *Flooding.exe* el cual requiere del MDE-AR y una máscara o imagen que delimita la zona urbana. El cálculo considera la cantidad de precipitación (mm o l/m^2) y ésta se reparte a partir de un píxel inicial con la altitud mínima (A_p) del MDE-AR. En el primer tratamiento se calcula el volumen total de agua en función del valor de la precipitación pluvial (l/m^2) y la superficie de la zona en estudio (número de píxeles de superficie (m^2)); en el segundo tratamiento, en cada iteración, se ubica el/los píxeles de menor altitud ().

El llenado progresivo se realiza a partir del punto inicial (A_p) que corresponde al píxel de menor altitud, y se añade el espesor de la lámina (T_f) por lo que la iteración inicial, en este caso, añade 1 cm en la escala hipsométrica del MDE-AR (en centímetros). El cálculo continúa con el volumen correspondiente al llenado de la primera iteración y muestra el volumen restante en cada cálculo. Las iteraciones terminarán cuando el volumen calculado en la primera iteración sea nulo. El resultado será la altitud máxima y la superficie del cuerpo de agua que se visualiza en una imagen con extensión *flood.raw* y en un nuevo MDE-AR (*imagen.flood_m4.raw*) (Figura V.1).

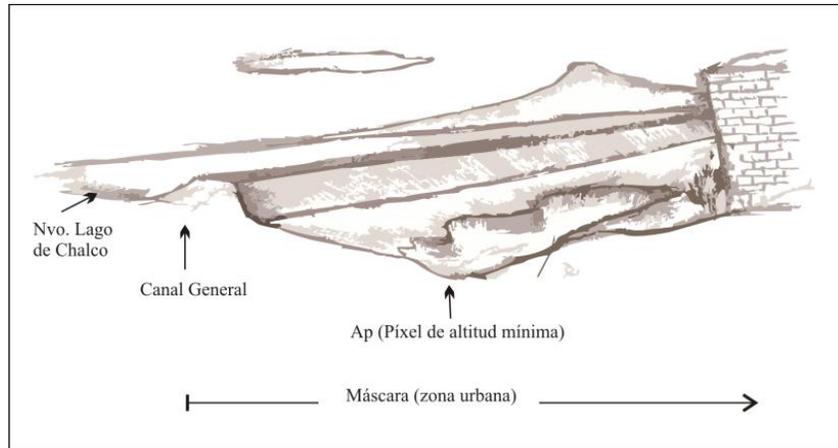


Figura V. 1. Ejemplo de la localización de la zona de menor altitud en la máscara de la zona urbana cuyo límite comprende el Canal General al Oeste, y la vía de ferrocarril al Este.

En la zona de estudio se utilizó una precipitación pluvial máxima en 24 hr de 50 y 88 mm que corresponde al periodo de retorno de 5 y 100 años, respectivamente; en la Figura V.2 se observa que esta cantidad de agua se distribuye entre la calle Cuitláhuac y la Av. Acapol (Figura V.2 y III.4). En el trabajo de campo se ubicó una zona de acumulación de agua después de un evento de fuerte precipitación en julio de 2010 entre la Av. Tezozómoc y la Av. Acapol, enfrente de la planta de bombeo en la colonia Américas II (Figura V.3). De acuerdo con las nivelaciones en campo, esta zona corresponde con un punto de altitud bajo (2226 msnm), y la basura y el lodo impiden el desalojo del agua.

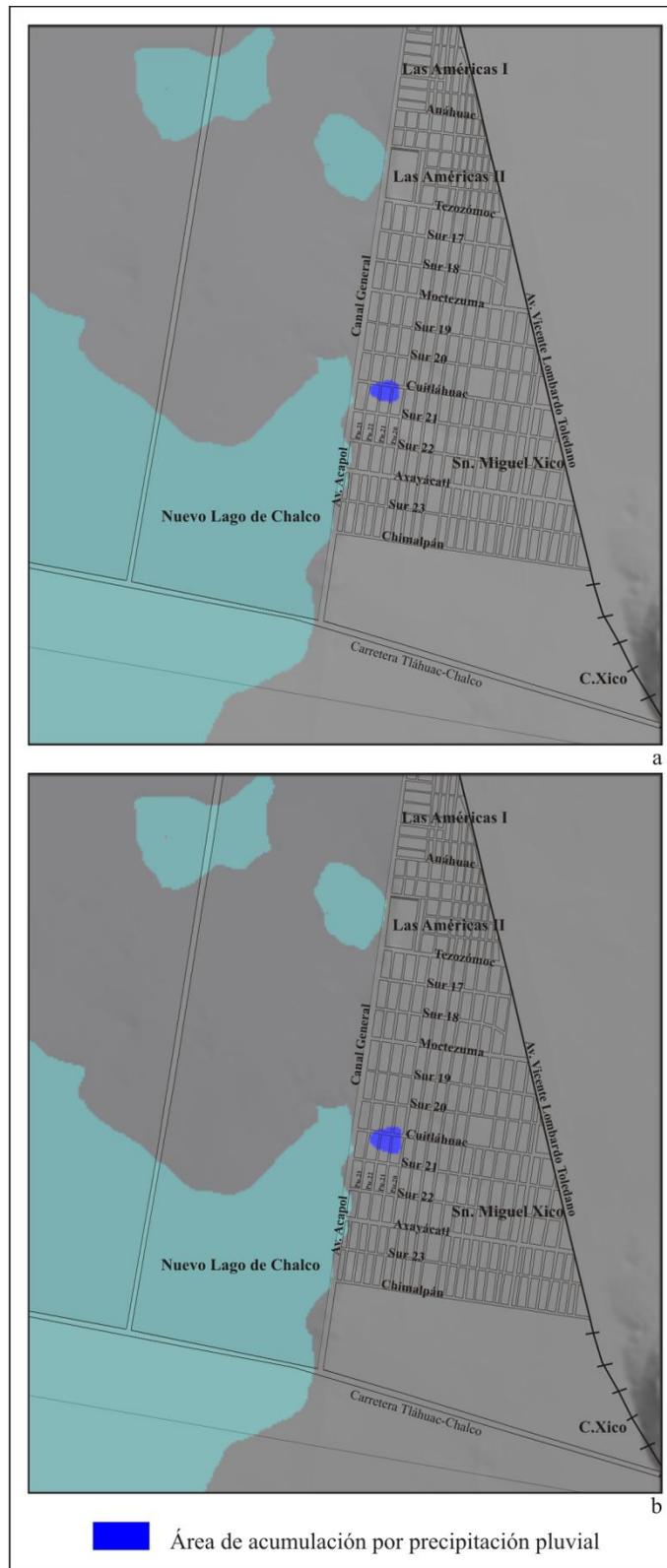


Figura V. 2. Resultados del cálculo con el algoritmo *Flooding* para a) 50 mm y b) 88 mm de precipitación pluvial.



Figura V. 3. Zona de acumulación en la Av. Acapol casi esquina con Av. Tezozomoc.

b) Sim_filling

Uno de los supuestos de inundación es el desbordamiento del Nuevo Lago de Chalco por una gran cantidad de precipitación pluvial. En este caso, se utilizó el algoritmo *Sim_filling.exe* (Parrot, 2010) en el cual se introduce la altitud (m) de uno o varios puntos iniciales ($Ap_{1, 2, \dots, n}$) de llenado en los que se incluye la altura de la lámina de agua (m) (Tf), el programa realiza el cálculo en función de la altitud total del píxel ($Atp = Ap + Tf$) y estima el área que ocupará dicho volumen. Si la altitud del píxel vecino (An) es mayor que (Atp) entonces el volumen de agua no se desplazará; en el caso contrario seguirá el flujo y con ello el crecimiento del lago hasta su desbordamiento. El resultado serán dos imágenes, una con el MDE-AR (*imagen_simfill_m4.raw*) con el nuevo valor de altitud de cada píxel (Ap) y otra con la superficie que ocupará la lámina (Tf) (*imagen_simfill.raw*) (Figura V.4).

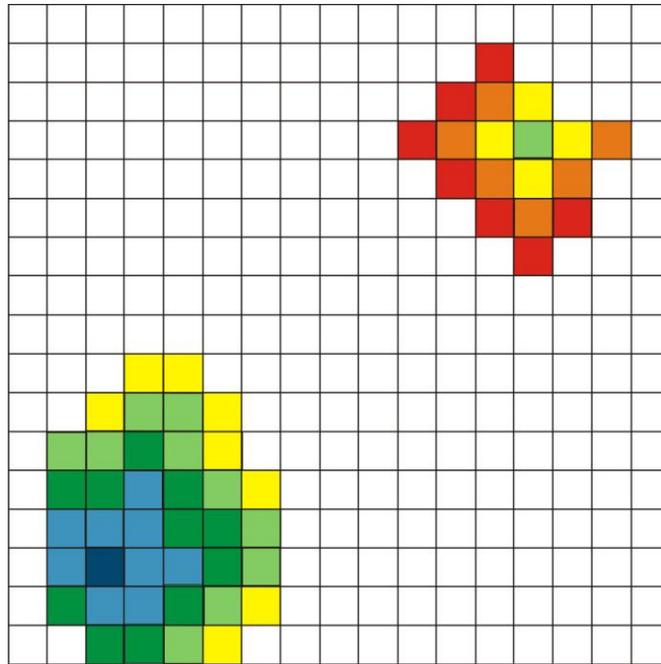


Figura V. 4. Cálculo del algoritmo *Sim_filling* con dos puntos iniciales de valor *Atp*; la lámina se distribuye hacia los píxeles vecinos (colores fríos a cálidos) que cumplen con la condición de desplazamiento.

La Figura V.5 indica los resultados con tres puntos iniciales de llenado, el primero con una altitud de 2,225 msnm (zona sur del lago) y dos puntos con una altitud de 2,225.5 msnm (zona norte del lago), y las distintas láminas en función del periodo de recurrencia de 5, 50 y 100 años (a, b y c respectivamente) y láminas de 50, 150 y 180 cm (d, e y f respectivamente). Cuando la altura del lago incrementa entre 50 cm y 1.5 m no hay desbordamiento pero el ascenso de 1.8 m o más produce el desbordamiento (Figura V.5f).

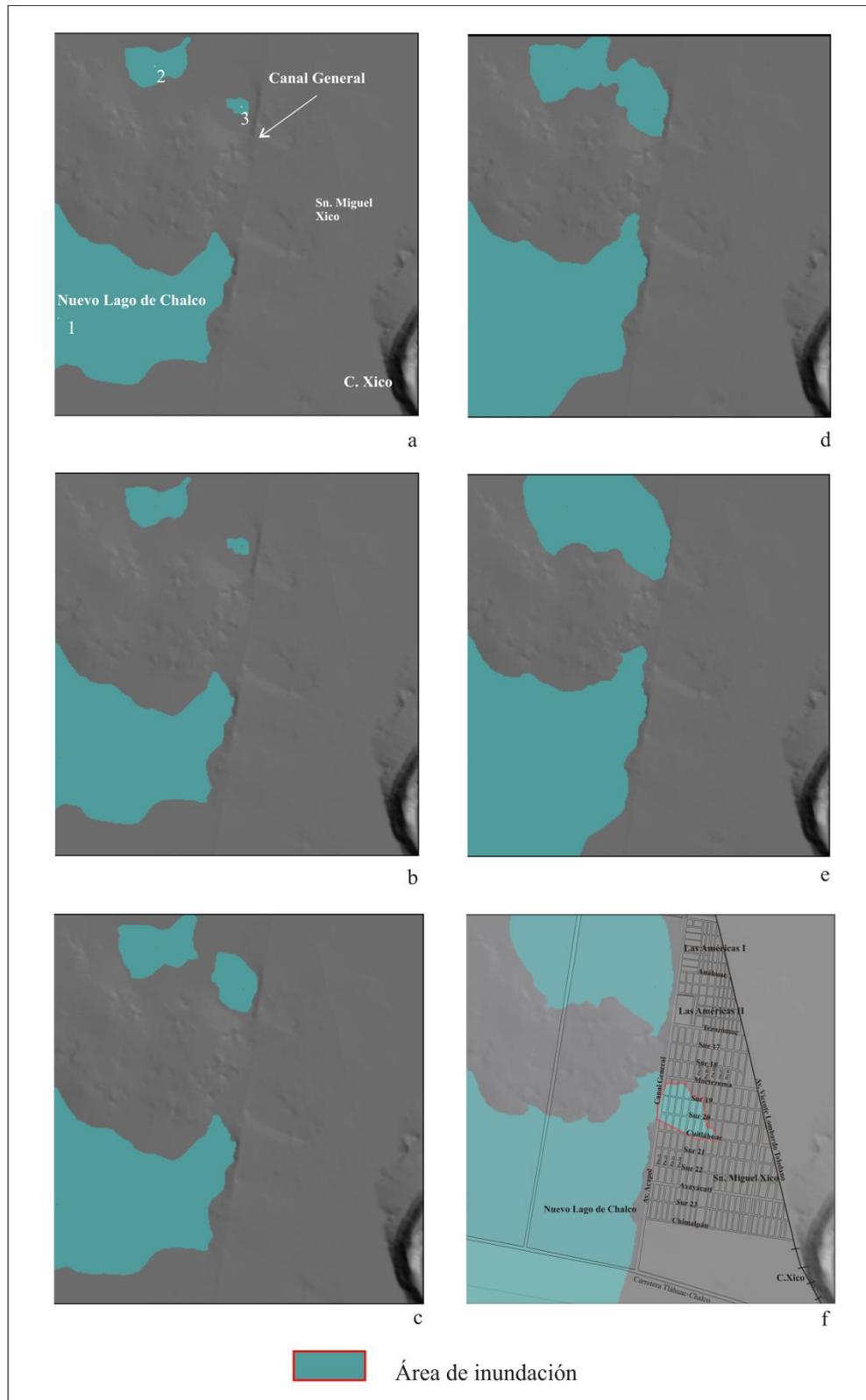


Figura V. 5. Resultados del algoritmo *Sim_filling* con tres puntos iniciales de llenado para a) 5, b) 50 y c) 88 mm de lluvia; y d) 50, e) 150 y f) 180 cm de ascenso.

c) *Water Filling*

En este escenario se inicia el llenado considerando los puntos más bajos del MDE-AR, esto es tanto en el lago como en la zona urbana, lo que implicaría la infiltración a través del dique (Figura V.6). Así, en el algoritmo *Water_filling* (Parrot, 2010) se especifica la altura de la lámina de agua (m) (Tf) y el programa distribuirá el volumen en función de los píxeles de superficie que cumplan con la condición de altitud mínima (Ap). El resultado se visualiza en una imagen (*imagen_wfill.raw*) y en un MDE-AR con los nuevos puntos de altitud.

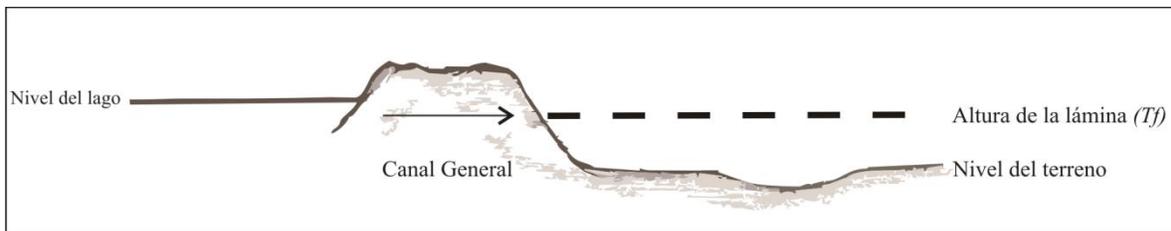


Figura V. 6. Escenario considerado en el algoritmo *Water_filling*

En la Figura V.7 se observa que al considerar láminas de 1, 1.5 y 1.8 m las áreas susceptibles de inundación son paralelas al Canal General, en la calle de Acapol, y en su intersección, de norte a sur, con la calle Tezozomoc, Cuitlahuac y hacia la zona de chinampas.

d) *Derrame*

El algoritmo desarrollado por Parrot (2010) describe el movimiento de un flujo a partir de una celda de ruptura y el llenado progresivo de los píxeles vecinos; el movimiento del flujo dependerá de la altitud del píxel (Ap) en el cual se considerará también el espesor del flujo (Tf).



Figura V. 7. Resultados del algoritmo *Water_filling* con una lámina total de a) 2226, b) 2226.50 y c) 2226.80 msnm.

Cuando la altitud de un píxel vecino (A_n) es mayor que , el flujo no podrá pasar en esa dirección; si la altitud del píxel es menor que , pero mayor que la altitud inicial (A_p) del píxel fuente, el espesor del flujo en el píxel vecino será menor que el espesor fijado y dependerá de la diferencia entre A_p y T_f y la altitud del píxel vecino (A_n). En éste caso (y),

el píxel vecino será el píxel fuente según su código y su rango en el grupo de píxeles, si hay más de un píxel con el mismo código. En el caso de cuencas endorreicas, el algoritmo busca la altitud mínima o depresión que pueda llenar el flujo; el siguiente punto de iteración se obtendrá al medir la distancia mínima entre esa zona y el primer píxel de inicio, lo que implica un nuevo desplazamiento del volumen restante, el cálculo finalizará cuando el volumen inicial sea nulo.

En la Figura V.8 se ejemplifica el funcionamiento del algoritmo; el código 1 representa la celda de ruptura, a partir de este punto dos píxeles vecinos de código 2 se llenan con el flujo; las conexiones siguientes son cuatro píxeles de código 3, mientras que el código 2 anterior da paso a la unión con el píxel de valor 4. Las conexiones continúan a partir del código 3 y así sucesivamente.

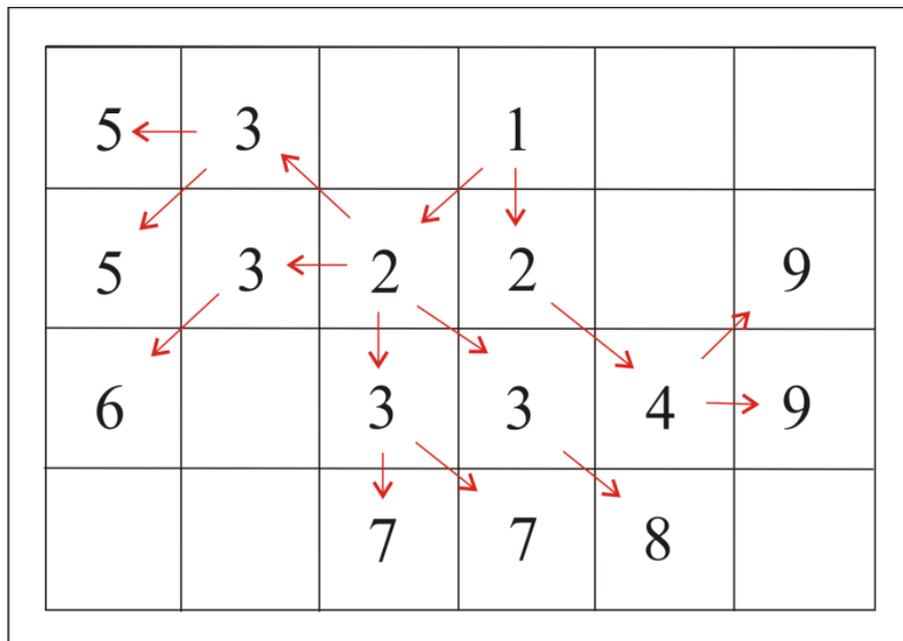


Figura V. 8. Llenado progresivo de píxeles, algoritmo desarrollado por Parrot (2009)

La celda de fractura se consideró donde termina el revestimiento exterior del Canal General, a la altura de la calle Cuitláhuac (Figura III.5.a) y se observa el desplazamiento del flujo hacia la zona urbana con una lámina superior a los 70 cm (Figura V.9).

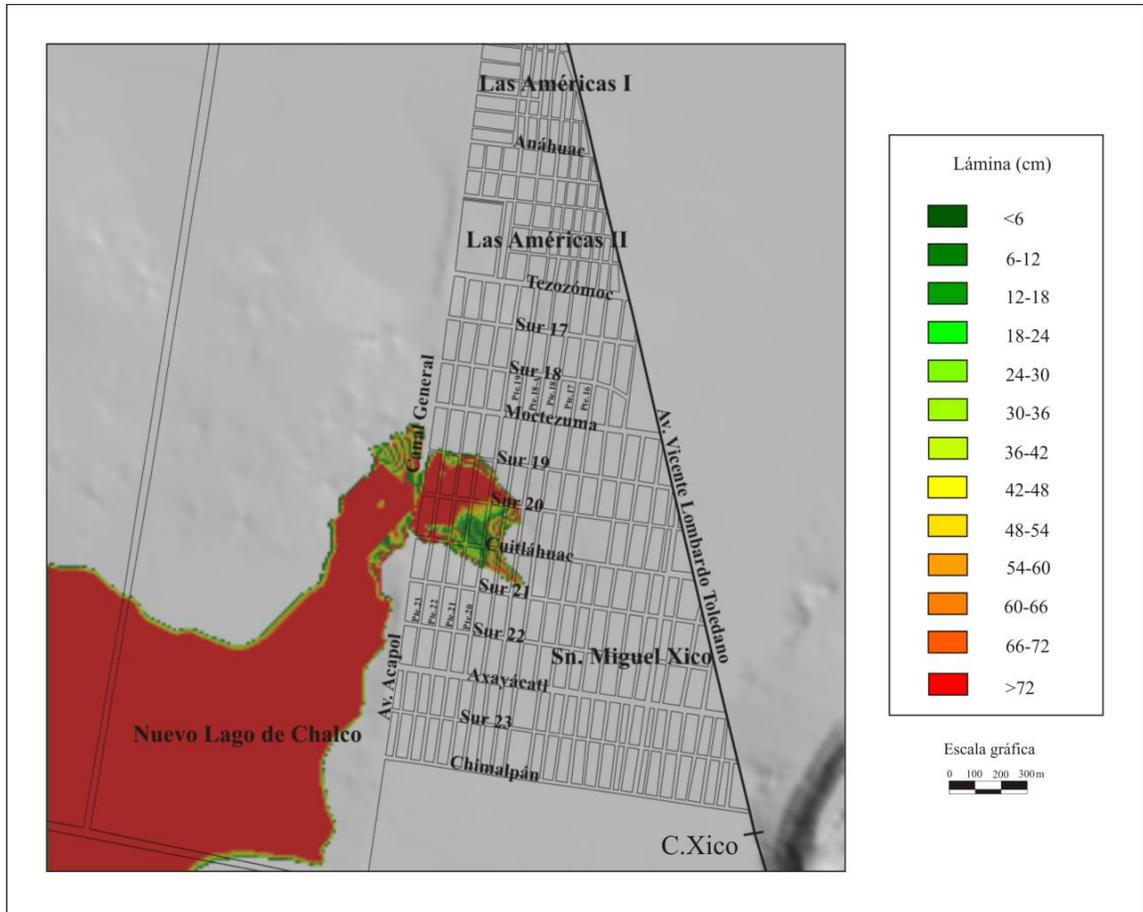


Figura V. 9. Resultados del programa *Derrame.exe*

e) *Charcos*

El programa *Charcos* es de gran utilidad para considerar la sobrecarga en el sistema de drenaje, en este caso estima las zonas de encharcamiento, así, en el MDE-AR se busca el punto más bajo y en un primer llenado se realiza la exploración de todos los puntos bajos dentro de la máscara de la zona urbana. Después se definen todas las micro-cuencas lacustres dando una etiqueta cuyo orden está en función de la altitud del punto más bajo en cada una de ellas y así obtener una imagen con extensión *charc_code.raw*. El archivo descriptivo (*imagen_charc_code.txt*) contiene el número de micro-cuencas lacustres, la superficie (m^2), el volumen de agua (m^3) captada en función de la cantidad de precipitación pluvial (mm o l/m^2) y la profundidad máxima (cm) de la lámina de agua en cada micro-cuenca.

Los charcos aparecen en una imagen (*imagen_charc.raw*), se obtiene un MDE con la altitud del terreno más la de los charcos (*imagen_charc_m4*) y una imagen (*imagen_charc_prof_m4*) donde codifica la profundidad; además un archivo *.xls* agrupa los datos de superficie (m^2), volumen de agua (m^3) y profundidad máxima (cm) de la lámina de agua (Figura V.10).

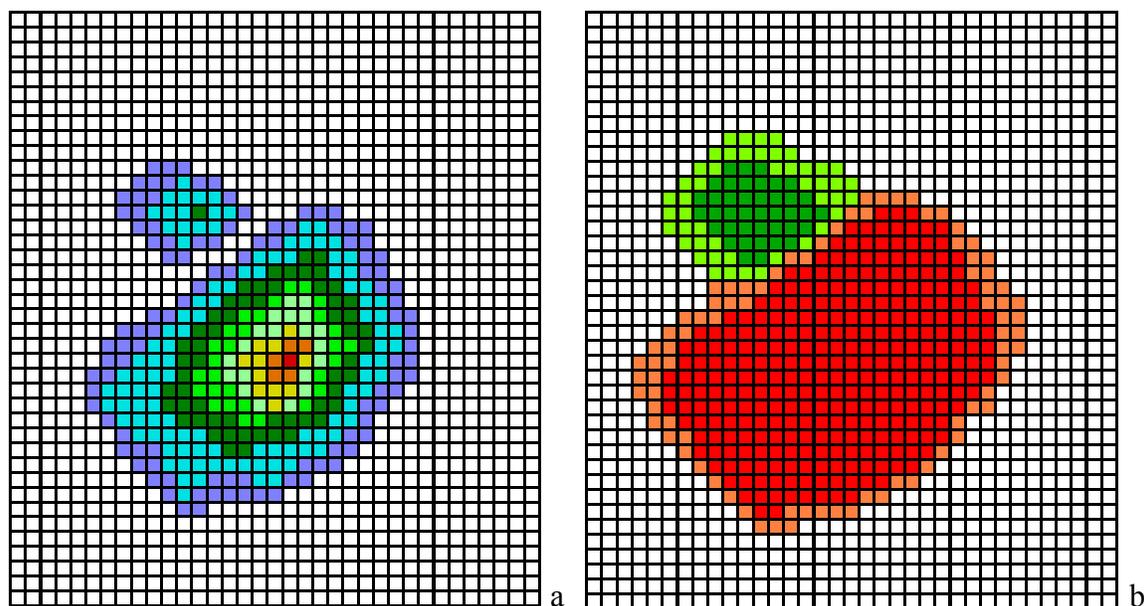


Figura V. 10. Llenado progresivo del algoritmo *Charc* en función de la altitud, a partir del punto más bajo (rojo), conforme se incrementa la profundidad, el charco comienza a llenarse (punto verde) (a) y la codificación posterior de los diferentes charcos hasta que se unen (colores más claros) (b).

Para el algoritmo *Charc* se utilizó la precipitación pluvial de los periodos de recurrencia de 5 y 100 años, esto es 50 y 88 mm (en 24 hrs.), ya que el primer caso corresponde con las zonas de encharcamiento más frecuentes y la extensión máxima de éstas en eventos de precipitación muy fuerte (Figura V.11a).

En la zona urbana de San Miguel Xico hay 102 micro-cuencas lacustres; las que tienen las altitudes más bajas se distribuyen en forma paralela al Canal General y corresponden con el hundimiento regional estimado por Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2010) (Figura V.11b). Las zonas de encharcamiento con una precipitación de 50 mm alcanzan láminas de

15 cm, y de 19 cm cuando la precipitación es >80 mm en un periodo de 24 hrs. La mayor parte de las micro-cuencas lacustres tienen una superficie menor a los $100,000 \text{ m}^2$ con láminas <10 cm, en tanto que las micro-cuencas de superficie $>100,000 \text{ m}^2$ son muy pocas y registran láminas de entre 2 y 19 cm (Figura V.12 a y b).



Figura V. 11. Resultados de la simulación con el algoritmo *Charc* que muestra las zonas de encharcamiento (rojo) (a) y las micro-cuencas lacustres definidas en función del punto más bajo (matiz de azul).

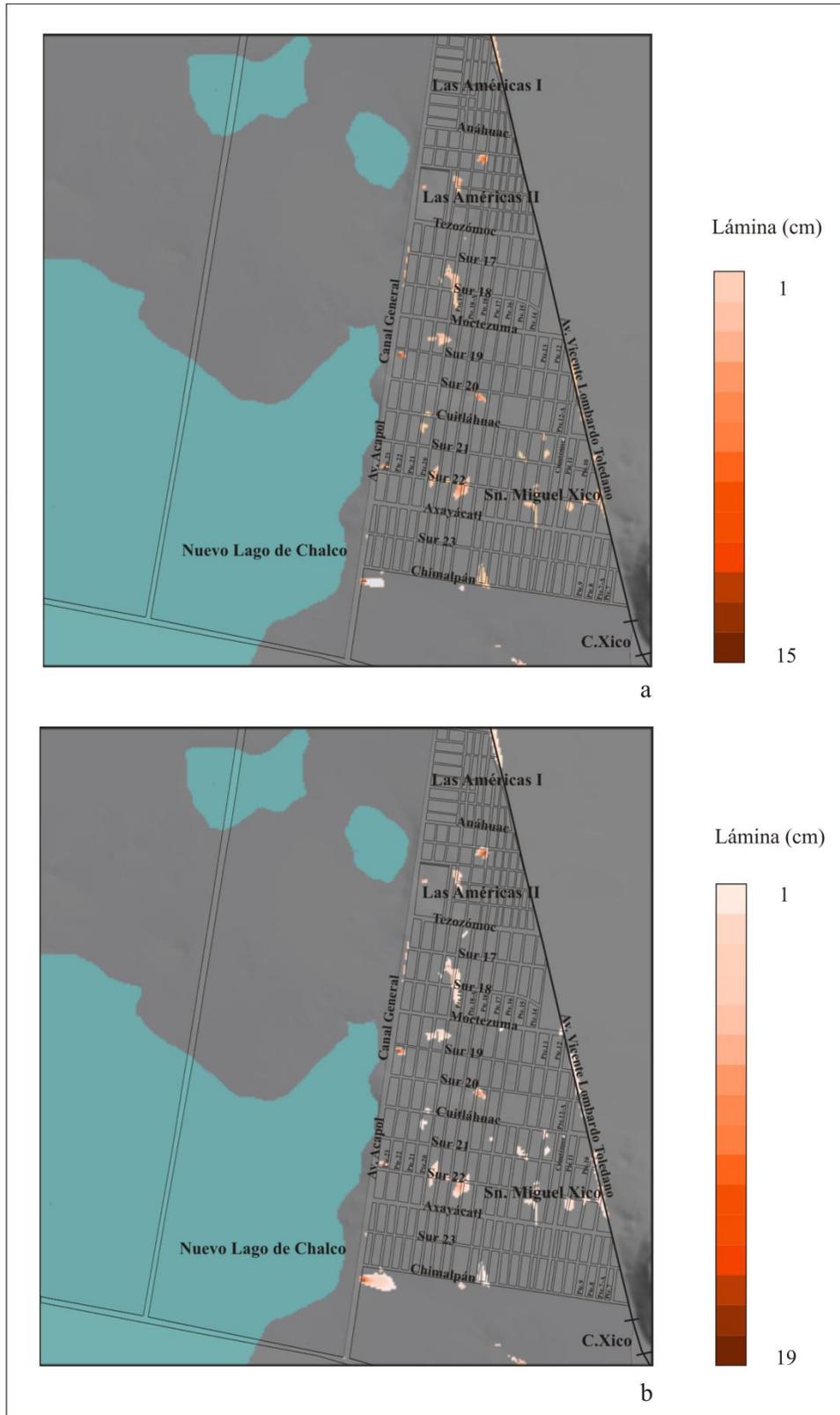


Figura V. 12. Profundidad de la lámina de agua en cada micro-cuenca lacustre para una precipitación pluvial de 50 y 88 mm (b y d, respectivamente).

La mayoría de las zonas de encharcamiento son de poca profundidad pero su volumen y superficie varía (Figura V.13 a y b). A través del Análisis de *Cluster* es posible determinar grupos de objetos internamente homogéneos y lo más heterogéneo al exterior, considerando distintas variables sin la necesidad de una independiente o explicativa (Everitt *et al.*, 2001). Existen varias distancias para determinar la similitud de los objetos, la más común es la euclidiana, pero también se pueden usar otras técnicas de análisis como las ascendentes (*building up*) que construyen grupos por agregación, como el algoritmo de *Johnson*, donde la agrupación es de forma secuencial, de menor a mayor distancia. Para representar gráficamente el *cluster* se emplea el gráfico en forma de árbol o dendograma donde cada objeto está representado inicialmente por una rama final, las uniones de ramas del árbol en otras intermedias representan las distancias a las que se produce el agrupamiento (anexo II).

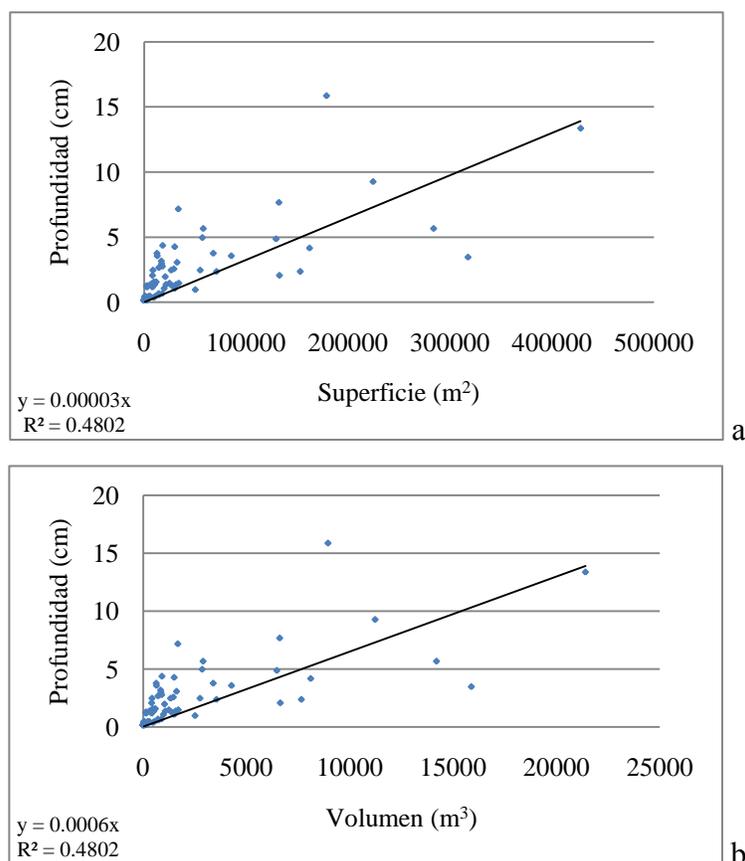


Figura V. 13. Relación entre la profundidad con la superficie (a) y el volumen (b) de las zonas de encharcamiento con 88 mm de lluvia.

Al considerar la superficie, el volumen y la profundidad de la lámina de agua en cada charco por una precipitación máxima de 50 y 88 mm en 24 hrs. se obtienen tres tipos de encharcamientos de igual superficie promedio para ambas cantidades de lluvia pero con mayor volumen y profundidad (Tablas V.2 y V.3). El primer grupo de charcos se encuentra en forma paralela al Canal General, y corresponde con la zona de mayor subsidencia, sus láminas promedio son de 11 cm; los charcos del segundo grupo ocupan una mayor superficie, y con esto volumen de agua, que el primer y tercer grupo de charcos, no obstante, la profundidad promedio es menor que los charcos del primer grupo y se encuentran con mayor frecuencia en la zona urbana (anexo II); el último grupo de charcos se caracteriza por su baja profundidad por lo que el volumen de agua y superficie son menores (Figura V.14).

Tabla V. 2. Valores medios por grupo de charcos con una precipitación máxima de 50 mm en 24 hrs.

Valores medios por grupo	Superficie (m ²)	Volumen (m ³)	Profundidad (cm)
1	178433	8922	11
2	343100	17155	7.4
3	17326	866	1.2

Tabla V. 3. Valores medios por grupo de charcos con una precipitación máxima de 80 mm en 24 hrs.

Valores medios por grupo	Superficie (m ²)	Volumen (m ³)	Profundidad (cm)
1	178433	14275	13.5
2	343100	27448	8.7
3	17326	1386	1.6



Figura V. 14. Grupos de charcos (1(a), 2(b) y 3(c)) obtenidos con el algoritmo de *Johnson*.

f) Subsid

La subsidencia es un fenómeno de gran magnitud en la zona de estudio por lo que es necesario considerar un escenario con este proceso en el mediano plazo. Ya que no han ocurrido eventos de inundación en la zona se pueden considerar otros modelos propuestos en relación con la subsidencia.

El monitoreo de la subsidencia del terreno se realiza por nivelaciones, mediciones con GPS e interpolación posterior de las mismas, fotogrametría y MDE obtenidos por sistemas de percepción remota. El estudio de la subsidencia se realiza de dos maneras: 1) a través de las investigaciones de sitio con los datos de perforaciones de pozos, cambios en el nivel del agua y de altitud, y 2) con el modelado numérico de la subsidencia regional en la que toma en cuenta el flujo regional del agua subterránea, parámetros hidráulicos, de mecánica de suelos y las condiciones de entrada al sistema para proponer escenarios de bombeo y proyectar el hundimiento esperado en un tiempo dado. Sin embargo, la visualización

espacial del fenómeno facilita la planificación del territorio y la toma de decisiones de las autoridades correspondientes.

El peligro de inundaciones en zonas con subsidencia y su representación espacial se encuentra en trabajos como los de Pai-Huy Hsu y Wen-Ray Su (2009) quienes a través del análisis multi-temporal de MDE obtenidos con sistemas *LiDAR* con la misma resolución y precisión, y el diseño de precipitación máxima en 24 hrs., delimitaron áreas de inundación potencial; por su parte, Freji-Ayoub *et al.* (2007) delimitaron áreas de subsidencia en la costa sureste de Australia susceptibles de inundación por mareas de tormenta. En el caso de la zona de Valle de Chalco, Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2010) estimaron el hundimiento con el monitoreo de piezómetros para dos sitios (NP2 y NP3) desde 1986 y emplearon el modelo de Cruickshank *et al.* (1979) que emplea los parámetros de conductividad hidráulica (K'), coeficiente de almacenamiento específico (Ss'), radio de partícula (e) estrés efectivo (σ) y carga hidráulica (h') (Figura V.15).

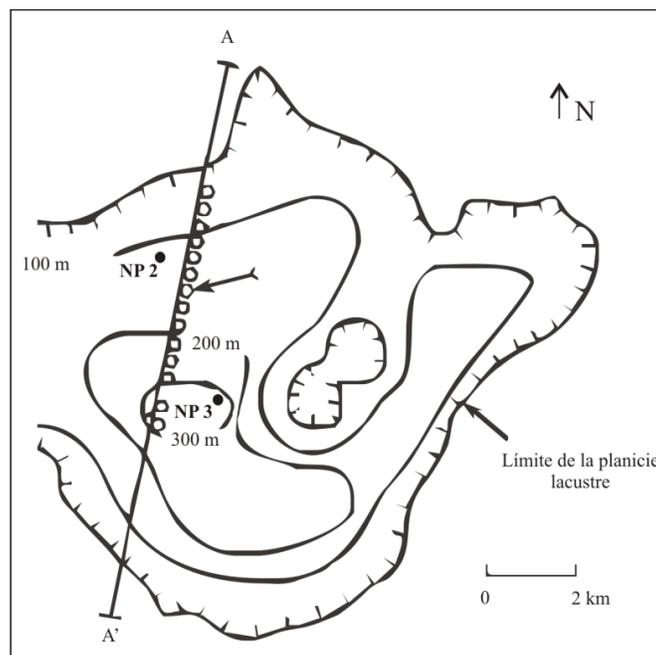


Figura V. 15. Ubicación de los piezómetros NP2 y NP3 utilizados en el modelo de subsidencia de Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2010). En Ortega-Guerrero *et al.* (1999).

Los resultados muestran que la subsidencia acumulada en el año 2020 en el sitio NP2 será de 12 m, y de 15 m para 2030, lo que implica una subsidencia promedio de 0.25 m/año; mientras que en el sitio NP3 se espera que para el año 2020 el nivel del terreno haya descendido en un total de 19 m, y 23 m en 2030, por lo que la tasa anual sería de 0.4 m/año (Tabla V.4). El error asociado al modelo reside en que los datos se obtuvieron en los primeros 85 m de espesor del acuitardo, siendo que el máximo es de 300 m.

Tabla V. 4. Subsidencia total acumulada en los sitios de monitoreo.

Sitio/Año	Subsidencia total acumulada (m)		Tasa (m/año)
	2020	2030	
NP2	12	15	0.25
NP3	19	23	0.4

Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero (2010)

El algoritmo *Subsid* elaborado por Parrot (2010) permite la estimación de la subsidencia en un MDE-AR bajo el supuesto de que el hundimiento está asociado a la extracción de agua, con una tasa continua, y al espesor del acuitardo lacustre. El algoritmo considera una máscara o imagen que delimita el área de la profundidad del acuífero de 200 y 300 m sobre el MDE-AR, con las cotas de altitud sobre un eje principal asignando el punto de entrada (PE), salida (PS) y el más bajo de subsidencia (PB). En este caso, el piezómetro NP3 corresponde a la altitud más baja monitoreada en la zona cercana al lago y se encuentra en el sitio de máximo espesor del acuífero (300 m); sobre este punto se traza un eje perpendicular y se inicia el cálculo de los puntos de altitud tanto en éste como en sus paralelos (Figura V.16). El programa realiza una suavización del borde de la zona de subsidencia.

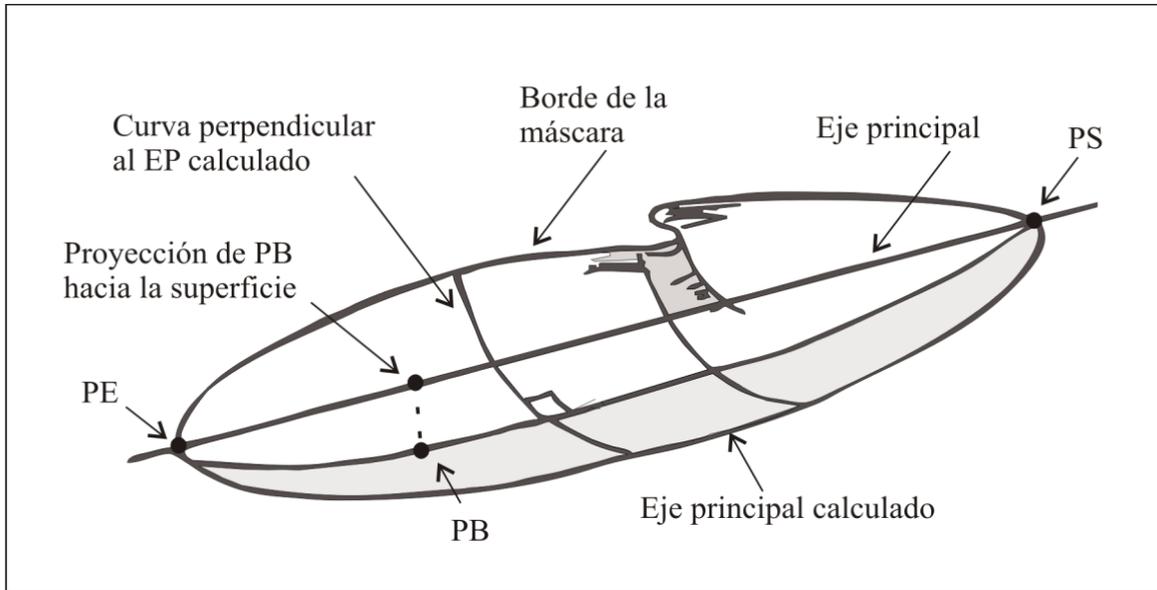


Figura V. 16. Ejemplo de la máscara de profundidad del acuífero en el que se calcula el eje principal (EP), el punto de entrada (PE), el punto de salida (PS) y el punto más bajo de subsidencia (PB).

Los MDE-AR obtenidos para una subsidencia de 19 y 23 m en la zona del acuitardo de 300 m de espesor; y de 12 y 15 m de hundimiento para la superficie que abarca el acuitardo de 200 m de profundidad, se utilizaron con los programas *Flooding.exe*, *Water_filling.exe* y *Derrame.exe*.

En el caso del MDE-AR utilizado para el algoritmo *Flooding* con 88 mm de lluvia se observan zonas de acumulación similares al proceso de formación del nuevo lago en la década de 1980 (Figura V.17); en el caso de *Water_filling* la simulación muestra el crecimiento del lago hacia las chinampas y la zona urbana mientras (Figura V.18) que el flujo por ruptura del algoritmo *Derrame* se dirige hacia la zona urbana a la altura de la calle Sur 23 con una lámina de >70 cm (Figura V.19)

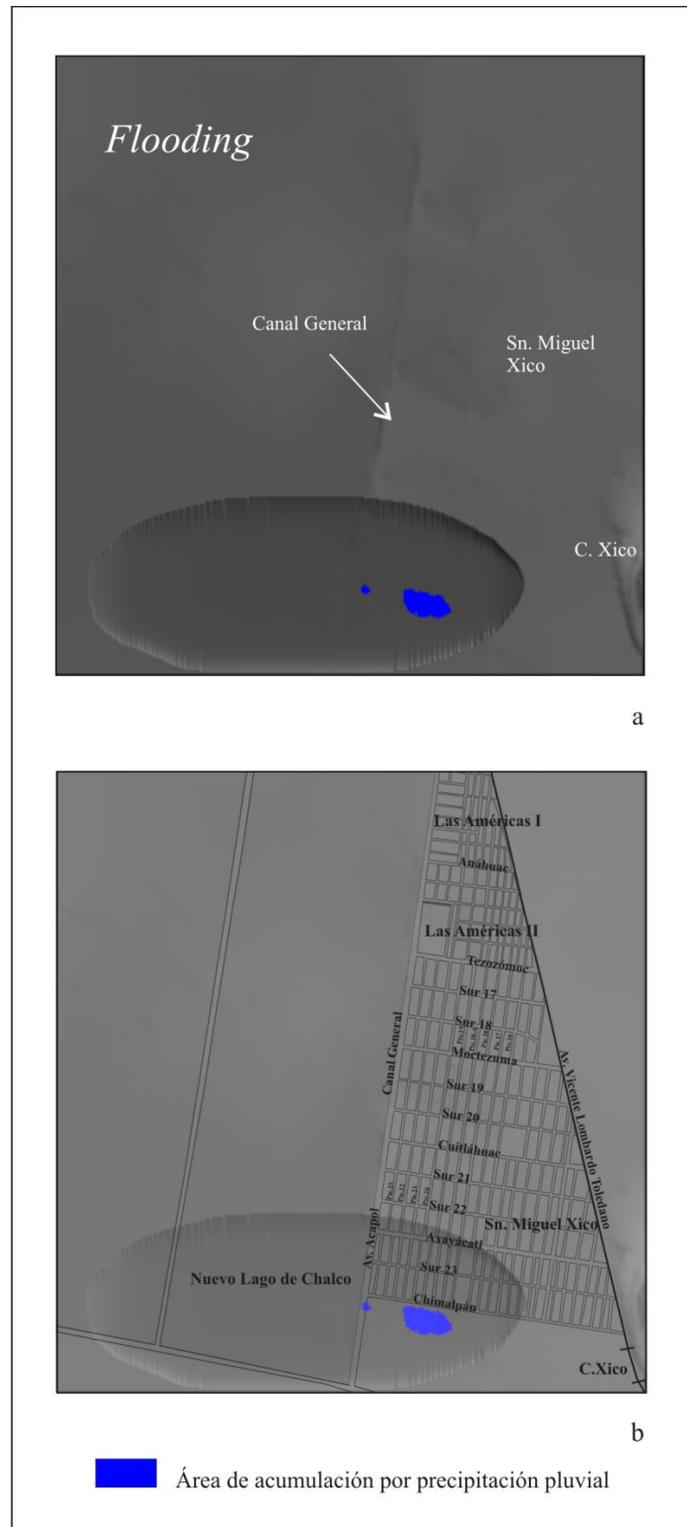


Figura V. 17. Resultado de los tratamientos con los algoritmos *Subsid* y *Flooding* a) en el MDE-AR con 19 m de subsidencia y b) en el MDE-AR con 23 m de subsidencia.

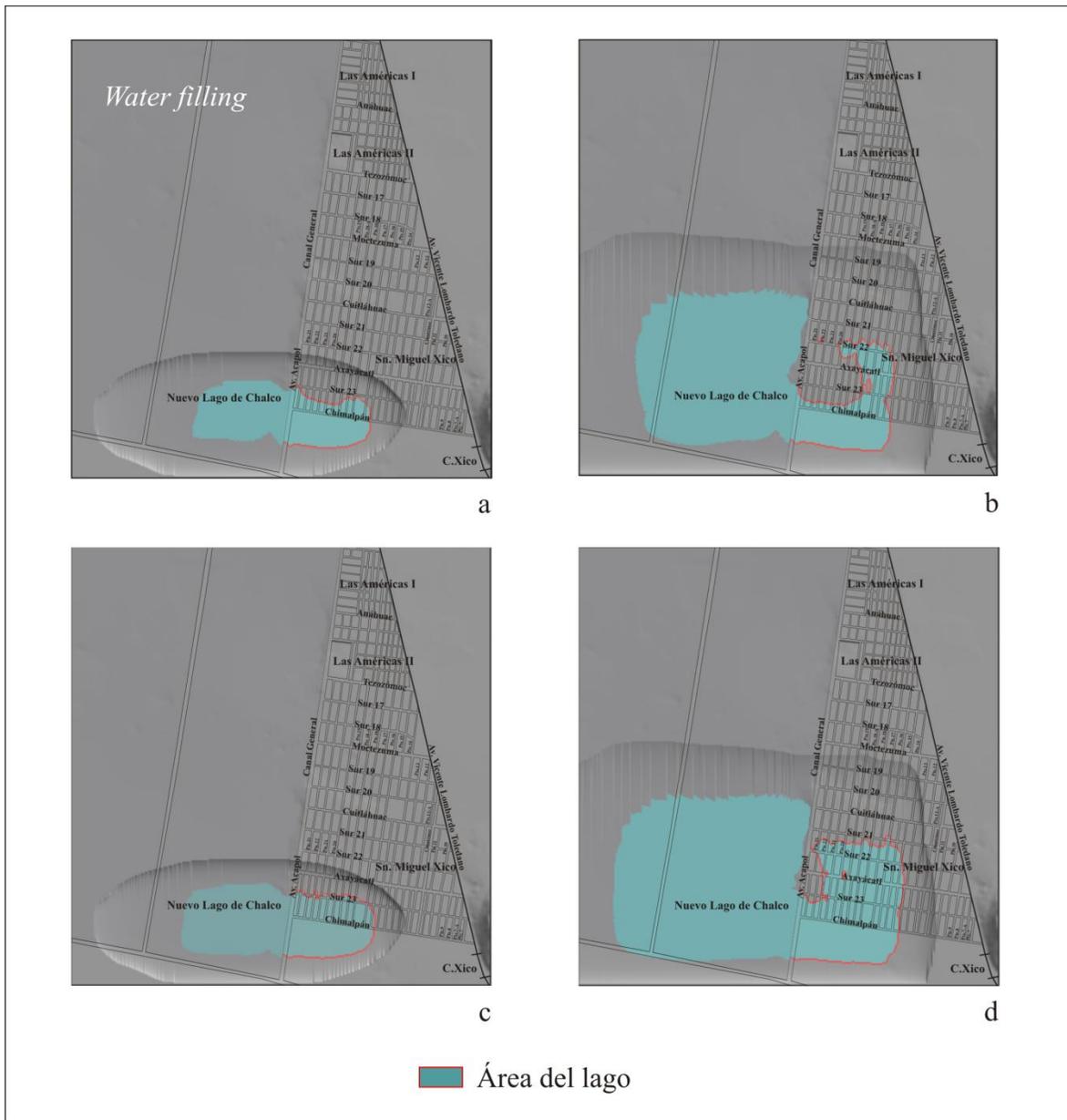


Figura V. 18. Resultado de los tratamientos con los algoritmos *Subsid* y *Water_filling* a) en el MDE-AR con una subsidencia de 19 m y láminas de 50 cm y b) 80 cm; y c) en el MDE-AR con la subsidencia de 23 m y láminas de 50 cm y d) 80 cm.

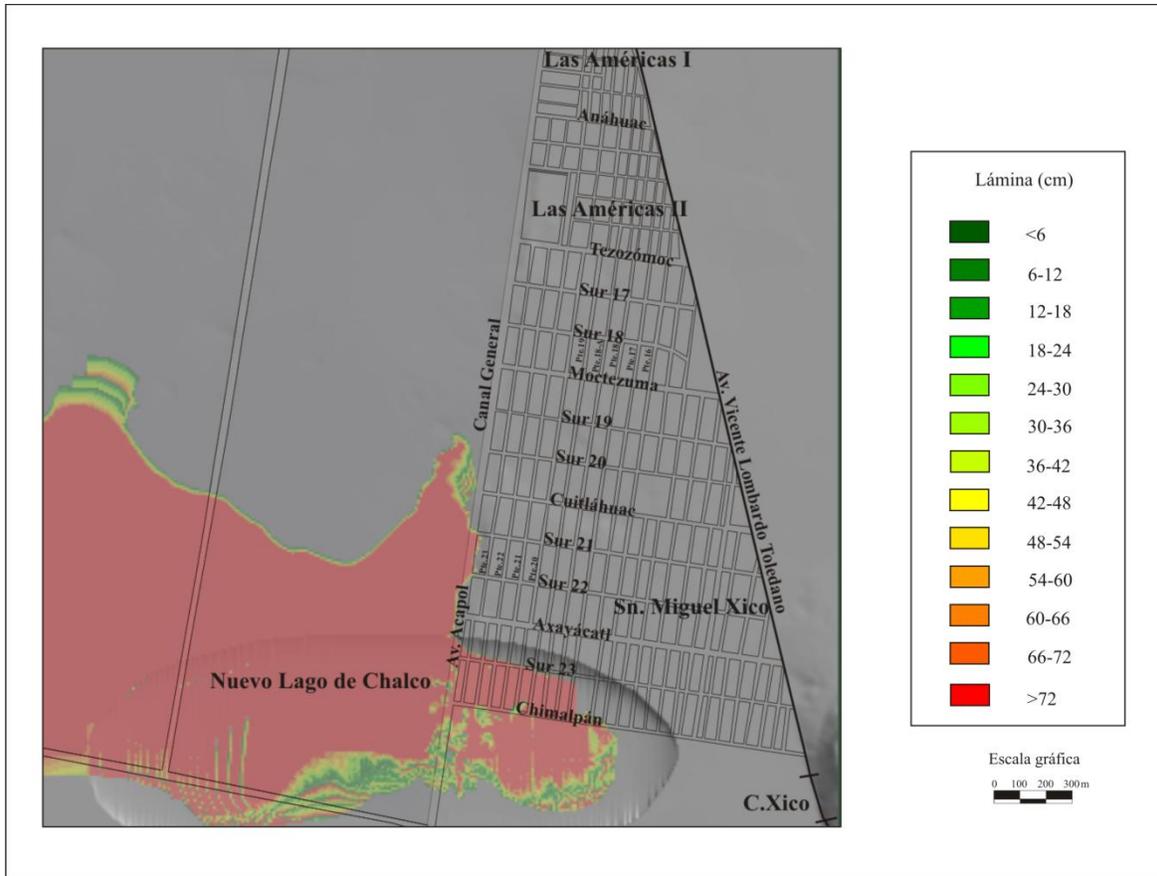


Figura V. 19. Resultados de los tratamientos aplicados a los MDE-AR obtenidos con el algoritmo *Subsid* aplicando el algoritmo *Derrame* en el MDE-AR con 19 m de subsidencia.

La limitante del algoritmo *Subsid* reside en que el hundimiento es un fenómeno diferencial por lo que su estimación requiere de distintas variables. Aunque la subsidencia del terreno se asocia con el espesor del acuitardo, el tipo de arcillas y el abatimiento de los pozos (Lesser-Illades y Cortés-Pérez, 1998), la altitud en los puntos nivelados desde 1986 proporcionados por la CONAGUA (2010) pueden proyectarse para el año 2009, 2020 y 2030 en forma teórica, ya sea utilizando la tasa de subsidencia promedio modelada con los datos de los piezómetros NP2 y NP3 que corresponden al espesor del acuitardo de 200 m y 300 m de espesor respectivamente, o bien elaborando una regresión logarítmica. La desventaja al utilizar estos métodos reside en la heterogeneidad espacial de la subsidencia como se muestra en la Figura V.20 cuyas nivelaciones del terreno corresponden al periodo 1986 a 2006; para el periodo 1997-2006 (Figura V.21) la tendencia de hundimiento se mantiene y a su vez se incrementaron los puntos de monitoreo.

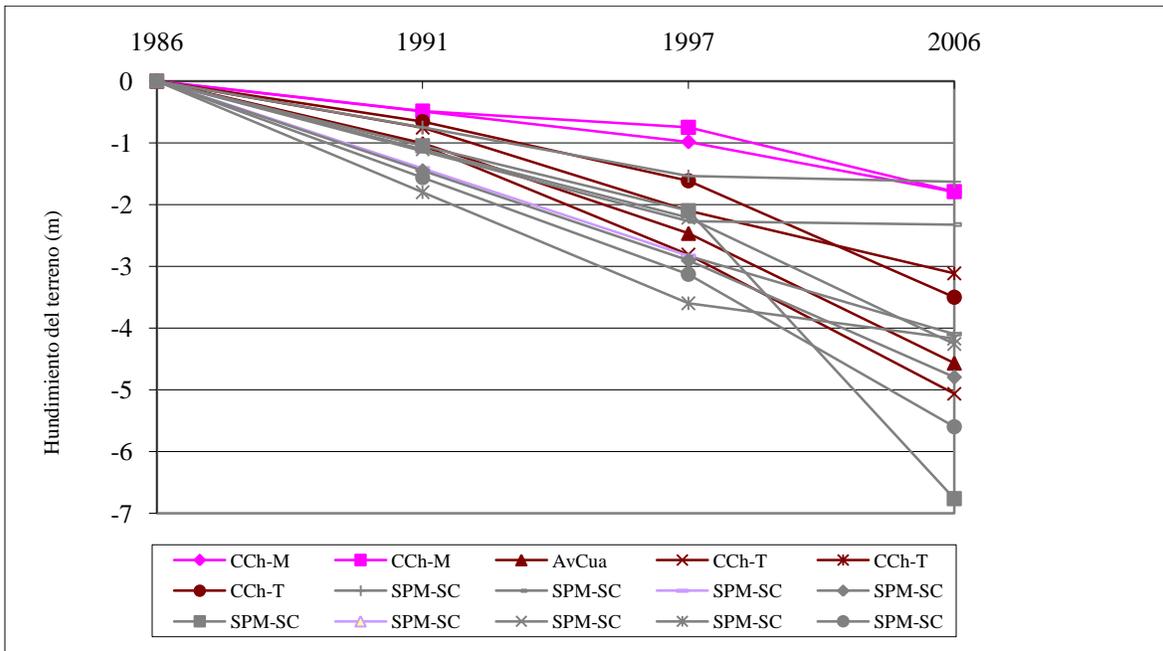


Figura V. 20. Puntos acotados de subsidencia en 1986, 1991, 1997 y 2006 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) obtenidos en la Carretera Chalco-Mixquic (CCh-M); Avenida Cuauhtémoc (AvCua); Carretera Chalco-Tláhuac (CCh-T) y el Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina (SPM-SC).

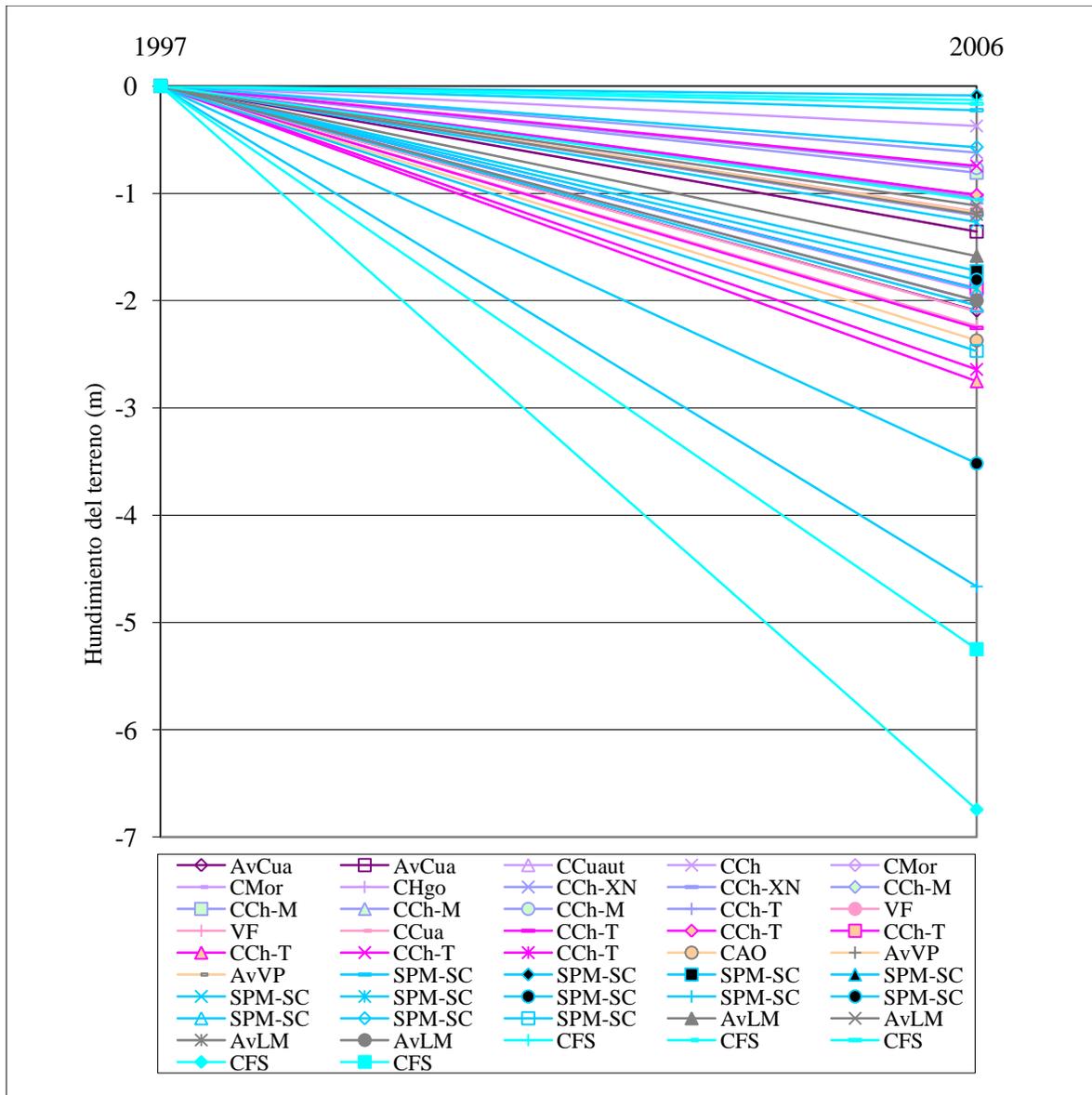


Figura V. 21. Puntos acotados de subsidencia en el periodo 1997-2006 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) en los municipios de Valle de Chalco y Chalco Díaz de Covarrubias: Av. Cuauhtémoc (AvCua), Carretera a Cuautla (CCuaut), Carretera a Chalco (CCh), Calle Morelos (CMor), Calle Hidalgo (CHgo), Carretera Chalco-Xico Nuevo (CCh-XN), Carretera Chalco-Mixquic (CCh-M), Carretera Chalco-Tláhuac (CCh-T), Via de Ferrocarril (VF), Calle Cuauhtémoc (CCua), Calle Álvaro Obregón (CAO), Av. Vía del Prestigio (AvVP), Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina (SPM-SC), Av. López Mateos (AvLM) y Calle Francisco Sarabia (CFS).

V.2.3. Observaciones

La simulación de inundaciones muestra los distintos escenarios de los cuales la ruptura y el desbordamiento del lago representan las situaciones prioritarias en la prevención del peligro de inundación. Las zonas afectadas por el llenado a partir de los puntos más bajos del terreno o la permeabilidad del dique de contención se encuentran entre las avenidas Anáhuac y Moctezuma en la colonia Las Américas II, en el área de chinampas al norte de la carretera Tláhuac-Chalco de la colonia San Miguel Xico, y entre las avenidas Moctezuma y Cuitláhuac, ésta última coincide con la ruptura del Canal General y el desbordamiento del lago por el ascenso del nivel en 1.8 m.

Los tipos de encharcamiento se asocian con el hundimiento del terreno, las láminas de mayor profundidad se ubican al sur de la colonia San Miguel Xico donde la subsidencia es de 25 a 40 cm/año, en tanto que los charcos de menor profundidad y volumen se ubican en el resto del área urbana.

La superficie de menor altitud identificada en el MDE-AR en la que se acumula el agua de la precipitación pluvial corresponde a la subsidencia estimada de 25 a 40 cm por año; en el trabajo de campo se observó que la basura impide el drenaje de la misma.

En la figura V.22 se muestra la zonificación del peligro de inundación, el matiz de azul indica la superficie afectada por un escenario, en tanto que los colores cálidos representan dos o más. En general, se observan tres áreas de peligro de inundación; la primera se ubica al norte, entre las avenidas Anáhuac y Tezozómoc, donde coinciden los encharcamientos y aquellos puntos de menor altitud del terreno susceptibles de llenado por la permeabilidad del dique de contención; en la segunda, entre las calles Sur 18 y Cuitláhuac, coinciden la ruptura del dique de contención o la infiltración de agua a través del mismo, la acumulación del agua de lluvia, los encharcamientos y el desbordamiento del Nuevo Lago de Chalco. Por último, al sur del área de estudio, coinciden todos los escenarios de simulación, en particular los de subsidencia para el año 2020; se observa que tanto la eventual fractura del Canal General y la infiltración de agua a través del mismo afectarían 3 y 30 ha

respectivamente (Tabla V.5). En general, el 30% de la zona de estudio urbana presenta algún peligro de inundación, lo que equivale a 102 ha.

El análisis estadístico de la precipitación pluvial histórica indica que para un periodo de recurrencia de 5 años la precipitación más frecuente es de 50 mm y de 88 mm para un siglo. Sin embargo, este fenómeno es una variable de comportamiento aleatorio, por lo que la cantidad de precipitación puede aumentar o disminuir, cabe destacar que en eventos de máxima precipitación registrados, como el de febrero de 2010 en el que se fracturó el Canal La Compañía, la cantidad de lluvia ascendió a 30 millones de m³ en 36 horas en el área de la subcuenca de Chalco.

Tabla V. 5 Superficie urbana en que coinciden los distintos escenarios de inundación (1. *Charc*, 2. *Derrame*, 3. *Flooding*, 4. *Sim_filling*, 5. *Water_filling*, 6. *Subsid&Derrame*, 7. *Subsid&Flooding*, 8. *Subsid&Water_filling*, obtenidos con el software *Nbpixitem* (Parrot, 2001) y *Cross_item* (Parrot, 2003)

Escenario (s)	Superficie afectada		Escenario (s)	Superficie afectada	
	(ha)	(%)		(ha)	(%)
1	6.03	1.76	5-4-3-2	1.39	0.405
2	0.93	0.27	5-4-3-2-1	0.17	0.050
4	0.42	0.12	8-1	1.23	0.359
5	1.91	0.56	8-5	3.33	0.971
6	3.85	1.12	8-5-4	0.01	0.003
8	32.74	9.55	8-6	25.8	7.522
4-2	0.17	0.05	8-6-1	0.55	0.160
5-1	0.4	0.12	8-6-5	2.71	0.790
5-2	0.23	0.07	8-6-5-1	1.25	0.364
5-4	4.94	1.44	8-7-6	1.42	0.414
5-4-1	0.22	0.06	8-7-6-5	1.89	0.551
5-4-3	9.7	2.83	8-7-6-5-1	0.12	0.035
5-4-2-1	0.5	0.15			
Superficie urbana 343 ha					

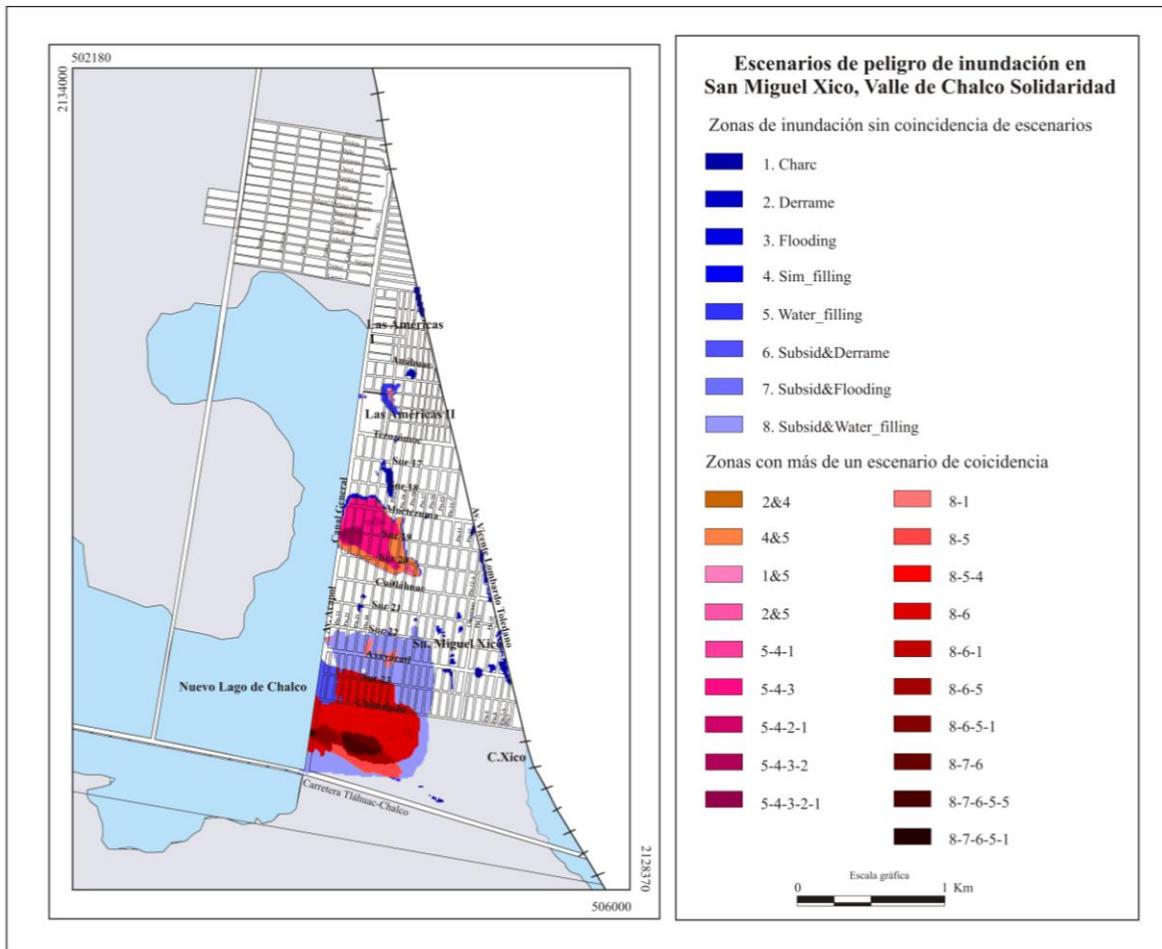


Figura V. 22. Escenarios de peligro de inundación en San Miguel Xico, Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México que considera el máximo de precipitación esperado (88 mm) así como la subsidencia de 25 y 40 cm/año (Escenario de inundación: 1. *Charc*, 2. *Derrame*, 3. *Flooding*, 4. *Sim_filling*, 5. *Water_filling*, 6. *Subsid&Derrame*, 7. *Subsid&Flooding*, 8. *Subsid&Water_filling*.)

Conclusiones

La simulación mediante los modelos digitales de elevación es una técnica de investigación necesaria en las ciencias ambientales dada la capacidad de respuesta ante una situación que aún no ocurre pero que se cuenta con los datos de entrada o variables adecuadas para evaluarla en un tiempo determinado; presenta ventajas de experimentación, costos, seguridad y visualización espacial.

Los distintos escenarios de inundación en la zona de San Miguel Xico son una herramienta para la prevención de riesgos ya que muestran áreas específicas en las cuales la gestión del mismo es prioritaria a corto y largo plazo. Sin embargo, para mejorar la delimitación de las áreas de inundación se deben realizar nivelaciones de precisión con una mayor densidad de puntos que incluyan no solo el relieve, sino la infraestructura hidráulica, así como el desarrollo de un algoritmo que considere la traza urbana como la obtenida en los pre-tratamientos de las imágenes de satélite y con ello realizar mapas que incluyan la dirección y tiempo de desplazamiento del flujo. Además, se recomienda el monitoreo constante de las fracturas superficiales y de los piezómetros para evaluar la subsidencia y sus efectos en el Canal General y la red de drenaje.

Otros mapas que pueden obtenerse de un MDE-AR son, por ejemplo, la zonificación y tipología de encharcamientos que incluya el sistema de drenaje, las tendencias anuales de crecimiento del lago dada la gran subsidencia, entre otros; los datos del monitoreo de las fracturas superficiales generadas por la extracción de agua podrían analizarse en forma espacial y reconocer su efecto en la infraestructura hidráulica; los datos de los piezómetros junto con su modelado matemático serían de utilidad en el estudio espacial de la subsidencia según el tiempo requerido.

Para obtener este tipo de mapas es necesario integrar datos del trabajo de campo o laboratorio así como el desarrollo de algoritmos según la problemática; los tratamientos de imágenes de satélite y MDE proveen información valiosa para el análisis con distintos métodos matemáticos y que además puede ser actualizada.

Referencias

Ackerman, F., 1978. Experimental investigation into the accuracy of contouring from DTMs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44, p.1537-1548.

Addison, P.S., 1997. *Fractals and chaos an illustrated course*. Institute of physics publishing, Bristol and Philadelphia, 256 p.

Alberro, J., 1988. Teoría de la formación de grietas debido a fuerzas de infiltración. Reporte interno, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México, D.F.

Aréchiga, C.E., 2004. El desagüe del Valle de México, siglos XVI-XXI. Una historia paradójica. *Arqueología Mexicana*, 12 (68), p.60-63.

Arnold, J.R., Libby, W.F., 1951. Radiocarbon dates. *Science*, 113 (2927), p.111-120.

Badadagli, T., Develi, K., 2003. Fractal characteristics of rocks fractured under tension. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 39, p. 73-88.

Barnsley, M.F., Jacquin, A., Mallassenet, F., Rueter, L., Sloan, A.D., 1988. Harnessing chaos for image synthesis. *Computer Graphics* 22, 4, p.131-140.

Bellin A., Pannone M., Fiori A., Rinaldo A., 1996. On transport in porous formations characterized by heterogeneity of evolving scales. *Water Resource Research*, 32(12) 3485-3496.

Besl, P.J., Jain, R.C., 1986. Invariant surface characteristics for 3-D object recognition in range images. *Computer Vision Graphics Image Processing*, 33, p. 33-80.

Biswas, M.K., Ghose T., Guha S., Biswas P.K., 1998. Fractal dimension estimation for texture images: a parallel approach. *Pattern Recognition Letters*, 19, p. 309-313.

Bloomfield, K., 1975. A Late-Quaternary Monogenetic Volcano Field in Central Mexico. *Geol. Rundschau*, 64, p.476-497.

Borkowski, A., Meier, S., 1994. A procedure for estimating the grid cell size of digital terrain models derived from topographic maps. *Geo-Information-System*, 7, 1, p. 2-5.

Bribiesca, C.J., 1960. Hidrología histórica del Valle de México. *Revista de Ingeniería Hidráulica Mexicana*, XIV.

Bushell, G.C., Yan, Y.D., Woodfield, D., Raper, J., Amal, R., 2002. On techniques measurement of mass fractal dimension of aggregates. *Advances in Colloid and Interfaces Science*, 95, p. 1-50.

Carrasco-Núñez, G., 1985 Estudio Geológico del Volcán Popocatepetl. Tesis de Licenciatura, Facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (inédita).

Carrillo, N., 1947. Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City. Comisión Impulsora y Coordinadora de Investigación Científica, anuario 47. En: Volumen Nabor

Chaudhuri B.B., Sarkar, N., 1995. Texture segmentation using fractal dimension. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17, p. 72-77.

Cheng Y.C., Lee P.J., Lee T.Y., 1999. Self-similarity dimensions of the Taiwan Island landscape. *Computers and Geosciences*, 25, 1043-1050.

Chen, J., Gong, P., He, C., Pu, R., Shi, P., 2003. Land use/cover change detection using improved change vector analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4), pp. 369-379, 2003.

Chunyang He, Dingyong Xie, 2008. Improving the Normalized Difference Built-up Index to map urban build-up areas by using a semiautomatic segmentation approach. 1p. En: IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2008. <http://www.igarss2008.org/Abstracts/pdfs/2872.pdf>

Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. Ariel Ciencia, 586 p.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2010. Nivelación de Precisión del Valle de México, Zona Lago de Texcoco, 2006. Zona Valle de Chalco, Edo. De México.

Comisión Nacional del Agua-Gerencia de Aguas del Valle de México (CNA-GAVM) 1991. Boletín de Mecánica de suelos. 10, 281 p. México.

Comité Europeo de Normalización (CEN) 1996. Drain and sewer systems outside buildings-Part 2: Performance Requirements, European Standard, European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium, 1996.

Comité Europeo de Normalización (CEN) 1997. Drain and sewer systems outside buildings-Part 4: Hydraulic design and environmental considerations, European Standard, European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium, 1996.

Cruickshank, V.C., 1985. Efectos de características variables del material confinantes sobre el comportamiento de acuíferos semiconfinados, reporte, La Mecánica de Suelos y La Geohidrología, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D. F.

Cuevas, J.A., 1936. Foundation conditions in Mexico City, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics, 3.

DeMers, M.N., 2001. GIS modelling in raster. GIS and Remote Sensing, Wiley, West Sussex, England, 209 p.

Doyle, F.J., 1978. Digital terrain models: an overview, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, 12, p.1481-1485.

Enciso de la Vega, S., 1992. Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la Cuenca de México. *Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 10 (1), p.26-36.

Everitt, B.S., Landau, S., Leese, M., 2001. *Cluster analysis*. London: Arnold, New York, Oxford University, 237 p.

Fattorelli, S., Dalla Fontana G., Da Ros, D., 1999. Flood hazard assessment and mitigation, p.20-37. En: Casale R., Margottini (Eds.) *Floods and Landslides: integrated risk assessment*, Alemania, Springer, 373 p.

Feder, J., 1988. *Fractals*. Plenum Press, 283 p.

Felicísimo, A., 1994. Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales [<http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdf.pdf>: 4 de diciembre de 2009]

Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, p.84-92.

Figueroa, A., 2007 Estudio geomorfológico general y aplicado a peligros en la zona del lago de Chalco, Estado de México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 119 p.

Freij-Ayoub, R., Unterschultz, J., Li, F., Trefry, C., Hennig, A., Otto, C., McInnes, K., 2007. Simulation of coastal subsidence and storm wave inundation risk in the Gippsland Basin. Report number 07-003. *Wealth from Oceans Flagship*.

Fries, C., 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 60, México.

Fries, C., 1962. Resumen de la Hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México. Hoja Pachuca 14Q-C(11), esc. 1:100,000. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Gabet, L., Giraudon, G., Renouard, L., 1994. Generation of high resolution urban zone Digital Elevation Models. Bulletin de la Société Française de Photogramétrie et de Télédétection, 3, 135.

García, M., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köeppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) México, 217 p.

Gayol, R., 1929. Breves apuntes relativos a las obras de saneamiento y desagüe de la Capital de la República y de las que del mismo género necesita con urgencia. Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, VIII.

Google Earth, 2009. Imágenes de satélite.

Gutiérrez de McGregor, M.T., González-Sánchez, J., Zamorano-Orozco, J.J., 2005. La Cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales. Temas Selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía, UNAM, 152 p.

Haala, N., Hahn, M., 1995. Data Fusion for the Detection and Reconstruction of Buildings. En: Gruen, A., Kuebler, P., Agouris, P. (eds), 1995. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhauser-Verlag, Basel, p. 211-220.

Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. Computers and Geoscience, 32, p.1283-1298.

Hiriart, F., Marsal, R.J., 1969. The subsidence of Mexico City. En Volumen Nabor Carrillo, p.109-147, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Ciudad de México.

Huizar, R., 1989 Contribution a l'étude géologique et hydrologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant (Mexique). Diplôme de docteur de l'Université de Besançon, France, 160 p.

Hurst, H.E., 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineering, 116, p.770-799.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2006a. Curvas digitales de la carta topográfica Chalco E14-B31, esc. 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2006b. Curvas digitales de la carta topográfica Amecameca de Juárez E14-B41, esc.1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2007a. Curvas digitales de la carta topográfica Ciudad de México E14-A39, esc.1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2007b Curvas digitales de la carta topográfica Milpa Alta E14-A49, esc.1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2007c. Carta topográfica Chalco E14-B31, esc. 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2009. Estaciones base de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) 14 al 16 de diciembre de 2009.

Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009, Serie 4. SEMARNAT, Comisión Nacional Forestal, INIFAP, INEGI.

International Union of Soil Science (IUSS) Working Group WRB (World Reference Base) for soil resources, 2006. Segunda ed., World Soil Resources Reports Núm. 103, FAO, Rome.

Jáuregui, E., 2000. El clima de la Ciudad de México. Temas Selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 114 p.

Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrametric Engineering and Remote sensing, 54, 11, p. 1593-1600.

Joly, F., 1988. La cartografía. Oikos-tau, Barcelona, 280 p.

Juárez-Badillo, E., 1978. Teoría de grietas de tensión. Reporte interno, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Kienzle, S., 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. Transactions in GIS, 8, 1, p.83-111.

Koutsoyiannis, D., 2002. The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. Hydrological Sciences Journal, 47(4), p.573-595.

Koutsoyiannis, D., 2003. Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. Hydrological Sciences Journal, 48(1), p.3-24.

Lambert, W., 1986. Descripción preliminar de los estratos de tefra en Tlapacoya. En: Tlapacoya: 35,000 años de historia en el Lago de Chalco, Lorenzo, J.L., Mirambel, L. (Eds.), Colección Científica, 115.

Lesser-Illades, J.M., Cortés-Pérez, M.A., 1998. El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. Ingeniería hidráulica en México, p.13-17.

Lozano-García, M. del S., Ortega-Guerrero, B., Caballero-Miranda, M., Urrutia-Fucugauchi, J., 1993. Late Pleistocene and Holocene Paleoenvironments in Central Mexico. Quaternary Research, 40, p.332-342.

Mandelbrot, B., 1982. The fractal geometry of nature. Freeman, San Francisco, 460 p.

Marsal, R., Mazari, M. 1959. El subsuelo de la ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 377 p.

Mazari, M., Alberro, J., Mazari, M., González, S., 1996. Agrietamiento de arcillas lacustres y su relación con el uso y reuso del agua. En: Hacia el Tercer Milenio (Coordinador: M. Mazari). México: El Colegio Nacional.

McBratney, A., 1998. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 50, p.51-62.

Mendoza, G.G., 1983. Planeación del Valle desde el punto de vista de la ingeniería ambiental. Memorias de la Planeación del desarrollo del Valle de México. División de Estudios de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, p.105-113.

Mesri, G., Rokhsar, A., Bohor, B.F., 1975. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay. Geotechnique, 25(3), p.527-554.

Molina, B.R., 1956. Estudios geoquímicos, geofísicos y geológicos de la Cuenca de Chalco, Méx. Revista de Ingeniería Hidráulica, México.

Mooser, F., 1975. Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, tomo 1, DDF, México.

Mooser, F., 1990. Estratigrafía y estructura del Valle de México. En: El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años de los sismos. Ovando-Shelley, E., González-Valenas, F. (Eds.), Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, p.29-36.

Mooser, F., Maldonado-Koerdell, M., 1961. Mexican National Report on Volcanology. Universidad Nacional Autónoma de México, Anales del Instituto de Geofísica, 7, 46–53.

Mooser, F., Nairn, M.E.A., Negendank, F.W.J., 1974. Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary Rocks: VII A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico. Geol. Rundschau, 63, p.451-483.

Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A., 1996. Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad, México, 27 p.

Murillo, R.F., García, G.A., 1978. Ex-lago de Texcoco. En: El subsuelo y la ingeniería en cimentaciones, p.51-82, Simposio de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Ortega-Guerrero, M.A., Farvolden, R.N., 1989. Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico. Journal of Hydrology, 110, p.271-294.

Ortega-Guerrero, M.A., Cherry, J.A., Rudolph, D., 1993. Large scale consolidation acuitard near Mexico City. *Groundwater*, 31, p.708-718.

Ortega-Guerrero, M.A., Rudolph, D., Cherry, J.A., 1999. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, 35(11), p.3327-3341.

Ortíz-Zamora, D.C., 2007. Fracturamiento en el acuitardo lacustre que cubre al acuífero regional de la Ciudad de México: Origen, dinámica e implicaciones. Tesis de doctorado, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 158 p.

Ortiz-Zamora D.C., Ortega-Guerrero, A., 2010. Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations and predictive simulations. *Water Resources Research*: 46, W01513, doi: 10.1029/2008WR007398.

Osman-Akan, A., Houghtalen, R., 2003. Urban hydrology, hydraulics and stormwater quality: engineering applications and computer modeling. John Wiley and Sons, 373 p.

Pai-Huy Hsu y Wen-Ray Su, 2009. Land-subsidence monitoring and flood simulation using multi-temporal digital elevation Models. *IEEE*, III, p.349-352.

Pain, C.F., 2005. Size does matter: relationships between image pixel size and landscape processes scales. En: Zerger, A., Argent, R.M. (eds.), MODSIM 2005 International Congress on Modelling Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Melbourne, p. 1430-1436.

Parrot, J-F., 2001. *Nbpixitem* (software inédito)

Parrot, J-F., 2003. *Cross_item* (software inédito)

Parrot, J-F., 2004. *New-Miel* (software inédito)

Parrot, J-F., 2005. *Broad4_mx* (software inédito)

Parrot, J-F., 2006-2007. *TLALOC* (Tridimensional Landscape Analysis & Local Operating Computation) Software. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Parrot, J-F., 2007. *FROG* (*Fractal Research On Geosciences*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Parrot, J-F., 2009. *Building_extraction* (software inédito)

Parrot, J.F., 2010. *Charcos* (software inédito).

Parrot, J.F., 2010. *Derrame* (software inédito).

Parrot, J.F., 2010. *Flooding* (software inédito).

Parrot, J.F., 2010. *Sim_filling* (software inédito).

Parrot, J.F., 2010. *Subsid* (software inédito).

Parrot, J.F., 2010. *Water_filling* (software inédito).

Parrot, J-F., 2010. *DEMONIO* (*Digital Elevation Models Obtained by Numerical Interpolating Operations*) (software inédito).

Parrot, J-F., 2010. *Intro_datos_dxf* (software inédito).

Parrot, J-F., 2009. DEM simulation of petroleum flux extension and diffusion due to pipeline ruptures in Mexico. En: Anderssen, R.S., R.D. Braddock and L.T.H. Newham (eds) 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling

and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, July 2009, pp. 2377-2383. ISBN: 978-0-9758400-7-8.
http://www.mssanz.org.au/modsim09/G3/parrot_G3.pdf

Parrot, J-F., 2009. Los Modelos Digitales del Terreno. Descripción e interpolación. En: Conceptos de Geomática y estudios de caso en México. Geografía para el siglo XXI, Serie Libros de Investigación. Aguirre-Gómez, R. (Coord.)

Parrot, J.F., Lyberis, N., Lefoconnier, B., Manb, Y.G., 1993. SPOT multispectral data and digital terrain model for the análisis of ice-snow fields on Arctic glaciers. IJRS, 14, 3, p.425-440.

Parrot, J.F., Ochoa-Tejeda, V., 2005. Generación de Modelos Digitales de Terreno. Método de digitalización. Geografía para el Siglo XXI, Instituto de Geografía, UNAM (en línea).

Peet, F.G., Sahota, T.S., 1985. Surface curvature as a measure of image textue. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, PAMI 7, 6, p.734-738.

Peñafiel, A., 1884. Las aguas potables de La capital de México. Oficina Tipográfica de La Secretaria de Fomento, México, 208 p.

Resendiz, D., Solana, J., 1969. The short-term stability of options in the Mexico City clay. En. Volumen Nabor Carrillo, Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, Anuario 47, p.203-227, Sec. de Hacienda y Crédito Público, México, 1969.

Rivera, A., Ledoux, E., 1991. Non-linear modeling of groundwater flow and total subsidence in the Mexico City aquifer-aquitard system. Land subsidence proceedings of the Fourth International Symposium of Land Subsidence, May 1991, IAHS, 200, p.45-58.

Robin, C., Boudal, C., 1987. A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern Volcan Popocatepetl. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 31, p.115-130.

Robledo, C.L., 1983. Planeación del Valle desde el punto de vista de la ingeniería ambiental. Memorias de la Planeación del Desarrollo del Valle de México, División de Estudios de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, p.86-99.

Saint Venant, B., 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à la introduction des marées dans leur lits. Comptes Rendus des Séances de L'Academie des Sciences, 73, pp. 147-154 &237-240.

Santoyo,V.E., Ovando, S.E., Mooser, F., León, P.,E., 2005. Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México. TGC Geotecnia S.A de C.V. y TGC Ingeniería S.A. de C.V. 171 p.

SARH-CEAS, 1989. Memoria de los detalles constructivos de los pozos de Xico. Reporte interno, México.

Schenk, T., 1995. A Layered Abduction Model of Building Recognition. En: Grün, A., Kuebler, O., Agouris, P., (eds), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhauser-Verlag, Basel, pp. 117-123.

Schmeiser, B.W., 1990. Simulation methods. En: Heyman, D.P., Sobel, M.J. (eds.), Stochastic Models, North Holland.

Schmitt, T.G., Thomas, M., Ettrich, N., 2004. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. Journal of Hydrology, 299, p.300-311.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión de Aguas del Valle de México (SARH-CAVM) 1979. Planos topográficos del área de Chalco, escala 1:10,000, México.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión de Aguas del Valle de México (SARH-CAVM) 1981. Boletín de Mecánica de Suelos, Núm.8, 1974-1977, México D.F., 295 p.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión de Aguas del Valle de México (SARH-CAVM) 1984. Niveles piezométricos de los pozos de Mixquic-Santa Catarina, en el Valle de Chalco. Registro interno, México.

Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) 1979. Carta Edafología, Ciudad de México E14-2, esc. 1:250,000, México.

Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) 1979. Carta Uso de suelo y Vegetación, Ciudad de México E14-2, esc. 1:250,000, México.

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN) 2009. Estación 00015020 Chalco. Normales climatológicas 1971-2000. (www.smn.gov.mx)

Servicio Meteorológico Nacional (SMN) 2010. Precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco, 1961-2008

Siebe, C., Rodriguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M., 2004. Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards. *Bulletin of Volcanology*, 66, p.203–225.

Siebe, C., Arana-Salinas, L., Abrams, M., 2005. Geology and radiocarbon ages of Tlaloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141(3–4), p.225–243.

Smith, M.P., Zhu, A.X., Burt, J.E., Stiles, C., 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma* 137, 1-2, p. 58-68.

Spectra Precision Survey Office, versión 1.11. (*software*)

Spectra Precision, 2005a. Sistema GPS L1 EPOCH 10, Hoja de especificaciones técnicas. http://www.bmprenta.cl/pdf/EPOCH_L1_GPS.pdf

Spectra Precision, 2005b. Sistema GPS L1 EPOCH 10, Spectra Precision Survey Office (Software).

Suter, M., 1991. State of stress and active deformation in Mexico and western Central America. En: Slemmons, D.B., Engdahl, E.R., Zoback, M.D., Blackwell, D.D. (Eds.), Neotectonics of North America: Geological Society of America, Decade of North American Geology, Decade Map 1, p.401–421.

Taud, H., Parrot, J.-F., Alvarez, R., 1999. DTM generation by contour line dilation. *Computer and Geosciences*, 25: 775-783.

Taud, H., Parrot, J.-F., 2005. Measurement of DEM roughness using the local fractal dimension. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4/2005.

Turcotte, D.L., 1986. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysics*, Cambridge University Press, 398 p.

Urrutia-Fucugauchi, J., Chávez-Segura, R., 1991. Gravity modeling of Lake Basin Structure: The Lakes of Xochimilco and Chalco, Sothern Basin of Mexico. Soc. Expl. Geophys. Annual Meeting Proceedings SEG.

Urrutia-Fucugauchi, J., 1995. Paleomagnetic constrains on spatial/temporal activity in the Santa Catarina-Chalco region, southeastern basin of Mexico. *Geofísica Internacional*, 34(1) p.55-66.

Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989. Geología de la Cuenca de México. *Revista de la Unión Geofísica Mexicana*, Universidad Nacional Autónoma de México, 28(2), p.133-190.

Wang, Z., Schenk, T., 2000. Building extraction and reconstruction from *LiDAR* data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, p.958-964.

Warren, C.J., Rudolph, D.L., 1977. Clay minerals in Basin of Mexico lacustrine sediments and their influential on ion mobility in groundwater, Journal of Contaminant Hydrology, 27, p.117-198.

Weibell, R., Brandli, M., 1995. Adaptive methods for the refinement of digital terrain models for geomorphometric applications. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, 101, p.13-30.

Weidner, U., 1996. An Approach to Building Extraction from Digital Surface Models. En: Proceedings of 18th ISPRS Congress, Vienna, Austria. B3, p. 924-929.

Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000. Terrain analysis. Principles and applications. John Wiley & Sons, New York.

Zeevaert, L., 1953. Pore pressure measurements to investigate the main source of surface subsidence in Mexico City. En: Proceedings of the III International Conference of Soil Mechanics, Zurich, 1953.

Zha, Y., Gao, Y., Ni, S., 2003. Use of Normalized Difference Built-up Index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 24(3), p. 583-594.

Anexo I. Programas ejecutables utilizados

Programa	Datos necesarios	Aplicación	Resultados
<i>Intro_data</i>			
	Valores de altitud/coordenadas UTM	Ubicación de los puntos obtenidos en el trabajo de campo en el MDE	Archivo para la obtención de curvas altimétricas e interpolación
<i>Brod4_mx</i>			
	Curvas en tono de gris y tabla de correspondencia	Imágenes de entrada para los programas de interpolación	Curvas altimétricas, fondo neutro, imagen <i>integer 4</i>
<i>Miel4_mx</i>			
	Curvas altimétricas con fondo neutro en una imagen <i>integer 4</i>	Interpolación multidireccional	MDE <i>integer 2</i> , <i>integer 4</i> , <i>ascii</i>
<i>Building_extraction</i>			
	Imagen RGB	Cálculo del <i>NDBI</i>	Imagen en tonos de gris con el <i>NDBI</i> para su edición
<i>Flooding</i>			
	MDE-AR	Inundación de la zona urbana por precipitación pluvial	Imagen binaria que indica las zonas de llenado más rápido por precipitación pluvial extrema (.raw) y su archivo descriptivo (.txt)
	Máscara de la zona urbana en estudio		
	Precipitación pluvial		MDE-AR con los valores de altitud con la lámina de agua y su archivo descriptivo

<i>Sim_filling</i>			
	MDE-AR	Inundación por el desbordamiento de un cuerpo de agua	MDE-AR con los valores de altitud con la lámina de agua y su archivo descriptivo
	Puntos iniciales de llenado con su altitud y que incluye la lámina de agua (m)		Imagen binaria que muestra la extensión de la lámina y su archivo descriptivo
<i>Water_filling</i>			
	MDE-AR	Inundación considerando un dique permeable	MDE_AR con los valores de altitud con la lámina de agua y su archivo descriptivo
	Altitud máxima de la lámina de agua (m)		Imagen binaria de la extensión de la lámina y su archivo descriptivo
<i>Derrame</i>			
	MDE-AR	Inundación por una o varias rupturas considerando el tiempo de desplazamiento	Imagen con la distribución de flujos por ruptura única o múltiple y su archivo descriptivo
	Volumen de agua		
<i>Charcos</i>			
	MDE-AR		Imagen de la extensión de los charcos o zonas susceptibles de inundación y su archivo descriptivo
		Zonas de encharcamiento	MDE-AR con los valores de altitud de los charcos y su archivo descriptivo
	Máxima cantidad de precipitación registrada en la zona		Imagen de las micro-cuencas lacustres en la zona de estudio y su archivo descriptivo que indica la cantidad de precipitación, número de micro-cuencas, superficie (m ²), volumen de agua captada (m ³) y profundidad o altura de la lámina de agua (cm)
			Imagen que indica la altura de la lámina de agua en cada micro-cuenca

Subsid



MDE-AR

Máscara de la zona
en estudio

Simulación de la subsidencia
considerando una tasa de
extracción continua de un
espesor del acuífero

MDE-AR y su archivo descriptivo

Cross_item



Imágenes con el
tema en tono de gris
en formato *.raw* Cruce de temas

Imagen en tonos de gris y su archivo
descriptivo con el número de
imágenes originales y de píxeles que
cruzan en uno o varios temas

Nbpix



Imágenes con el
tema en tono de gris
en formato *.raw* Conteo del número de píxeles
de uno o varios temas de la
imagen

Archivo descriptivo del número de
píxeles de uno o varios temas

FROG



Imágenes *.raw* y
archivos
descriptivos

Análisis fractal de imágenes

Imágenes *.raw* y
archivos
descriptivos

TLALOC



MDE y archivo
descriptivo

Análisis tridimensional del
relieve

MDE y archivo descriptivo

DEMONIO



Imágenes *.raw* y
archivos
descriptivos

Generación y análisis de MDE

Imágenes *.raw* y
archivos
descriptivos

Paint Shop Pro



Edición de imágenes

Anexo II. Dendrogramas para la caracterización de las zonas de encharcamiento

Análisis de *Cluster* tipo ascendente (algoritmo de *Johnson*), método de encadenamiento completo.

VARIABLES SELECCIONADAS: superficie, volumen y profundidad de los charcos que se forman con 50 y 88 mm de precipitación pluvial máxima en 24 hrs. que corresponden a los periodos de retorno de 5 y 100 años respectivamente.

Precipitación pluvial de 50 mm en 24 hrs. para un periodo de retorno de 5 años.

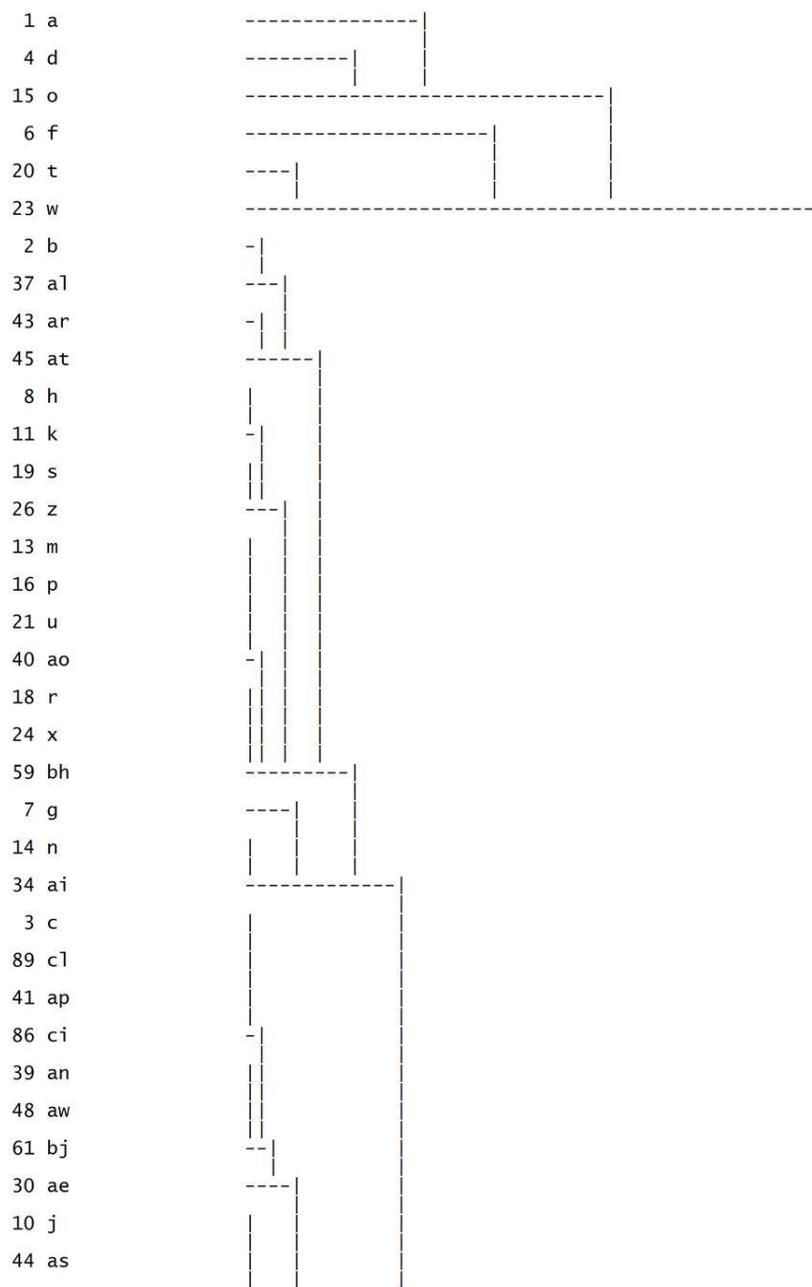
Elemento	Superficie (m ²)	Volumen (m ³)	Profundidad (cm)
a	178800	8940	15.85
b	85400	4270	3.55
c	33900	1695	1.45
d	132100	6605	7.65
e	129300	6465	4.85
f	428000	21400	13.35
g	33400	1670	7.15
h	18100	905	4.35
i	162100	8105	4.15
j	2400	120	1.25
k	29900	1495	4.25
l	500	25	0.25
m	16800	840	3.15
n	57900	2895	5.65
o	224400	11220	9.25
p	17100	855	2.95
q	100	5	0.15
r	29100	1455	2.55
s	12500	625	3.75
t	283800	14190	5.65
u	17800	890	2.75
v	8100	405	1.15
w	317500	15875	3.45

x	26400	1320	2.45
y	800	40	0.45
z	12800	640	3.55
ab	300	15	0.25
ac	200	10	0.15
ad	300	15	0.15
ae	50100	2505	0.95
af	17500	875	0.65
ag	300	15	0.25
ah	8100	405	2.05
ai	57000	2850	4.95
aj	11700	585	1.55
ak	900	45	0.45
al	67700	3385	3.75
am	400	20	0.15
an	24800	1240	1.45
ao	14300	715	2.65
ap	30000	1500	1.05
aq	9300	465	1.55
ar	70900	3545	2.35
as	3300	165	1.25
at	54900	2745	2.45
au	8500	425	2.45
av	200	10	0.15
aw	21400	1070	1.35
ax	153000	7650	2.35
ay	132600	6630	2.05
az	5800	290	0.45
ba	100	5	0.15
bb	4500	225	0.35
bc	100	5	0.15
bd	10200	510	1.35
be	200	10	0.15
bf	200	10	0.15

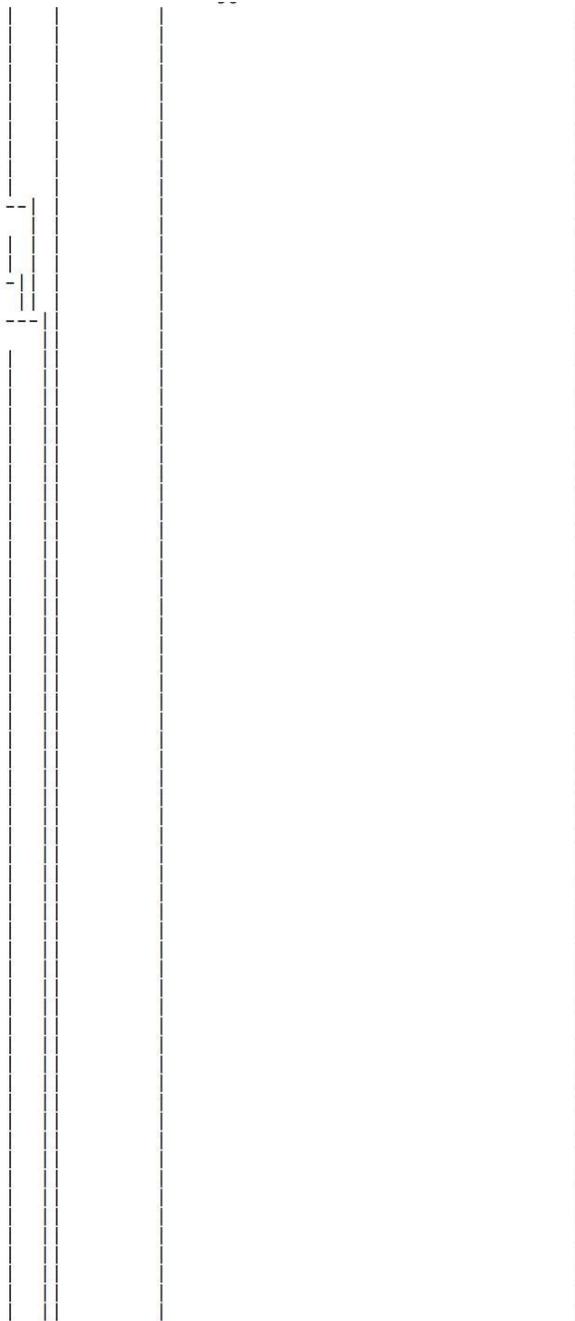
bg	200	10	0.15
bh	32200	1610	3.05
bi	6100	305	1.35
bj	19500	975	1.05
bk	600	30	0.35
bl	300	15	0.15
bm	1600	80	0.25
bn	2800	140	0.15
bo	100	5	0.15
bp	2600	130	0.35
bq	20600	1030	1.95
br	4400	220	0.45
bs	100	5	0.15
bt	2700	135	1.15
bu	100	5	0.15
bv	200	10	0.15
bw	100	5	0.15
bx	300	15	0.15
by	400	20	0.15
bz	100	5	0.15
ca	14500	725	0.55
cb	100	5	0.15
cc	100	5	0.15
cd	100	5	0.15
ce	100	5	0.15
cf	100	5	0.15
cg	700	35	0.35
ch	100	5	0.15
ci	27400	1370	1.25
cj	100	5	0.15
ck	14200	710	0.65
cl	31300	1565	1.35
cm	200	10	0.15
cn	100	5	0.15

co	100	5	0.15
cp	300	15	0.25
cq	11000	550	0.45
cr	100	5	0.15
cs	100	5	0.15
ct	300	15	0.25
cu	3500	175	0.25
cv	9400	470	0.35
cw	100	5	0.15
cx	1000	50	0.15
cy	100	5	0.15

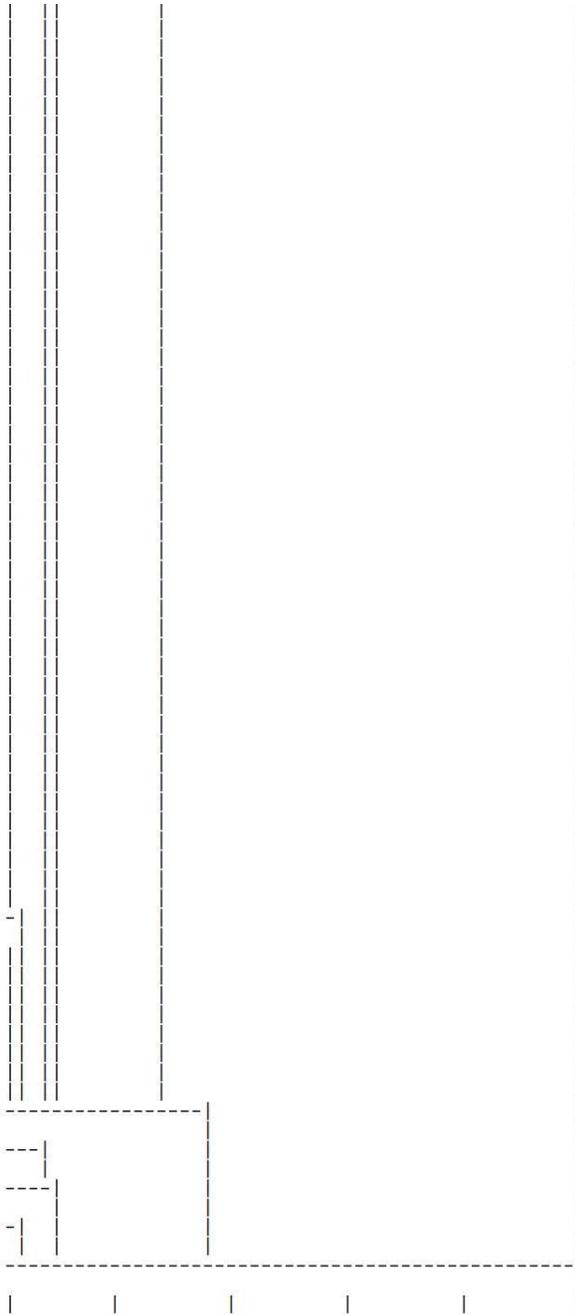
Árbol de encadenamiento:



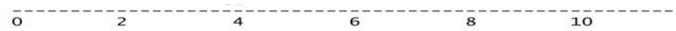
71 bt
22 v
60 bi
35 aj
42 aq
55 bd
33 ah
46 au
68 bq
12 l
27 ab
32 ag
93 cp
97 ct
64 bm
17 q
52 ba
54 bc
66 bo
70 bs
72 bu
74 bw
77 bz
79 cb
80 cc
81 cd
82 ce
83 cf
85 ch
87 cj
91 cn
92 co
95 cr
96 cs
100 cw



102 cy
 28 ac
 47 av
 56 be
 57 bf
 58 bg
 73 bv
 90 cm
 29 ad
 63 bl
 75 bx
 38 am
 76 by
 101 cx
 65 bn
 98 cu
 25 y
 36 ak
 62 bk
 84 cg
 51 az
 69 br
 53 bb
 67 bp
 31 af
 78 ca
 88 ck
 94 cq
 99 cv
 5 e
 9 i
 49 ax
 50 ay



Distancia:



Grupo N° Código de identificación de los integrantes

1 3 1 4 15

2 3 6 20 23

3 96 2 37 43 45 8 11 19 26 13 16 21 40 18 24 59 7 14 34 3 89 41 86 39 48 61
30 10 44 71 22 60 35 42 55 33 46 68 12 27 32 93 97 64 17 52 54 66 70 72 74 77 79
80 81 82 83 85 87 91 92 95 96 100 102 28 47 56 57 58 73 90 29 63 75 38 76 101 65
98 25 36 62 84 51 69 53 67 31 78 88 94 99 5 9 49 50

Precipitación pluvial de 88 mm en 24 hrs. para un periodo de retorno de 100 años.

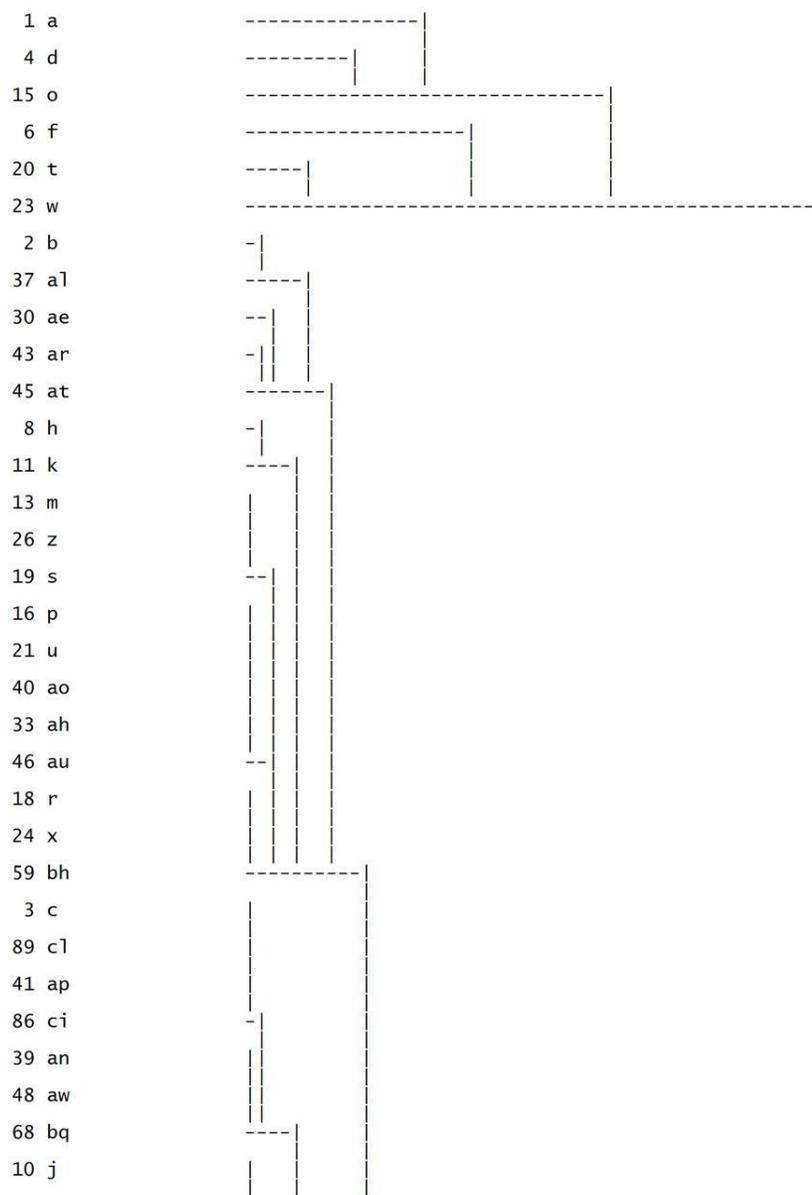
Elemento	Superficie (m2)	Volumen (m3)	Profundidad (cm)
a	178800	14304	19.18
b	85400	6832	4.28
c	33900	2712	1.98
d	132100	10568	9.68
e	129300	10344	5.98
f	428000	34240	14.58
g	33400	2672	8.88
h	18100	1448	5.48
i	162100	12968	5.28
j	2400	192	1.98
k	29900	2392	6.08
l	500	40	0.48
m	16800	1344	4.38
n	57900	4632	7.38
o	224400	17952	11.58
p	17100	1368	3.88
q	100	8	0.18
r	29100	2328	3.58
s	12500	1000	4.78
t	283800	22704	7.08
u	17800	1424	3.38
v	8100	648	1.18
w	317500	25400	4.38
x	26400	2112	3.18
y	800	64	0.68
z	12800	1024	4.48
ab	300	24	0.28
ac	200	16	0.18
ad	300	24	0.18

ae	50100	4008	1.38
af	17500	1400	0.98
ag	300	24	0.28
ah	8100	648	3.18
ai	57000	4560	6.88
aj	11700	936	2.08
ak	900	72	0.78
al	67700	5416	4.28
am	400	32	0.18
an	24800	1984	2.08
ao	14300	1144	3.38
ap	30000	2400	1.38
aq	9300	744	1.98
ar	70900	5672	3.08
as	3300	264	1.58
at	54900	4392	3.18
au	8500	680	3.28
av	200	16	0.18
aw	21400	1712	1.88
ax	153000	12240	3.08
ay	132600	10608	2.58
az	5800	464	0.68
ba	100	8	0.18
bb	4500	360	0.58
bc	100	8	0.18
bd	10200	816	1.68
be	200	16	0.18
bf	200	16	0.18
bg	200	16	0.18
bh	32200	2576	3.98
bi	6100	488	1.68
bj	19500	1560	1.38
bk	600	48	0.48
bl	300	24	0.18

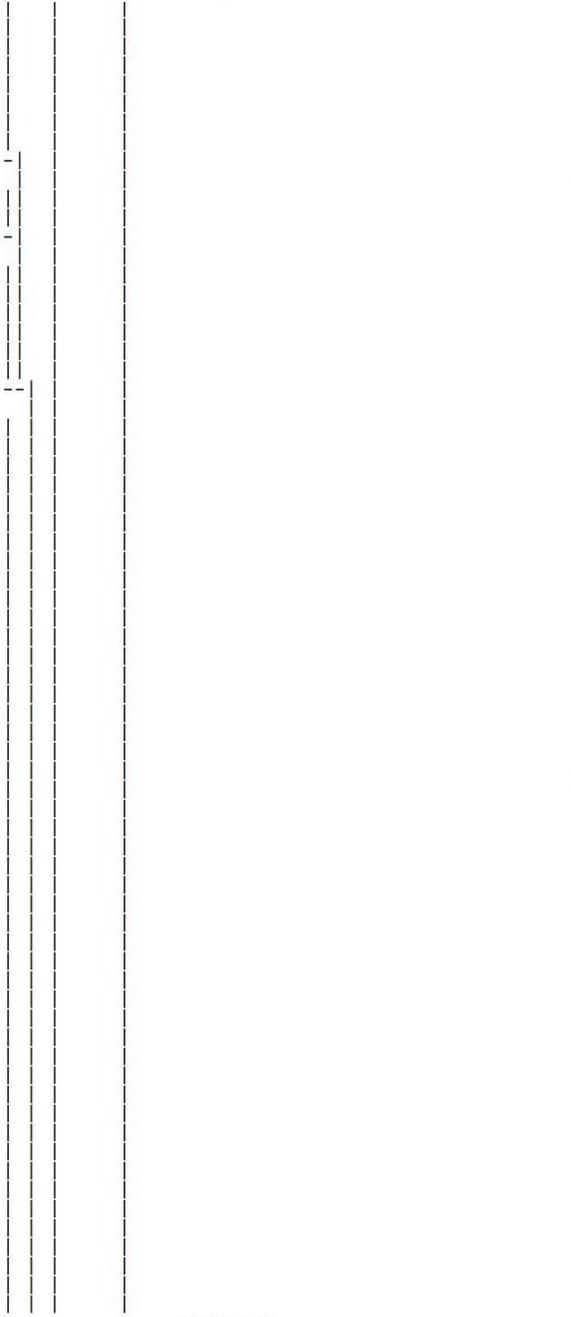
bm	1600	128	0.38
bn	2800	224	0.18
bo	100	8	0.18
bp	2600	208	0.58
bq	20600	1648	2.58
br	4400	352	0.78
bs	100	8	0.18
bt	2700	216	1.28
bu	100	8	0.18
bv	200	16	0.18
bw	100	8	0.18
bx	300	24	0.18
by	400	32	0.18
bz	100	8	0.18
ca	14500	1160	0.88
cb	100	8	0.18
cc	100	8	0.18
cd	100	8	0.18
ce	100	8	0.18
cf	100	8	0.18
cg	700	56	0.58
ch	100	8	0.18
ci	27400	2192	1.68
cj	100	8	0.18
ck	14200	1136	0.98
cl	31300	2504	1.88
cm	200	16	0.18
cn	100	8	0.18
co	100	8	0.18
cp	300	24	0.28
cq	11000	880	0.68
cr	100	8	0.18
cs	100	8	0.18
ct	300	24	0.28

cu	3500	280	0.38
cv	9400	752	0.48
cw	100	8	0.18
cx	1000	80	0.18
cy	100	8	0.18

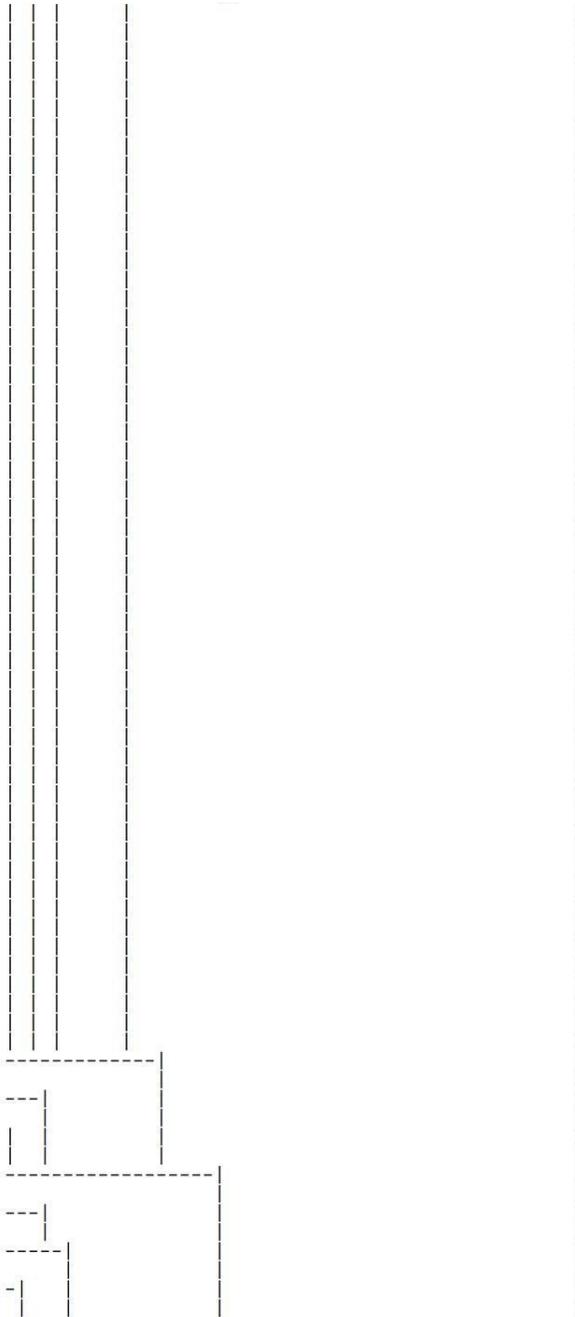
Árbol de encadenamiento:



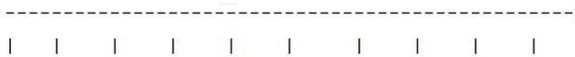
44 as
60 bi
35 aj
42 aq
55 bd
22 v
71 bt
31 af
78 ca
88 ck
61 bj
12 l
62 bk
84 cg
64 bm
98 cu
17 q
52 ba
54 bc
66 bo
70 bs
72 bu
74 bw
77 bz
79 cb
80 cc
81 cd
82 ce
83 cf
85 ch
87 cj
91 cn
92 co
95 cr
96 cs



100 cw
 102 cy
 28 ac
 47 av
 56 be
 57 bf
 58 bg
 73 bv
 90 cm
 29 ad
 63 bl
 75 bx
 38 am
 76 by
 101 cx
 27 ab
 32 ag
 93 cp
 97 ct
 65 bn
 25 y
 36 ak
 51 az
 69 br
 53 bb
 67 bp
 94 cq
 99 cv
 7 g
 14 n
 34 ai
 5 e
 9 i
 49 ax



50 ay



Distancia:



Grupo N° Código de identificación de los integrantes

- 1** 3 1 4 15
- 2** 3 6 20 23
- 3** 96 2 37 30 43 45 8 11 13 26 19 16 21 40 33 46 18 24 59 3 89 41 86 39 48 68
10 44 60 35 42 55 22 71 31 78 88 61 12 62 84 64 98 17 52 54 66 70 72 74 77 79 80
81 82 83 85 87 91 92 95 96 100 102 28 47 56 57 58 73 90 29 63 75 38 76 101 27 32
93 97 65 25 36 51 69 53 67 94 99 7 14 34 5 9 49 50