



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VULNERABILIDAD DEL
ACUÍFERO DE ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE
MÉXICO APLICANDO LA METODOLOGÍA DRASTIC”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA

JESICA GOYA SÁNCHEZ

DIRECTOR:

DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ



MÉXICO, D.F.
2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice

i Resumen	I
ii Abstract	II
iii Agradecimientos	III
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	4
1.3 Justificación	5
1.4 Descripción de la zona de estudio	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA	7
2.1 Generalidades	8
2.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera	10
2.2.1 Métodos basados en simulaciones	10
2.2.2 Métodos estadísticos	10
2.2.3 Métodos de Índices y superposición	10
2.3 DRASTIC	13
2.4 Estudios de comparación	15
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	17
3.1 Metodología de trabajo	18
3.1.1 Software utilizado	22
3.2 D (Profundidad al nivel estático)	23
3.3 R (Recarga)	28
3.4 A (Medio acuífero)	29
3.5 S (Suelos)	31
3.6 T (Topografía)	36
3.7 I (Impacto a la Zona Vadosa)	39
3.8 C (Conductividad hidráulica)	40
CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO NATURAL	44
4.1 Climatología e Hidrología de superficie	45

4.2 Geología	48
4.2.1 Estratigrafía	49
4.2.2 Geología Estructural	56
4.3 Hidrogeología	57
4.3.1 Acuitardo superior	57
4.3.2 Acuífero superior	58
4.3.3 Acuífero inferior	59
4.3.4 Acuífero calcáreo	59
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
5.1D (Profundidad al nivel estático)	62
5.2 R (Recarga)	64
5.3 A (Medio acuífero)	66
5.4 S (Suelos)	68
5.5 T (Topografía)	70
5.6 I (Impacto a la Zona Vadosa)	72
5.7 C (Conductividad hidráulica)	74
5.8 Índice DRASTIC	78
5.9 Índice normalizado y zonas de vulnerabilidad	81
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	86
6.1 Conclusiones	87
6.2 Líneas futuras de Investigación	88
6.2.1 Recomendaciones	88
6.2.2 Investigaciones futuras	89
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS CITADAS	91



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

1.2 Objetivos

1.3 Justificación

1.4 Descripción de la zona de estudio

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El rápido crecimiento de las zonas urbanas crea un aumento en la demanda de agua potable y a la vez pone en riesgo la calidad de esta (Bugliarello, 1999). La ciudad de México experimentó un rápido crecimiento poblacional en las últimas décadas del siglo pasado, reflejado en la urbanización de áreas que representan zonas de recarga al acuífero y un incremento en el suministro de agua potable. El abastecimiento de agua dulce de la Ciudad de México proviene en un 71% del agua subterránea, proporcionada por 3500 pozos de extracción dentro de la cuenca de México, y 29% de fuentes externas a la cuenca (Ramos Leal, 2010b).

Con el fuerte cambio en el régimen de abastecimiento de agua de la ciudad, surge la necesidad de elaborar un mapa de vulnerabilidad que refleje las zonas que deben ser monitoreadas cuidadosamente para evitar la contaminación del acuífero. Este mapa se presenta a la vez como una herramienta para la gestión y para la protección del acuífero de la Ciudad de México.

El concepto de vulnerabilidad del agua subterránea fue introducido por el hidrogeólogo francés, Margat en 1968. Después de él han surgido muchas metodologías para evaluar la vulnerabilidad Foster (1987) propuso la metodología GOD que asigna un índice entre 0 y 1 a tres variables, que son: G (ground water occurrence - tipo de acuífero), O (overall aquifer class - litología de la cobertura), D (depth - profundidad del agua o del acuífero). El resultado se obtiene de la multiplicación entre sí de las variables (Auge, 2004).

En Italia, Civita (1990) creó una variante del DRASTIC llamada SINTACS que fue creada especialmente para las características hidrogeológicas de Italia y a la vez proporciona un mapeo de mayor detalle. El acrónimo SINTACS representa: S (soggiacenza - profundidad del agua), I (infiltrazione - infiltración), N (non saturo - sección subsaturada), T (tipologia

della copertura - tipo de suelo), A (acuífero - características hidrogeológicas del acuífero), C (conducibilità - conductividad hidráulica), S (superficie topografica - pendiente topográfica) (Auge, 2004).

EPIK, fue creado por Doerfliger y Zwahlen (1997) para determinar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos. Las siglas representan: Epikarst (E), Cubierta protectora (Protective cover) (P), Condiciones de infiltración (Infiltration conditions) (I), Desarrollo de la red kárstica (Karst network development)(K), que son parámetros muy importantes en el flujo y transporte dentro de sistemas kársticos (Auge, 2004).

Van Stempvoort et al. (1993) desarrollaron la metodología AVI, Índice de Vulnerabilidad Acuífera (Aquifer Vulnerability Index). Para este método se toman en cuenta dos parámetros: el espesor de cada unidad por encima del acuífero más somero y la conductividad hidráulica estimada de cada una de estas unidades. El resultado es una interpolación de valores para visualizar la vulnerabilidad, expresada en tiempos advectivos de tránsito.

Uno de los métodos con mayor número de variantes, más robusto y el utilizado en este trabajo es DRASTIC (Aller et al., 1987). Se basa en la suma de 7 parámetros para clasificar la vulnerabilidad en una escala del 1 al 10 por medio del índice DRASTIC que se obtiene con la ecuación:

$$\text{DRASTIC} = Dr * Dw + Rr * Rw + Ar * Aw + Sr * Sw + Tr * Tw + Ir * Iw + Cr * Cw \dots (1), \text{ donde:}$$

D: profundidad al nivel freático

R: recarga neta

A: litología del acuífero

S: tipo de suelo

T: topografía

I: impacto a la zona vadosa

C: conductividad hidráulica

r: parámetro

w: peso asignado

Este índice es el resultado de multiplicar cada uno de los parámetros por el peso que se le asigna en función de la importancia que tiene en la vulnerabilidad.

El gran número de variaciones que presenta este método se deben a que es fácil añadir o quitar uno o más parámetros para la zona de estudio. Esto se logra al recalcular los pesos que se le asigna a cada uno de los parámetros dependiendo de la influencia que tengan en el cálculo de la vulnerabilidad. En Canadá, Denny et al. (2007) incorporaron las características estructurales de acuíferos fracturados creando DRASTIC-Fm para incluir los efectos en la recarga y las determinaciones de las zonas de captura de los pozos.

En Irán, Javadi et al. (2011) realizaron una calibración del método para obtener la vulnerabilidad relacionada con la concentración de nitratos en el agua subterránea. Shouyu y Guangtao (2003) modificaron el método para evaluar la vulnerabilidad en China al implementar una clasificación de patrones difusos utilizando el concepto de distancia Euclidiana para aplicar los pesos y valores de los siete parámetros. Al-Adamat et al. (2003) utilizaron DRASTIC sin incluir el parámetro de conductividad hidráulica debido a la escasez de valores. En una segunda etapa crearon un DRASTIC modificado en el que integró el uso de suelo para obtener el riesgo a la contaminación.

1.2 Objetivos

Con la realización de la presente tesis se busca caracterizar la vulnerabilidad del acuífero del Distrito Federal a la contaminación con ayuda del método DRASTIC por medio del análisis de varios parámetros como las profundidades del nivel estático, la geología del área, la conductividad hidráulica y el medio geológico en el que se encuentra el acuífero, ente otros. La caracterización de la vulnerabilidad permitirá identificar las zonas más vulnerables a ser contaminadas y gestionar medidas de protección para el acuífero.

1.3 Justificación

La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del Distrito Federal a la contaminación por hidrocarburos es un tema de suma importancia ya que existen más de 500 gasolineras y autoconsumos en el área urbana que ponen en peligro la calidad del agua que se extrae del subsuelo.

La protección que brinda el medio geológico al acuífero ha sido sobreestimada, y es inminente reevaluar la vulnerabilidad a la contaminación y crear políticas de protección para mantener la calidad del agua que usamos en la Ciudad.

1.4 Descripción de la zona de estudio

La Ciudad de México se encuentra dentro de una cuenca endorreica limitada al Norte por la Sierra de Guadalupe, al sur por la Sierra del Chichinautzin, al suroeste por la Sierra del Ajusco, por la Sierra de las Cruces al oeste y la Sierra de Santa Catarina al este (Figura 1.1). El centro de la Ciudad se encuentra cubierto en distintas zonas por áreas lacustres producto de los lagos que existieron al término de la época glacial. Hacia el centro se encontraba el lago de México, el lago de Texcoco al este, Xochimilco y Chalco al sur y Zumpango al norte. Hoy en día la mayor parte de la extensión que ocupaban estos lagos ha sido drenada artificialmente para dar paso a una urbanización desmedida.

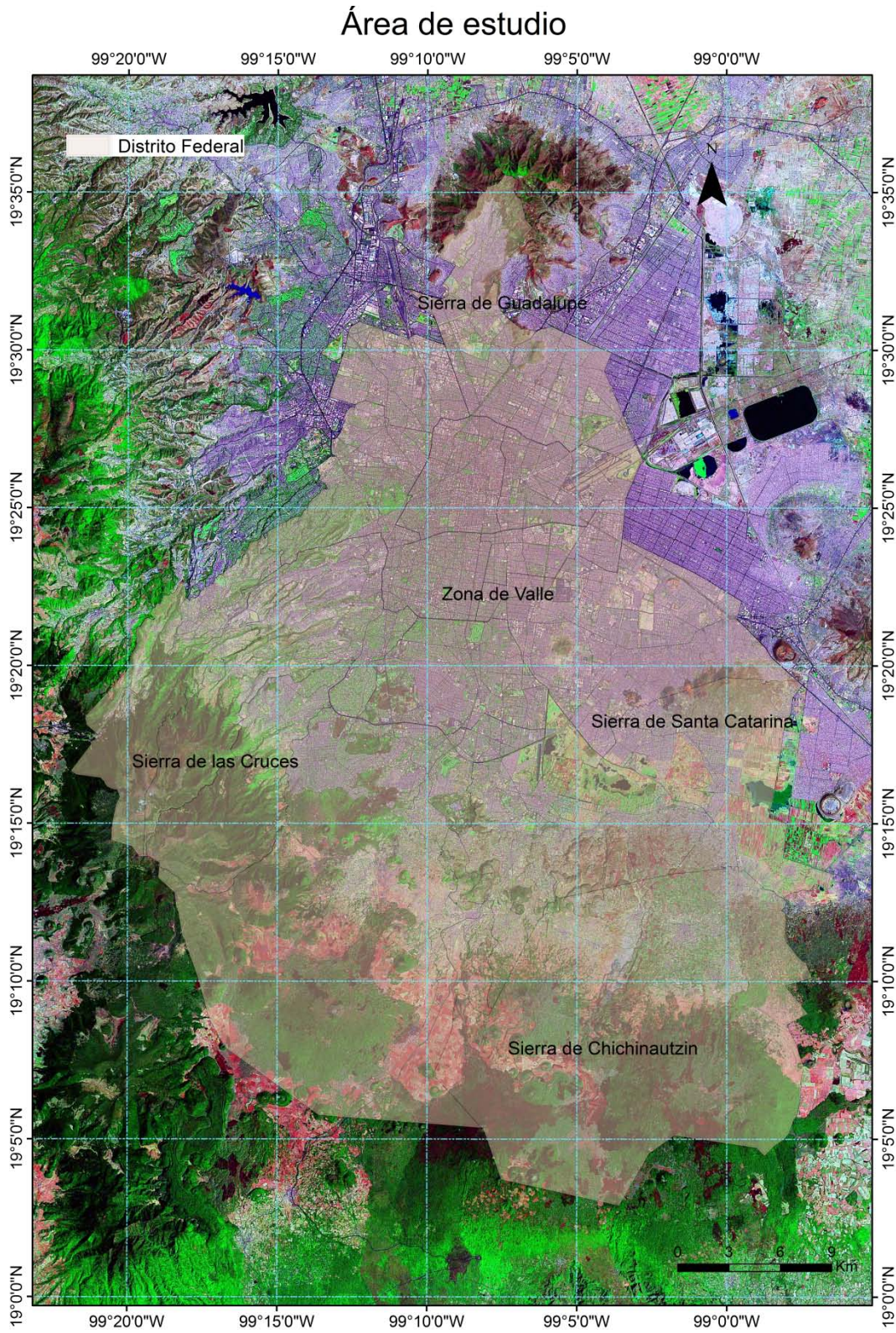


Figura 1.1 Área de estudio, Ciudad de México.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1 Generalidades

2.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera

2.2.1 Métodos basados en simulaciones

2.2.2 Métodos estadísticos

2.2.3 Métodos de Índices y superposición

2.3 DRASTIC

2.4 Estudios de comparación

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1 Generalidades

El término de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación fue introducido primeramente por Margat, un hidrogeólogo francés, en 1968 (Vrba y Zaporozec, 1994). En un principio sólo tenía relación con los aspectos cualitativos de la contaminación. Hoy en día puede también determinar aspectos cuantitativos y de calidad del agua subterránea (Ramos Leal, 2010a).

El concepto de vulnerabilidad del agua subterránea está fundado en la premisa de que el medio físico en el que se encuentra el acuífero le proporciona cierta protección de los agentes externos, por ello existen zonas con mayor propensión que otras a ser contaminadas (Al-Zabet, 2002).

La vulnerabilidad del agua subterránea no es una característica que pueda medirse directamente en campo. Esta se basa en un concepto básico que definen Vrba y Zaporozec (1994) que algunas áreas del suelo son más vulnerables a la contaminación de aguas subterráneas que otras. El nivel del agua subterránea es la clave en la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación, que se define como la probabilidad de que una cierta cantidad de un contaminante pueda alcanzar el nivel del agua subterránea dentro de un tiempo determinado (Voigt et al., 2004).

El concepto de vulnerabilidad implica dos conceptos: vulnerabilidad intrínseca, que define la vulnerabilidad del agua subterránea a contaminantes generados por actividades humanas tomando en cuenta las características inherentes a la geología, hidrología e hidrogeología independientemente de la naturaleza de los contaminantes. La vulnerabilidad específica, por otro lado, define la vulnerabilidad del agua subterránea a un contaminante o un grupo de ellos tomando en cuenta las propiedades del

contaminante y su relación con los distintos componentes de la vulnerabilidad intrínseca (Gogu y Dassargues, 2000).

El grado de contaminación del agua subterránea es determinado frecuentemente por los procesos de atenuación natural que se generan en el área ubicada entre la fuente de contaminación y el acuífero. Existen varios procesos naturales, físicos y químicos que ocurren en el subsuelo responsables de que el contaminante cambie su estado físico y químico. Estos cambios pueden generar una disminución en el potencial de contaminación que poseía la sustancia, o un cambio en la naturaleza de la misma. Algunos de estos procesos poseen mayor eficacia en la zona del suelo y la zona vadosa que en la zona saturada (Gogu y Dassargues, 2000).

El riesgo a la contaminación difiere de la vulnerabilidad a la contaminación en que el primero toma en cuenta el impacto que ocasiona la actividad del ser humano en la calidad del agua subterránea, no sólo considerando la vulnerabilidad sino también la existencia de una fuente de contaminación potencial como factor dinámico. Lo fuerte que pueda ser el impacto dependerá de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y el valor del acuífero como un recurso (Ducci, 2000).

Tanto la vulnerabilidad como el riesgo del agua subterránea a un contaminante se pueden plasmar en un mapa como una función de las condiciones hidrogeológicas. Esto proporciona un panorama de cómo la protección efectiva que el ambiente natural proporciona puede cambiar drásticamente de un lugar a otro (Gogu y Dassargues, 2000).

2.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera

A continuación se describen brevemente los principales métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera, los cuales pueden ser divididos en tres grupos: métodos basados en simulaciones, métodos estadísticos, y métodos de índices y superposición.

2.2.1 Métodos basados en simulaciones: utilizan modelos matemáticos para analizar y simular los procesos que gobiernan el transporte de contaminantes en la subsuperficie.

2.2.2 Métodos estadísticos: utilizan grupos de variables que condicionan la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos, proporcionando conclusiones según la asociación que presenten estas áreas.

2.2.3 Métodos de Índices y superposición: combinan un conjunto de características o atributos físicos del suelo, la zona no saturada y los acuíferos, a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad. Dentro de estos métodos se encuentran los métodos de Sistemas de matriz (superposición) y los Modelos de sistema de conteo de puntos (índices). Para utilizar estos métodos primero se deben seleccionar los parámetros representativos para la evaluación de la vulnerabilidad y posteriormente a cada parámetro se le asigna un rango de valores que reflejan el grado de vulnerabilidad a la contaminación (Gogu y Dassargues, 2000).

Métodos de sistemas de matriz: Estos se utilizan con un número restringido de parámetros cuidadosamente elegidos. Para obtener la vulnerabilidad se realiza una combinación que refleja la evaluación de cualquier punto del área de estudio. El resultado numérico final es dividido en intervalos que expresan el grado de vulnerabilidad (Gogu y Dassargues, 2000). Dentro de este tipo de métodos están el sistema GOD (Foster, 1987), el método AVI (Van Stempvoort et al., 1993) y el método ISIS (Civita y De Regibus 1995).

El método GOD es una herramienta sencilla para evaluar la vulnerabilidad acuífera ya que sólo toma en cuenta tres parámetros: G (ground water occurrence - tipo de acuífero), O (overall aquifer class - litología de la cobertura), D (depth - profundidad del agua o del acuífero). El índice de vulnerabilidad se obtiene al asignar valores a estos parámetros y multiplicarlos entre sí. El valor de vulnerabilidad se presenta en un rango de valores de 0 a 1 (Auge, 2004).

Van Stempvoort et al. (1993) desarrollaron la metodología AVI, Índice de Vulnerabilidad Acuifera (Aquifer Vulnerability Index). Para este método se toman en cuenta dos parámetros: el espesor de cada unidad por encima del acuífero más somero (d) y la conductividad hidráulica estimada de cada una de estas unidades (k). El resultado (c) está dado por

$$c = \sum_{i=1}^n d_i/k_i \dots (2), \text{ donde:}$$

c = resistencia hidráulica dada por el método AVI

n = el número de capas

k= conductividad hidráulica estimada de cada capa n

Se realiza este cálculo para cada pozo con corte litológico y posteriormente se realiza una interpolación de valores para visualizar la vulnerabilidad (Gogu y Dassargues, 2000).

El método ISIS fue desarrollado por Civita y De Regibus (1995) como la síntesis de varios estudios de vulnerabilidad acuifera. Este método es un híbrido que combina el sistema de pesos y valores de DRASTIC y SINTACS con el método y estructura general de GOD. Los parámetros utilizados son: la recarga media anual, topografía, tipo de suelo, espesor del suelo, litología de la zona no saturada, espesor de la zona no saturada, medio acuífero y espesor del acuífero. A estos parámetros se añade el uso de suelo que ha sido tomado de la metodología SINTACS, dependiendo del tipo de uso, ya sea para

agricultura, de condiciones normales y con un área superficial fuertemente drenada (Gogu y Dassargues, 2000).

Para estimar el índice de vulnerabilidad de ISIS se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_v = p_{Inf} \times f_{Inf} + p_{Su} \times f_{Sus} \times f_{Su} + p_{Ins} \times f_{Si} \times f_{Ins} + p_{Sat} \times f_{Ss} \times f_{Sat} \dots (3), \text{ donde:}$$

p_{Inf} = valores para los rangos de recarga neta

f_{Inf} = coeficiente de infiltración dependiente del uso de suelo

p_{Su} = valores para el tipo de suelo

f_{Sus} = coeficiente para el tipo de suelo dependiente del uso de suelo

f_{Su} = coeficiente de peso dependiente del espesor del suelo

p_{Ins} = valores asignados a la zona vadosa

f_{Si} = coeficiente de peso dependiente de la litología y espesor de la zona no saturada

f_{Ins} = coeficiente de la zona vadosa dependiente del uso de suelo

f_{Ins} = coeficiente de la zona vadosa dependiente del uso de suelo

p_{Sat} = valores asignados al medio acuífero

f_{Ss} = coeficiente de peso dependiente del espesor del acuífero

f_{Sat} = coeficiente del acuífero dependiente del uso de suelo

El índice de vulnerabilidad final dependiente del uso de suelo varía entre 24 y 180, dividido en 6 clases de vulnerabilidad: extrema (141-180); muy alta (124-140); alta (88-123); media (64-87); baja (44-63); muy baja (24-43).

Métodos de conteo de puntos: Estos métodos son sistemas de evaluación en los que cada parámetro es multiplicado por un peso asignado para reflejar la relación entre ellos. Los parámetros valuados y multiplicados son después sumados para obtener la puntuación final (Gogu & Dassargues, 2000). Esta puntuación provee una medida de la vulnerabilidad para un punto del área de estudio. A este tipo de métodos pertenecen DRASTIC (Aller et al. 1987), SINTACS (Civita y De Maio, 1997) y EPIK (Doerfliger y Zwahlen, 1997) que es utilizado para medios kársticos.

En Italia, Civita y De Maio (1997) crearon una variante del DRASTIC llamada SINTACS que fue creada especialmente para las características hidrogeológicas de Italia y a la vez proporciona un mapeo de mayor detalle. El acrónimo SINTACS representa: S (soggiacenza - profundidad del agua), I (infiltrazione - infiltración), N (non saturo - sección subsaturada), T (tipologia della copertura - tipo de suelo), A (acquifero - características hidrogeológicas del acuífero), C (conducibilità - conductividad hidráulica), S (superficie topografica - pendiente topográfica) (Auge, 2004). La diferencia entre DRASTIC y SINTACS que es que el último tiene un sistema de pesos y valores más flexible y permite crear nuevas clasificaciones de pesos. Se basa en:

$$I_v = \sum (P_{(1,7)} \times W_{(1,n)}) \dots (4), \text{ donde:}$$

I_v = índice de vulnerabilidad del método SINTACS

$P_{(1,7)}$ = valuación de cada uno de los siete parámetros

$W_{(1,n)}$ = peso asociado

n = número de arreglos de clasificación de pesos

2.3 DRASTIC

Desarrollado por la EPA (Aller et. al., 1987), DRASTIC es uno de los métodos más utilizados para la evaluación del potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

Sus siglas provienen de cada uno de los siete parámetros hidrogeológicos que lo conforman (en inglés): profundidad al nivel freático (D), recarga neta (R), litología del acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), impacto a la zona vadosa (I) y conductividad hidráulica (C). Estos parámetros son los que mayor impacto tienen en el potencial de contaminación de una zona.

El método DRASTIC produce una serie de resultados que permiten desarrollar programas para la protección del agua subterránea, el monitoreo y trabajos de limpieza (Al-Zabet, 2002). Este método ha sido utilizado en múltiples trabajos por su practicidad,

facilidad para aumentar o disminuir el número de parámetros y posibilidad de adaptar estos a condiciones específicas del área de estudio (Kim, Y.J., Hamm, S.Y., 1999; Fritch, T.G. et al., 2000; Al-Zabet, 2002; Babiker, I.S. et al., 2005; Jamrah, A. et al., 2008; Ahmed, A.A., 2009; Tilahun, K. & Merkel, B.J., 2009; Liggett, J.E. & Allen, D.M., 2010; Ormeci V. S. & Davraz, A., 2010; Expósito, J.L. et al., 2010)

En esta metodología se tiene un sistema donde cada parámetro tiene un valor y un peso dependiendo de la importancia que tiene en la evaluación del área (Tabla 2.2). A cada parámetro se le asigna un valor entre 1 y 10. Después, este valor es multiplicado por un factor de importancia que va de 1 a 5 y estos factores valuados son sumados para obtener el índice $D_i = D_r * D_w + R_r * R_w + A_r * A_w + S_r * S_w + T_r * T_w + I_r * I_w + C_r * C_w$.

Donde $D_r, R_r, A_r, S_r, T_r, I_r$ y C_r son los parámetros valuados por su importancia de 1 a 10 y como se muestra en la Tabla 2.1 $D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w$ y C_w son los parámetros ponderados por su peso de 1 a 5 (Al-Zabet, 2002).

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

Tabla 2.1 Peso de los parámetros de DRASTIC (Aller et al., 1987).

EPIK fue creado por Doerfliger y Zwahlen (1997) para determinar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos. Los parámetros evaluados son: Epikarst (E), Cubierta protectora

(Protective cover) (P), Condiciones de infiltración (Infiltration conditions) (I), Desarrollo de la red kárstica (Karst network development)(K) las cuales son parámetros muy importantes en el flujo y transporte dentro de sistemas kársticos (Auge, 2004). En este método mientras mayor sea la puntuación, mayor es la protección que tiene el área. El sistema de cuenta de puntos que utiliza está basado en el método DRASTIC. La evaluación de la vulnerabilidad con este método se realiza en escalas que van de 1:10000 a 1:5000.

2.4 Estudios de comparación

Existen pocos estudios en los que se realicen comparaciones entre los resultados que arrojan los distintos métodos de vulnerabilidad. Uno de estos es el realizado por Corniello et al. (1997) en la región de Piana Campana en el sur de Italia. En esta zona se utilizaron los métodos DRASTIC, SINTACS, GOD y AVI para realizar una comparación cualitativa de aspectos específicos. En cuanto al método SINTACS, se observa que genera áreas de muy alta vulnerabilidad en zonas en las que se ven involucradas las aguas superficiales y las interacciones con el acuífero. Esto es resultado de la identificación del acuífero y de los valores de vulnerabilidad asignados a las áreas afectadas por el drenaje. En el método DRASTIC, el área correspondiente a la clase de vulnerabilidad baja fue más extensa que con SINTACS, este último, da más importancia al parámetro que evalúa el uso de suelo a causa de los pesos que se le asignan en la evaluación. En las áreas que tienen una variación considerable en los valores de vulnerabilidad, el método GOD da una distribución homogénea de valores, por ello este método sólo puede ser usado en aquellos lugares donde se de un alto contraste entre valores. Un método que utiliza pocas variables pero que provee resultados similares es el método AVI, inclusive al realizar una comparación estadística entre los métodos se muestra que la mayor similitud está entre DRASTIC y SINTACS pero existe una gran correlación con AVI (Gogu y Dassargues, 2000).

Otro estudio comparativo fue realizado por Civita y De Regibus (1995). En este trabajo se estudiaron tres tipos de regiones del norte de Italia para cubrir distintas situaciones hidrogeológicas, como regiones planas, con colinas y montañosas. Los métodos comparados más importantes fueron: DRASTIC, SINTACS y GOD. Utilizando los distintos métodos en la misma área con los mismos datos se demostró que los métodos simples dan resultados similares que los métodos complejos y que resulta más adecuado utilizar los métodos sencillos en áreas grandes, y métodos más flexibles y precisos como SINTACS y DRASTIC en estudios de mayor detalle (Gogu y Dassargues, 2000).

En Bélgica, Gogu et al., (2003) realizaron otra comparación entre métodos en la cuenca del río Néblon. Entre los métodos utilizados están EPIK, DRASTIC, GOD e ISIS. En este estudio se encontró que el método ISIS utiliza el parámetro de la profundidad al nivel estático de una manera en la que suaviza el índice resultante y que el parámetro utilizado para los coeficientes de escurrimiento dependiendo del uso de suelo es un factor que influye en todos los demás coeficientes. En el método DRASTIC se observa que la profundidad del nivel estático es determinante en la evaluación de la vulnerabilidad y que las características kársticas no siempre se muestran con alta o muy alta vulnerabilidad. En cuanto a DRASTIC y EPIK, se corrobora que ambos hacen énfasis en las mismas características hidrogeológicas y geomorfológicas aunque los enfoques sean distintos.

La ventaja de los métodos de vulnerabilidad es la flexibilidad que presenta la cuantificación de los parámetros y el hecho de que permiten incluir o excluir parámetros dependiendo de las características geológicas, hidrogeológicas, hidrológicas, de suelo, topografía, clima y uso de suelo de la zona de estudio (Gogu et al., 2003).



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Metodología de trabajo

3.1.1 Software utilizado

3.2 D (Profundidad al nivel estático)

3.3 R (Recarga)

3.4 A (Medio acuífero)

3.5 S (Suelos)

3.6 T (Topografía)

3.7 I (Impacto a la Zona Vadosa)

3.8 C (Conductividad hidráulica)

METODOLOGÍA

3.1 Metodología de trabajo

La metodología que se utilizó para evaluar la vulnerabilidad acuífera de la Ciudad de México se muestra en la Figura 3.1. La primera etapa del proceso consistió en la recopilación y análisis de una gran cantidad de fuentes bibliográficas para integrar la información existente del área de estudio sobre temas como la geología e hidrogeología. Posteriormente se realizó un censo de las fuentes potenciales de contaminación (gasolineras y autoconsumos), así como la verificación de la ubicación de una gran cantidad de pozos de la ciudad.

Con esta información recopilada se integró una base de datos que contiene las coordenadas, datos de la profundidad del nivel estático, caudal de extracción y en algunos casos pruebas de bombeo, cortes litológicos (Figura 3.2) y datos geoquímicos de los pozos de agua potable. Sobre las fuentes potenciales de contaminación se incluyó información de las coordenadas, tipo de fuente, volumen de combustible almacenado, antigüedad de la instalación, etc.

Tras la evaluación de la información obtenida se llegó a la conclusión de que el método DRASTIC sería el elegido para realizar la caracterización de la vulnerabilidad del acuífero del Distrito Federal porque resulta ser el más robusto sin que la obtención de información se convierta en un impedimento para su procesamiento.

En la siguiente etapa se generó un Sistema de Información Geográfico (SIG) que incluye todos los datos obtenidos en la etapa anterior. Con la información incorporada en el SIG se crearon las distintas capas que dieron origen al índice DRASTIC. El parámetro D (profundidad al nivel estático) se configuró con los datos de potencimetría obtenidos para el 2010, para la R (recarga) se utilizaron los datos proporcionados por Carrera-Hernández (2008), la A (litología del acuífero) así como la I (litología de la zona vadosa) fueron calculadas utilizando la información proveniente de los cortes litológicos de la

ciudad, el parámetro S (tipo de suelo) fue configurado con datos obtenidos de INEGI, la (T) topografía se generó con ayuda de un modelo digital de elevación y por último, la C (conductividad hidráulica) fue calculada con datos generados en las pruebas de bombeo que se reinterpretaban de los datos obtenidos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM, 2005) y de Vázquez S. (1987).

Cada una de estas capas fue multiplicada después por un factor de ponderación que refleja la influencia del factor en el cálculo de la vulnerabilidad acuífera. Al tener estas capas listas se realizó un álgebra de mapas para sumar las capas entre sí y generar el mapa de índice DRASTIC. Posteriormente, utilizando este mapa como, se realizó un proceso de normalización de 0 a 10 para clasificar el área del Distrito Federal en zonas de vulnerabilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta. Los valores extremos utilizados para el proceso de normalización fueron 55 y 150. Los nuevos valores se reagruparon en intervalos uniformes a los que se les asignó un valor de vulnerabilidad como se muestra en la Tabla 3.1.

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

Tabla 3.1 Valores de vulnerabilidad normalizados y asignación de zonas de vulnerabilidad.

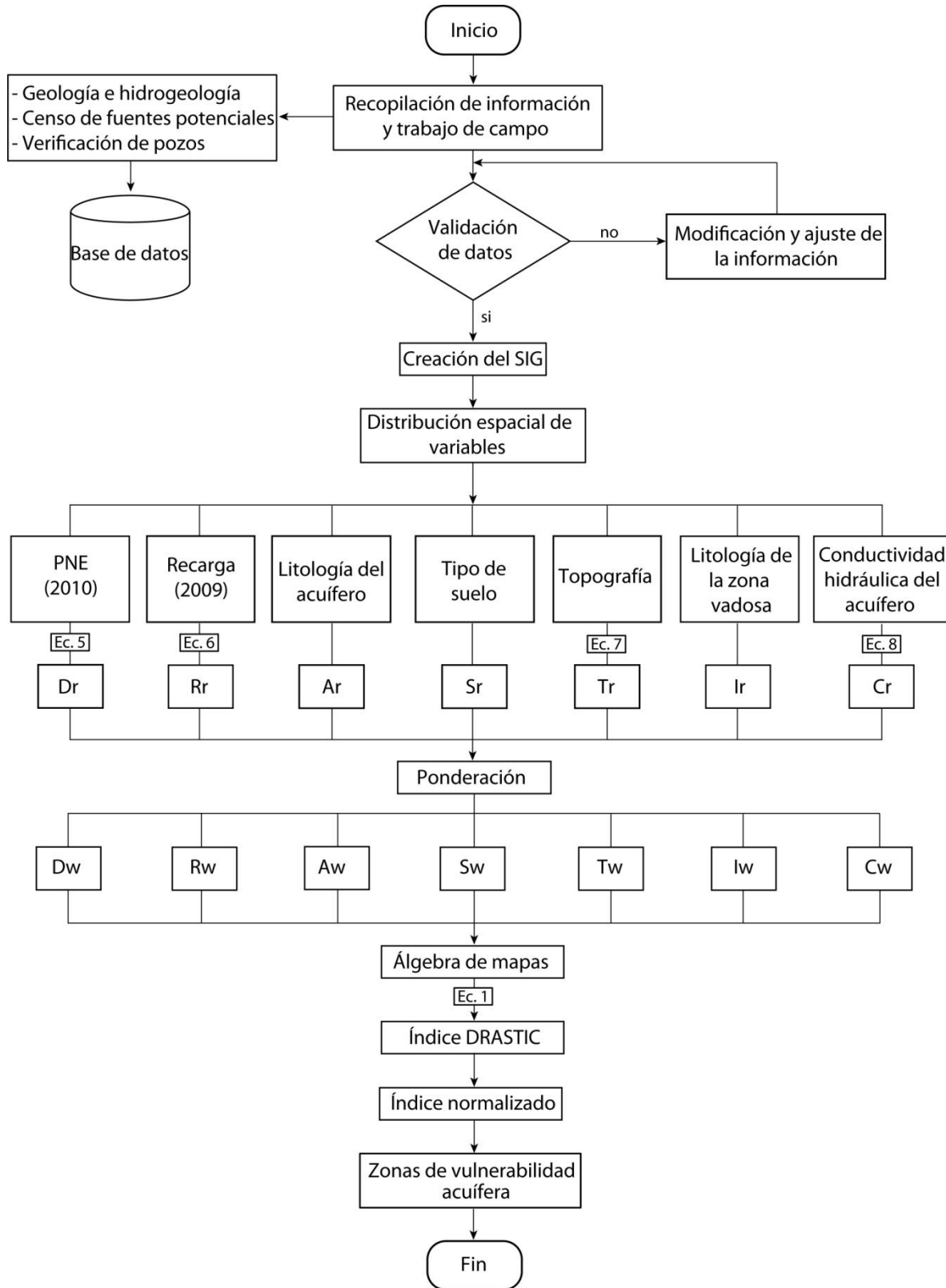


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

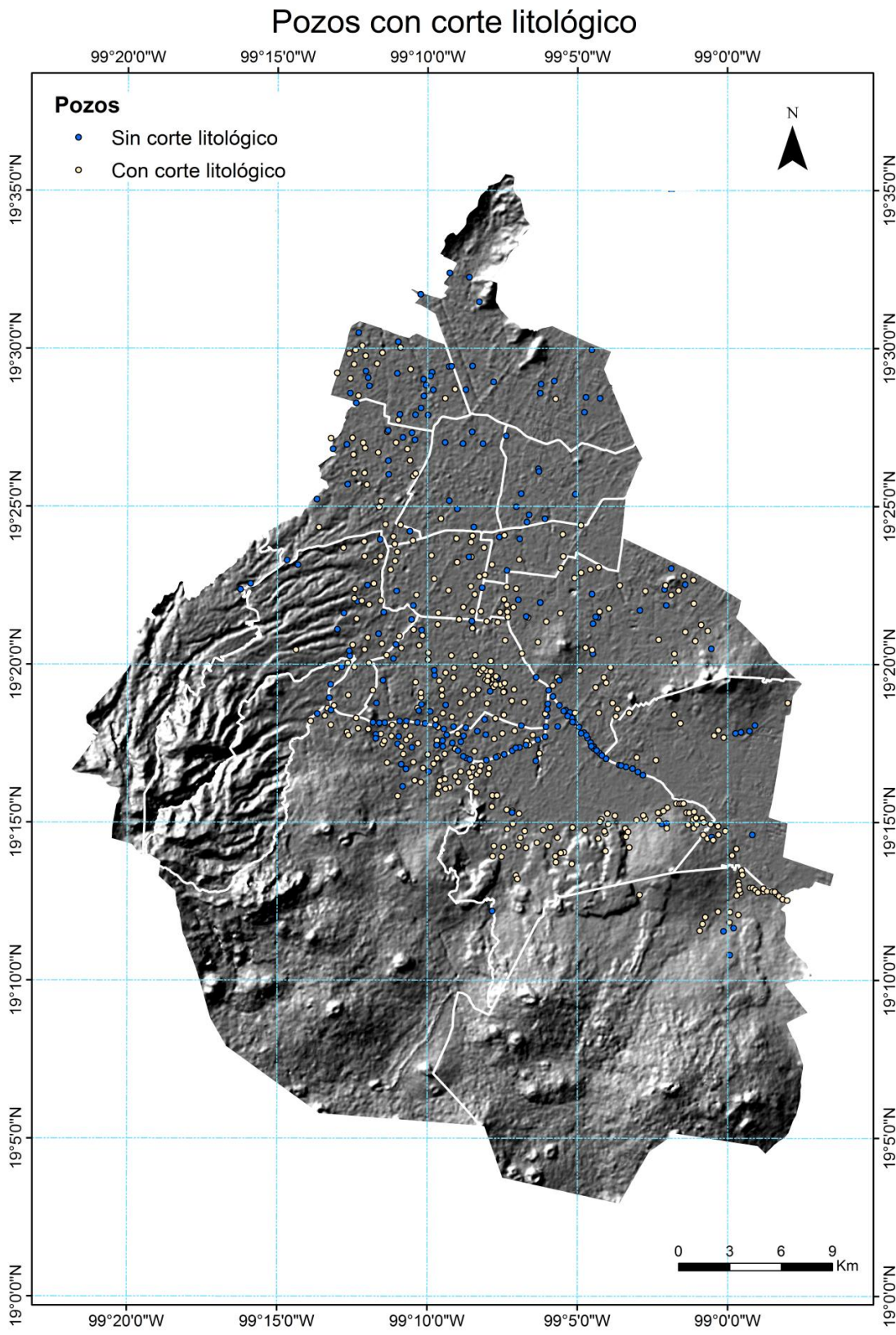


Figura 3.2 Pozos de la Ciudad de México con corte litológico

3.1.1 Software utilizado

El Sistema de Información Geográfico que fue utilizado en este proyecto fue el ArcGIS 9.3.1 (ESRI, 2009) con los módulos *3D Analyst*, *Spatial Analyst*, *Geoestatistical Analyst* y *Publisher*. En este software se compilaron las bases de datos necesarias para generar las capas que constituyen al índice DRASTIC, también se realizaron el álgebra de mapas y los procesos de normalización del índice.

La mayoría de las interpolaciones fueron generadas con el programa SURFER 10.1.561 (Golden Software, 2011). Este es un software especializado en visualización en 3D, creación de líneas de contorno y modelación de superficies.

Otra herramienta utilizada fue el Global Mapper 10.02 (Global Mapper Software LLC, 2010) que para este trabajo fungió como un enlace entre el GIS y SURFER. Este programa permite hacer conversiones entre tipos de archivos para poder trabajar distintos aspectos del cálculo de un parámetro en los distintos programas y aprovechar las ventajas que proporciona cada uno de ellos.

A continuación se describen los parámetros utilizados y los procesos realizados para la obtención de los valores de vulnerabilidad:

3.2 D (Profundidad al nivel estático)

En la Tabla 3.2 se observan los valores para la profundidad del nivel estático los cuales fueron modificados por Ramos (2010b) para adaptarlos a las profundidades existentes en la Cuenca de México.

Profundidad al Nivel freático (m.)		
Intervalo original	Intervalo modificado	Clase
0 - 1.5	0 - 7.5	10
1.5 - 4.6	1.5 - 4.6	9
4.6 - 9.1	23 - 45.5	7
9.1 - 15.2	45.5 - 76	5
15.2 - 22.9	76 - 114.5	3
22.9 - 30.5	114.5 - 152.5	2
>30.5	>152.5	1

Tabla 3.2 Valores para el factor de profundidad al agua subterránea.

La evaluación de este parámetro se realizó a partir de una base de datos hidrológicos que se construyó con información proporcionada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) para el periodo 1990-2005 y el Organismo de Cuenca de Aguas del Valle de México (OCAVM) para el periodo 2006-2010. Los datos que conforman esta base incluyen coordenadas de ubicación, datos piezométricos y datos geoquímicos. Estos datos presentan algunas deficiencias. Las coordenadas de muchos de los pozos se encuentran mal ubicadas y no existen valores de profundidad para varios años en muchos pozos. Por estas razones primero se realizó una identificación visual de los pozos por medio de "Google maps" o visitas físicas y se obtuvieron las coordenadas reales de la mayoría de los pozos con el fin de que los valores del nivel estático realmente se vean reflejados en las configuraciones. Se realizó la comprobación y relocalización de 364 pozos de un total de 656 que conforman la base de datos. Del total de pozos, 590 corresponden a la red del SACM, 27 a piezómetros, 16 a pozos en el

Estado de México en las cercanías con el límite del DF, y 26 a pozos no encontrados en las fuentes originales pero de los cuales se conoce su ubicación exacta.

Para el 2010 se proporcionaron únicamente 55 mediciones, por esta razón se generaron 165 hidrógrafos a partir de datos históricos. Estos hidrógrafos fueron procesados utilizando MATLAB 7.10.0.499, R2010a (Mathworks Team, 2010) ajustando una recta de tendencia con el método de mínimos cuadrados, discriminando mediciones claramente anómalas, con base en el análisis de la curva histórica de cada pozo. El código utilizado para procesar los hidrógrafos se muestra a continuación:

```
clear all
close all
format long g
clc

[filename,pathname]=uigetfile('*.','Elija su archivo');
dat=load(filename);
sizedat=size(dat);
cont=0;
delete hidrotemp.temptxt
for ii=1:sizedat(1,1)
    if dat(ii,2)==-9999
        cont=cont+1;
    else M=[dat(ii,1),dat(ii,2)];
        dlmwrite('hidrotemp.temptxt',M,'delimiter','\t','-
append','precision','%4.2f','newline','pc');
        end
    end

if cont==sizedat(1,1)
    display('Este pozo no contiene datos de PNE, no se puede generar hidrografo')
    pause(2)
    break
end

newdat=load('hidrotemp.temptxt');
Tiempo=newdat(:,1);
PNE=newdat(:,2);
figure(1)
set(axes,'XDir','default','YDir','reverse'),hold on;
plot(Tiempo,PNE,'r','markersize',8),hold on;
```



```

plot(Tiempo,PNE,'g+', 'markersize',8);
minT=min(Tiempo);
maxT=max(Tiempo);

display ('Continuar con el procesamiento del hidrografo?');
display ('1=si');
display ('2=no');
value_choice=input("");
if value_choice==2
    break
end

clc
display ('Ha modificado datos manualmente?(modificar valores antes de continuar)');
display ('1=si');
display ('2=no');
value=input("");
if value==1
    newdat=load('hidrotemp.temptxt');
    Tiempo=newdat(:,1);
    PNE=newdat(:,2);
end
p = polyfit(Tiempo,PNE,1);
PNE_2010 = polyval(p,2010);
tasa = p(1,1);
tas_adjust = tasa*100;
tas_adjust = round(tas_adjust);
tasa = (tas_adjust/100)*(-1);
% display(['y = ',num2str(p(1,1)), 'x ',num2str(p(1,2))]);
Tiempofit=[1990:0.1:2010];
PNEfit=polyval(p,Tiempofit);
PNECORRELACION=polyval(p,Tiempo);
Corrcoef=corr(PNE,PNECORRELACION);
corr_adjust = Corrcoef*100;
corr_adjust = round(corr_adjust);
Corrcoef = corr_adjust/100;
figure(2)
set(axes,'XDir','default','YDir','reverse'),hold on;
plot(Tiempo,PNE,'k:');hold on
plot(2010,PNE_2010,'r+', 'markersize',16); hold on
plot(Tiempofit,PNEfit);
title(filename)
xlim([1990 2010])
%ylim([default max(PNEfit)+3])

```

```

legend('Datos originales','Proyección 2010',[ 'y = ',num2str(p(1,1)), 'x
',num2str(p(1,2)),' r= ',num2str(Corrcoef),' tasa = ',num2str(tasa),' m/año']);
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
grid on
xlabel('Año');
ylabel('PNE (m)');

totDat = size(Tiempo);
NumObs = totDat(1,1);

fitoutputfile=[filename,'fit'];
Mfit=[Tiempo,PNE];
dlmwrite(fitoutputfile,Mfit,'delimiter','\t','precision','%4.2f','newline','pc');
%append es para escribir consecutivamente sin borrar los archivos pasados
%(tener memoria en los datos y la manda a disco)

PNE_2010_adjust = PNE_2010*10;
PNE_2010_adjust = round(PNE_2010_adjust);
PNE_2010 = PNE_2010_adjust/10;

per_ini = min(Tiempo);
per_fin = max(Tiempo);

resumen = [PNE_2010, tasa, Corrcoef, NumObs, per_ini, per_fin];
resoutputfile=[filename,'res'];
dlmwrite(resoutputfile,resumen,'delimiter','\t','newline','pc');

```

A pesar de utilizar estos criterios de discriminación se generaron algunos valores anómalos que fueron descartados. Con las 55 mediciones proporcionadas se calculó el error porcentual al compararlas con los valores calculados. El error promedio obtenido fue del 4%, validando el proceso y las predicciones de todos los hidrógrafos. En ArcGIS (ESRI, 2009) se realizó una operación llamada *Topo to RASTER* con la cual a partir de los valores generados por los hidrógrafos y los de la base de datos se genera una superficie de valores continuos. Esta superficie generada en GIS se exportó a SURFER (Golden Software, 2010) con un tamaño de pixel de 90x90 para realizar la configuración del nivel potenciométrico usando el método de Kriging.

Kriging es un método geoestadístico de estimación de puntos que parte del principio de que la variación espacial continúa con el mismo patrón, es decir, que los puntos

cercanos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes (Chapra, S.C. et al., 2007).

En SURFER (Golden Software, 2010) se definió un área con elevaciones mayores a los 2410 metros en la cual la profundidad del nivel sobrepasa los 150 metros, valor que supera el máximo para la evaluación de la vulnerabilidad, por lo que a esta área se le asignó el valor fijo de 150 metros de profundidad para efectos prácticos. Esta área es la zona de recarga para el acuífero de la Ciudad la cual se delimita abriendo el DEM (*Digital Elevation Model*) de la Ciudad de México como un *contour map* (Figura 3.3) y aplicando la operación *Grid|Math, IF A>2410,150,0* sobre el *grid* del DEM para delimitar el área (Figura 3.4).

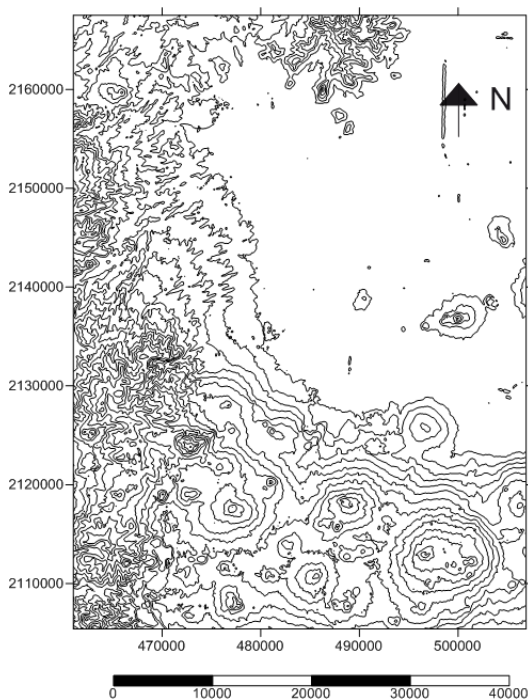


Figura 3.3 Líneas de contorno del DEM.

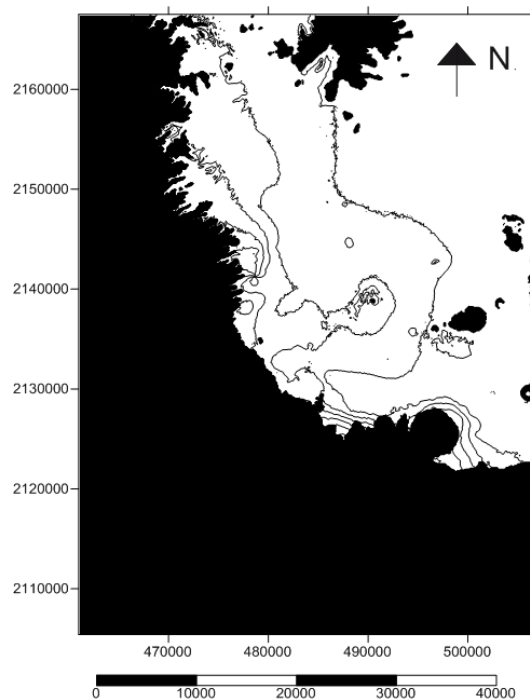
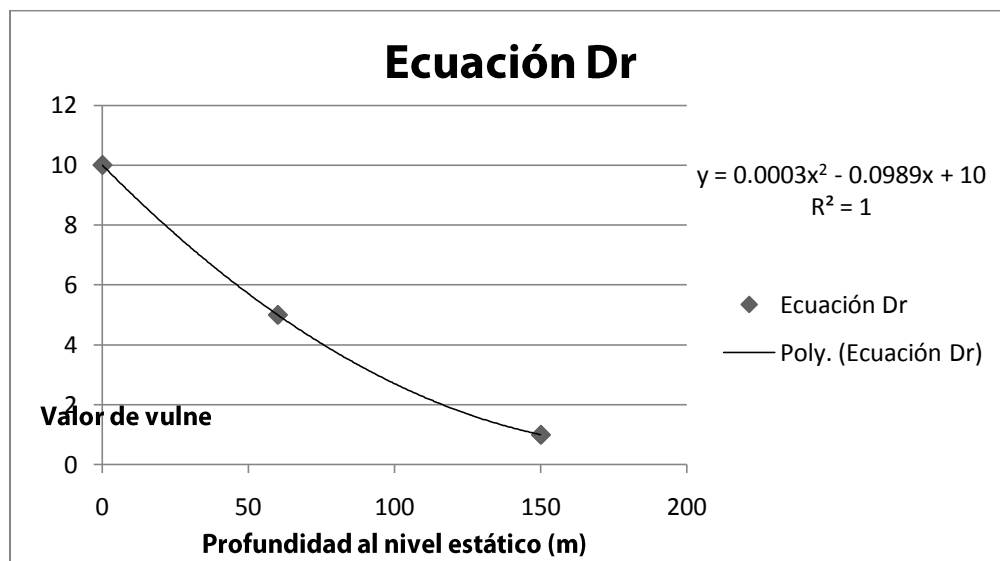


Figura 3.4 Delimitación del área de recarga.

Al tener delimitada el área de recarga se aplicó otra vez la operación *Grid|Math, IF A>2410,0,1* sobre el *grid* del DEM para asignar el valor de 150 al área de recarga y de 0 al resto. Al tener asignados los valores de esta manera se pudo sumar el *grid* que contenía

la piezometría con el del área de recarga y obtener valores para toda el área de la Ciudad. Esta operación se realizó con *Grid|Math*, A+B (A=área de recarga, B= piezometría del 2010).

Al tener valores para toda el área se pudo aplicar la función (Ec. 5) $y = 0.0003x^2 - 0.0989x + 10.0$ en la operación *Grid|Math* para generar el mapa de clases (Dr). Esta ecuación proviene del ajuste de los valores medio y extremos de la ponderación de DRASTIC para este parámetro (Gráfica 3.1).



Gráfica 3.1 Ecuación de ajuste para la profundidad al nivel estático.

3.3 R (Recarga)

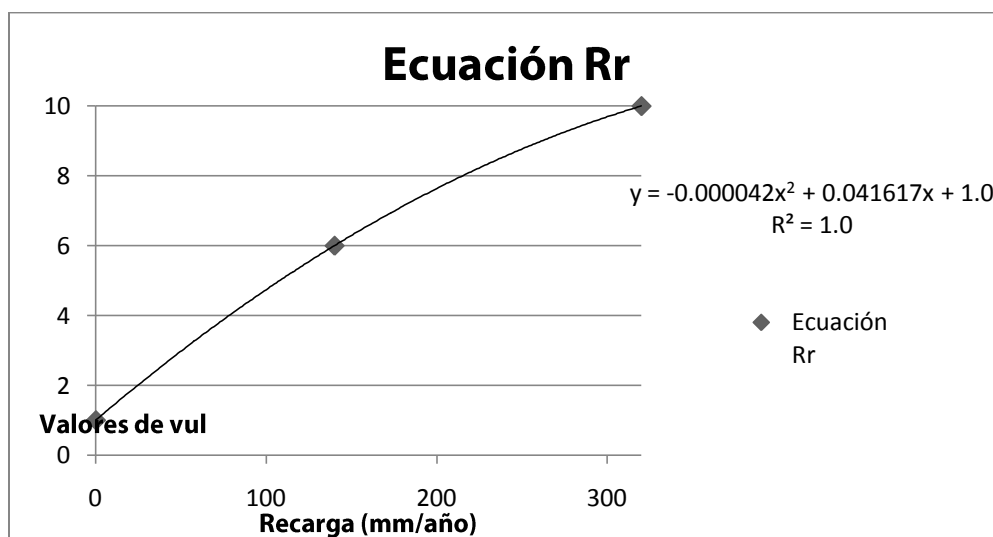
La recarga neta es el promedio anual del agua de lluvia que llega a infiltrarse a un acuífero desde la superficie incluyendo la infiltración anual promedio, en la 3.3 se observan los valores de vulnerabilidad originalmente propuestos por Aller et al. (1987).

La recarga neta fue estimada a partir de datos climatológicos de 2009 obtenidos de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional mediante un balance diario según la metodología establecida por Carrera-Hernández (2008). El mapa de

recarga utilizado en esta tesis fue creado por el Doctor Jaime Carrera Hernández en contribución al proyecto del que se desprende esta tesis. Existen algunas áreas al sur de la Ciudad para las cuales no existen valores ya que no están contempladas en la metodología utilizada. A partir de los valores de se determina el valor de vulnerabilidad relativa al aplicar la función (Ec. 6) mostrada en la Gráfica 3.2.

Recarga neta	
Intervalo (mm)	Clase
0 – 50	1
50 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Tabla 3.3 Valores para el factor de recarga neta.



Gráfica 3.2 Ecuación de ajuste para la recarga.

3.4 A (Medio acuífero)

En este parámetro se evalúa el potencial de transporte de un contaminante una vez que alcanza el medio geológico en el que se encuentra emplazado el acuífero.

Para el cálculo de la variable se tomó como base la descripción litológica de más de 350 pozos de la Ciudad de México (SACM, 2005), proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Las diferentes litologías están evaluadas de acuerdo a los valores propuestos por Aller et al. (1987) y estos ajustados dependiendo de la proporción que se presente de litologías base como arenas, arcillas, gravas y basaltos y según las características litológicas, el grado de compactación y la granulometría del material encontrado en el acuífero de Ciudad de México (Tabla 3.4). En cada uno de los pozos se ubicó la profundidad del nivel estático de 2010 para identificar la litología correspondiente al nivel de saturación y se le asignó el valor ponderado.

Material del acuífero			
Material original	Clase	Material en el área de estudio	Clase
Lutita masiva	1-3	Arcilla	1
Ignea/metamórfica	2-5	Andesita	2
Ignea/metamórfica alterada	3-5	Margas	2
Till glacial	4-6	Arcilla/Limo	3
Arenisca estratificada, caliza, lutitas	5-9	Ceniza volcánica	3
Arenisca masiva	4-9	Arcilla/Arena	4
Caliza masiva	4-9	Caliza	4
Arena y grava	4-9	Conglomerado	4
Basaltos	2-10	Toba	4
Caliza cárstica	9-10	Aglomerado	5
		Arena	5
		Basalto	5
		Basalto/Escoria	6
		Arena/Grava	7
		Escoria	7
		Escoria/Piroclasto	7
		Grava	9

Tabla 3.4 Valores de Ar para las distintas litologías, Modificado de Aller et al. (1987).

Posteriormente se realizó una interpolación en ArcGIS (ESRI, 2009) con los valores obtenidos aplicando un criterio de discriminación con el cual se descartaron los pozos que se encontraran a más de 500 metros de la ubicación de la que se reporta el corte litológico.

3.5 S (Suelos)

El parámetro de suelo toma en cuenta los materiales que predominan en la superficie de la región de estudio. El material original es con el que se desarrolló la metodología DRASTIC y el material en el área de estudio es la adaptación de estos materiales a los encontrados en el Distrito Federal (Tabla 3.5).

El parámetro S se calcula con base en los distintos tipos de suelo que existen en la Ciudad de México. Con ayuda de la cartografía edafológica disponible (INEGI, 2007) se determinó la distribución espacial de los diferentes tipos de suelo en el área de estudio. Los suelos presentes son los siguientes: Cambisol (B), Gleysol (Gsn), Phaeozems (H/HS), Litosol (I), Fluvisol (J), Luvisol (L), Histosol (O/OsN), Regosol (R), Andosol (T), Vertisol (V) y Solonchak (Z).

La descripción de los tipos de suelos se complementó con la clasificación del sistema FAO-UNESCO (*Food and Agriculture Organization*, 1974), la clasificación hecha por INEGI en las "Guías para la interpretación de Cartografía – Edafología (2007)". Estas unidades se describen a continuación:

Andosol (T)

Los Andosoles son suelos altamente porosos, de colores oscuros típicos de paisajes volcánicos. Se desarrollan a partir de material de origen volcánico como depósitos de ceniza, tobas, depósitos pumíticos u otro material rico en silicatos.

Estos suelos tienen una estructura en forma granular y bloques subangulares, son ricos en materia orgánica y aluminio. El fósforo presente se encuentra como fosfato inorgánico, siendo esencialmente insoluble y no se encuentra disponible para las plantas. Estos suelos poseen una gran capacidad de retención de humedad y una elevada susceptibilidad a erosionarse.

Cambisol (B)

Definidos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) como Inceptisoles, los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente, son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima, excepto en zonas áridas. El material parental, generalmente planicies aluviales, coluviales y/o depósitos eólicos con granulometría de fina a media, se transforma considerablemente, formando estructuras y decoloración, incrementando ligeramente el porcentaje de arcillas y la remoción de los carbonatos. También se caracterizan por presentar meteorización ligera a moderada y por ausencia de cantidades apreciables de arcilla, carbonato de calcio, fierro o magnesio.

Fluvisol (J)

Se correlacionan con los Fluventes y Fluvacuentes descritos por el USDA. Un Fluvisol es un suelo genéticamente joven (poco desarrollado) formado en depósitos aluviales. Además de presentarse en zonas influenciadas por ríos, también se pueden encontrar en valles y marismas costeras. Técnicamente estos suelos están definidos por un desarrollo insipiente o incluso inexistencia de un horizonte superficial y el material parental derivado de ríos, lagos o sedimentos marinos depositados por intervalos regulares o en el pasado reciente. Estos suelos exhiben un perfil estratificado que refleja la historia de depósito. El contenido de minerales y materia orgánica disminuyen conforme la profundidad aumenta.

Gleysol (Gsn)

Del ruso *Gley*, masa lodosa. Están relacionados con los Entisoles e Inceptsoles según el USDA *Soil Taxonomy*. Son suelos que presentan un exceso de humedad y que, a menos que sean drenados, se encuentran saturados permanentemente debido al mal drenaje desarrollando un característico patrón de color gléyico (esencialmente formado por colores rojizos, parduzcos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en las capas superficiales). El material parental corresponde a un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente fluviales, marinos y lacustres del Pleistoceno u Holoceno con mineralogía básica a ácida. Se forman en áreas deprimidas y posiciones bajas del terreno con niveles someros de agua subterránea. La prolongada saturación de agua y la falta de oxígeno producen una evidencia visual de la reducción del hierro, por lo que son poco aptos para el desarrollo de raíces y el crecimiento de plantas,

Histosol (O/OsN)

Mejor conocidos como suelos de pantano o suelos orgánicos, los Histosoles técnicamente están caracterizados como suelos de baja densidad, mal drenaje y con altas tasas de acumulación de materia orgánica en la parte superficial, formando una capa de hasta 80 cm, Esta materia orgánica puede o no estar mezclada con grandes cantidades de arena, limo o arcilla. Están confinados a cuencas y depresiones pobremente drenadas, pantanos y marismas con niveles de agua subterránea someros y áreas de tierras altas con una alta relación precipitación-evapotranspiración. Posee una elevada fertilidad, con el único inconveniente de su frecuente encharcamiento y subsecuente naturaleza anóxica.

Litosol (l)

Según la FAO los Litosoles forman parte de un grupo de suelos conocidos como Leptosoles, son suelos con una profundidad de perfil muy somera (aproximadamente 10 cm), indicando poca influencia de los procesos de formación de suelos. Se encuentran en áreas con condiciones topográficas de excesiva a moderada pendiente o con materiales geológicos relativamente recientes, ya sean roca o materiales no

consolidados con menos de 20 % de tierra fina. Debido a los continuos procesos de erosión por viento y agua y a la poca profundidad del suelo respecto a la ubicación de la roca madre o material parental los Leptosoles muestran poca o nula diferenciación de horizontes, característica de otros suelos como los Regosoles (FAO) o los Entisoles (USDA).

Luvisol (L)

Definidos como Alfisoles con arcillas de alta actividad según el USDA, los Luvisoles se caracterizan por el proceso de lavado o migración de arcillas que ocurre en las capas superiores y su acumulación en las capas inferiores formando un horizonte argílico. Tienen en la superficie la presencia de humus, sobreyaciendo la capa altamente lixiviada y desprovista de minerales arcillosos y minerales de hierro. Por debajo de estos horizontes, se encuentra la capa de acumulación de arcilla mezclada con altos niveles de iones de nutrientes disponibles como el Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio.

Phaeozems (H/HS)

Definidos como Udoles y Alboles por el USDA, son suelos porosos que presentan una capa superficial oscura (horizonte A mólico fino) seguida de un horizonte subsuperficial cámbico o árgico. Son ricos en materia orgánica y nutrientes, provienen de materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), tills y otros.

Los Phaeozems tienen un alto contenido de iones de Calcio disponibles unidos a las partículas de suelo, resultando en una estructura muy permeable y bien agregada, son muy parecidos a los Chernozems y Kastañozems pero debido a sus características físico-químicas están más intensamente lixiviados.

Regosol (R)

Los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados, producto de un material parental poco consolidado, con granulometría de fina a media. Carecen de horizonte diagnóstico y el desarrollo del perfil es mínimo debido a la edad joven o a la

formación lenta del suelo. Son particularmente comunes en zonas áridas y regiones polares o desérticas. Tienen una nula capacidad de retención de agua debido al drenaje interno excesivo.

Solonchak (Z)

Similar a los Andisoles según la clasificación del USDA, los Solonchaks están definidos por una alta acumulación de sal soluble en los primeros 30 cm de profundidad del perfil. Son formados a partir de material parental salino bajo condiciones de extrema evaporación, presentan hidromorfismo (Solonchak gléyico), manifestado por cierta reducción del hierro y la formación de un patrón de moteaduras o manchas al quedar en contacto con el aire, poseen además aproximadamente un 15% de saturación de sodio y algunos tienen en la superficie una capa arcillosa que sufre rupturas en forma de placas poligonales cuando se encuentra seca, propiciando que en ellos crezca vegetación de manglar y halófitas, inhabilitándolos para el desarrollo de actividades agrícolas.

Tipo de suelos				
Material original	Clase	Material en el área de estudio	Clasificación	Clase
Arcillas no agregadas y material no compacto	1	Andosol (T)	Arcillas no agregadas	1
Arcilla margosa	3	Luvisol (L)	Arcillas no agregadas	1
Limo margoso	4	Solonchak (Z)	Arcillas no agregadas	1
Marga	5	Gleysol (Gsn)	Arcillas no agregadas	1
Arenisca margosa	6	Histosol (O/OsN)	Arcillas no agregadas	1
Agregado arcilloso o comprimido	7	Vertisol (V)	Agregado arcilloso o comprimido	7
Arena	9	Phaeozem (H/HS)	Arenas	9
Fino o ausente	10	Fluvisol (J)	Arenas	9
Grava	10	Cambisol (B)	Grava	10
		Litosol (I)	Fino o ausente	10
		Regosol (R)	Fino o ausente	10

Tabla 3.5 Valores de vulnerabilidad relativa para cada tipo de suelo presente en el área de estudio.

Vertisol (V)

Los Vertisoles están caracterizados por tener aproximadamente un 30% de arcilla expansiva (principalmente montmorillonita) en los primeros 50 cm del perfil. Por esta razón, en épocas de secas se generan grietas de magnitud considerable que permiten una gran mezcla de materiales de diferentes horizontes formando así una unidad pedológica relativamente profunda y uniforme.

Estos suelos se forman a partir de rocas básicas como el basalto, en general son suelos oscuros con capas bien definidas de carbonato de calcio o yeso. Contienen altos niveles de nutrientes, sin embargo, debido al gran contenido de arcillas no son los mejores suelos para cultivar.

De acuerdo con la descripción de la FAO, de INEGI y los criterios de clasificación de la metodología DRASTIC se definieron valores de vulnerabilidad relativa para cada tipo de cobertura edáfica según se indica en la Tabla 3.5. El valor de 1 corresponde al tipo de suelo con menor vulnerabilidad, debido a la composición textural, en donde la presencia de arcillas es un factor que influye en la velocidad de transmisión de fluidos a través de los horizontes del suelo. De esta manera, el valor de 10 representa el material más vulnerable.

3.6 T (Topografía)

La variación que hay en la pendiente topográfica es un factor que determina la extensión de la escorrentía y el asentamiento de un contaminante que influye en su asentamiento para que se infiltre. En la Tabla 3.6 se observan los valores asignados por Aller et al. (1987) para la evaluación de este parámetro.

Para el cálculo de este parámetro se utilizan los Modelos Digitales de Elevación (DEM) que constituyen una representación digital de los valores de elevación de la superficie de la Tierra en intervalos horizontales espaciados regularmente. Estos modelos

representan, en un arreglo reticular, el valor aproximado de la elevación del terreno por lo que la resolución espacial del DEM es muy importante dependiendo de los fines para los cuales se pretenda utilizar la información. Mientras menor sea el tamaño de la celda de la retícula del DEM se considera que se tiene una mayor resolución espacial. Para este trabajo se utilizó una resolución de 90x90 m ya que algunos parámetros cuentan con muy pocos valores para realizar las configuraciones y con esta resolución se obtienen buenas configuraciones a pesar de la escasez de valores.

Topografía (pendiente %)	
Intervalo	Clase
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

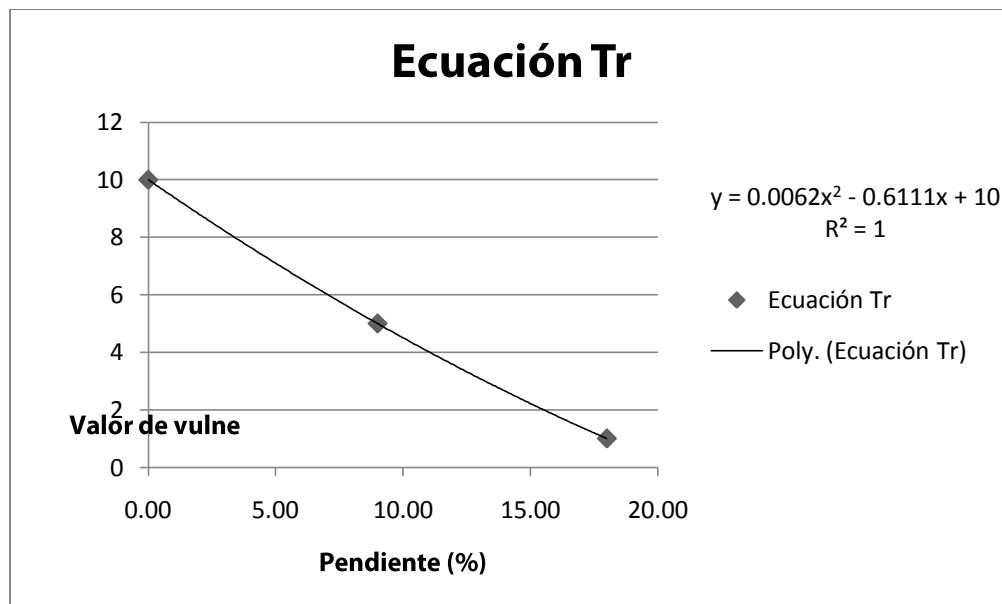
Tabla 3.6 Valores para el factor de topografía.

El DEM utilizado en este trabajo fue el modelo ASTER de la NASA (LP DAAC, 2006). En un principio se había comenzado a trabajar con el modelo de INEGI, pero presenta la limitante de que la unión entre mosaicos no es uniforme y hay variaciones notables en las aturas que reporta el modelo. Por esta razón se utilizó el modelo que proporciona la NASA que tiene una muy buena continuidad en las alturas y buena definición de píxeles.

El cálculo de la vulnerabilidad comienza exportando de Global Mapper (Global Mapper Software LLC, 2010) el archivo del DEM del área de estudio con el comando "Export RASTER and Elevation Data" en el formato Surfer Grid (Binary v7 Format), en metros con un *Sample spacing* de 90 x 90. En SURFER (Golden Software, 2011) se abre el archivo exportado como un image map, después se utiliza el comando *Grid|Calculus* para seleccionar este *grid*, después *Slope|Terrain Modeling|Terrain Slope* para generar un *grid* con el cálculo de la pendiente en grados. Utilizando *Grid|Math* se cambia de grados a

radianes el *grid* de la pendiente con la ecuación $C = ((A*3.1416)/180)$, después con *GridMath* se cambia de radianes a porcentaje con la ecuación $C=TAN(A)*100$.

Para este parámetro también se requirió generar una ecuación de ajuste para obtener valores continuos. En este caso se obtuvo una recta con la ecuación (Ec. 7) $y = 0.0062x^2 - 0.6111x + 10$ - 0.6111x + 10 (Gráfica 2.3).



Gráfica 3.3 Ecuación de ajuste para la topografía.

Para que la ecuación pueda aplicarse correctamente se requiere fijar en 18 todos los valores de pendiente mayores a este valor, ya que cualquier pendiente mayor a 18% posee el mismo valor de vulnerabilidad. Esta discriminación de valores se realiza con la operación *GridMath* con la condición $IF A > 18, 18, A$.

Una vez teniendo todos los valores en el rango de 0% a 18% se aplica la función de clase obtenida ($y = 0.0062x^2 - 0.6111x + 10$) con el comando *GridMath* para obtener el mapa de vulnerabilidad relativa Tr que presenta valores que van de 1 a 10, siendo los más bajos los de menor vulnerabilidad.

3.7 I (Impacto a la Zona Vadosa)

Los valores asignados a este parámetro fueron modificados de Aller et al. (1987) para ajustarse a la litología que se encuentra en la Cuenca de México. El ajuste se realizó con base en la permeabilidad empírica que presenta cada roca ya que en este parámetro se cuantifica la potencial infiltración (advectiva) de un contaminante a través de un paquete de roca. Se tomaron en cuenta algunas litologías base como las arenas, arcillas, basaltos y gravas y con estas se ajustaron las demás litologías dependiendo de la proporción en la que estas litologías principales se presentan (Tabla 3.7).

Material de la zona vadosa			
Material	Clase	Material en el área de estudio	Clase
Capa confinante	1	Arcilla	2
Limo/arcilla	2-6	Arcilla/Limo	3
Lutita	2-5	Ceniza volcánica	3
Caliza	2-7	Margas	3
Arenisca	4-8	Andesita	4
Caliza estratificada, arenisca, lutita	4-8	Arcilla/Arena	4
Arena, grava con limo, arcilla	4-8	Caliza	5
Ignea/metamórfica	2-8	Toba	5
Arena y grava	6-9	Arena	6
Basalto	2-10	Basalto	6
Caliza cárstica	8-10	Conglomerado	6
		Basalto/Escoria	7
		Aglomerado	8
		Arena/Grava	8
		Escoria	8
		Escoria/Piroclasto	8
		Grava	9

Tabla 3.7 Valores para el factor de impacto a la zona vadosa, modificado de Aller et al. (1987).

La información litológica se tomó de los cortes litológicos que existen de la Ciudad, proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM, 2005). Una vez identificada la profundidad del nivel estático en cada uno de estos cortes se realiza una

ponderación del porcentaje que representa el espesor de cada una de las diferentes unidades con respecto a la profundidad total de la superficie hasta la profundidad del nivel estático (PNE).

De esta ponderación se obtuvo un valor único para ese pozo con el que se realizó una interpolación para evaluar la vulnerabilidad. Se utilizó un criterio de discriminación con el que se descartaron los pozos que se encontraran a más de 500 metros de la ubicación de la que se reporta el corte litológico. Los datos utilizables fueron interpolados en ArcGIS (ESRI, 2009) con el método *Inverse distance weighting* (IDW) con un tamaño de pixel de 270x270 m. El método IDW se basa en que la influencia relativa entre un punto y otro disminuye conforme aumenta la distancia entre los puntos a interpolar y el punto a crear (Chapra, S.C. et al., 2007).

3.8 C (Conductividad hidráulica)

Con este factor se mide la tasa de movimiento del agua subterránea dentro del acuífero, lo que afecta la velocidad a la cual se puede desplazar un contaminante en la Tabla 3.8 se observan los valores propuestos por Aller et al. (1987) para determinar la vulnerabilidad de la conductividad hidráulica.

Conductividad hidráulica (m/d)	
Intervalo	Clase
0.040746 – 4.0746	1
4.0746 – 12.2238	2
12.2238 – 28.522	4
28.522 – 40.746	6
40.746 – 81.492	8
>81.492	10

Tabla 3.8 Valores para el factor de conductividad hidráulica.

Para obtener el parámetro de la conductividad hidráulica (K) del acuífero de la Ciudad de México se realizaron cinco distintas interpretaciones de los datos existentes:

1) Valores de K reportados por SACM (2005)

El primer paso consistió en la recopilación de los 44 valores de transmisividad mostrados en la Tabla 5.1. A primera vista destacan 13 valores muy bajos y 3 muy altos. Estos últimos son considerados como valores extremos de velocidad de infiltración.

2) Valores de K por el método de Rushton, FI

Se reinterpretaron 23 pruebas de bombeo de las 55 compiladas de SACM (2005) con el método de Rushton (1988). Este método considera el flujo radial hacia el pozo con componentes verticales. La representación del flujo hacia la zona del pozo de bombeo se realiza mediante una malla regular radial, donde los intervalos desde el centro del mismo hasta la frontera lateral se incrementan logarítmicamente.

La aplicación de este método se realizó con la ayuda del software *Visual-Two Zone Model* (Hernández, N. L., 2008). En el software se ingresa la información de la prueba de bombeo así como el modelo conceptual generado a partir del corte litológico del pozo de bombeo y con ellos se calcula una curva teórica. Posteriormente se ingresan los datos de Tiempo-Abatimiento que representan la curva de campo, esta curva debe calibrarse con análisis de sensibilidad hasta que se logra ajustar a la curva teórica, de esta forma se determinan los valores de los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica saturada K, coeficiente de almacenamiento específico Ss, rendimiento específico Sy).

3) Valores de K reportados por Vázquez (1987)

Vázquez (1987) reinterpretó 31 pruebas de bombeo de las 55 recopiladas de SACM (2005).

4) Valores de K interpretados por métodos convencionales, reportados por Vázquez (1987).

29 pruebas de bombeo compiladas del SACM (2005) fueron reinterpretadas por Vázquez S. (1987), con métodos estándar (Cooper & Jacob, 1946; Hantush, 1964; Theis 1935; Boulton & Streltsova, 1978; Boulton, 1954; Neuman, 1974; Walton, 1962); Los valores obtenidos por métodos convencionales son más bajos que obtenidos por métodos numéricos, como se puede observar en la Tabla 5.1.

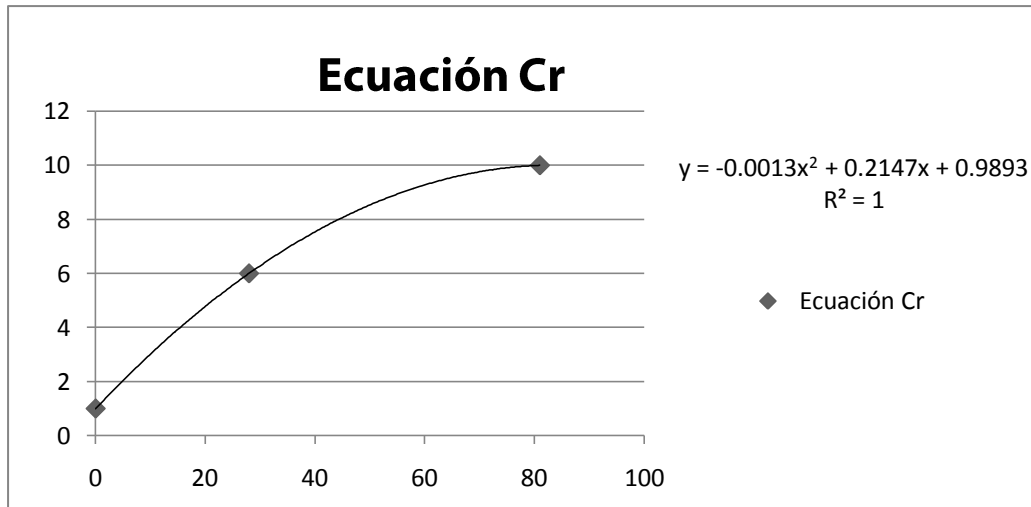
5) Valores de K de la Facultad de Ingeniería utilizando espesores saturados del año 1993 y 2010

Utilizando los valores de transmisividad de SACM (2005) y los datos de espesores de acuífero de 41 pozos se calcularon los 27 valores de K que se muestran en la Tabla 5.1. En 28 pozos no se tuvo información de la posición del nivel estático.

Con los datos del espesor saturado del acuífero para 2010, obtenidos de 34 pozos de SACM y con la información de transmisividad de 11 pruebas de bombeo de Vázquez (1987) y 3 de SACM se obtuvieron 48 valores de K que se muestran en la Tabla 5.1. Con la información de SACM de 21 pozos no pudo fijarse la profundidad al nivel estático.

A los valores de k obtenidos por los distintos métodos se les aplicó la Ecuación 8:

$y = -0.0013x^2 + 0.2147x + 0.9893$ (Gráfica 3.4) para generar datos continuos y crear el mapa de vulnerabilidad del parámetro C.



Gráfica 3.4 Ecuación de ajuste para la conductividad hidráulica.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL MEDIO NATURAL

4.1 Climatología e Hidrología de superficie

4.2 Geología

4.2.1 Estratigrafía

4.2.2 Geología Estructural

4.3 Hidrogeología

4.3.1 Acuitardo superior

4.3.2 Acuífero superior

4.3.3 Acuífero inferior

4.3.4 Acuífero calcáreo

DESCRIPCIÓN DEL MEDIO NATURAL

4.1 Climatología e Hidrología de superficie

Dentro de la gran variedad de climas que conforman la Cuenca de México predomina, de acuerdo a la clasificación de Köpen, el Templado Subhúmedo (Cb(Wo)(W)) el cual se encuentra distribuido en la mayor parte del Distrito Federal. Es el más húmedo de los climas templados con un porcentaje de lluvia invernal menor al 10%. La variación del Templado Subhúmedo (Cb(W₂)(W)) es menos húmeda con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor a 5% (CONAGUA, 2002), este se distribuye en el área restante de la ciudad.

El régimen de lluvias para la cuenca depende del clima asociado a la región, por ello se identifican dos tasas de precipitación. La que corresponde al clima Templado Subhúmedo (Cb(Wo)(W)) es de entre 500 y 600 mm con una temperatura media anual de entre 8° y 11° C. En el mes de junio se registra la mayor precipitación que varía entre 100 y 110mm, en febrero y diciembre se registra la mínima que es menor a 5 mm. La temperatura más alta se registra en junio con valores de 12° a 15°, la más fría se reporta de diciembre a febrero con valores de 3° a 5° C.

En la región correspondiente al clima Templado Subhúmedo (Cb(W₂)(W)) la precipitación media anual es mayor a 700 mm y la temperatura media anual varía entre 12° y 18° C. La incidencia máxima de lluvias se da en julio con valores de 150 a 160 mm. La menor precipitación se da en febrero y diciembre.

La zona de la Ciudad de México pertenece a la región Hidrológica No. 26 Alto Pánuco y comprende las subregiones hidrológicas I Xochimilco, II Churubusco, III Ciudad de México y de manera parcial a la región hidrológica VII Texcoco. Estas regiones se

caracterizan por tener presas, ríos y canales entubados (Figura 4.3). En la zona poniente de la Ciudad predominan las presas y ríos, y en el centro los canales y ríos entubados.

La zona I Xochimilco incluye las cuencas de los ríos que descienden de la Sierra de Chichinautzin. Los principales ríos de la zona son: San Gregorio, Santiago, San Lucas y San Buenaventura. Esta zona tiene una superficie aproximada de 522 km², la longitud de las corrientes es de 46.0 km con un régimen perenne y cauces estables. Los principales canales dentro de esta zona son: Cuemanco, Nacional, Bordo, Apatlaco, Chalco y De Garat, los canales Cuemanco y Apatlaco no se encuentran entubados (CONAGUA, 2002).

En la zona II Churubusco encontramos las cuencas de los ríos Eslava, Magdalena, Barrancas San Jerónimo, Anzaldo, Barranca Coyotes, Barranca Texcalatlaco, Barranca Tetelpa, Barranca de Guadalupe, Barranca del Muerto, Tarango y Mixcoac. A causa de las condiciones topográficas y morfológicas de los suelos en los que se encuentran los cauces, estos son estables. En las partes altas, el régimen de la mayoría de estos ríos es intermitente, en las partes bajas se han convertido en perennes a causa de las descargas de aguas negras sobre todo los ríos Mixcoac, Magdalena y Eslava. Esta zona cubre una extensión de 234 km² y la longitud de las corrientes principales es de 28 km. Dentro de esta zona se localizan as presas Texcalatlaco y Mixcoac (CONAGUA, 2002).

La zona III corresponde a la ciudad de México, esta está compuesta por las cuencas de los ríos Becerra, Tacubaya, Tecamachalco, San Joaquín, Tornillo, Hondo, Sordo, Barranca los Cuartos, Totolica, Chico de los Remedios, San Mateo Nopala, Barranca Tepaxtlaxco, Río de los Remedios, Tlanepantla, y San Javier. Incluye gran parte del área urbana de la Ciudad de México y los ríos que bajan desde el poniente de la Ciudad. Salvo los ríos Tacubaya, San Joaquín, Hondo, y Tlanepantla que tienen escurrimientos perennes, los demás son corrientes intermitentes. Esta zona comprende una extensión de 725 km² y la longitud de las corrientes principales es de 57.5 km. Las presas que se encuentran dentro de esta zona son: Madín, Los Cuartos, el Sordo, San Joaquín, Tecamachalco, Tacubaya y Becerra (CONAGUA, 2002).

En la Figura 4.1 se pueden observar los principales cuerpos de agua superficiales así como la disposición del drenaje profundo de la ciudad.

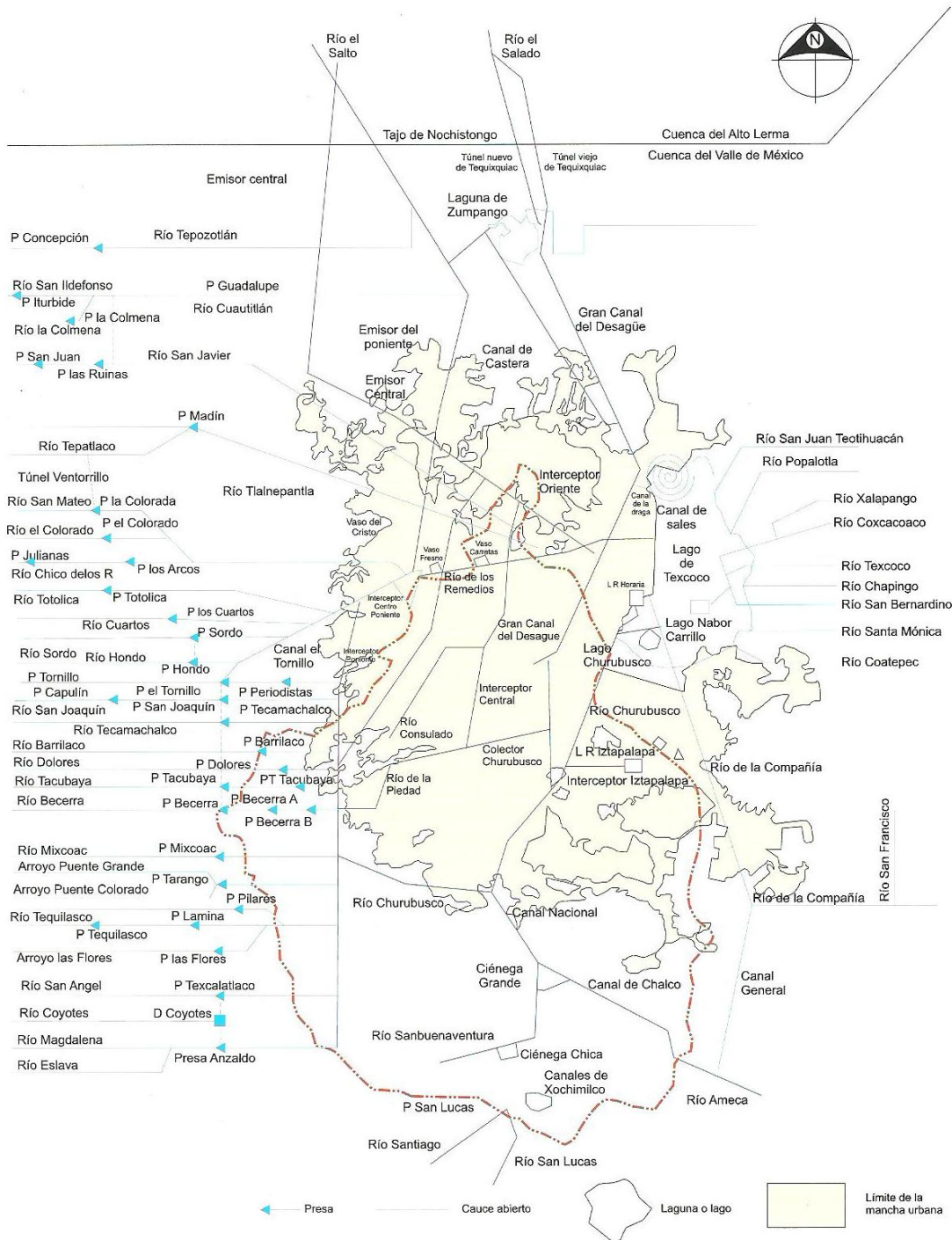


Figura 4.1 Distribución del sistema de drenaje de la ciudad de México al final del segundo milenio (Santoyo, 2005)

4.2 Geología

La Cuenca de México de aproximadamente 9600 km² (Aguayo et al., 1989) se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana que se extiende de este a oeste atravesando la República Mexicana (Figura 4.2). El vulcanismo predominantemente es calcoalcalino, y varía en composición desde basáltico a riolítico. Las rocas más abundantes son de composición intermedia. Presenta un cambio a composición alcalina en los extremos oriental y occidental (Ferrari, 2000).

En la Cuenca predominan los derrames basálticos, volcanes y lagos con una distribución, morfología y orientación que permite inferir que están situados en fosas tectónicas por lo que se le nombró como Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente (CONAGUA, 2002).

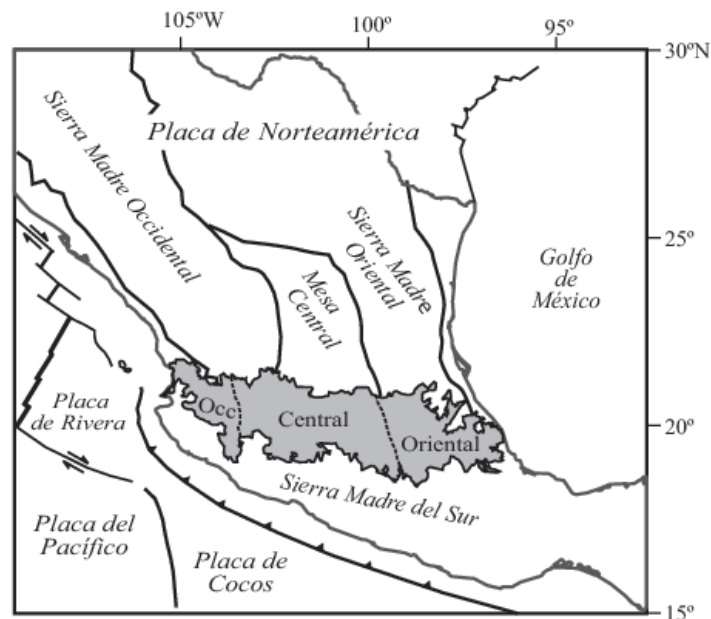


Figura 4.2 Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena et al., 2005)

La Cuenca se encuentra rodeada por elevaciones topográficas volcánicas, al norte por la Sierra de Guadalupe, al sur por la Sierra de Chichinautzin, el Ajusco al suroeste, la Sierra Nevada al oriente y la Sierra de Santa Catarina al este (CONAGUA, 2002).

El surgimiento de la Sierra del Chichinautzin en el Cuaternario, a partir de abundantes emisiones de basalto, modificó el régimen de escurrimiento de la cuenca al cerrarla en el sur haciéndola endorreica. Con este cierre se empezó a acumular agua en el centro de la Cuenca dando origen a los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac que comenzaron a ser rellenados junto con las planices por depósitos aluviales y lacustres. Los depósitos lacustres ocupan más de 1200 Km² de superficie dentro de la zona de la Ciudad de México (Aguayo et al., 1989). Hacia las zonas altas encontramos primero la zona de transición conformada por clásticos fluviales y aluviales intercalados localmente con las arcillas lacustres, después tenemos la zona de lomas de origen volcánico (Santoyo et al., 2005).

4.2.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica del Distrito Federal que se muestra en la Tabla 4. 1 está compuesta por las siguientes unidades:

Para el Cenozoico se distingue la Unidad del **Cuaternario Sedimentario (Qs)** a la que corresponden las formaciones de Depósitos aluviales (Qal) y Depósitos lacustres (Qla). Según Vázquez y Palomera (1989) los depósitos aluviales comprenden conglomerados, brechas con intercalaciones de arcillas, tobas y derrames basálticos y andesíticos del Pleistoceno-Holoceno. Los depósitos lacustres del Pleistoceno Tardío-Holoceno agrupan los sedimentos clásticos y productos piroclásticos del Popocatepetl y la Sierra del Chichinautzin que Vázquez y Palomera (1989) determinan que se depositaron en un ambiente lacustre. En el centro de la planicie de la Ciudad de México tenemos los mayores espesores de esta unidad que pueden alcanzar los 300 m, los cuales van disminuyendo hacia las zonas altas donde se interdigitan con los depósitos aluviales (Vázquez y Palomera, 1989).

La siguiente unidad es la del **Cuaternario Volcánico (Qv)** en que se agrupan las Formaciones Chichinautzin (Qc), Popocatépetl (Qp), Iztaccíhuatl (Qi) y la Unidad Aluvial Volcánica (Qalv). La Formación Chichinautzin se encuentra interdigitada con depósitos lacustres y de aluvión. Esta formación se encuentra compuesta por todo el volcanismo monogenético principalmente estromboliano con edad y características parecidas en la Cuenca de México y sus alrededores, las lavas son de naturaleza masiva o lajada, muy extensas y vesiculares; la composición es andesítico-basáltica y andesítica (Vázquez y Palomera, 1989). La Formación Popocatépetl está constituida por bloques lávicos, lapilli, líticos, flujos de cenizas, andesitas básicas, pómez, cenizas, flujos piroclásticos y derrames lávicos interdigitados con clastos fluviales hacia las llanuras (Vázquez y Palomera, 1989). Subyaciendo con ligera discordancia a las Formaciones Chichinautzin y Popocatépetl encontramos la Formación Iztaccíhuatl que consta de secuencias efusivas de composición andesítico-basáltica a dacítica que inician con derrames lávicos, algunos autobrechados con intercalaciones de tobas líticas y brechas tobáceas, y terminan con cuerpos dómicos (Vázquez y Palomera, 1989). Principalmente las Formaciones Popocatépetl y Chichinautzin presentan interdigitaciones con clastos aluviales (Qalv) (Vázquez y Palomera, 1989).

La tercera unidad corresponde a la **Unidad Volcánica Superior – Grupo Tarango (Qt)** que incluye las Formaciones Tláloc (Qt), El Pino (Qpp) y Llano Grande (Qllg). Se pueden observar secciones de referencia de la Formación Tláloc en el flanco poniente de la Sierra de Río Frío que constan de varias sucesiones de pómez y líticos angulosos tamaño lapilli, flujos de cenizas cristalinas, vítreas y de pómez con composiciones andesíticas, latíticas y dacíticas (Vázquez y Palomera, 1989). En la Formación El Pino tenemos rocas extrusivas de composición principalmente máfica constituidas por secuencias de flujos lávicos con intercalaciones de tefra, lapillis líticos y escoria tamaño lapilli que forman los cerros de La Estrella, El Pino, Chimalhuacán y otros aislados (Vázquez y Palomera, 1989). Las secuencias que constituyen a la Formación Llano Grande constan de capas delgadas de lapilli pumítico y lítico de caída, flujos de cenizas vítreas, derrames lávicos y domos

(Vázquez y Palomera, 1989). Las Formaciones El Pino y Llano Grande se encuentran cubiertas discordantemente por la Formación Tláloc según Vázquez y Palomera (1989).

Es en la unidad del Cuaternario Volcánico y la unidad Volcánica Superior – Grupo Tarango donde se ha detectado que se encuentra alojado el acuífero de extracción de la Ciudad de México.

Posteriormente se tiene la **Unidad Volcánica Inferior** compuesta por depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc), la Formación Las Cruces (Tpc), las Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío (Tpb), la Formación Otomí (Tpo), los Depósitos Volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv), las Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv), el Grupo Pachuca (Tomp) y las Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv). Los depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno se encuentran interdigitados con unidades volcánicas de todo el Plioceno según Vázquez y Palomera (1989); la Formación Las Cruces al Occidente de la capital consta de depósitos piroclásticos en algunos casos cubiertos o interestratificados con aluvión y paleocanales fluviales y lavas intercaladas con brechas (Vázquez y Palomera, 1989); los depósitos Volcánicos del Plioceno Temprano los encontramos en los flancos de la Sierra de las Cruces y coronando la sierra de Guadalupe, estos varían de composición andesítica a dacítica e incluyen secuencias piroclásticas generalmente no consolidadas (Vázquez y Palomera, 1989); las Rocas extrusivas del Mioceno medio y tardío se ubican en los cerros El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra de Guadalupe y de la Sierra de las Cruces constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas interestratificadas en algunos sitios con brechas volcánicas (Vázquez y Palomera, 1989); el Grupo Pachuca incluye secuencias de material clástico, brechas volcánicas, piroclastos, derrames lávicos que van de basalto a riolita, y tobas intercaladas; por último, las Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano constan de secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados interestratificados o cubiertos por derrames lávicos. Dentro de las

secuencias volcánicas se encuentran clásticos aluviales que indican periodos de calma en la actividad volcánica (Vázquez y Palomera, 1989).

Subyaciendo la Unidad Volcánica Inferior se ha detectado al **Grupo Balsas (Teob)** que es un conglomerado oligomítico calizo compacto con matriz limosa cementada por calcita y óxido de hierro. Localmente se observan interestratificaciones de yeso y caliza lenticulares y derrames basálticos e intercalaciones de toba riolítica. Esta unidad es un depósito post-orogenia Laramide que se acumuló al mismo tiempo que se daba un fallamiento normal lateral derecho y volcanismo basáltico (Vázquez y Palomera, 1989).

Por último, el basamento está compuesto por la **Unidad Sedimentaria Marina** del Mesozoico compuesta por las Formaciones Mezcala (Kmx), Cuautla (Kc), Morelos (Km) y Xochicalco (Kx). La Formación Mezcala, es una secuencia Flysch originada posiblemente por el levantamiento y erosión del arco magmático del Cretácico, que consta de una interestratificación gradual rítmica de grauvacas, limolitas y lutitas con ambiente de depósito de aguas someras (Vázquez y Palomera, 1989). Se encontró en el pozo Michuca-1 a profundidades entre 1720 y 1850 m. Se determinó la existencia de esta Formación por la presencia de microfósiles como *Margino-truncana* s.p. y *Archeoglobigerina* s.p. pertenecientes al Turoniano-Maastrichtiano (Vázquez y Palomera, 1989). Después tenemos la Formación Cuautla que está formada por calcarenitas de estratificación gruesa con biostromas de rudistas que fue identificada en los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 a profundidades de 1575 m y 2100 m respectivamente (Vázquez y Palomera, 1989). Más abajo se encuentra la Formación Morelos de la que se encontraron espesores incompletos a profundidades de 2060 m y 2160 m en los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 respectivamente, está compuesta por una interestratificación de capas gruesas de calizas y dolomías diagenéticas (Vázquez y Palomera, 1989). Por último se infiere la existencia de la Formación Xochicalco que es de ambiente marino de cuenca relativamente profunda y consta de una secuencia de calizas calcilutíticas y calcilimolíticas en capas delgadas a medianas con laminación fina, contenido variable de carbón y abundantes vetillas de calcita (Vázquez y Palomera, 1989).

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

Tabla 4.1 Columna Estratigráfica

Esta descripción estratigráfica realizada por Vázquez y Palomera (1989) resulta ser la más completa. Existen otras realizadas por autores como Fries (1960), Segerstrom (1961), Schlaepfer (1968), Mooser (1988), De Cserna et al. (1988) pero existen grandes inconsistencias entre todas ellas, sobre todo en cuanto a la Formación Tarango de Bryan (1948) para la cual existen discrepancias sobre qué unidades incluir y cuál es su extensión.

El mapa geológico (Figura 4.3) de la Ciudad de México fue realizado por el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en el que se muestran las principales Formaciones geológicas de la ciudad.

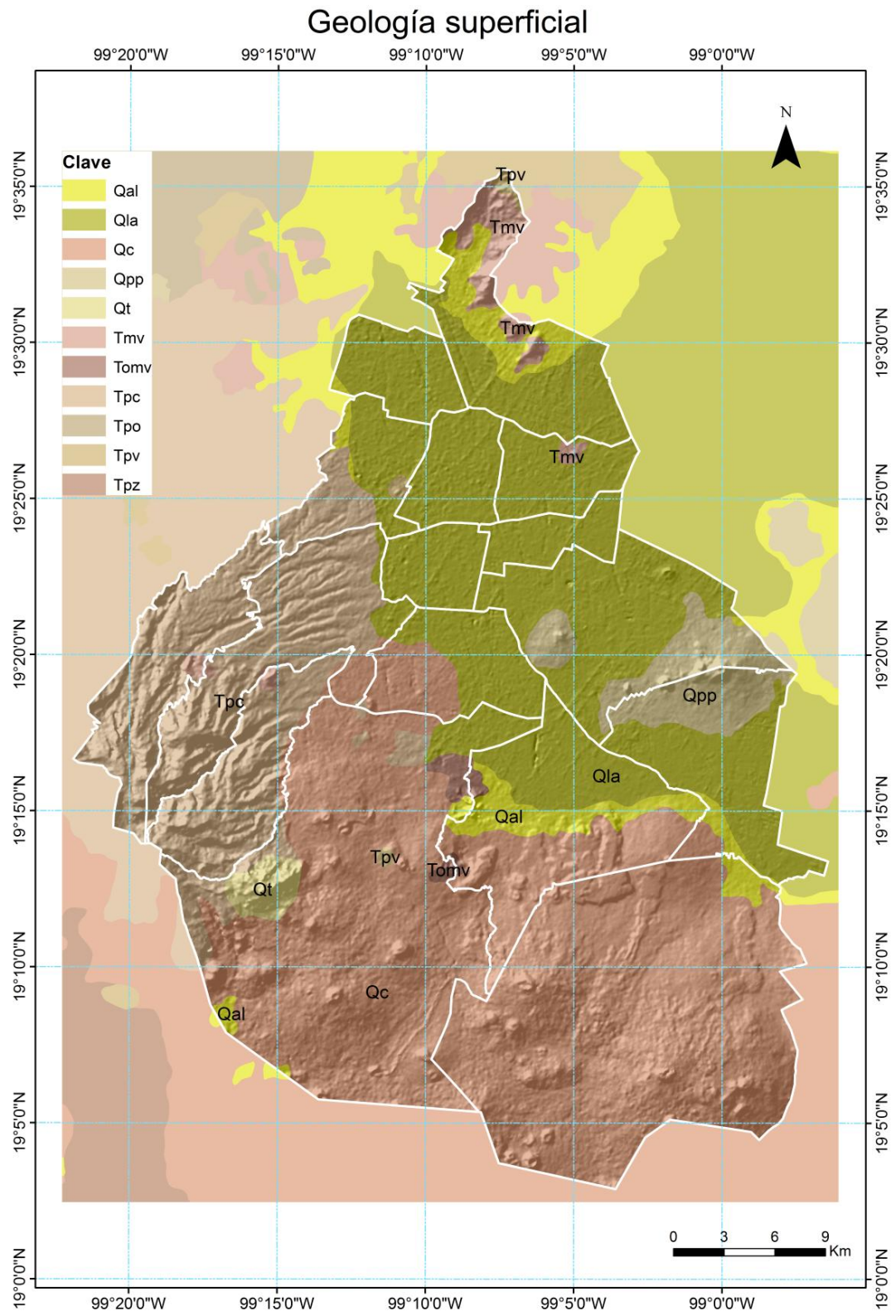


Figura 4.3 Mapa geológico de la Ciudad de México.

4.2.2 Geología Estructural

Según Aguayo et al. (1989) existen tres tipos de fallas en la zona de la Ciudad de México:

1.- Fallas profundas. Estas no tienen una expresión superficial y sólo afectan las unidades profundas. Se infiere que se encuentran inactivas desde el Mioceno. Estas son:

- Falla Mixhuca, con orientación NW-SE, el salto hacia el oriente varía entre 1650 a 2050 metros.
- Graben Copilco, con orientación N-S y un salto promedio de 130 m
- Graben Narvarte formado por dos fallas de corta longitud, orientación N-S y salto de aproximadamente 30 m.

2.- Fallas locales. Ocasionadas por el desplazamiento superficial en zonas de inestabilidad en los flancos de altos estructurales.

- Falla Aeropuerto. En la Calzada Ignacio Zaragoza con orientación N-S y un salto de 20 metros al oriente.
- Graben Peñón del Marquez. Formado por dos fallas de corta longitud con salto de 30 metros y orientación N-S.
- Graben Tenochtitlán. Se extiende N-S en la depresión del antiguo lago de México desde Viaducto Piedad hasta la Colonia Morelos.

3.- Fallas locales. Formadas alrededor de los Cerros de la Estrella y el Peñón de los Baños por movimientos verticales a causa de deslizamientos de los estratos volcánicos y sedimentos superficiales.

Durante la etapa de campo de este proyecto se realizaron levantamientos de algunos lineamientos en la Ciudad de México que han sido causados por el efecto de subsidencia. Entre estos tenemos los presentes en la zona de la FES Zaragoza, que tienen una dirección preferencial de 36° SE y los de la zona de Guelatao con rumbo de NE 47°. En estas zonas encontramos grandes potencias de arcillas por lo que podemos asociar

estos lineamientos con los efectos causados por la subsidencia del terreno generada por el bombeo.

4.3 Hidrogeología

Para este trabajo se divide la hidrogeología de la Ciudad de México en cuatro grandes unidades: Acuitardo superior (compuesto por arcillas), Acuífero superior (Unidad Volcánica Superior – Grupo Tarango), Acuífero Inferior (Unidad Volcánica Inferior) y Unidad Sedimentaria Marina (Acuífero calcáreo?).

4.3.1 Acuitardo superior

En el acuitardo de arcillas se han detectado varios componentes según Santoyo et al. (2005).

- 1.- Una costra superficial que es más profunda en el Centro Histórico y se adelgaza hacia las orillas de lo que era la zona lacustre.
- 2.- Capa superior de arcillas, de blandas a muy blandas
- 3.- Una capa dura entre las formaciones arcillosas, a 33 y 37 metros de profundidad, compuesta por limos arenosos con algo de arcilla y algunas gravas.
- 4.- Capa inferior de arcillas, más consolidadas
- 5.- Depósitos profundos compuestos por materiales granulares

El espesor de esta capa es muy variable pero utilizando la información disponible de 148 cortes litológicos y tomando en cuenta sólo la primera capa de arcillas limpias hemos inferido que los espesores varían de 0 a 110 m de potencia.

Con el tiempo y el constante bombeo, las arcillas de esta capa han sufrido compactación y fracturamiento. Estas fracturas han permitido la infiltración a través del acuitardo desde hace más de 50 años, el bombeo excesivo hizo que la presión de poro de las arcillas disminuyera notablemente y al comenzarse a consolidar empezó a ceder agua,

dejó de ser una barrera protectora para el acuífero y se volvió una fuente de recarga para el acuífero aluvial al tener un flujo descendente (Durazo, 1996). Este fenómeno se puede observar sobre todo en la zona Oriental de la ciudad, Iztapalapa, Ixtapaluca, Tláhuac, Xochimilco y San Antonio Tecomitl. Esta capa se caracteriza por su alto contenido de agua, de 421% a 574% (Mesri et al. 1975)

4.3.2 Acuífero superior

Por debajo del acuitardo arcilloso se localiza el acuífero volcánico-aluvial-piroclástico (Unidad Volcánica Superior) compuesto por depósitos piroclásticos del Cuaternario, depósitos aluviales del Cuaternario provenientes de las partes altas al Oeste de la Ciudad, depósitos volcánicos del Pleistoceno, depósitos fluviolcustrés del Plioceno alternados en arenas, tobas pumíticas, conglomerados, derrames de andesitas de más de 300 m, derrames de basalto, tezontle, capas de cenizas, estratos de arcillas de lagos de esa edad y sedimentos piroclásticos arrastradas por aluviones desde el norte y el Poniente, y rocas volcánicas al sur de la Ciudad. Esta unidad representa el acuífero de abastecimiento de la Ciudad de México.

En 1964 la Secretaría de Recursos Hidráulicos realizó una serie de perforaciones (Av. de los 100 Metros, San Juan de Aragón, Tláhuac, San Joaquín, Castañeda, Centenario, Coapa 7 y 8) y por la información que estos brindaron (Veytia, 1975) se estimó el espesor de este acuífero en más de 1000 metros en los cuales se encuentran tobas, brechas volcánicas, conglomerados, intercalaciones de lava y alternancias de piroclastos con depósitos fluviales. La extracción en este acuífero se lleva a cabo en los primeros 300 metros de espesor de donde se obtienen caudales de 65 a 214 l/s con buena calidad.

El comportamiento de este acuífero resulta libre en las zonas altas, en los abanicos piroclásticos, en las llanuras y aluviales, se comporta como confinado por depósitos lacustrés del Cuaternario en las zonas de planicies y como semiconfinado en la parte

central de la Cuenca donde por encima se encuentra el paquete de arcillas lacustres (Leyva, 2010).

En sus orígenes, este acuífero estaba confinado por el acuitardo arcilloso en toda la superficie de la planicie de la Ciudad de México. En la época prehispánica existía artesianismo en las Lagunas de Tenochtitlan, de Texcoco y Chalco. En 1857 los pozos que se habían perforado eran surgentes y hacían subir el agua hasta el segundo nivel de las casas. En 1870 se intensificó la perforación y se pusieron en funcionamiento aproximadamente 1000 pozos (Santoyo et al., 2005).

La recarga de este acuífero se da en las zonas altas como la Sierra del Chichinautzin, la Sierra de las Cruces, la Sierra de Santa Catarina y los conos volcánicos que se encuentran en la planicie. Estas áreas se han visto disminuidas por el aumento de la mancha urbana y la deforestación que aumenta el escurrimiento y disminuye la infiltración.

4.3.3 Acuífero Inferior (Unidad Volcánica Inferior)

Para la diferenciación de este acuífero no se ha encontrado información litológica determinante pero se ha separado del volcánico-aluvial-piroclástico por el hecho de que está compuesto por rocas volcánicas fracturadas que pertenecen a un evento volcánico separado del Oligoceno Superior-Mioceno Superior (Aguayo et al., 1989.) A este acuífero también se relacionan las rocas pertenecientes a las Formaciones Balsas y Mezcala (Leyva, 2010).

4.3.4 Unidad calcárea

A esta unidad pertenecen las Formaciones Morelos y Cuautla que fueron identificadas en los pozos profundos Mixhuca 1 y Tulyehualco 1 respectivamente a 1500 y 2100 metros. Estructuralmente, esta unidad se presenta de forma masiva, plegada, fracturada y afallada (Ramos Leal et al. 2010b). Se desconoce si esta unidad constituye un acuífero

profundo emplazado en rocas carbonatadas, actualmente el Sistema de Aguas de la Ciudad de México está realizando una perforación profunda en la delegación de Iztapalapa, mayor a los 2000 m, para estudiar la litología presente y las posibilidades de explotación de agua potable.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1D (Profundidad al nivel estático)

5.2 R (Recarga)

5.3 A (Medio acuífero)

5.4 S (Suelos)

5.5 T (Topografía)

5.6 I (Impacto a la Zona Vadosa)

5.7 C (Conductividad hidráulica)

5.8 Índice DRASTIC

5.9 Índice normalizado y zonas de vulnerabilidad

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 D (Profundidad al nivel estático)

Como se observa en la Figura 5.1 la profundidad del nivel estático se encuentra en el rango de vulnerabilidad de 1 a 8. La zona más vulnerable del área de la Ciudad de México es la que se encuentra en el norte en la planicie dentro de las delegaciones de Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y Cuauhtémoc, donde el nivel potenciométrico se encuentra a menos de 50 m de profundidad correlacionable con un índice de vulnerabilidad alto (7-8). En la zona oriental de la ciudad, en la delegación Tláhuac encontramos otra zona de alta vulnerabilidad causada por niveles piezométricos menores a los 40 m.

Las áreas con menor índice de vulnerabilidad (1-2) a la contaminación se encuentran en los altos topográficos al sur y oeste de la ciudad en las sierras de Chichinautzin y Las Cruces, esto es por la gran profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico, más de 150 metros. En el análisis de este parámetro se observa una clara correlación entre la disminución de la vulnerabilidad conforme aumenta la pendiente topográfica y la profundidad del nivel potenciométrico.

El área que ocupan cada uno de los distintitos índices de vulnerabilidad en el Distrito Federal se muestran en la Gráfica 5.1, aquí se observa que predomina la vulnerabilidad muy baja (1-2) con un área de 58.5%, seguida de la vulnerabilidad media (5-6) que ocupa el 24.1% del área. La vulnerabilidad baja (3-4) y alta (7-8) ocupan una extensión menor de 11.3% y 6.2% del total respectivamente.

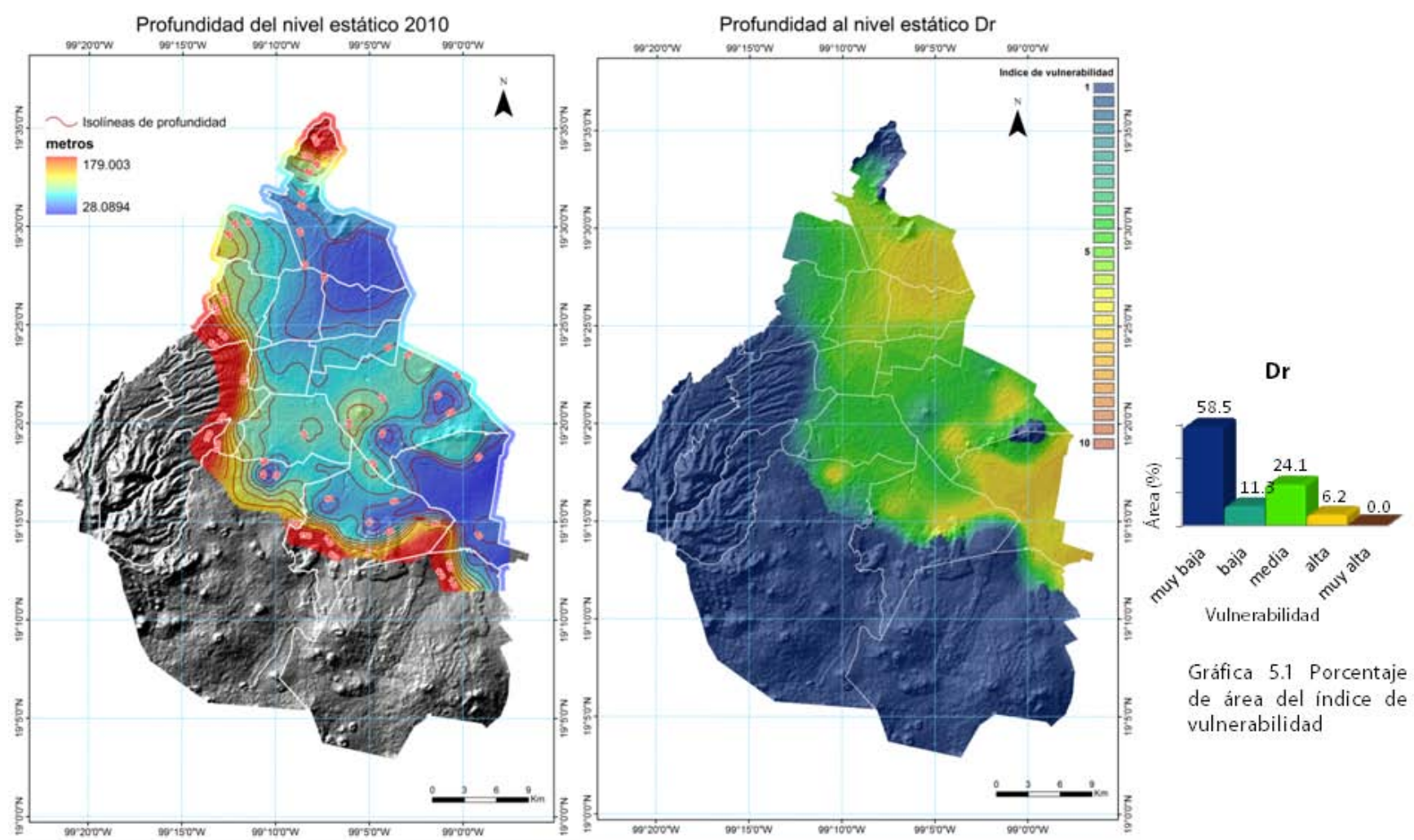


Figura 5.1 Profundidad del nivel estático para el 2010 y vulnerabilidad de la profundidad al nivel estático.

5.2 R (Recarga)

En general, la recarga en la Ciudad de México varía entre los 100 mm/año y los 460 mm/año. A la menor recarga corresponde un índice de vulnerabilidad muy bajo (1-2), que representa un 82.5% del área total. Se localiza en las zonas planas de la ciudad donde predominan las arcillas con baja permeabilidad, lo que ocasiona que no exista flujo descendente hacia el acuífero (Figura 5.2).

A diferencia de la vulnerabilidad relativa del nivel piezométrico, la recarga presenta altos valores de vulnerabilidad en los altos topográficos donde existen litologías permeables, como los basaltos de la Sierra del Chichinautzin que son las principales áreas de recarga del acuífero de la ciudad con láminas de recarga superiores a los 350 mm/año. A diferencia de la sierra de Chichinautzin, la sierra de Las Cruces presenta valores de vulnerabilidad muy bajos (1-2) y bajos (3-4) ya que la recarga no supera los 150 mm/año y la litología presente en la zona no permite una gran infiltración, esto se ve reflejado en la densidad de cañadas que existen en el área.

El índice de vulnerabilidad llega hasta niveles altos (7-8) y muy altos (9-10) en las delegaciones de Milpa Alta, Tlalpan, Coyoacán, Álvaro Obregón y algunas zonas de Xochimilco, Iztapalapa y Tláhuac donde existen tasas de infiltración altas. En general, la recarga del acuífero de la Ciudad de México se estimó en $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponden a un coeficiente de infiltración de 5.8%.

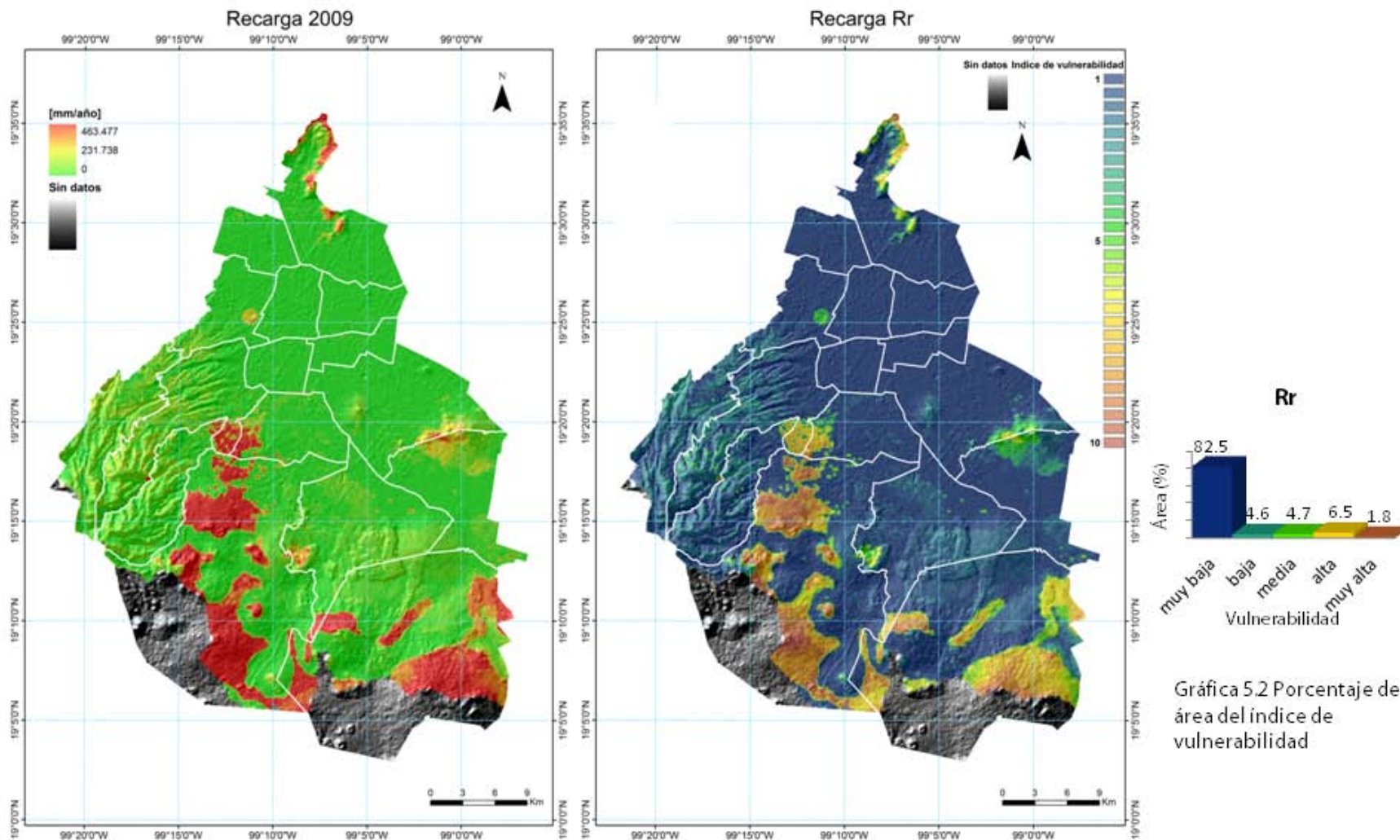


Figura 5.2 Distribución de la recarga, 2009 y vulnerabilidad de la recarga.

5.3 A (Medio acuífero)

El índice de vulnerabilidad del parámetro del medio acuífero se observa en la Figura 5.3. Se ve afectado por el tipo de litología en la que se emplaza el acuífero. En el caso del Distrito Federal, las zonas con mayor índice se ubican en litologías de gravas, escorias, piroclastos y arena/grava que proveen muy poca protección al acuífero; estas áreas se encuentran principalmente en las delegaciones de Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Coyoacán y parte de Cuauhtémoc y Benito Juárez.

En contraste con estas zonas vulnerables podemos observar que las áreas menos vulnerables se encuentran donde existen los mayores espesores de arcilla en las delegaciones de Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Tláhuac, Xochimilco e Iztapalapa. El sur de la ciudad presenta vulnerabilidades moderadas ya que en esta zona predominan los basaltos de la Sierra del Chichinautzin; esta situación se repite en la sierra de Las Cruces a causa de la abundancia de rocas volcánicas. La vulnerabilidad media predomina en área sobre las demás con un 54.8% del área total del Distrito Federal, posteriormente prevalece la baja con 30.8%.

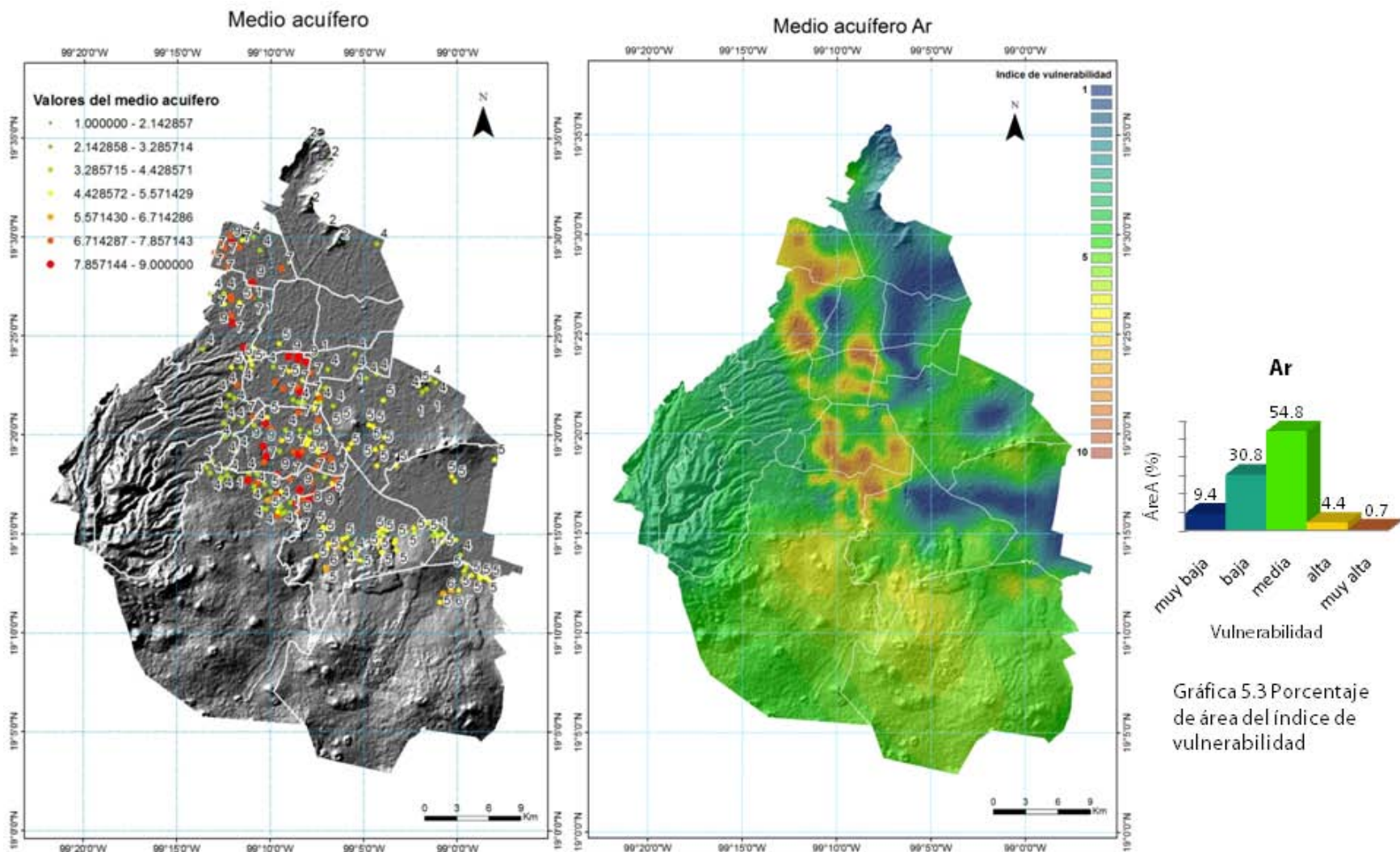


Figura 5.3 Valores de vulnerabilidad asociados a pozos con corte litológico y vulnerabilidad del medio acuifero

5.4 S (Suelos)

Los suelos en la Ciudad de México son de vulnerabilidad muy alta en general como se observa en la Figura 5.4. Estos suelos cubren la mayor parte del norte, centro y sur del Distrito Federal sumando un 67.6% de la superficie total.

La vulnerabilidad muy baja representa un 32.4% del área total y se localiza en la parte sur-oeste de la Sierra de las Cruces, en algunas zonas de Tlalpan y Milpa Alta, en estas áreas el tipo de suelo que predomina es el Andosol. En las delegaciones de Xochimilco, Tláhuac, Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero se observan otras áreas con muy baja vulnerabilidad en las que predominan los Histosoles y el Solonchak.

Las áreas que presentan la vulnerabilidad más alta se encuentran en Milpa Alta, Tlalpan, el oeste de Coyoacán, al este de Tláhuac e Iztapalapa, y en una pequeña porción de Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo. El suelo que se encuentra en estas delegaciones es el Litosol. El resto del Distrito Federal encontramos Feozem, que representa una alta vulnerabilidad a causa de la alta permeabilidad y porosidad que posee.

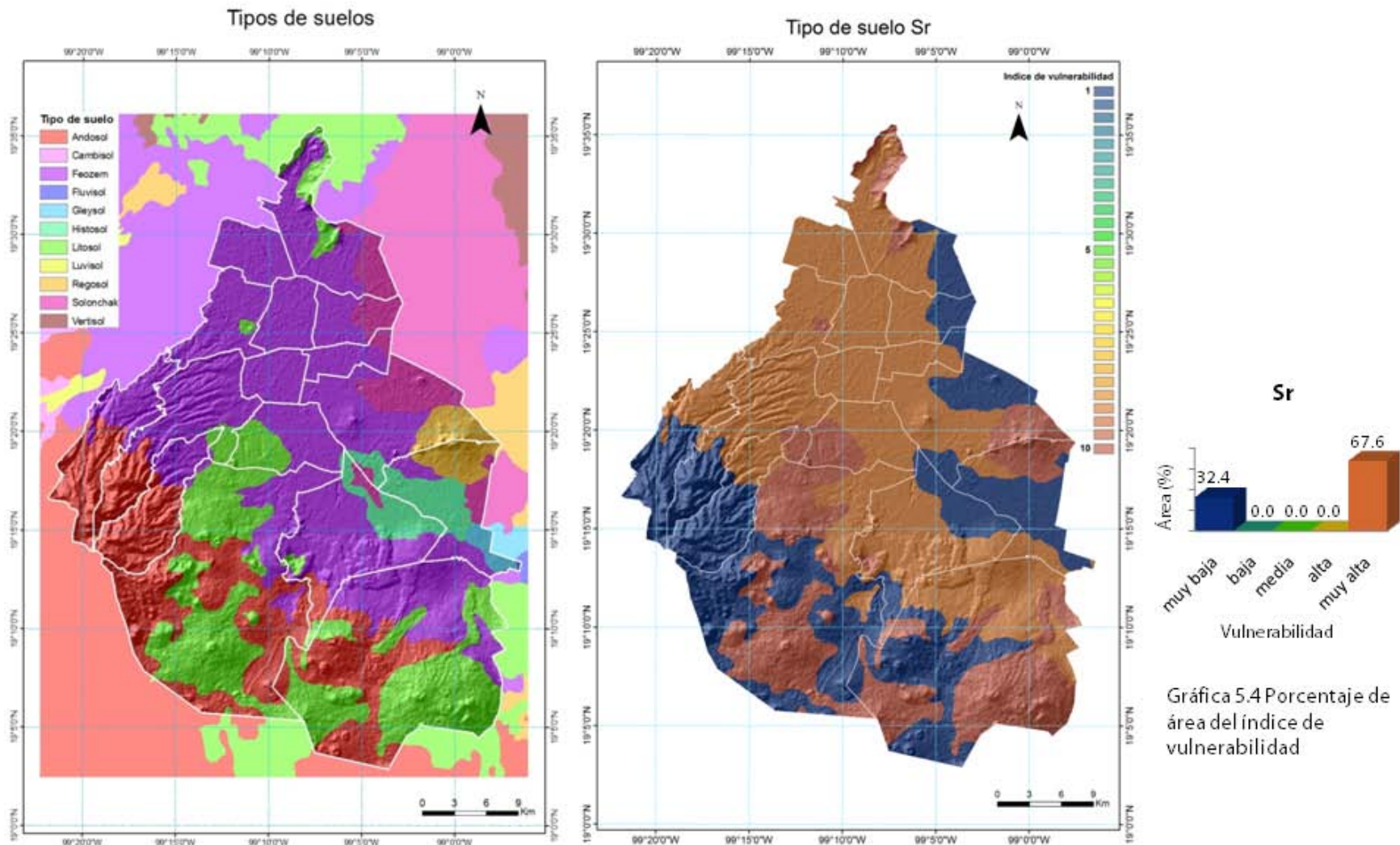


Figura 5.4 Distribución espacial de los suelos del DF (INEGI, 2007) y vulnerabilidad de los suelos.

5.5 T (Topografía)

Respecto a la topografía, los valores ubicados en los altos topográficos son los que representan la menor vulnerabilidad, la mayoría de ellos repartidos en el sur y oeste del área a lo largo de las sierras de Chichinautzin y de Las Cruces respectivamente (Figura 5.5). También encontramos puntos aislados en el este de la Ciudad pertenecientes a la Sierra de Santa Catarina, y al norte, pertenecientes la Sierra de Guadalupe. Esta vulnerabilidad muy baja ocupa un 25.4% del área total.

El resto de la Ciudad posee valores de vulnerabilidad altos que alcanzan a ocupar el 31.3% del área del Distrito Federal. La alta vulnerabilidad se presenta en zonas planas correspondientes al área que solían ocupar los lagos prehispánicos.

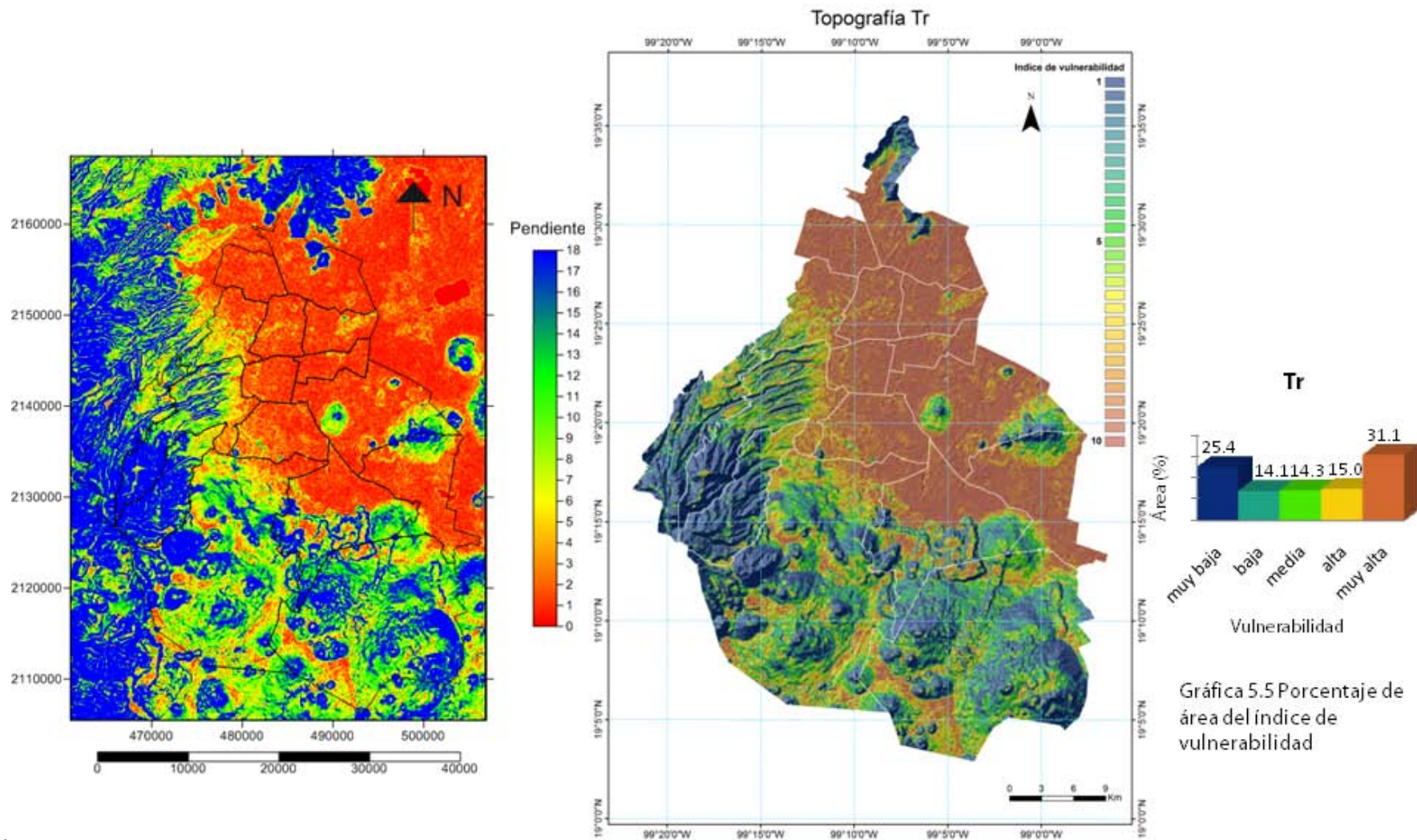


Figura 5.5 Pendiente topográfica de la Ciudad de México y valores de vulnerabilidad de la pendiente.

5.6 I (Impacto a la Zona Vadosa)

Este parámetro refleja la vulnerabilidad del material geológico que ocupa los primeros metros desde la superficie hasta el nivel estático. Las zonas que presentan menor vulnerabilidad son aquellas donde se encuentra la mayor potencia de arcillas, esto es a causa de la baja permeabilidad de este tipo de depósitos. Los valores de permeabilidad se encuentran en el rango de 8×10^{-3} hasta 8×10^{-7} (Vargas y Ortega-Guerrero, 2004).

El 73% del área del Distrito Federal presenta vulnerabilidad media y se encuentra en las zonas altas en el sur y oeste, esto se debe a que predominan litologías como las tobas, arenas, basaltos y conglomerados (Figura 5.6).

Las zonas de vulnerabilidad alta (3.6% del área total) se encuentran en las zonas de transición entre las zonas planas y los altos topográficos, aquí se encuentran litologías como gravas y arenas derivadas de la erosión que tiene lugar en los altos topográficos.

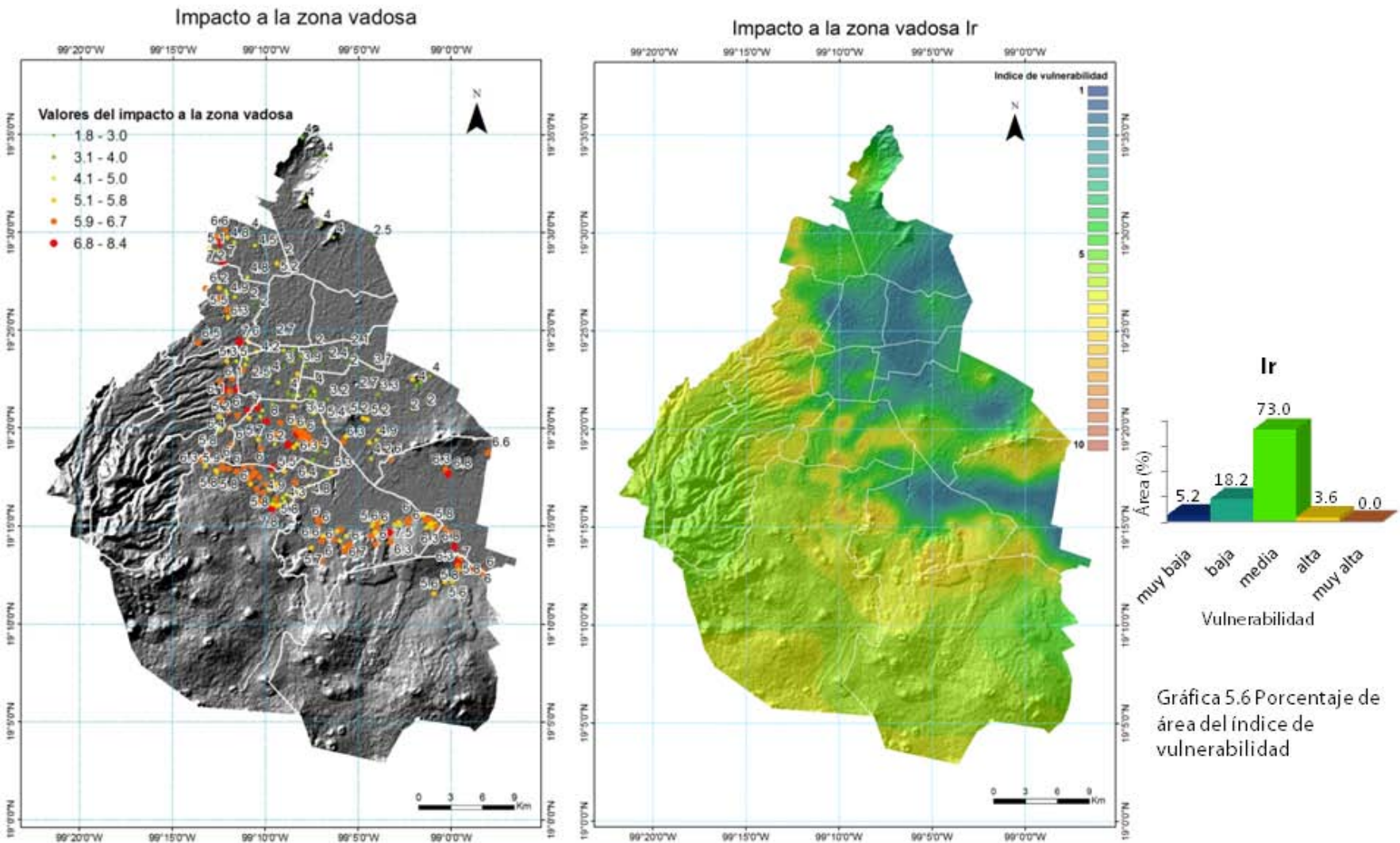


Figura 5.6 Valores de vulnerabilidad asociados a pozos con corte litológico y vulnerabilidad de la zona vadosa.

5.7 C (Conductividad hidráulica)

Por último, en el mapa Cr observamos únicamente índices de vulnerabilidad muy baja (1-2) y baja (3-4) debido a que los valores de conductividad hidráulica que fueron interpretados, se encuentran en el intervalo de 0.5 a 20.7 m/d. La vulnerabilidad más baja se encuentra distribuida en el occidente de la Ciudad, principalmente en la Sierra de las Cruces en las delegaciones de Álvaro Obregón, Cuajimalpa y Magdalena Contreras (Figura 5.7).

Al sur se observa un ligero aumento de la conductividad en las delegaciones de Tlalpan y Milpa Alta por la presencia de los basaltos de la Sierra del Chichinautzin (>7 m/d) que poseen una mayor conductividad que los materiales volcánicos de la Sierra de las Cruces (<1 m/d).

En las porciones centrales de Benito Juárez y Coyoacán se observa un ligero aumento del índice de vulnerabilidad a causa de la presencia de arenas y gravas que poseen una mayor conductividad hidráulica. Este aumento de conductividad también se observa en el área de la Sierra de Santa Catarina, en este caso por la presencia de material volcánico.

De los valores calculados por el método de Rushton podemos destacar que se obtuvieron valores de 0.16 m/día a 60 m/día. El rango de valores obtenidos en las reinterpretaciones de Vázquez (1987) es de 0.70 m/día a 319.68 m/día., por otro lado, las obtenidas por métodos estándar varían de 0.07 m/día a 18.99 m/día. El Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería realizó una reinterpretación de los datos proporcionados por el SACM (2005) con lo que se obtuvieron valores mínimos y máximos de 0.41m/día y 45.60 m/día.

En la Tabla 5.1 se muestran los valores finales de conductividad hidráulica que se utilizaron para las configuraciones del parámetro Cr.

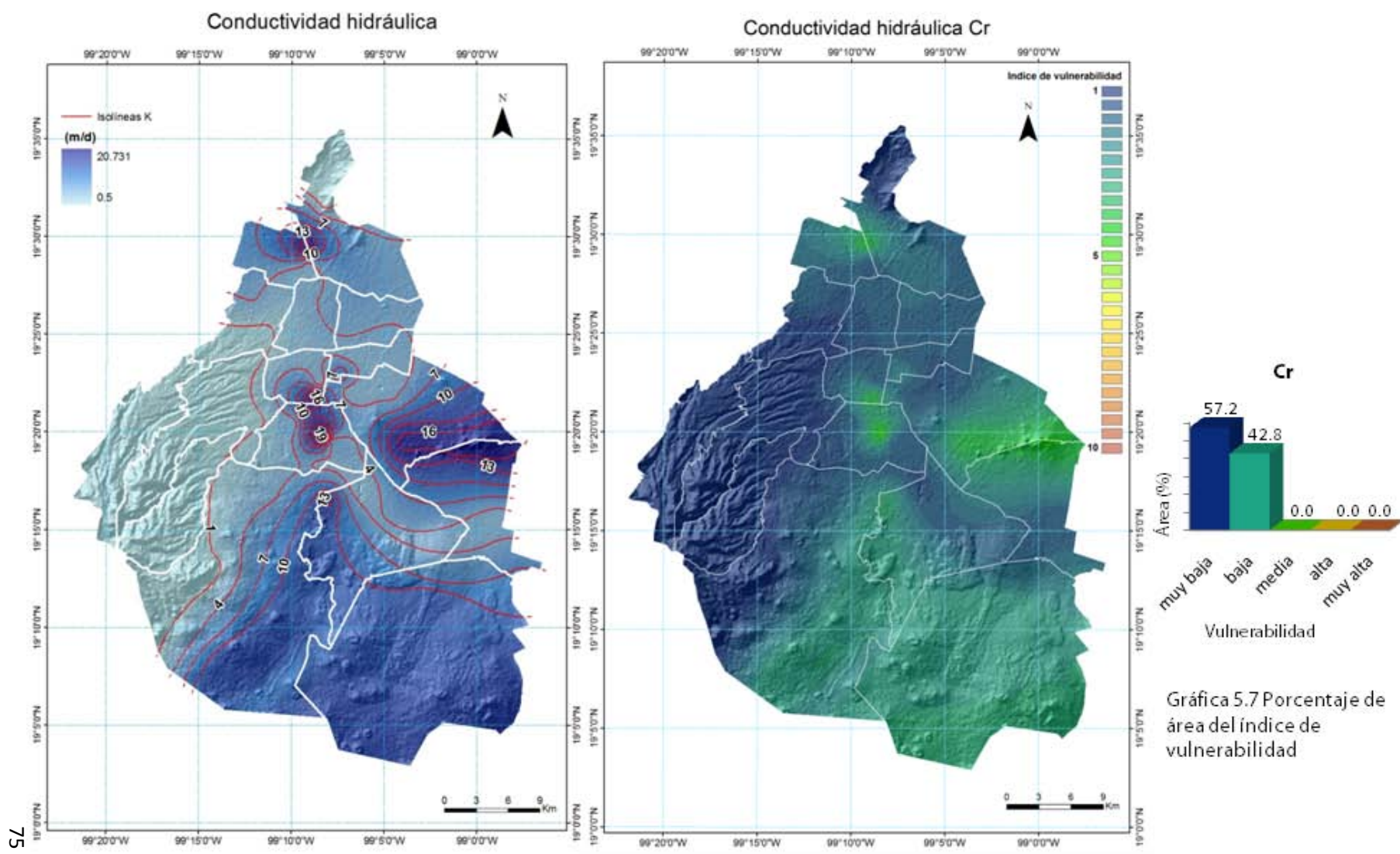


Figura 5.7 Conductividad hidráulica del 2010 y vulnerabilidad asignada a la conductividad hidráulica.

Clave	Nombre de Pozo	X	Y	K (m/d)	T (m ² /d)
8	Agrícola Oriental 6	492005	2143268	14.76	1579.00
18	Altavista	479022	2139290	0.90	123.00
21	Arenal San Ángel	480867	2139378	1.84	1813.00
36	Castañeda 6	478677	2141443	2.32	353.00
38	Ciudad Deportiva 2	490398	2145310	2.92	377.00
69	Jardines del Pedregal 5	477248	2135365	20.18	3758.00
74	La Cienega	482539	2137993	6.52	717.00
76	La Pirulera	478870	2150360	4.09	514.00
92	La Moderna	485806	2144537	11.07	1485.00
119	Portales	484601	2141067	52.37	2800.00
141	San Martin Xochinahuac 2	478706	2156331	2.92	980.00
148	Santa Ursula Xitla	481273	2131506	58.12	1553.00
161	Trabajadores del Hierro	484111	2153792	25.43	2430.00
193	Ortiz Rubio	485040	2142278	18.76	875.00
194	Country Club	485129	2139839	2.64	492.00
Izt-8	Iztapalapa 8	495991	2139160	3.20	459.00
Per-3	Periférico 3	485006	2134778	2.13	337.00
Per-9	Periférico 9	486058	2131329	1.49	216.00
SC-12	Santa Catarina 12	492786	2136963	4.28	248.00
SL-15	San Luis 15	492988	2129012	1.84	147.00
Xot-2B	Xotepingo 2B	485650	2137357	4.19	683.00

Tabla 5.1 Parámetros hidráulicos de la Ciudad de México

En la Figura 5.8 se muestra un mosaico en el que se compilan los índices de vulnerabilidad de las variables que componen al método DRASTIC.

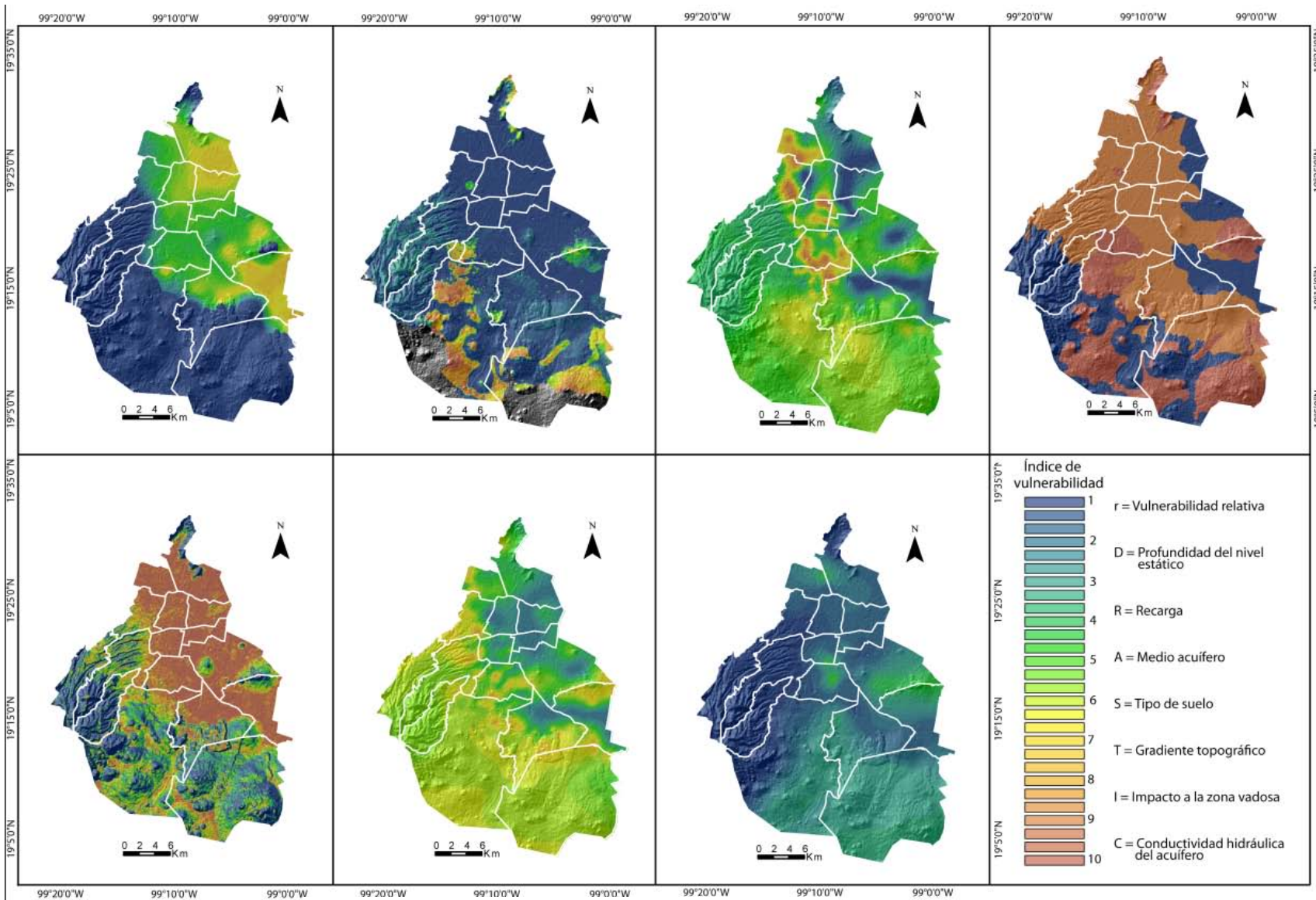


Figura 5.8 Mosaico de las variables del Índice DRASTIC

5.8 Índice DRASTIC

Utilizando el álgebra de mapas con la Ecuación 1 ($D_i=5D_r+4R_r+3A_r+2S_r+1T_r+5I_r+3C_r$) se generó el índice DRASTIC de la Ciudad de México que se observa en la Figura 5.9. Este índice presenta valores en un rango de 54 a 153. Cabe mencionar que el índice DRASTIC original (Aller et al., 1987) contempla valores un mínimo de 23 y un máximo de 230 tomando en cuenta las condiciones de menor y mayor vulnerabilidad de un acuífero, respectivamente.

Índice DRASTIC

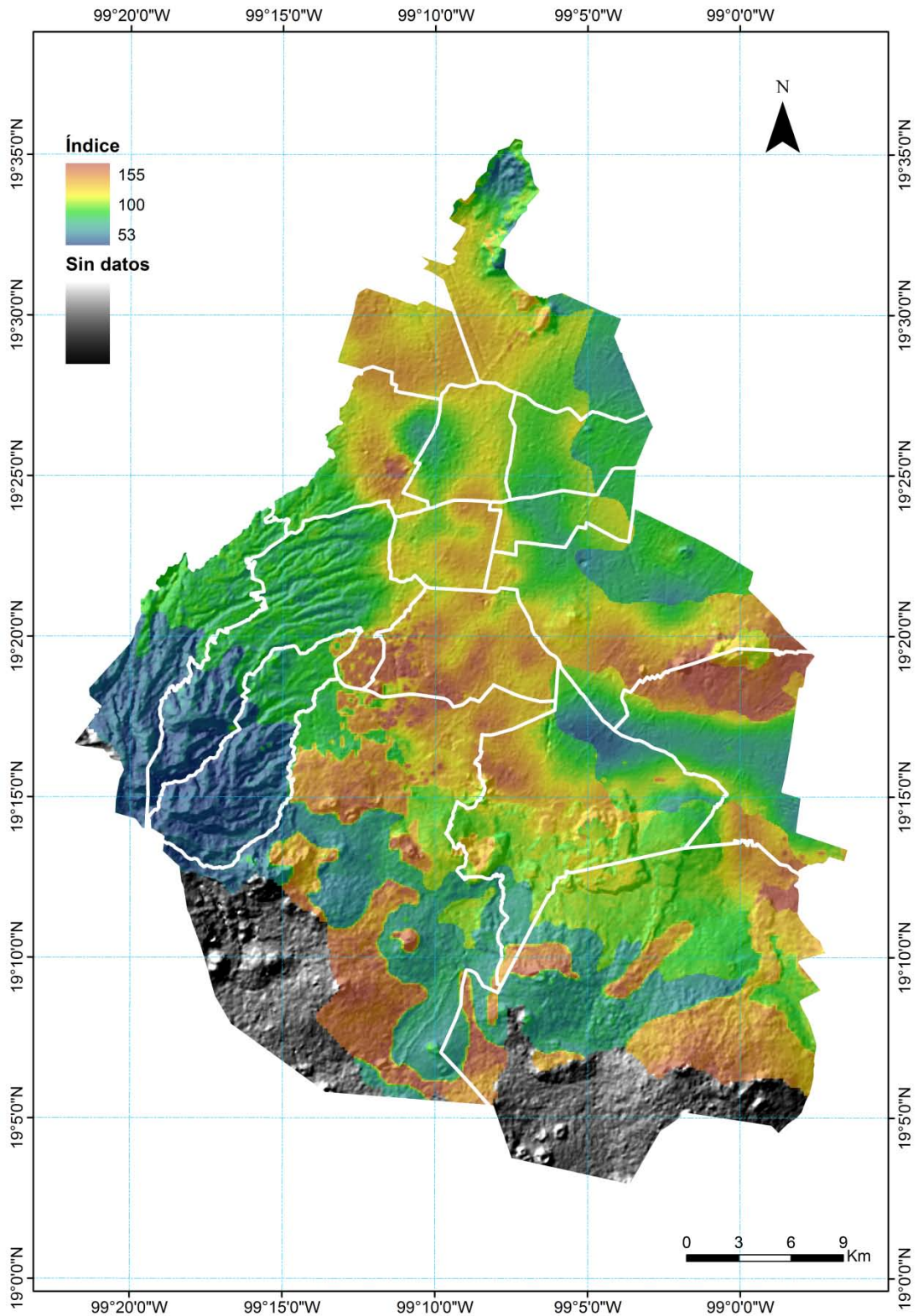


Figura 5.9. Variación espacial del Índice DRASTIC del acuífero de la Ciudad de México

Los mayores índices (>110) se presentan en las delegaciones de Miguel Hidalgo (69-130), Coyoacán (83-153), Tlalpan (máximo de 145), en la zona sur de Iztapalapa (61-137), Milpa Alta (64-139), al oeste de Xochimilco (57-122) y en la zona norte de Tláhuac (62-137). Los índices menores a 100 se encuentran en las delegaciones de Álvaro Obregón (54-124), Cuajimalpa (54-92), Magdalena Contreras (54-115) y en una gran área de Tlalpan (mínimo de 55).

Los altos índices estimados en las delegaciones de Tlalpan, el sur de Xochimilco y Milpa Alta se deben a que la profundidad del nivel estático se encuentra a más de 80 m de profundidad y la pendiente topográfica es mayor al 6%. El medio acuífero, el impacto a la zona vadosa y la conductividad hidráulica son los principales factores que aumentan el índice en estas áreas. Tras un análisis de los distintos parámetros, se encontró que la recarga juega un papel preponderante en la caracterización del índice DRASTIC. Las áreas de estas delegaciones que presentan índices bajos, menores a 74, se deben a que la profundidad del nivel piezométrico supera los 100 m de profundidad y la recarga disminuye a menos de 50 mm/año proporcionando una mayor protección al acuífero.

Los factores responsables de los altos índices que se encuentran en las delegaciones de Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Coyoacán, Iztapalapa, Tláhuac y el norte de Xochimilco se encuentran controlados por una baja pendiente topográfica (<2%) y la profundidad del nivel piezométrico (<80 m). En las delegaciones de Benito Juárez y el norte de Coyoacán la conductividad hidráulica fluctúa entre los 8 y 13 m/d, lo que proporciona una mayor protección en estas áreas. En contraste, se observan índices bajos en las delegaciones de Venustiano Carranza (71-97), Iztacalco (73-107) y el norte de Iztapalapa (61-103) a causa de la presencia de espesores de arcilla que sobrepasan los 40 m.

Las altas pendientes topográficas (<12%), la baja tasa de recarga (<50 mm/año) y la conductividad hidráulica baja (3 m/d) aunado a que la superficie potenciométrica se encuentra por debajo de los 100 m de profundidad, son factores que se conjuntan en la zona de la Sierra de las Cruces en las delegaciones de Álvaro Obregón, Cuajimalpa y

Magdalena Contreras para generar un área con un índice de vulnerabilidad bajo (<74). En las inmediaciones de Coyoacán, Magdalena Contreras y Álvaro Obregón se identificó un área de 6.5 km² con un índice DRASTIC muy alto (100-125) que es atribuido a la recarga (100 a 120 mm/año), el tipo de suelo que corresponde a la vulnerabilidad más alta (10) y la disminución de la pendiente topográfica.

5.9 Índice normalizado y zonas de vulnerabilidad

Tomando como base el mapa de índice DRASTIC se realizó una normalización de los valores a una escala de 0 a 10 para generar el mapa de zonas de vulnerabilidad que se muestra en la Figura 5.10.

Los valores correspondientes a la vulnerabilidad muy baja (0-2) se observan en Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Tlalpan ocupando un área del 55.1%, 73.13% y 35.1% del total de cada delegación, respectivamente (Figura 5.11). Es notable la distribución profunda del nivel potenciométrico en estas delegaciones, mayor a 115 m., así como una tasa de recarga baja.

La zona de vulnerabilidad predominante en el área del Distrito Federal es la baja (2-4), esta predomina en las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Cuauhtémoc, Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco. Cabe mencionar que delegaciones como Tláhuac o Iztapalapa presentan zonas de vulnerabilidad alta en un 27% y 8.2% de la superficie total. En estas áreas encontramos niveles piezométricos entre los 40 y 90 m de profundidad, así como conductividades hidráulicas mayores a los 13 m/día y distribuciones de suelos con vulnerabilidades muy altas (9 y 10), la conjunción de estos factores deriva en un el aumento puntual de la vulnerabilidad en estas delegaciones.

Por otra parte las zonas de alta vulnerabilidad (6-8) se encuentran en las delegaciones de Tlalpan y Milpa Alta, sobre todo en las áreas de recarga localizadas en los basaltos de la

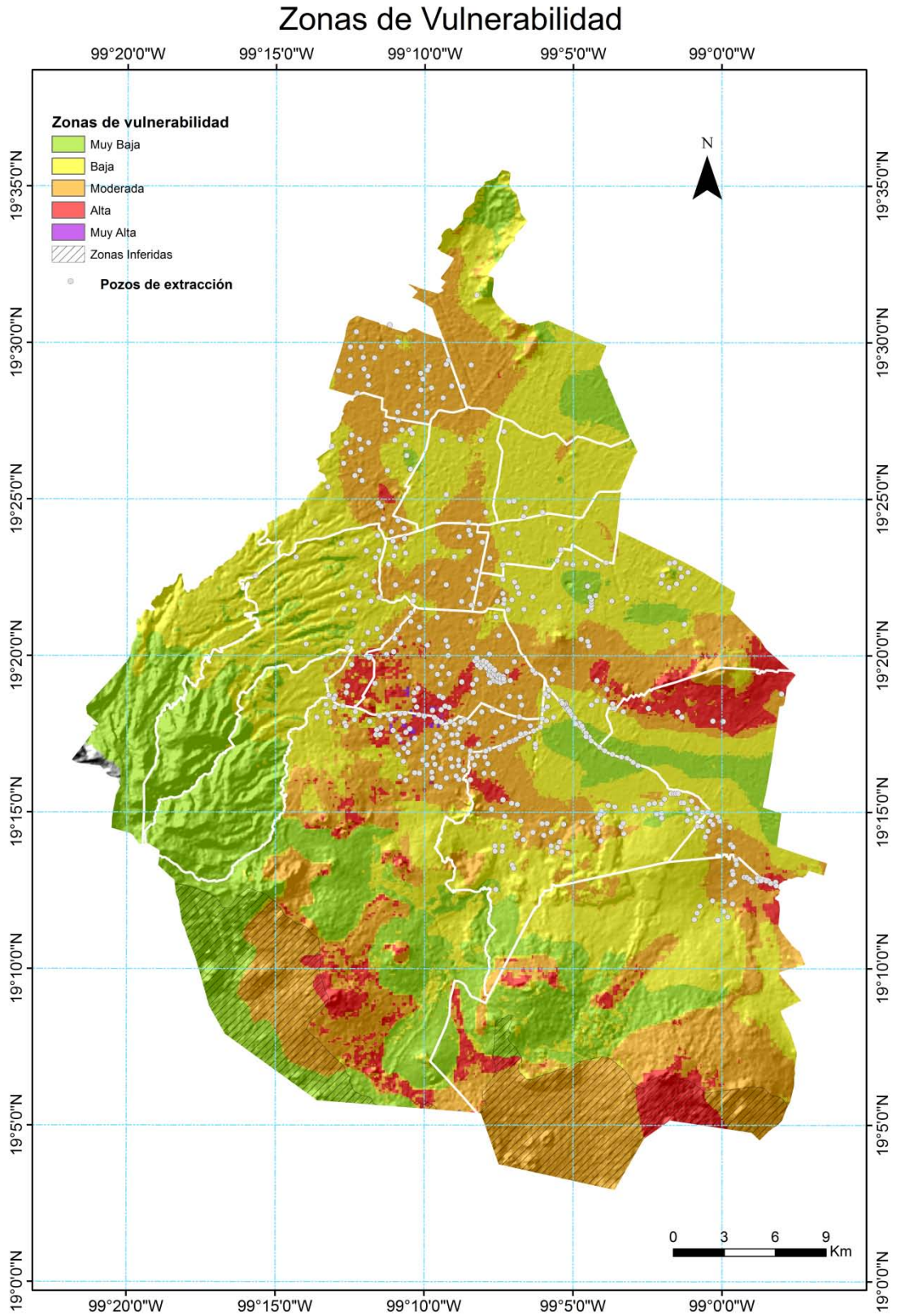


Figura 5.10 Mapa de zonas de vulnerabilidad de la Ciudad de México.

Sierra del Chichinautzin con conductividades hidráulicas del orden de 8 a 13 m/d y una recarga de más de 100 mm/año.

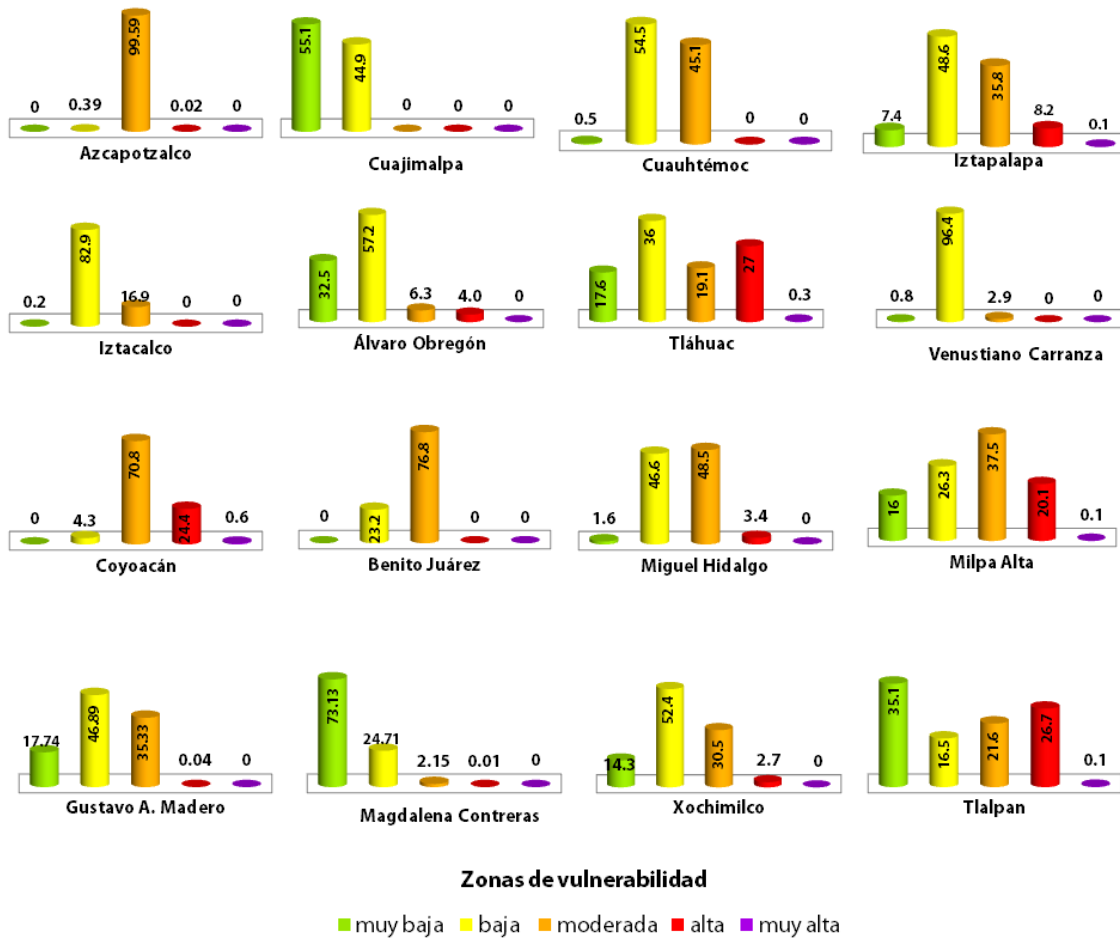


Figura 5.11 Porcentaje del área de las zonas de vulnerabilidad por delegación.

Las delegaciones en las que prevalecen las zonas de vulnerabilidad moderada (4-6) son Azcapotzalco (99.59%), Miguel Hidalgo (48.5%), Benito Juárez (76.8%), Coyoacán (70.8%) y Milpa Alta (37.5%). En estas delegaciones, los principales factores que controlan la vulnerabilidad son la conductividad hidráulica del acuífero que no sobrepasa los 13 m/día y la recarga que es menor a los 50 mm/año.

Otras delegaciones en las que se detectaron zonas de alta vulnerabilidad son Iztapalapa, Coyoacán, Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón y Xochimilco. El porcentaje de alta vulnerabilidad presente en la superficie de las delegaciones Miguel Hidalgo, Álvaro

Obregón, Iztapalapa, Coyoacán, Tláhuac, Xochimilco, Tlalpan y Milpa Alta es de 3.4%, 4%, 8.2%, 24.4%, 27%, 2.7%, 26.7% y 20.1%, respectivamente.

Las zonas de muy alta vulnerabilidad fueron ubicadas en las delegaciones de Tláhuac, Coyoacán, Iztapalapa, Milpa Alta y Tlalpan donde cubren el 0.3%, 0.6%, 0.1%, 0.1% y 0.1% del área de sus territorios respectivamente. Estas zonas de muy alta vulnerabilidad son causadas por la presencia de niveles piezométricos menores a los 60 m, valores de recarga mayores a los 50 mm/año y conductividades hidráulicas superiores a los 7 m/día.

Al sur de la ciudad podemos observar algunas áreas que muestran un sombreado, esto es porque se realizó una inferencia de la vulnerabilidad ya que la distribución del parámetro de recarga no alcanza a cubrir toda la extensión del Distrito Federal. La determinación de la vulnerabilidad de estas zonas se hizo analizando los otros parámetros que si abarcan toda el área de estudio así como el peso que se le asignó a cada uno.

El área que ocupan cada una de las zonas de vulnerabilidad en el Distrito Federal se observan en la Figura 5.12. La vulnerabilidad preponderante en el área de estudio es la baja con 41.4 % del total del área. Después tenemos la vulnerabilidad moderada, muy baja, alta y muy alta con 34.3%, 16.9%, 7.3% y 0.08% respectivamente.

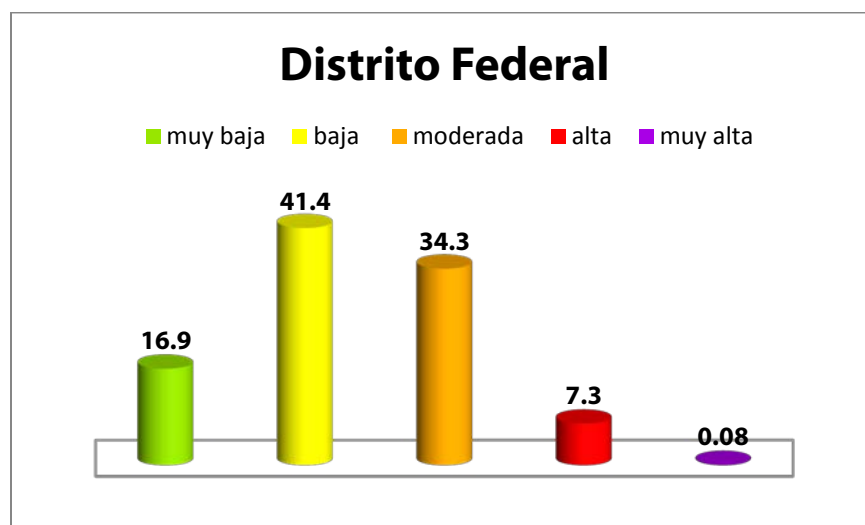


Figura 5.12 Porcentaje de zonas de vulnerabilidad acuífera en el Distrito Federal.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 Conclusiones

6.2 Líneas futuras de Investigación

6.2.1 Recomendaciones

6.2.2 Investigaciones futuras

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

6.1 Conclusiones

Los resultados de la presente tesis permitieron crear el primer mapa de vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México utilizando la metodología DRASTIC. Al reclasificar y normalizar el índice DRASTIC (ID), estimado de 54 a 153, se definieron cinco zonas de vulnerabilidad acuífera: muy baja ($55 < ID < 74$), baja ($74 < ID < 93$), moderada ($93 < ID < 112$), alta ($112 < ID < 131$) y muy alta ($131 < ID < 150$).

Del área que ocupa cada una de las zonas de vulnerabilidad se estimó que el 16.9%, 41.4%, 34.3%, 7.3% y 0.08% del área total de la Ciudad de México se clasifica en zonas de muy baja, baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad acuífera, respectivamente.

Las zonas de muy alta vulnerabilidad se ubican en Tlalpan, al sur de la delegación de Coyoacán, al sur de Iztapalapa, al norte de Tláhuac y al este de Milpa Alta, estas poseen la menor extensión de las distintas zonas. Las áreas de alta vulnerabilidad se pueden localizar en las delegaciones de Tlalpan, Tláhuac, Iztapalapa, Tláhuac (en el área de la Sierra de Santa Catarina), Coyoacán y en una pequeña zona al oriente de Álvaro Obregón. Las zonas de vulnerabilidad moderada las podemos situar en el centro y el norte de la ciudad, mientras que en casi todas las delegaciones se observan zonas de baja vulnerabilidad. En orden descendente (referente a la extensión territorial) podemos mencionar a las delegaciones de Venustiano Carranza, Iztacalco, Álvaro Obregón, Iztapalapa, Xochimilco y Gustavo A. Madero. Las zonas de baja vulnerabilidad se identificaron en las Sierras de Las Cruces, Chichinautzin y en menor medida en las delegaciones de Tláhuac y Gustavo A. Madero.

El mapa de la zonificación de la vulnerabilidad acuífera de la Ciudad de México es una nueva y poderosa herramienta que proporcionará valiosa información para los

tomadores de decisiones del Gobierno del Distrito Federal para gestionar las cuestiones referentes al acuífero de una manera más adecuada.

6.2 líneas futuras de investigación

6.2.1 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en esta tesis, se derivan las siguientes recomendaciones con la intención de mejorar la información y conocimientos que se tienen acerca de la Ciudad de México y su acuífero.

Es importante contar con una buena descripción litológica de los cortes de pozos que se han realizado en la ciudad, por ello es recomendable que se realicen algunas perforaciones en zonas donde es dudosa la interpretación o en grandes áreas donde no se tienen cortes. Se propone a su vez, que estas perforaciones se equipen posteriormente como pozos de observación para tener un mejor control de la profundidad del nivel estático.

Aprovechando el equipamiento de las nuevas perforaciones que se proponen, se sugiere la realización de pruebas de bombeo y *slug tests* de larga duración en distintas zonas de la ciudad de manera que se cubra la mayor extensión posible para poder realizar una mejor interpretación de este parámetro y generar una configuración más certera del parámetro C. A su vez, se recomienda realizar nuevas pruebas en pozos existentes para brindar parámetros actualizados y confiables a los estudios que se realizan sobre la ciudad.

Se propone la realización de un nuevo inventario de los pozos de abastecimiento de la ciudad en el que se indiquen sus coordenadas, croquis de localización y el nombre del aprovechamiento. Este inventario se propone porque existen severas inconsistencias en la información que se logró recabar. Existen varios casos con dos pozos con el mismo

nombre de aprovechamiento, un gran número de coordenadas tienen un notable margen de error y en muchos casos los croquis indican una ubicación distinta que las coordenadas. Este trabajo es con el fin de contar con datos certeros para realizar estudios sobre el área.

Referente al tema de la geología, se recomienda se realice un nuevo estudio de las unidades que componen al Distrito Federal, ya que los estudios que existen sólo hacen referencia al área de estudio como parte de la Cuenca de México y no se mencionan cuales son las unidades que se encuentran sólo en la ciudad. Además, existe un serio problema con los distintos nombres que se les han asignado a las distintas litologías por lo que se requiere una unificación de la nomenclatura.

Con ayuda de las perforaciones propuestas y las reinterpretaciones litológicas, se sugiere se realice una mejor y más detallada interpretación de la estratigrafía de la Ciudad de México para obtener un mejor entendimiento del subsuelo de la capital Mexicana.

6.2.2 Investigaciones futuras

La subsidencia de la Ciudad de México es un fenómeno que se ha estudiado desde hace algunos años por el daño que ocasiona en las estructuras. Recientemente, Cabral et al., (2008), con ayuda de las imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) y utilizando el método InSAR (SAR Interferometrico) para medir la variación de la elevación de puntos de control (PS), han logrado medir la respuesta espectral (energía electromagnética reflejada por un PS y captada por los radares de los satélites) que se espera que no cambie con el tiempo. Cuando esta respuesta llega a variar, significa que hubo un desplazamiento del PS que se traduce en el reacomodo de los depósitos lacustres y arcillosos en los que se encuentran cimentados estos PS. Este reacomodo se da por la extracción de agua del subsuelo de estas litologías.

Al utilizar esta metodología se busca cuantificar y zonificar la subsidencia de la Ciudad de México para realizar una adecuación del método DRASTIC y añadir la variable de subsidencia (S_b) en el cálculo del índice DRASTIC para tomar en cuenta un factor de gran importancia en la toma de decisiones del desarrollo de la Ciudad de México.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS CITADAS

7 Referencias

7. Referencias citadas

Aguayo-Camargo, J.E., Marín-Córdova, S., Sánchez-Díaz, F., 1989. Evolución geológica de la Cuenca de México. Boletín de la Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos. Tópicos geológicos de la Cuenca del Valle de México. Memoria de Simposio pags. 25-41.

Al-Adamat, R., 2003. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography*, 23(4), pp.303-324.

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

Al-Zabet, T., 2002. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology*, 43(1-2), pp.203- 208.

Ahmed, A.A., 2009. Using Generic and Pesticide DRASTIC GIS-based models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer at Sohag, Egypt. *Hydrogeology Journal*, 17(5), 1203-1217.

ASTER Digital Elevation Model, Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), 2006.

Auge M., 2004. Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Universidad de Buenos Aires. CONICET. 2004.

Babiker, I.S. et al., 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *The Science of the total environment*, 345(1-3), pp.127-40.

Cabral-Cano, E., H. Dixon, T., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O. y E. Carande, R., 2008. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City Geological Society of America, *Bull.*2008; 120: 1556-1566

Denny, S.C., Allen, D.M. & Journeay, J.M., 2007. DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*, 15(3), pp.483-493.

Ducci, D., 2000. GIS Techniques for Mapping Groundwater Contamination Risk. *Natural Hazards*, (1956), pp.279-294.

Durazo, J., 1996. Ciudad de México. Acuitardo superficial y contaminación acuífera. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XI, Núm 2, págs. 5-14.

ESRI ArcMap 9.3.1, ArcGIS Desktop 9.3.1, 2009.

Expósito, J.L. et al., 2010. Groundwater Protection Using Vulnerability Maps and Wellhead Protection Area (WHPA): A Case Study in Mexico. *Water Resources Management*, 24(15), pp.4219-4236.

FAO-UNESCO, 1974. Soil Map of the World (1:5,000,000), Vol. 1: Legend. UNESCO, Paris.

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

Fritch, T.G. et al., 2000. An Aquifer Vulnerability Assessment of the Paluxy Aquifer, Central Texas, USA, Using GIS and a Modified DRASTIC Approach. *Environmental Management*, 25(3), pp.337-345.

Global Mapper Software LLC, 2010. Global Mapper 10.02

Gogu, R.C. & Dassargues, A., 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), pp.549-559.

Gogu, R.C., Hallet, V. & Dassargues, A., 2003. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology*, 44(8), pp.881-892.

Golden Software, 2011. SURFER Version 10.1.561 (32-bit) Surface Mapping System.

Gómez -Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, núm. 3, 2005, p. 227-283*

Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Rajmohan, N., Al-Yaroubi, S., 2008. Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. *Environmental monitoring and assessment*, 147(1-3), 125-38.

Javadi, S. et al., 2011. Modification of DRASTIC Model to Map Groundwater Vulnerability to Pollution Using Nitrate Measurements in Agricultural Areas. , 13, pp.239-249.

Kim, Y.J., Hamm, S.Y. (1999). Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 7, 227-235

Leyva, E., 2010. Acuíferos Semiconfinados y su modelacion: Aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

Liggett, J.E. & Allen, D.M., 2010. Evaluating the sensitivity of DRASTIC using different data sources, interpretations and mapping approaches. *Environmental Earth Sciences*, 62(8), pp.1577-1595.

MATLAB 7.10.0.499, R2010a. Interactive environment for algorithm development, data visualization, data analysis and numeric computation. The Mathworks Team, Natick, MA, USA. <http://mathworks.com>.

Mesri, G., Rokhsar, A., Bohor, B. F., 1975. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay. *Géotechnique*, Volume 25, Issue 3, pages 527 –554, ISSN: 0016-8505, E-ISSN: 1751-7656

Mooser F., Molina T.C., 1992. Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México. Centro de Investigación Sísmica Fundación Javier Barros Sierra, A.C. México. D.F., 19 pp.

Ormezi Varol, S. & Davraz, A., 2010. Hydrogeological investigation of Sarkikaraagac Basin (Isparta, Turkey) and groundwater vulnerability. *Water International*, 35(2), pp.177-194.

Ramos Leal, J. A. (2010a). Curso de vulnerabilidad acuífera e índices de calidad del agua. Geociencias.

Ramos Leal, J. A., Noyola Medrano, C., & Tapia Silva F. O. (2010b, February). Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. *Environmental Earth Sciences*. *Environmental Earth Sciences*. 2010; 61(6):1309-1320.

Rushton, K.R., Rathod, K.S. Causes of non-linear step pumping test responses. *Q. J. Eng. Geol.* (1988) 21:147–158.

Santoyo Villa, E., Ovando-Shelly, E., Mooser H., F., 2005. Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México; TGC.

Shouyu, C. & Guangtao, F., 2003. A DRASTIC-based fuzzy pattern recognition methodology for groundwater vulnerability evaluation. *Hydrological Sciences Journal*, 48(2), pp.211-220.

Sistema de aguas de la Ciudad de México, 2005.

Sorichetta, A., 2011. Groundwater vulnerability assessment using statistical methods. Tesis de doctorado, UNIVERSITA DEGLI STUDI DI MILANO.

Tilahun, K. & Merkel, B.J., 2009. Assessment of groundwater vulnerability to pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. *Environmental Earth Sciences*, 59(7), pp.1485-1496.

Vázquez Sánchez E., 1995. Modelo Conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la cuenca de México. México D.F.

Vazquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1987. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*.

Veytia, B. M., 1975. Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Voigt, H.-jürgen et al., 2004. Characterization of groundwater vulnerability to fulfill requirements of the water framework directive of the European Union. *Water*, 43, pp.567-574.