



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Programa de Posgrado

## Tesis

METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS DE RECARGA DE  
ACUÍFEROS EN EL ORGANISMO DE CUENCA  
AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO  
MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

que para obtener el grado de  
**Maestría en Ciencias del Agua**  
**(Gestión Integral del Agua de Cuencas y Acuíferos)**

presenta:

**Victor Manuel Díaz García**

Tutor: Dr. Héctor Sanvicente Sánchez



**Instituto Mexicano de Tecnología del Agua**

**Programa de Posgrado**

## **Tesis**

**METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS DE RECARGA DE  
ACUÍFEROS EN EL ORGANISMO DE CUENCA  
AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO  
MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

que para obtener el grado de  
**Maestría en Ciencias del Agua**  
**(Gestión Integral del Agua de Cuencas y Acuíferos)**

presenta  
**Víctor Manuel Díaz García**

**Tutor: Dr. Héctor Sanvicente Sánchez**

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN EL ORGANISMO DE CUENCA AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

**VÍCTOR MANUEL DÍAZ GARCÍA**

*Jiutepec, Mor. 18 de abril de 2011*

Lugar y fecha



Firma

*¿Por qué esta magnífica tecnología científica, que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil, nos aporta tan poca felicidad? La respuesta es esta, simplemente: porque aún no hemos aprendido a usarla con acierto.*  
*Albert Einstein*

## CONTENIDO

CAPITULO 1	INTRODUCCIÓN	5
	▪ Objetivo	5
	▪ Antecedentes	5
CAPITULO 2	CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
	▪ Localización	10
	▪ Características	11
CAPITULO 3	CRITERIOS EMPLEADOS PARA ENCONTRAR ZONAS DE RECARGA DEL ACUÍFERO	16
	▪ Método de trabajo	16
	▪ La evaluación multicriterio	17
	▪ Antecedentes de este estudio en México	24
	▪ MCE-FLOWA y AHP	26
CAPITULO 4	APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO	30
	▪ Resultados	32
CAPITULO 5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
ANEXO 1	METODOLOGÍA	40
	BIBLIOGRAFÍA	58

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

La Cuenca de México cuenta con condiciones favorables para proponer sitios de recarga del agua subterránea lo cual constituye un factor importante en la gestión integrada el agua.

#### **OBJETIVO**

Los acuíferos de la cuenca de Valle de México sufren una severa sobreexplotación debida a que no se recarga en su totalidad de manera natural con el agua de lluvia; esta debería infiltrarse a través de zonas permeables, pero en la Cd. de México cada vez estas áreas son menores, además el agua de la lluvia es interceptada por la red del drenaje y pese a esto la ciudad tiene que enfrentar graves inundaciones en temporada de lluvias. Una consecuencia palpable de la sobreexplotación de acuíferos es el hundimiento de la ciudad y la aparición de grietas en la estructura del subsuelo.

La razón de este estudio es encontrar a través del uso de herramientas de los sistemas de información geográfica una metodología que permita identificar áreas a considerarse como zonas potenciales de recarga de uno de los acuíferos más importantes de esta cuenca que es el de Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

#### **ANTECEDENTES**

La infiltración derivada de la precipitación en la superficie de la tierra es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico. La infiltración es un proceso complejo y depende de las condiciones de utilización del suelo, de la vegetación, de la red fluvial, de la pendiente de la superficie, de la evaporación y de la precipitación.

La urbanización aumenta superficies impermeables en una cuenca y transporta la descarga del agua de lluvia al sistema de alcantarillas que descarga en afluentes externos. Esto da como resultado una menor infiltración y recarga del agua subterránea.

Este estudio presenta una técnica de localización a partir de un modelo digital de elevación (MDE) con elementos geográficos, geológicos, hidrológicos y de vegetación para la identificación de zonas potenciales para la infiltración en el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. La combinación de estos elementos como variables manejadas a través de un sistema de información geográfica (SIG) permitirá identificar esas zonas por medio de mapas.

La información que se emplea en esos elementos o capas es reciente y gratuita, y corresponde a aquella que está disponible a través de organismos públicos como INEGI, CONAGUA, CONABIO, SEMARNAT entre otros y que se va emplear en un SIG para configurar mapas.

La delimitación de los parteaguas se llevaba a cabo tradicionalmente en forma manual. Actualmente los parteaguas se trazan con la ayuda de los modelos digitales de elevación (MDE) además de redes de drenaje, pendientes, relieve, modelos hidrológicos y trayectorias de flujo superficial entre otras aplicaciones. Los estudios recientes demuestran que la exactitud de los parámetros extraídos de los MDE es comparable a los obtenidos por métodos manuales mientras que el tiempo de obtención es mucho menor (Saraf, 2004).

Respecto a identificar zonas de infiltración teniendo como base un MDE empleando las herramientas de un Sistema de Información Geográfico varios autores han llevado a cabo estudios apoyándose en el análisis multicriterio de Satty (1991), aplicado para la identificación de zonas de infiltración en rocas duras (Saraf, 1998) y en la recarga artificial en rocas volcánicas (Shankar, 2005); Ruman (2005), aplicó el análisis multicriterio y SIG para ubicar zonas de infiltración en una cuenca urbana. En cada caso se ha aplicado una técnica de análisis propia para identificar la ponderación o la importancia de cada criterio que se emplea en el análisis.

Las técnicas de evaluación multicriterio son algoritmos numéricos que definen la posibilidad de una solución con base a elementos con una ponderación asignada mediante una lógica matemática o interpretaciones lógicas; en esta técnica la

ponderación o peso es asignado a las capas de datos para reflejar una importancia relativa (Das, 2004).

La aplicación en un SIG del análisis multicriterio actualmente está simplificado ya que hay extensiones disponibles en la Web para la paquetería que maneja estas herramientas informáticas.

En este estudio se empleó una de ellas llamada MCE FLOWA debido a su versatilidad y fácil instalación, ya que otras extensiones que también están disponibles en la red presentaron diversas dificultades para que el software dedicado las pudiera reconocer así como el sistema operativo actual de una PC.

El software MCE FLOWA se utilizó en conjunto con la versión del Windows XP y con el ArcInfo 9.2 ya que en ambos casos la extensión pudo instalarse fácilmente, aunque también se instaló correctamente en Windows Vista junto con el ArcGis 9.3.1. (Chen, et.al. 2008) empleó la extensión FLOWA con el ArcGis 9.2 para la evaluación de la extensión de zonas de irrigación en tierras de cultivo en una región de Australia, obteniendo elementos importantes para la toma de decisiones.

En el estudio que aquí se expone se representa un técnica en desarrollo bajo un modelo conceptual con el empleo de un SIG que podrá aplicarse en cualquier otra zona que requiera encontrar zonas potenciales de recarga para acuíferos.

Existen otros estudios que se han efectuado para ubicar zonas de recarga para el acuífero de la Ciudad de México como el de Lesser (1990) que utilizó una técnica diferente basada en características litológicas de los afloramientos; sin embargo a la fecha no se ha encontrado un reporte en donde se haya empleado la técnica que se trata en este estudio aplicada a algún acuífero dentro de los límites del Organismo de Cuenca de Valle de México o similar.

De acuerdo con la publicación “Mexico City’s Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability” (1995), la recarga artificial de acuíferos se ha practicado en la Cuenca de México desde 1943 para evitar inundaciones habiendo mención de que varios proyectos de este tipo se llevaron a cabo en el basalto fracturado que resulta altamente permeable de las partes altas que mostraron alto índice de infiltración durante los periodos de lluvias intensas, y fue hasta 1953 que se utilizó en la recarga del subsuelo. Posteriormente, en 1983 se construyeron dos plantas piloto para la recarga de agua tratada al subsuelo, la más importante la del Cerro de la Estrella que opera hoy en día.

La UAM publicó en el libro *Repensar la Cuenca* (2009), acerca de sitios en donde se sugieren zonas estratégicas para recarga artificial de acuíferos que fueron evaluadas a través de un conjunto de parámetros (figura 1).

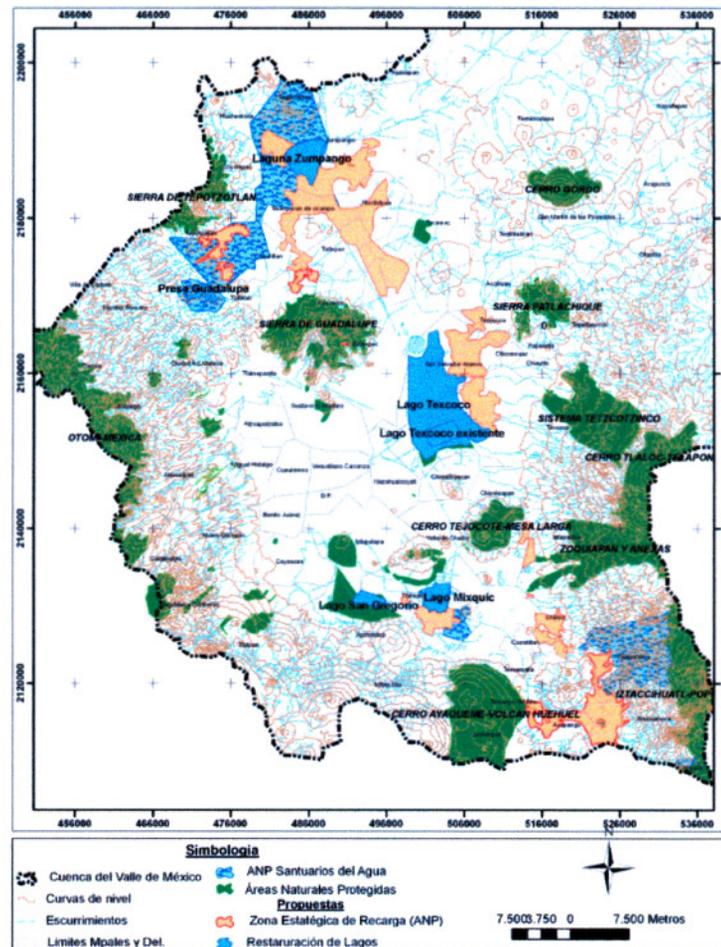


Figura 1. Zonas estratégicas para la recarga del agua subterránea en la Cuenca de México (tomado de UAM, 2009).

Así también la determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México fue publicada por la CONAGUA (2002) en un estudio específico y posteriormente en el Diario Oficial de la Federación (CONAGUA, 2003 y 2009).

Sobre este acuífero también se han hecho estudios sobre la posible coincidencia de la cuenca superficial con la subterránea (Perevochtchikova , *et al.* 2006), en donde se pone de manifiesto la necesidad de una mayor cantidad de estudios.

Leyva, E. (2010), en su estudio sobre modelación sobre el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, menciona que la zona de recarga mas importante es la Sierra Chichinautzin y sus alrededores, debido a la alta permeabilidad de las rocas, pero descarta otras fuentes. Asimismo, distingue un acuífero libre de mayor extensión y otro confinado, los que han variado en extensión con el tiempo (figura 2).

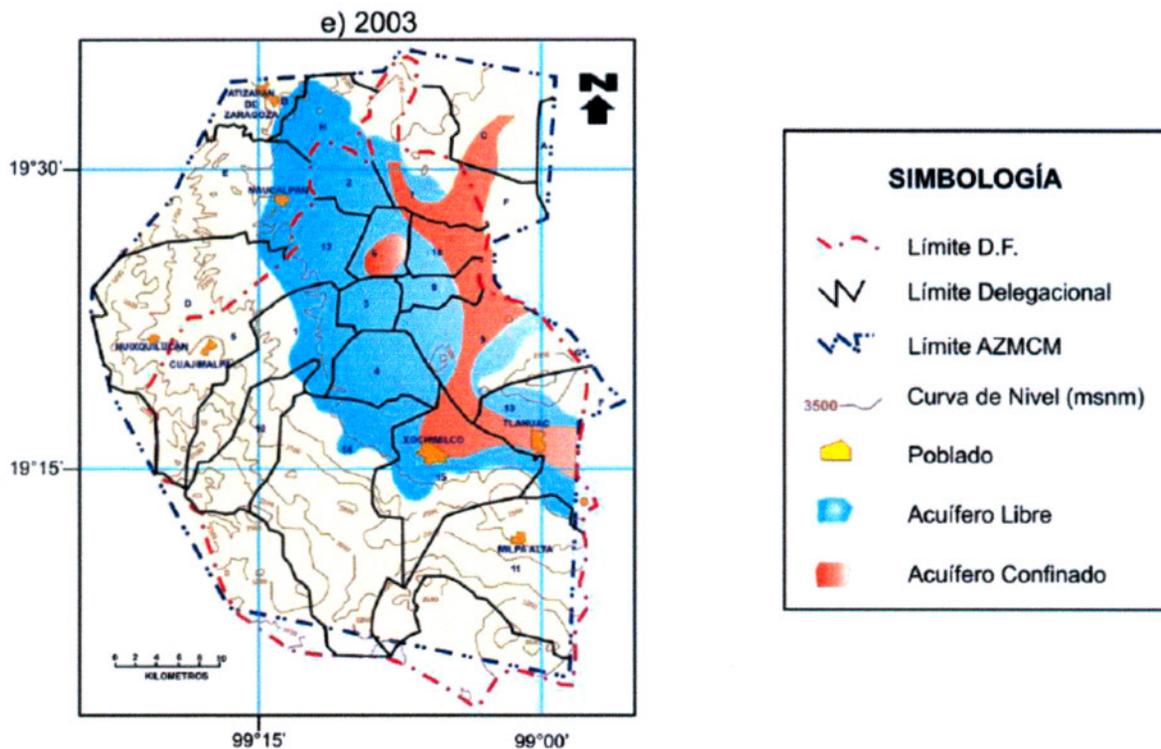


Figura 2. Mapa que muestra la extensión al año 2003, de los dos tipos de acuíferos que se encuentran dentro de los límites del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (tomado de Leyva, E. 2010).

En cuanto a la vulnerabilidad en el abastecimiento de los recursos de agua potable para la Cuenca de México (Escolero, *et al.*, 2009), la situación es crítica ante la falta de una estructura eficaz para la planeación territorial que realiza cambios de uso de suelo para urbanización en áreas de recarga. Recientemente el Sistema de Información de Agua Potable y Saneamiento (SIAPS), muestra en un SIG que los límites de las áreas de ordenamiento territorial y suelo de conservación para el Distrito Federal están rebasados por asentamientos urbanos.

## CAPITULO 2

### CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### LOCALIZACIÓN

El área de estudio (figura 3) comprende exclusivamente la zona superficial dentro de los límites marcados como el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México cuyas siglas son: ZMCDM (CONAGUA, 2003), el cual forma parte de la Cuenca del Valle de México en la porción central del país.

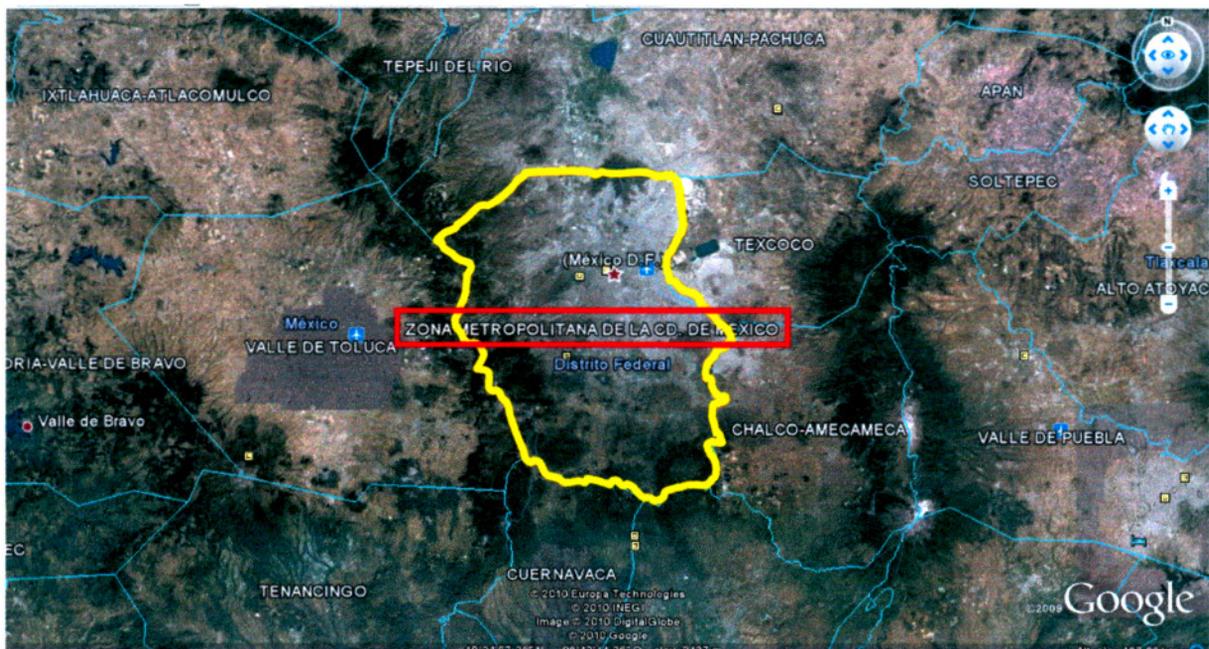


Figura 3. Imagen satelital de Google Earth muestra los límites asignados por la CONAGUA para el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México y que comprende el área de estudio (Tomado de LOCREPDA, CONAGUA, 2010).

El acuífero ZMCDM (figura 3) tiene una extensión de 2,013.16 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2010) y colinda al oriente con dos acuíferos que son, el acuífero de Texcoco y el de Chalco-Amecameca, al poniente colinda con el de Valle de Toluca, al norte con el acuífero de Cuautitlán-Pachuca y al sur, con el de Cuernavaca y el de Cuautla-Yautepec.

## CARACTERÍSTICAS

La zona que cubre la extensión del acuífero de estudio se consideró como zona piloto para aplicar la técnica del MCE FLOWA ya que presenta una cobertura urbana muy extensa que es la ciudad de México la cual ha limitado la recarga natural; las necesidades de agua de esta zona van en aumento por la densidad de población que concentra (CONAGUA, 2010) además de que presenta otros problemas de hundimiento y fracturamiento del suelo (UAM, 2009).

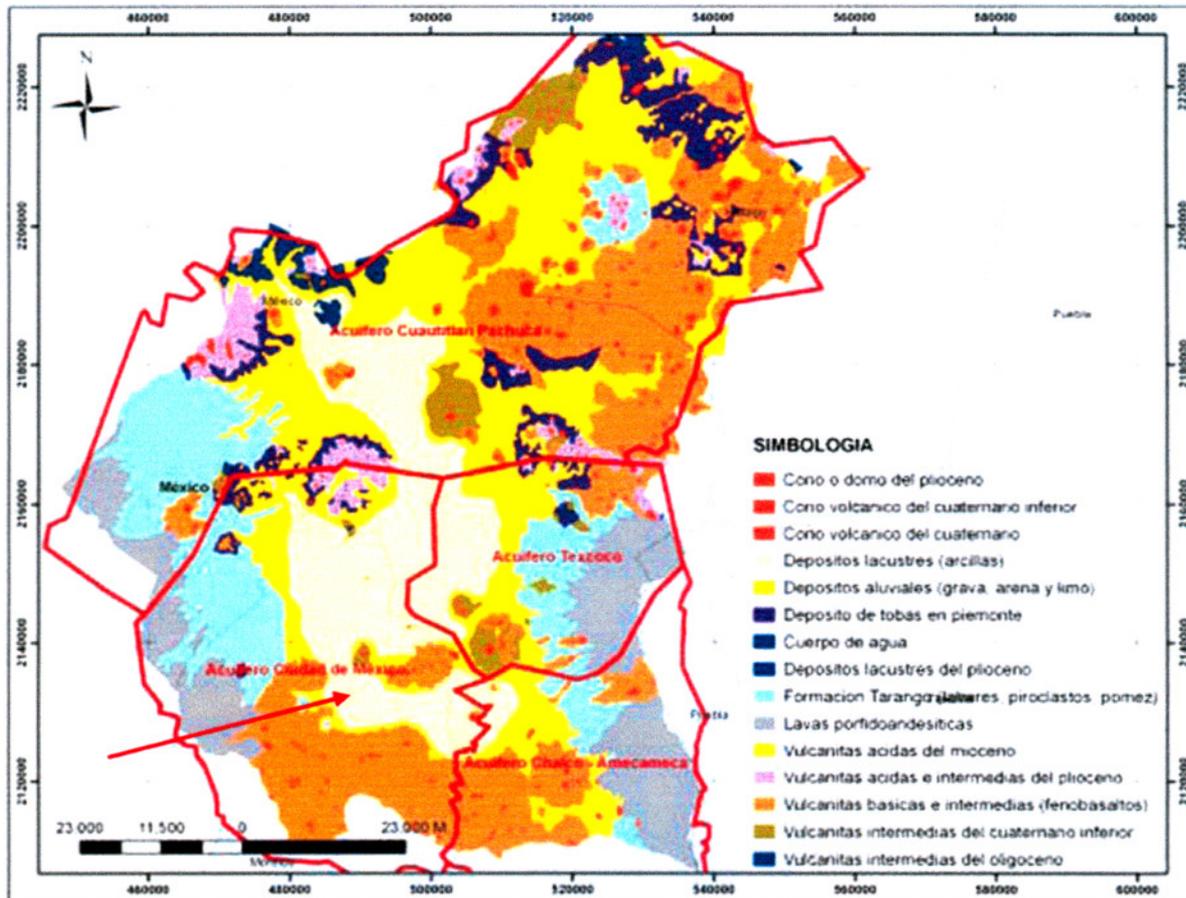


Figura 4. Mapa geológico que muestra las diferentes litologías y cuerpos de agua que afloran en el Acuífero de la Ciudad de México o Zona Metropolitana, dentro de la Cuenca de México (tomado de Repensar la Cuenca, UAM, 2009).

Para la geología dentro de los límites del acuífero de Zona Metropolitana de la Ciudad de México (figura 4), las litologías del Cuaternario (Mosser, 1996) que definen los fenobasaltos y domos volcánicos (en color naranja y amarillo ocre) establecen las áreas de mayor potencial de infiltración de acuerdo con su porosidad (UAM, 2009) y múltiples fracturamientos descritos por Marín-Córdoba *et al.*

(1989), Santoyo *et al.* (2005) y posteriormente por García-Palomo *et al.* (2008); seguidas en orden de importancia por las litologías de lavas porfidoandesíticas (en color gris) y de los afloramientos de la formación Tarango en color azul claro; así como también los depósitos aluviales (en color amarillo) ubicados en la parte baja de la cuenca que generalmente son la fuente del agua subterránea ya que reciben su recarga de las elevaciones cercanas. Sin embargo estas zonas consideradas también favorables para la recarga del acuífero, la mancha urbana las ha estado cubriendo con su extensión continua (figura 5).

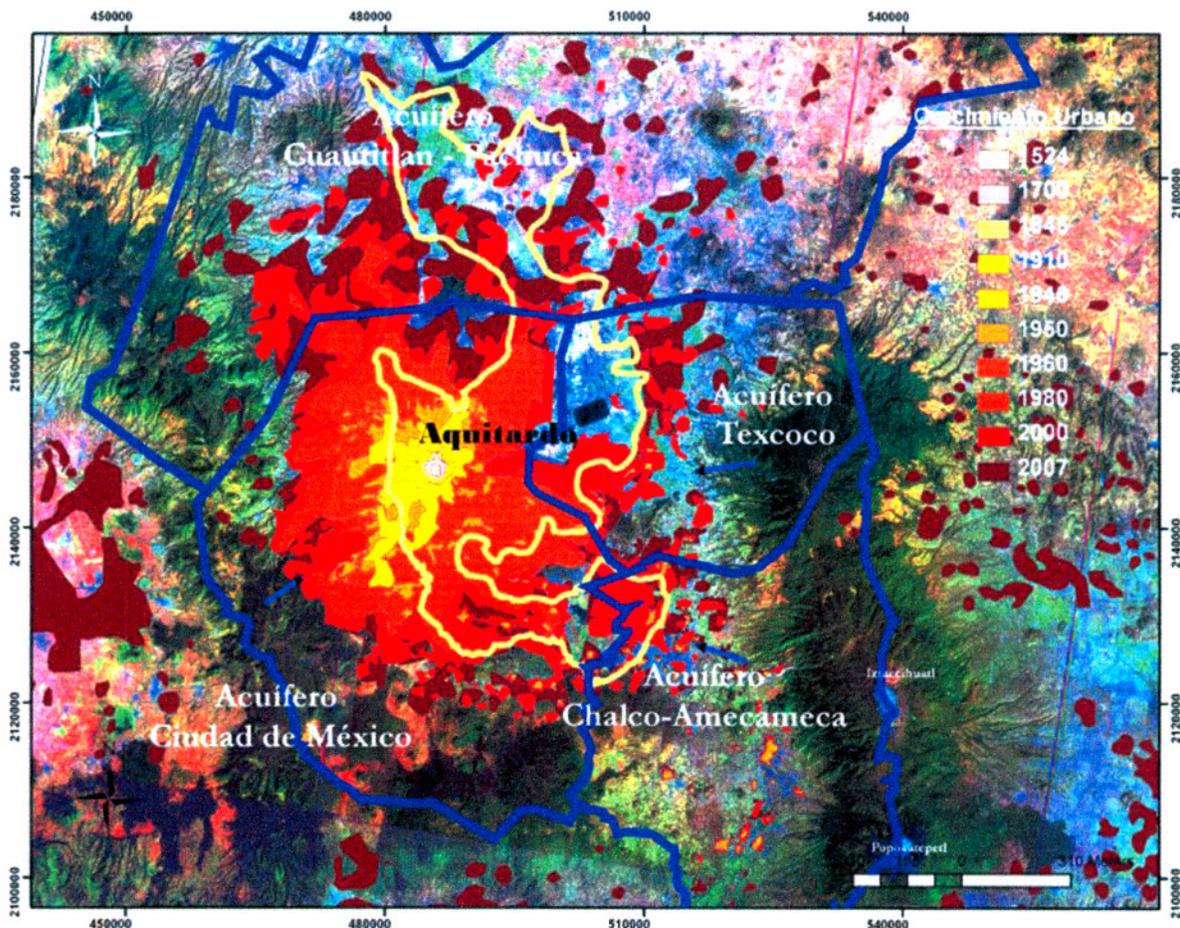


Figura 5. Evolución de la mancha urbana en la Cuenca de México (tomado de: Repensar la Cuenca, UAM 2009).

Desde los inicios del siglo pasado, la mancha urbana empezó a extenderse más allá del lecho lacustre (figura 5), para empezar a cubrir las zonas permeables de recarga a su alrededor; primero por la Sierra Las Cruces (desde 1910), para luego extenderse sobre la Sierra Ajusco (1950), la Sierra Guadalupe y Tepozotlán (1990) y actualmente por la Sierras Nevada y de Río Frío (1990).

Al impermeabilizar los suelos agrícolas y forestales en estas décadas, la cuenca no sólo perdió capacidad de recarga, sino la capacidad de autorregularse con respecto a los picos de lluvia. El agua que antes había recargado los acuíferos, empezó a escurrir libremente e inundar las zonas urbanas cuenca abajo, primero en el poniente, luego en el sur, y más recientemente, en el sureste y oriente.

Las zonas naturales de recarga de los acuíferos lamentablemente tienden a desaparecer si no se controla la concesión de uso del suelo y del agua originalmente destinado para la agricultura o bosque, para convertirlas en zonas de desarrollo urbano lo cual está aniquilando en parte el ciclo hidrológico en esta cuenca y principalmente para este acuífero. En 1910 la Ciudad de México tenía una extensión de 27 km<sup>2</sup>, en 1990 alcanzó 1,209 km<sup>2</sup> (UAM, 2009). Con la actual tendencia de crecimiento urbano desarrollada por el gobierno de la capital del país y del Estado de México, se espera que la superficie de la mancha urbana rebase los 1,500 km<sup>2</sup> para el año 2020.

Acuífero Zona Metropolitana de la Cd. De México	Recarga hm <sup>3</sup> /año	Extracción hm <sup>3</sup> /año DOF 31/1/03	Volumen concesionado y/o registrado REPDA 31/1/03	Relación concesionada/ Recarga 31/12/07	Déficit aguas subterráneas al 31/12/07
(UAM, 2009)	279	507.4	1248	4.47	-969

Tabla 1. El déficit de este acuífero es importante ante una gran extracción y un volumen concesionado importante según se publicó en el Diario Oficial de la Federación (CONAGUA, 2003).

La disponibilidad de agua subterránea en este acuífero es deficitaria, la UAM (2009) publicó datos (tabla 1) que representan valores de los años 2003 y que algunos de ellos como el volumen concesionado y el déficit de aguas subterráneas los consignó como del 2007, sin embargo corresponden al 2003 según lo publicado en el Diario Oficial de la Federación (CONAGUA, 2003); pero la Comisión Nacional del Agua actualizó dichas cifras en 2009.

La extracción medida (tabla 1) es superior a la recarga total media anual, y el volumen concesionado de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) presenta cifras muy elevadas que no garantizan la recuperación del acuífero, razón por la que es deficitario y además está sobreexplotado, no obstante que no hay una descarga natural comprometida.

(tabla 2) y la situación el acuífero aparentemente mejoró por una mayor recarga debido a los nuevos caudales que inyectan los pozos de absorción y disminución del volumen concesionado de acuerdo con las cifras publicadas, pero con un aumento en la extracción. Según el censo realizado en la Región XIII Aguas del Valle de México por la CONAGUA (2007) este acuífero contaba con 1,524 pozos de los cuales 304 carecían de título de concesión (figura 6).

Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México	Recarga hm <sup>3</sup> /año 28/08/09	Extracción hm <sup>3</sup> /año DOF 28/08/09	Volumen concesionado y/o registrado REPDA 28/08/09	Relación concesionada/ Recarga 28/08/09	Déficit aguas subterráneas al 28/08/09
Tomado de CONAGUA (2009)	512.8	623.8	1226.4	2.39	-713.6

Tabla 2. Después de 6 años el acuífero muestra signos de mejoría ya que sus valores deficitarios disminuyeron pero la extracción aumentó así como la recarga, mientras que el volumen concesionado disminuyó levemente.

De acuerdo con las cifras, el aumento en la extracción puede deberse en parte a que hay un mayor número de pozos trabajando actualmente, ya que al estar vedado este acuífero y no dar lugar a nuevas concesiones que extraigan mas volumen de agua, la extracción si no permaneció constante debió haber disminuido o cambiado de uso.

Distrito Federal	2004		2008	
	Superficial	Subterráneo	Superficial	Subterráneo
USO				
Agrícola	370,000		365,040	75
Agroindustrial				
Domestico				16,390
Acuicultura	190,000		189,216	
Servicios	950,000	4,320,000	224,640	3,964,864
Industrial		29,720,000		28,265,872
Pecuario				
Público Urbano	309,050,000	780,520,000	309,052,800	780,516,000
Múltiple		290,000		2,910,000
Energía Eléctrica				
Total	310,560,000	814,850,000	309,831,696	815,673,201

Tabla 3. Usos del agua para el Distrito Federal de acuerdo al REPDA (m<sup>3</sup>/ año). Tomado de Estadísticas del Agua de la Región Hidrológica Administrativa XIII, Aguas del Valle de México 2005 y 2009 respectivamente.

Pero como la construcción de viviendas se ha incrementado en la ciudad, la consecuencia ha sido una mayor cantidad de demanda de agua para uso urbano que se traduce en que los pozos existentes estén extrayendo más agua de la concesionada o bien que se hayan realizado más perforaciones; sin embargo para la Comisión Nacional del Agua (D.O.F, 2009) no hay concesiones nuevas, pero para el gobierno capitalino es otra situación ya que sigue autorizando cambios de uso del agua ante la extensión de la ciudad sobre zonas agrícolas (UAM, 2009).

Sin embargo en el Distrito Federal los usos y los volúmenes concesionados de acuerdo con el REPDA (tabla 3), no presentan una variación significativa en el lapso de los últimos años (2004 al 2008), no obstante estar localizado dentro de los límites del acuífero de la ZMCDM en donde reporta la CONAGUA (2009) disminución importante en los volúmenes registrados.

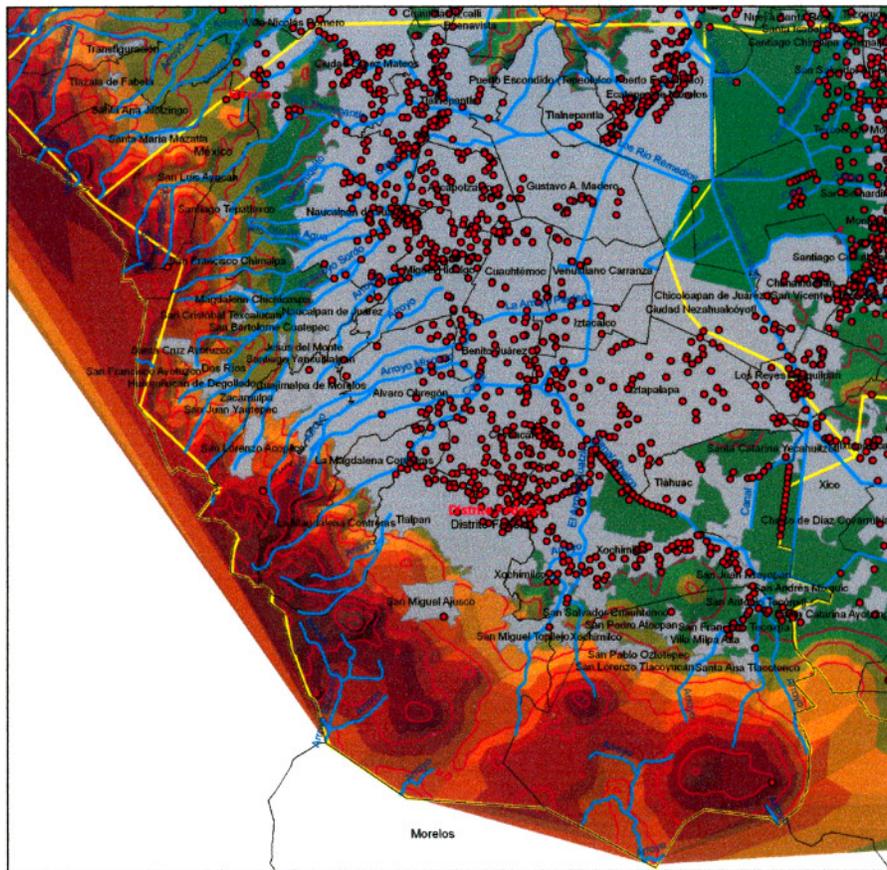


Figura 6. Esta imagen elaborada con MDE muestra el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México señalado por una línea amarilla; en la imagen las áreas elevadas están en color oscuro y las zonas bajas de color verde y gris que es en donde se encuentra la Ciudad de México. Los puntos rojos representan más de 1524 pozos que extraen agua del acuífero.

## **CAPITULO 3**

### **CRITERIOS EMPLEADOS PARA ENCONTRAR ZONAS DE RECARGA DEL ACUÍFERO**

En este trabajo se empleo el análisis multicriterio a través de una interfase operativa instalada en un paquete informático para procesar información geográfica; a continuación se describe esta extensión así como los criterios utilizados y su ponderación para la obtención del resultado.

#### **MÉTODO DE TRABAJO**

El análisis de los criterios múltiples (AMC) o multicriterio es un término general para una colección de técnicas transparentes y sistemáticas que ayudan a solucionar un problema de decisión. Los AMC se aplican en una variedad de disciplinas y la ventaja más grande es que la información heterogénea se puede procesar junta. En términos del AMC un problema consiste en las opciones de la decisión (alternativas de la decisión) y en los criterios de decisión.

Las opciones y los criterios de decisión se utilizan para construir una matriz de evaluación que sostenga el funcionamiento de los resultados sobre las opciones de cada criterio. La importancia de cada uno de los criterios es expresada por un peso, entre más peso consigue un criterio, adquiere mayor importancia.

Todos los criterios o factores que se consideran relevantes para una decisión se comparan cara a cara en parejas en una matriz de comparación en la que se utilice un peso como una medida para expresar la preferencia relativa entre los factores. Por lo tanto, los valores numéricos que expresan un juicio de la importancia relativa (o de la preferencia) de un factor contra otro tienen que ser asignados a cada uno.

La explicación de cómo opera esta metodología asignando valores numéricos y de cómo operan en la matriz comparativa de criterios está descrita por Saaty (1980 y 1991) en sus inicios; actualmente hay una gran variedad de trabajos publicados en donde este método ha sido empleado en aspectos hidrológicos como en el trabajo

de Phukon (2004) y más recientemente con Yu (2009), en donde se pueden manejar hasta 20 criterios.

En este trabajo se empleó la extensión MCE-FLOWA (multicriteria evaluation fuzzy linguistic ordered weighted averaging) la cual se incorporó al ArcInfo 9.2 a partir de la página Web de ESRI, así como también la extensión AHP (Analytical Hierarchy Process) también de ESRI que complementa la evaluación por la facilidad de emitir reportes pero que no aplica los cuantificadores lingüísticos de la primera extensión y que se utilizaron en el presente estudio.

## LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO

A continuación se hace una breve síntesis de lo que consiste el método MCE que emplea MCE FLOWA que tiene su fundamento en lo descrito por Satty (1980) para este tipo de evaluaciones y que para este caso es una aplicación en los SIG.

El proceso de evaluación multicriterio (EMC en inglés: MCE) consiste en un conjunto de técnicas enfocadas en obtener modelos para evaluar y tomar una decisión con base en criterios y objetivos establecidos en un ambiente multidimensional; tomar una decisión con base en criterios y objetivos estando en conflicto no es fácil ya que un mismo objetivo puede ser visto como mas importante para unos y sin importancia para otros. El problema general de la EMC es seleccionar aquella alternativa que mejor satisfaga las preferencias del decisor.

En los SIG las alternativas son unidades espaciales conocidas como objetos de tal forma que en los modelos rasters son celdas y en los vectoriales son puntos, líneas y polígonos, agrupándose en una sola categoría constituyendo una capa tematica donde el número de categorías es igual a las capas que quieran establecerse dando un conjunto global de alternativas de selección.

Las alternativas son cada una de las soluciones posibles a un problema, dotadas de ventajas e inconvenientes diferentes. Las alternativas pueden ser proyectos, ó polígonos, o puntos del plano y puede haber “m” alternativas:

$$A_i \quad (i=1, m)$$

- Son completamente disjuntas y exhaustivas.
- No cabe concebir alterativas “intermedias” a las enumeradas.

- Si tales alternativas quisieran considerarse se añade simplemente con carácter individual a la lista anterior.
- El conjunto  $\{A_i\}$  es discreto y universal para los efectos de la EMC aplicada a los SIG.

La decisión es la elección de unas de las alternativas posibles para solucionar un problema. Esta es el resultado final que se espera después de aplicar cualquier método de EMC. Se considera un criterio los distintos aspectos de la realidad que inciden en las ventajas o desventajas de las alternativas disponibles como soluciones al problema. Los criterios son conocidos también como atributos o variables y sobre ellos se basa la decisión. Los criterios son conocidos también como: atributos o variables y sobre ellos se basa la decisión y forman un conjunto discreto:

$$\{C_j\} \quad (j=1, n)$$

La regla de decisión tiene como insumos a las capas de cada criterio, de tal forma que para poder llevar a cabo la evaluación es necesario que la regla de decisión se aplique en las capas criterio junto con las limitantes para poder obtener el modelo de decisión. El conjunto de procedimientos de la EMC aplicables en un entorno SIG, basan su funcionamiento aritmético en lo que se ha definido como regla de decisión, que es de donde se evalúa y se logra tener como resultado final el modelo de decisión. La mejor forma de ordenar una relación de criterios con una de alternativas que define la EMC, es una matriz y se le conoce con el nombre de Matriz de Evaluación (figura 7); también recibe otros nombres como matriz de puntuación, matriz de efectividad o matriz de proyecto-efecto.

		ALTERNATIVAS ( i )					
		1	2	3	4	...	i
CRITERIOS ( j )	1	PUNTUACIÓN DE CRITERIOS ( X <sub>ij</sub> )					
	2						
	3						
	·						
	·						
	J						

Figura 7. Matriz de Evaluación.

Su diseño debe hacerse con mucha certeza y cuidado porque de aquí es de donde los distintos métodos de EMC basan todo su funcionamiento intrínseco para lograr

la evaluación de las alternativas. El resultado del proceso de evaluación está marcado en la asignación de valores a las alternativas y por lo general las variables o criterios a evaluar no están medidos en escala de intervalos o razón si no que en los SIG, se presenta frecuentemente una escala nominal. El punto ideal es el vector que contiene los valores más altos de cada criterio (valores más altos de cada fila en la Matriz de Evaluación).

La ponderación o asignación de pesos es asignar un valor específico a cada criterio que concuerde con su importancia relativa; este valor específico se le conoce como ponderación o peso y es expresado mediante números naturales o en porcentajes (tabla 7 y anexo 1, paso 8). Cuando los pesos se han asignado a cada criterio se genera una matriz que contenga las prioridades (figura 8). Para poder asignar los pesos es recomendable aunque no siempre es posible, contar con un grupo interdisciplinario con el fin de que no se obtenga un resultado sesgado hacia un criterio del cual fueran todos expertos o ninguno.

		CRITERIOS (J)					
		1	2	3	4	...	J
PUNTOS DE VISTA (V)	1	PESOS (P <sub>j</sub> )					
	2						
	3						
	·						
	·						
	V						

Figura 8. Asignación de pesos en la Matriz de Prioridades.

Obteniendo las matrices de Evaluación y Prioridades, se emplean una serie de métodos para generar la matriz final denominada de Valoración en la cual cada alternativa ha obtenido un valor, según cada uno de los puntos de vista planeados.

		ALTERNATIVAS (I)					
		1	2	3	4	...	I
PUNTOS DE VISTA (V)	1	VALORES (r <sub>i</sub> )					
	2						
	3						
	·						
	·						
	V						

Figura 9. Matriz de Valoración.

Los valores  $r_i$  son una función del número y naturaleza de los criterios, las prioridades empleadas y las técnicas aritméticas aplicadas.

Después de haber asignado puntuación a los criterios y pesos asignados a cada criterio se puede utilizar el método de suma ponderada como un método de Evaluación Multicriterio. El método de ponderación de los factores que se empleó en este ejercicio con la extensión MCE FLOWA es el de eigenpesos descrito por Saaty (1980).

Por ejemplo, considerar dos criterios “A” y “B” con valores en sus alternativas  $x_{ij}$  y el peso para cada criterio  $w_j$  de 0.66 y 0.34 respectivamente, se aplica el método de la suma ponderada donde cada cuadro es una celda (figura 10).

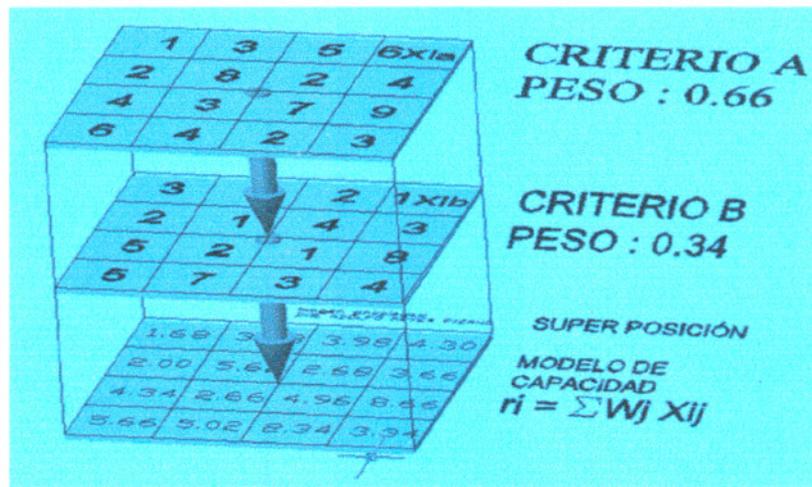


Figura 10. Suma ponderada de dos criterios.

Se trata de un procedimiento de comparación por pares de los criterios, que parte de una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar.

Así se establece una matriz de comparación entre pares de criterios, comparando la importancia de cada uno de ellos con los demás, posteriormente se establece el eigenvector principal, el cual establece los pesos ( $w_j$ ) que a su vez proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores.

La escala de medida que se emplea en este método y que estima el coeficiente  $a_{ij}$ , ha surgido de 28 escalas alternativas, es una escala de tipo continuo (ratios o razón) que va desde un valor mínimo de  $1/9$  hasta 9.

El coeficiente  $a_{ij}$  vale cuando el criterio  $i$ , al compararlo con  $j$ , es:

Absolutamente menos importante	1/9
Demostablemente menos importante	1/7
Notablemente menos importante	1/5
Ligeramente menos importante	1/3
Igualmente importante	1
Ligeramente más importante	3
Notablemente más importante	5
Demostablemente más importante	7
Absolutamente más importante	9

En este procedimiento en primer lugar se determina la importancia relativa de la variable de cada fila en relación a la variable de su columna correspondiente, así, es preciso primero, completar toda la matriz introduciendo en el triángulo superior-derecho el inverso del valor de la celda correspondiente del triángulo inferior-izquierdo, lo cual MCE FLOWA lo hace de manera automática.

De esta manera si consideramos los criterios enlistados en la primera columna como los criterios “ $i$ ” y los criterios ordenados en el primer renglón como los criterios “ $j$ ” considerando que:

- criterio  $i$  = criterio  $j$
- criterio  $ii$  = criterio  $jj$
- criterio  $iii$  = criterio  $jjj$

Entonces podemos representar esto como una matriz igual a la siguiente (tabla 4):

FACTORES	Criterio $j$	Criterio $jj$	Criterio $jjj$
Criterio $i$	$a_{11}$	$a_{21}$	$a_{31}$
Criterio $ii$	$a_{12}$	$a_{22}$	$a_{32}$
Criterio $iii$	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{33}$

Tabla 4. Matriz de variables de comparación por pares.

Posteriormente, es preciso sumar cada columna para obtener un marginal de columna, y a continuación, se genera una nueva matriz mediante la división de cada celda entre el marginal de su columna (tabla 5).

FACTORES	Criterio j	Criterio jj	Criterio jjj
Criterio i	$a_{11/\Sigma A}$	$a_{21/\Sigma B}$	$a_{31/\Sigma C}$
Criterio ii	$a_{12/\Sigma A}$	$a_{22/\Sigma B}$	$a_{32/\Sigma C}$
Criterio iii	$a_{13/\Sigma A}$	$a_{23/\Sigma B}$	$a_{33/\Sigma C}$

Tabla 5. Se genera una nueva matriz.

Y por último, se genera el eigenvector principal normalizado (tabla 6).

FACTORES	Criterio j	Criterio jj	Criterio jjj	Eigenvector principal	Eigenvector principal normalizado
Criterio i	$a_{11/\Sigma A}$	$a_{21/\Sigma B}$	$a_{31/\Sigma C}$	$\Sigma i = a_{11/\Sigma A} + a_{21/\Sigma B} + a_{31/\Sigma C}$	$\Sigma i / n$
Criterio ii	$a_{12/\Sigma A}$	$a_{22/\Sigma B}$	$a_{32/\Sigma C}$	$\Sigma ii = a_{12/\Sigma A} + a_{22/\Sigma B} + a_{32/\Sigma C}$	$\Sigma ii / n$
Criterio iii	$a_{13/\Sigma A}$	$a_{23/\Sigma B}$	$a_{33/\Sigma C}$	$\Sigma iii = a_{13/\Sigma A} + a_{23/\Sigma B} + a_{33/\Sigma C}$	$\Sigma iii / n$

Tabla 6. Eigenvector principal normalizado en la matriz.

Este procedimiento a diferencia de otros permite verificar la consistencia de los juicios de valor asignados mediante un dato cuantitativo obtenido después de obtener los pesos; este valor se le denomina “Razón de Consistencia” (c.r.) por sus siglas en ingles (consistency ratio) que se establece mediante el cociente del índice de consistencia (c.i.), por sus siglas en ingles (consistency index) y el índice aleatorio (r.i.) por sus siglas en ingles (random index). MCE FLOWA calcula este cociente en forma automatizada simplificando el consumo de recursos en estas operaciones.

A continuación se describe el procedimiento para la obtención de estos índices y cocientes:

c.r. (razón de consistencia)

$$c.r. = \frac{c.i.}{r.i.}$$

- Si  $c.r. \geq 0.10$  Los juicios de valor no son suficientemente consistentes para establecer los pesos ( $w_j$ ).
- Si  $c.r. \leq 0.10$  Se consideran satisfactorios los juicios de valor asignados.

El índice de consistencia c.i. es un valor que se obtiene a partir del eigenvalor máximo ( $\lambda_{MAX}$ ) de la siguiente manera:

$$c.i. = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1}$$

Donde  $n$  = número de factores en la matriz de comparación

El eigenvalor máximo  $\lambda_{MAX}$  se obtiene de la manera siguiente: se lleva a cabo el producto de la matriz de comparación por pares por el eigenvector principal normalizado. Del vector resultante de orden  $n \times 1$  se divide cada elemento entre cada uno de los correspondientes elementos del eigenvector principal normalizado resultando otro vector "a" de orden  $n \times 1$ .

Se suman todos sus componentes de este vector columna "a" $_{n \times 1}$  y se divide entre "n" obteniendo así el eigenvalor máximo  $\lambda_{MAX}$  que será utilizado para calcular el índice de consistencia i.c. (c.i. en inglés).

El índice aleatorio (r.i.), representa el índice de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente a partir de una escala de 1/9 hasta 9 con juicios de valor recíprocos y diagonal compuesta de la unidad (1). Los valores para el índice de consistencia aleatorio (r.i.) se encuentran en Saaty (1980, p. 21).

Resumiendo las fases de un proceso de EMC:

- Plantear el objetivo (u objetivos).
- El espacio a ser evaluado (alternativas).
- Definir los criterios (factores y limitantes).

Para el caso de los SIG se refiere a problemas en el espacio donde los criterios estarán asociados a entidades geográficas y las entidades a otras entidades representándolas en capas temáticas.

Esta herramienta integra el ArcGIS con un módulo del proceso de jerarquización analítico (AHP); usando este procedimiento que hace un promedio ponderado a través del cuantificador-dirigido (OWA), el AHP-OWA es el operador de la combinación de los criterios múltiples. La naturaleza del AHP-OWA depende de parámetros que se expresan por medio de cuantificadores lingüísticos a veces no muy claros o ambiguos. Cambiando los términos lingüísticos el AHP-OWA puede generar una amplia gama de las estrategias de decisión.

Aquí se propone el empleo de un sistema de evaluación de criterios múltiples con la puesta en práctica del AHP-OWA (MCE-LOWA) dentro de ArcGIS, que es capaz de integrar etiquetas dentro del EMC convencional para la toma de decisión espacial, por lo que se sugiere que el SIG-EMC propuesto simplificará la definición de las estrategias de decisión y facilitará un análisis exploratorio de criterios múltiples incorporando la información cualitativa dentro del análisis.

### ANTECEDENTES A ESTE ESTUDIO EN MEXICO

Una metodología similar empleando la extensión AHP fue aplicada en tres acuíferos del estado de Aguascalientes (Velázquez, L. *et al.*, 2004), en una extensión importante de terreno (figura 11) y con múltiples factores que intervinieron en el análisis de información para definir inicialmente las zonas de descarga y recarga; la jerarquía del sistema de flujo se relacionó con la temperatura del agua. Los flujos regionales y los locales fueron identificados por el contraste de temperatura coincidiendo los primeros con valores de 30°C o más y los otros con agua con temperatura menor a 30°C. El espesor de las unidades geológicas constato el recorrido regional del agua de mayor temperatura.

A diferencia de la metodología empleada en el acuífero ZMCDM en el estudio de Aguascalientes las zonas potenciales de recarga se diferenciaron a través del análisis del relieve considerando las de más alta elevación como responsables del proceso, las rocas volcánicas observadas permitieron constatar su potencialidad de recarga, lo cual coincide en parte con las zonas de recarga identificadas en Valle de México (figura 1). Esta definición estuvo acorde con los niveles más profundos del nivel estático reportados en Aguascalientes; por otra parte, la escasa cubierta vegetal se consideró como una característica positiva para la recarga a diferencia de que en la Cuenca de Valle de México la vegetación es más abundante y disminuye la recarga natural.

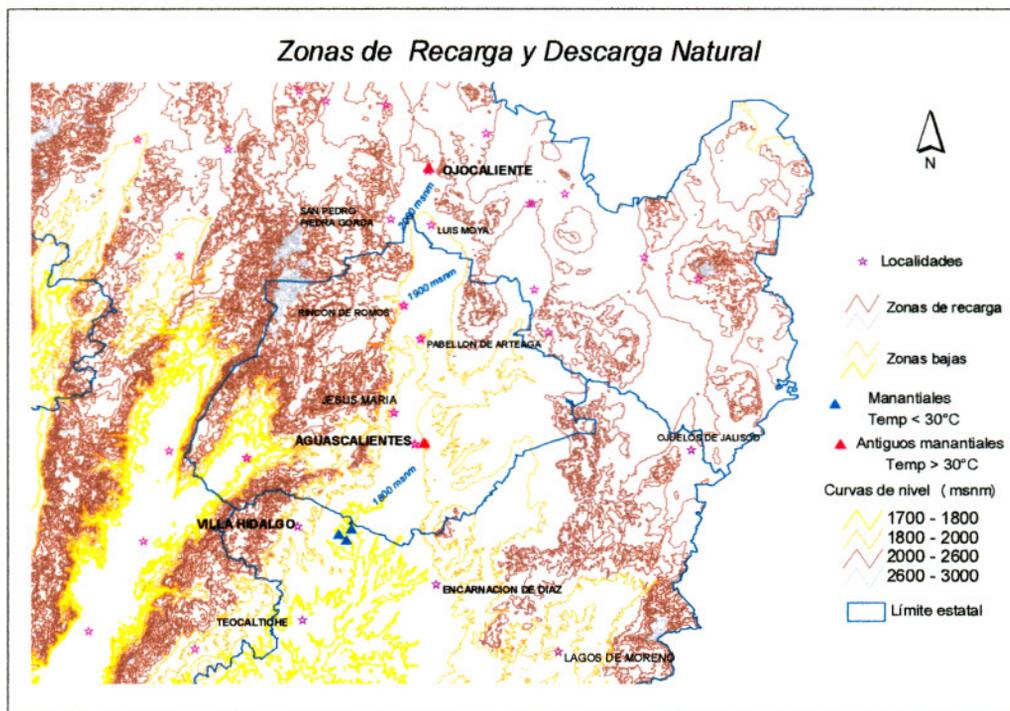


Figura 11. Zona de los acuíferos Valle Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación.

Otro estudio que se llevó a cabo en la costa de Villa Unión, Sin., por Malcewski (2006) enfocado al uso de la tierra para urbanización, empleó la extensión OWA que es antecedente a la de FLOWA en un SIG, utilizando un sistema de análisis de imágenes satelitales y encontró resultados similares en la precisión de la información, empleando los cuantificadores lingüísticos para la obtención de mapas en conjunto con múltiples criterios y análisis estadístico detallado.

De los mapas obtenidos como resultado del estudio (figura 12), de los cuales se descartaron cinco porque no aportan datos significativos, se consideraron los

mapas de “atleast a few” y “atleast one” por el valor a partir de 1.00 como óptimo hacia cero para la toma de decisiones en la selección de áreas cercanas a las vías de comunicación y cercanas a la ciudad (valores en la leyenda del mapa).

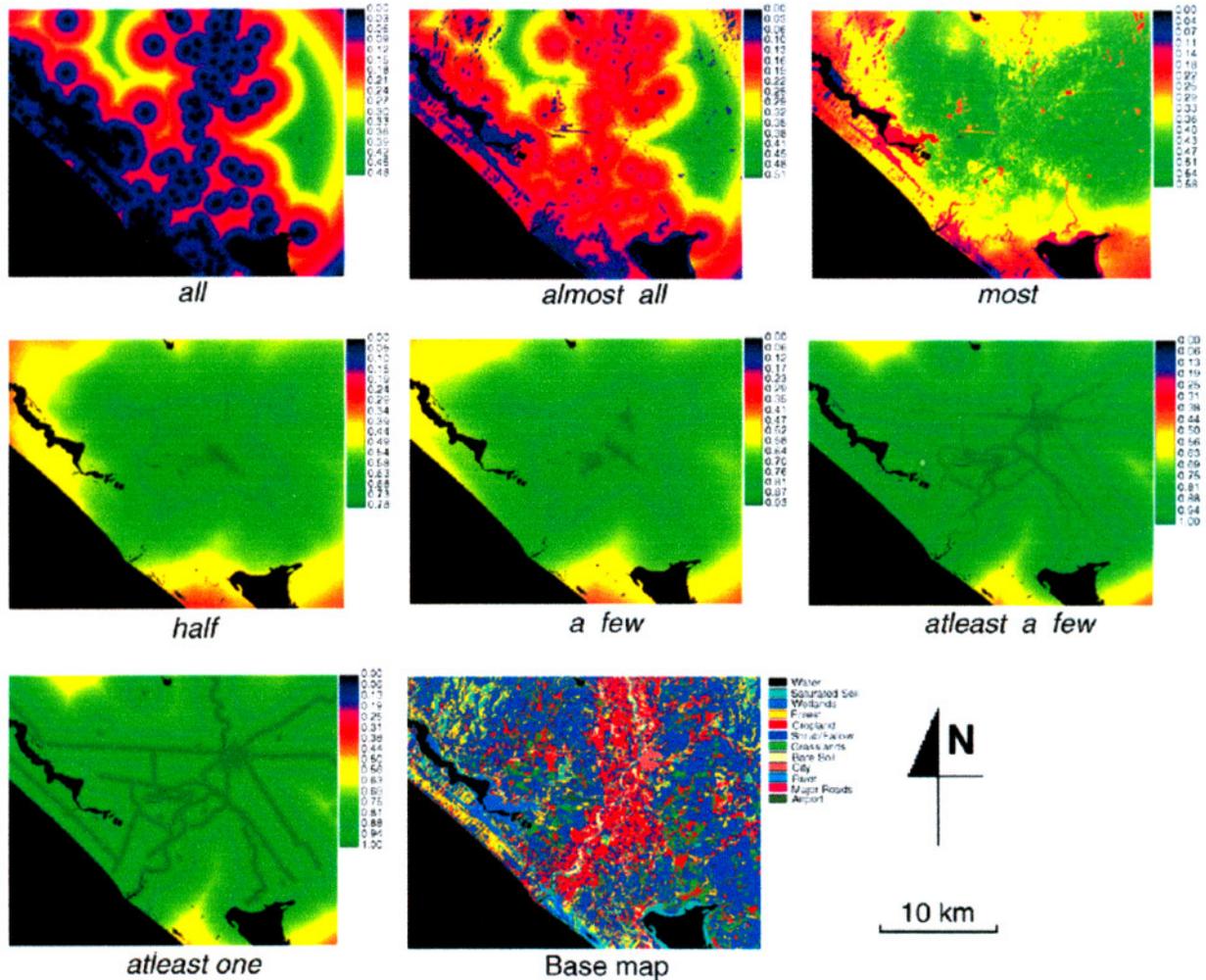


Figura 12. Mapas para el uso del terreno en Villa Unión Sin., como resultado del uso de los cuantificadores lingüísticos de la extensión FLOWA (Malcewski, 2006).

### MCE-FLOWA Y AHP

Boroushaki (2008) posteriormente propuso la aplicación de la extensión MCE FLOWA en ArcGis la cual resultó una herramienta ágil en el desarrollo de este estudio con la asignación de etiquetas para los distintos mapas que resultan del AMC y que se obtuvieron con la extensión MCE-FLOWA empleando tres criterios y un objetivo (anexo 1).

Cada mapa raster se iguala con un criterio en la matriz de paridad donde se va a asignar un peso dentro del análisis EMC descrito anteriormente, pero ahora en un SIG; el resultado se ilustra en la tabla 9, la cual se obtuvo a partir de la extensión AHP considerando los mismos criterios y pesos en la extensión MCE- FLOWA como se verá en el anexo 1.

Los criterios seleccionados (tabla 9) son los que mayor relevancia presentan para este trabajo; el primer criterio seleccionado fue el geológico (geol), porque constituye la estructura y las rocas de las que está construida la cuenca (figura 13), la infiltración, el almacenamiento y conducción del agua subterránea.

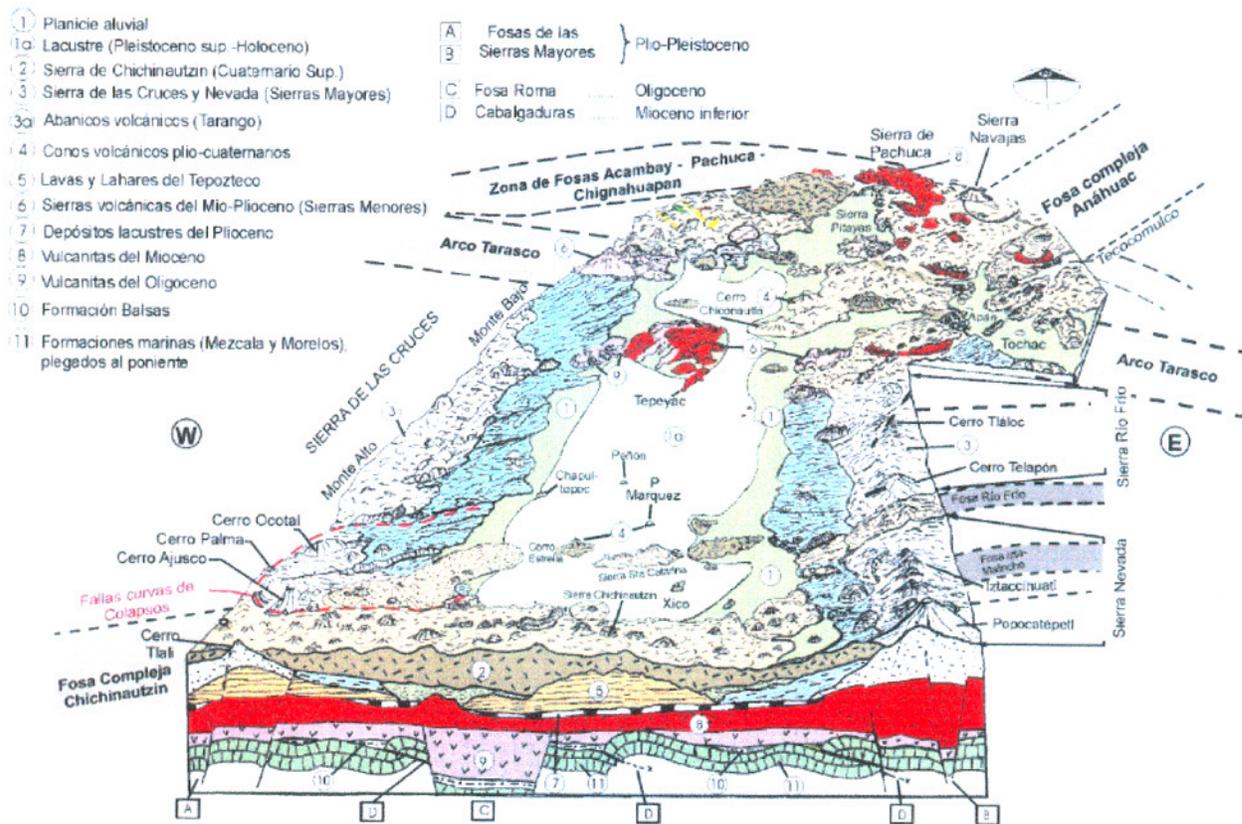


Figura 13. Geología y morfología de la cuenca de Valle de México (tomado de Santoyo, *et al.*, 2005)

La cuenca está formada por rocas ígneas extrusivas principalmente (Mosser, 1996) que delimitan en su mayor parte al acuífero de la Zona Metropolitana; las rocas basálticas tienen baja capacidad de infiltración en comparación con las sedimentarias pero su fracturamiento aumenta la porosidad de 5 a 50% (Freeze, R. A., *et al.*, 1979) y hacen que su capacidad de infiltración aumente (tabla 7). A manera de comparación de datos, cabe señalar que las rocas del Cuaternario en la

Cuenca de México presentan características importantes de porosidad eficaz de acuerdo con los criterios de Ingebritsen, S. E., *et. al* ( 1998), que pueden variar del 15 al 35% (tabla 8) según un estudio elaborado por el IMTA ( Herrera-Zamarrón, *et al.*, 2005) para el acuífero ZMCDM.

<b>Depósitos no consolidados</b>	<b>Porosidad (%)</b>
Grava	25-40
Arena	25-50
Limo	35-50
Arcilla	40-70
<b>Rocas</b>	
Basalto fracturado	5-50
Caliza kárstica	5-50
Arenisca	5-30
Caliza, dolomita	0-20
Lutita	0-10
Rocas cristalinas fracturadas	0-10
Rocas cristalinas densas	0-5

Tabla 7. Rangos de valores de porosidad; tomado de Freeze and Cherry (1979), *Groundwater*, Cap. 2, tabla 2.4

Cada tipo de roca se presentan dentro del mapa (figura 14) con una extensión y color diferente y constituyen en conjunto la capa geológica a la cual se le da un peso como criterio que se obtiene con la aplicación del FLOWA (anexo 1) y que en este estudio se le asignó el mayor peso. Los colores que muestran en principio los mapas raster no son relevantes ya que al normalizarlos en el análisis FLOWA cambian de aspecto; ahora cada color tiene un nuevo valor de acuerdo a sus celdas para efectuar el proceso de la suma ponderada de criterios (figura 10).

El segundo criterio es el tipo de suelo (figura 16), ya que es en parte la cobertura del criterio anterior en la mayor parte de los casos y que contribuye a aumentar o disminuir la infiltración al subsuelo; al igual que el caso anterior los tipos de suelo y su extensión se clasifican por colores en el mapa que a su vez serán normalizados. La información disponible sobre suelos para el área de estudio muestra en su mayor parte que tienen una capacidad de infiltración de mediana a lenta (Herrera-Zamarrón, *et al.*, 2005).

Tipo de Roca	Clave estratigráfica	Porosidad eficaz %
Cuaternario aluvión	Qal	35
Cuaternario lacustre	Ql	3
Cuaternario inferior volcánico	Qiv	30
Cuaternario inferior cono volcánico	Qivc	30
Cuaternario-Pleistoceno andesita	QPA	15
Cuaternario volcánico	Qv	35
Cuaternario cono volcánico	Qvc	35
Formación Tarango	T	35

Tabla 8. Porosidad eficaz en rocas tomado Herrera-Zamarrón, et al., (2005), páginas 231-232.

El tercer criterio empleado (figura 15) es la de la vegetación (bosques), que transmite al suelo el agua de lluvia y que controla el escurrimiento, pero que también la absorbe y la evapora; entre más vegetación se considera que habrá mayor infiltración; sin embargo, la cubierta vegetal identificada dentro del suelo de conservación del área metropolitana de la Ciudad de México está disminuyendo.

Para obtener el cálculo gráfico de los eigenvalores y de los eigenvectores mencionados antes (tabla 6), se aplica la extensión AHP para el cálculo de los pesos de las capas criterio (tabla 9), mismos que serán obtenidos con la extensión MCE-FLOWA (anexo 1, paso 8), ya que ésta no muestra este detalle.

[Criteria & LayerSource (clsfd.)]	
geol	geol
suelo	suelo
bosques	bosques
[*****AHP results*****]	
[Eigenvalues]	
3.0092	
-0.0046	
-0.0046	
[Eigenvector of largest Eigenvalue]	
0.8468	
0.466	
0.2564	
[criteria weights x 100 (%)]	
0.545	(geol) = 54.5 %
0.287	(suelo) = 28.7 %
0.1634	(bosques) = 16.8 %
[consistency ratio CR]= 0.0088 (Revision of preference values is recommended if CR > 0.1)	

Tabla 9. Resultado del proceso de la extensión AHP; los pesos de los mapas criterio aparecen al final.

## CAPITULO 4

### APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

La extensión FLOWA empleada en el ArcGis lleva a cabo la evaluación multicriterio con los datos que se ingresan a la aplicación (anexo 1); los mapas criterio que se consideraron relevantes para una decisión se compararon cara a cara en una matriz de paridad inteligente, que es una medida para expresar la preferencia relativa entre los factores. Se seleccionaron tres mapas raster escala 1:250,000 (CONAGUA, 2008) con una amplia clasificación de rocas, suelos y vegetación para usarse como criterios dentro de los límites del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México que se identificaron como: geología (geol), suelos y vegetación (bosques), (figuras 14, 15 y 16).

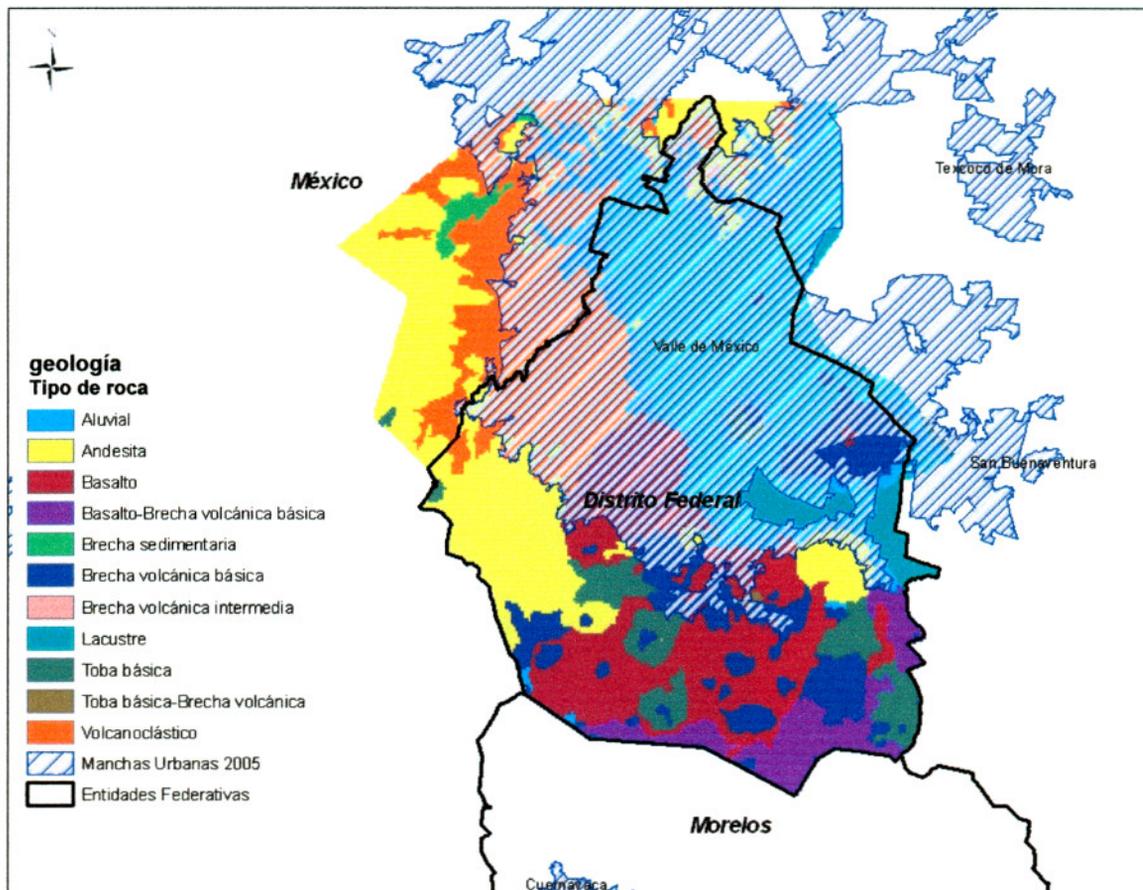


Figura 14. Sobre la capa de geología (geol) de INEGI (2005), se muestra la cubierta urbana (en líneas diagonales) en el acuífero ZMCDM.

La cobertura urbana de la Ciudad de México dispone de una superficie de concreto y asfalto sobre una parte importante de la superficie del acuífero de la ZMCDM (figura 14); la capa geológica queda por debajo de ésta, sin embargo lo que se trata es de averiguar con los criterios seleccionados áreas favorables para la recarga de acuerdo con sus condiciones naturales, pudiendo darse algún sitio favorable dentro de la cobertura de la zona urbana, y que podría indicarse como sitio potencial para un pozo de inyección. Las capas del suelo y vegetación ya tienen considerada la extensión de la ciudad dentro de sus áreas.

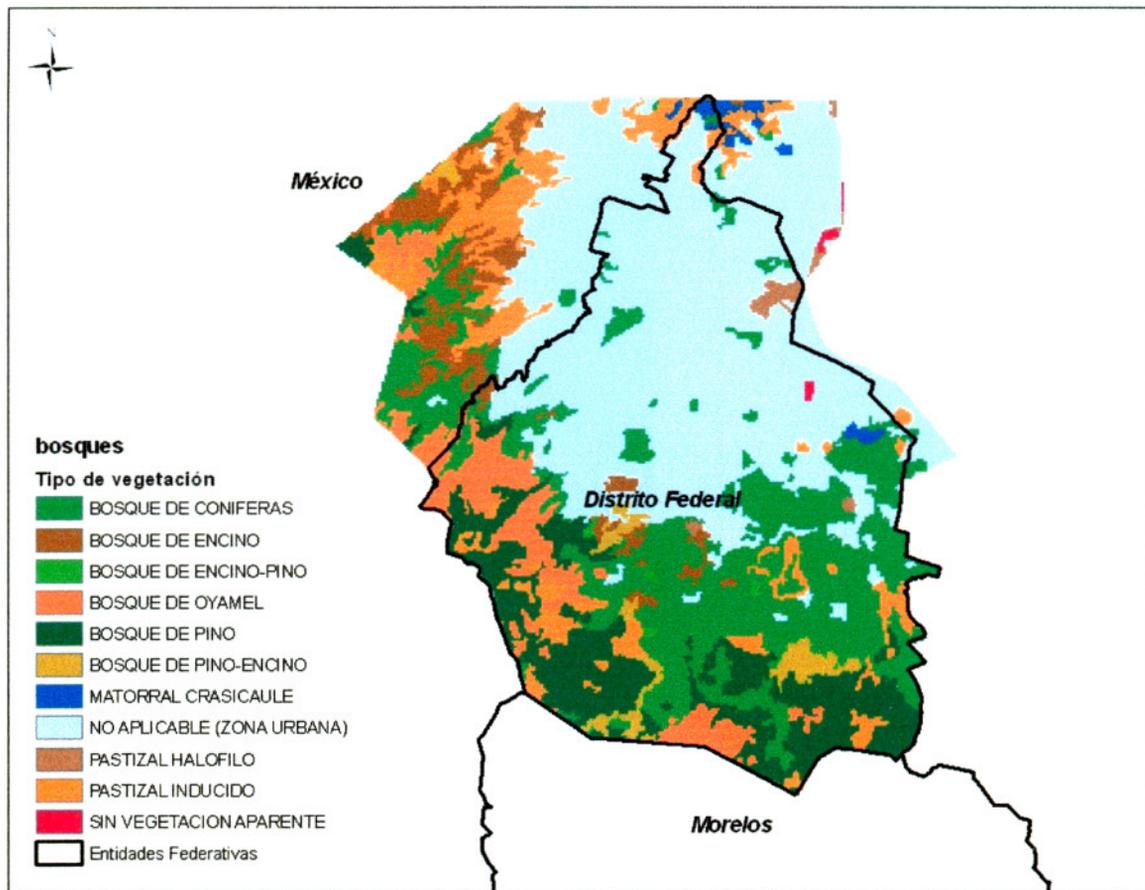


Figura 15. La distribución de la vegetación sobre el acuífero es boscosa principalmente en cuanto a los límites del mapa que señalan la extensión del acuífero (tomada de la Serie III Vegetación INEGI, 2005).

Los mapas que se emplearon para convertirse en criterios están delimitados por la extensión del acuífero ZMDCM; a estos mapas vectoriales se transformaron raster mediante la extensión Spatial Analyst. Estos mapas presentan en su contenido varias capas que muestran de manera general las características geológicas, edafológicas y de vegetación.

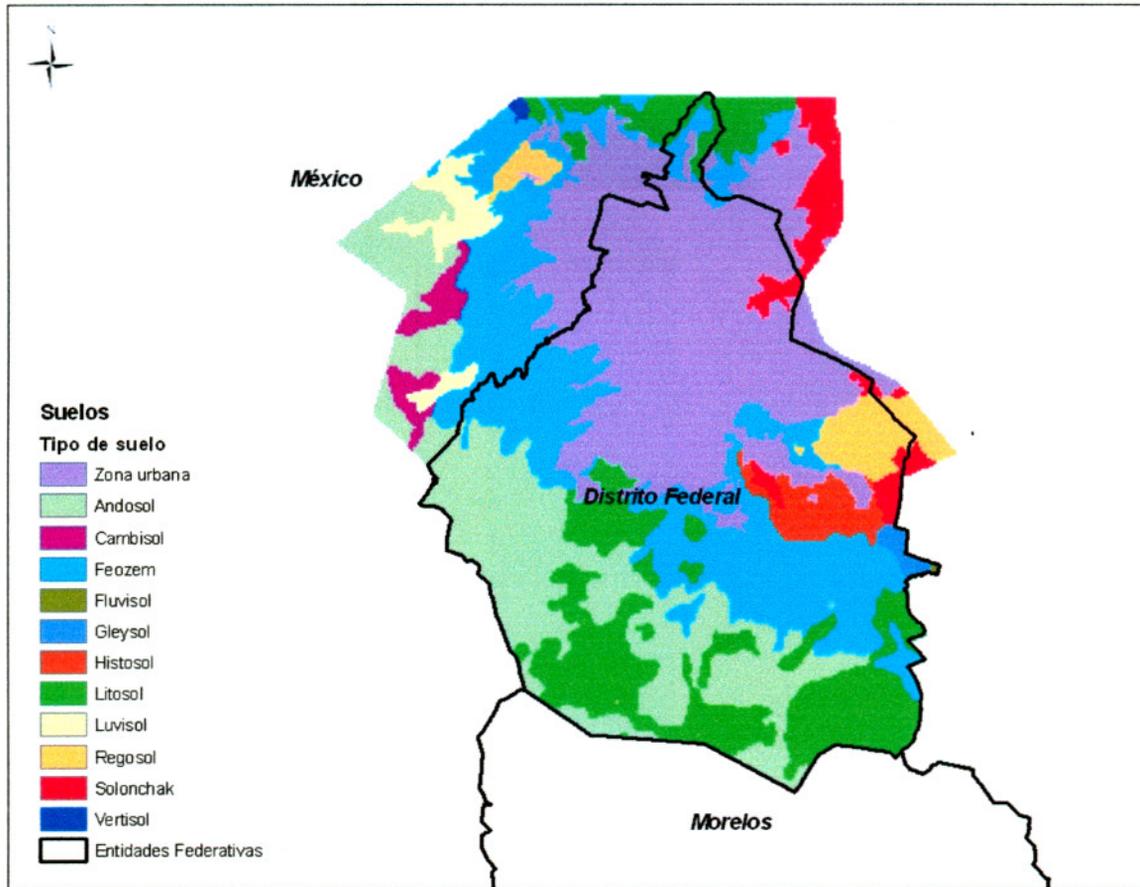


Figura 16. La distribución de los suelos sobre el acuífero (tomada de la Serie III Suelos INEGI, 2005).

La red fluvial sobre el acuífero en su mayor parte esta entubada o en canales y su trazo está representado por líneas; en este análisis EMC se utilizaron áreas y no es conveniente mezclarlos ya que las celdas que los representan en el mapa raster son distintas. MCE FLOWA hace una advertencia al hacer esta mezcla de vectores en el sentido de que el índice de la matriz sale del rango al hacer el cálculo aplicando el cuantificador lingüístico. En una etapa anterior a este estudio se llevó a cabo un ejercicio en donde se emplearon los cuatro mapas criterio que incluyó el de los ríos; al comparar los resultados con el estudio actual no se encontró alguna diferencia significativa contra el resultado obtenido empleando tres mapas raster, cuyos resultados fueron más precisos.

## RESULTADOS

Se llevaron a cabo varios análisis de acuerdo al proceso descrito del EMC aplicando la extensión MCE FLOWA, donde se consideraron los mapas criterio

señalados anteriormente, se les asignó un peso (anexo 1, paso 8: Step 4, Weights) y se obtuvo el resultado con el cociente de consistencia más bajo (tabla 9). Se emplearon tres criterios y un objetivo con siete alternativas llamadas cuantificadores lingüísticos; de las alternativas sólo una se seleccionó para considerarse como resultado de interés en un mapa dentro de los límites del acuífero en formato raster (figura 17).

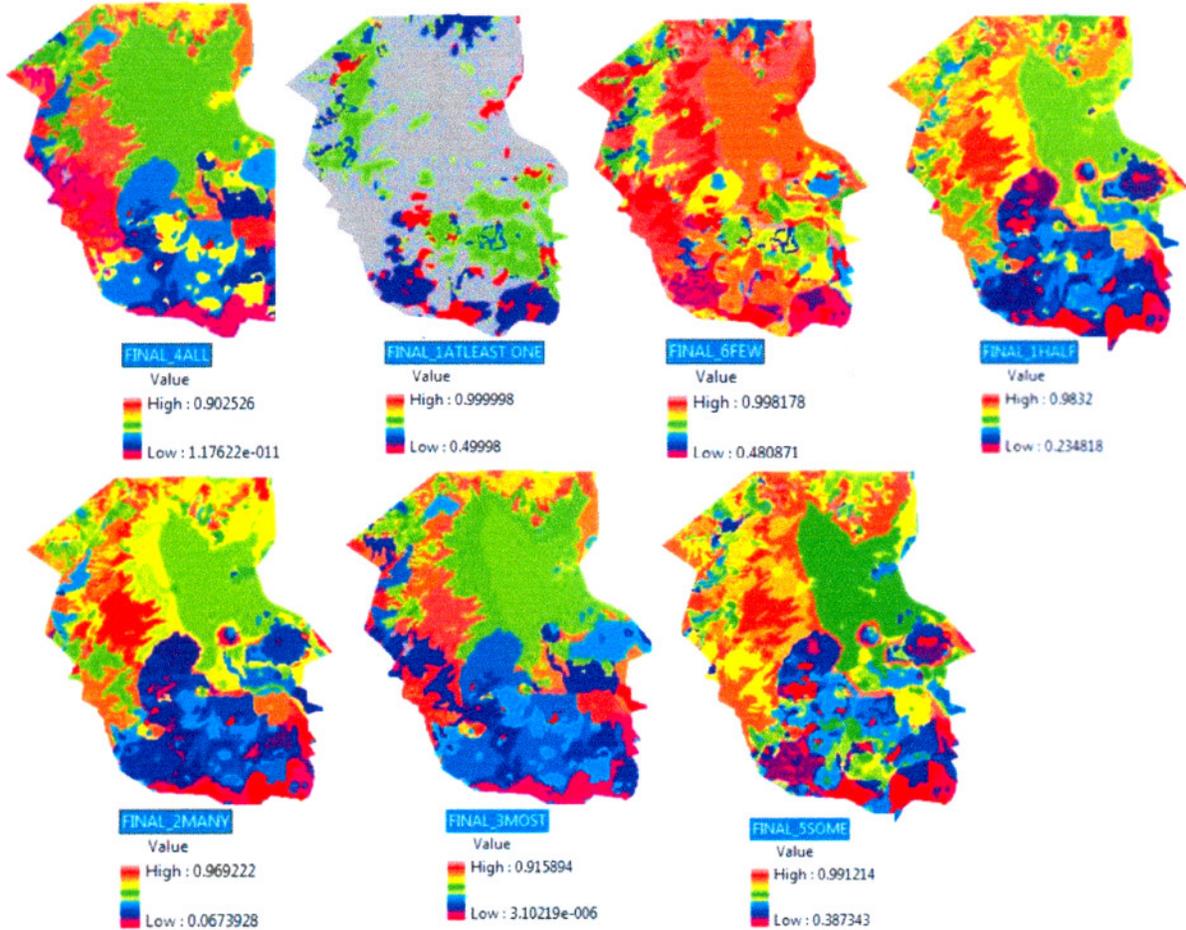


Figura 17. Mapas del acuífero de la ZMCDM procesados con MCE FLOWA para zonas de recarga.

Todos los mapas raster que se obtuvieron del MCE FLOWA se procesaron con la misma rampa de colores considerando los valores más altos para identificar las zonas de recarga. De estos mapas el que mostró las zonas de interés mejor delimitadas y con los parámetros estadísticos más significativos fue el cuantificador FEW (figura 17 y tabla 10). Los demás cuantificadores como SOME y MANY muestran valores estadísticos de interés pero de menor relevancia, no obstante las zonas de recarga que señalan en su mayor parte

coinciden con las del cuantificador FEW en donde son mas abundantes. ATLEASTONE fue el cuantificador con menor relevancia en la información gráfica en el mapa aunque con valores estadísticos similares a FEW. Por otra parte HALF señala áreas de recarga menos dispersas y bien delimitadas pero en menor proporción y sus parámetros estadísticos son ligeramente inferiores. Así también, el apoyo gráfico de los histogramas correspondientes a cada cuantificador que se encuentran en el anexo 1 ayudó a tomar la decisión para considera a FEW como el más destacado.

Estad/Cuant	FEW	SOME	ALL	MOST	MANY	HALF	ATLEASTONE
MIN	0.48	0.39	0	0	0.07	0.23	0.5
MAX	1	0.99	0.9	0.92	0.97	0.98	1
MEDIA	0.9	0.78	0.45	0.46	0.59	0.68	0.94
DESV. STD	0.09	0.12	0.22	0.21	0.18	0.15	0.09

Tabla 10. Estadística de los valores obtenidos en los mapas MCE FLOWA que señalan al cauntificador FEW como el de mayor interés para localizar zonas de recarga natural en el área del acuífero ZMCDM.

Comparando el mapa del cuantificador FEW y el mapa con el relieve del MDE (figura 6) en donde se ubican los límites delegacionales del Distrito Federal se pueden localizar las áreas de recarga propuestas por MCE FLOWA (figura 18).

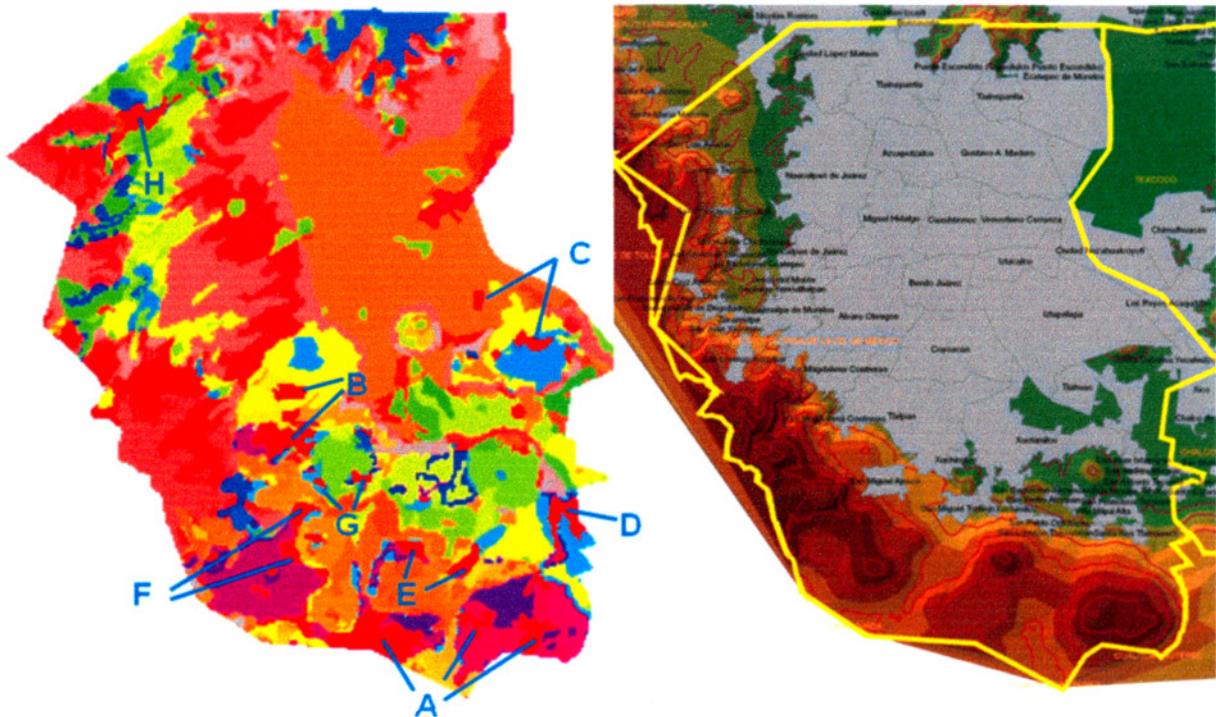


Figura 18. Comparativo entre el mapa del cuantificador FEW de MCE FLOWA y el MDE del acuífero ZMCDM.

Las áreas de recarga propuestas se encuentran en el extremo sureste del mapa FLOWA las zonas color rojo intenso que están sobre las laderas de los volcanes (A) Ocotéctl y Tláloc , así como en las laderas del volcán Chichinautzin en el extremo sur central de la Delegación Xochimilco; (B) la parte baja de la Cuenca del Río Magdalena y las barrancas de la Delegación Álvaro Obregón y las que se encuentran en el extremo oriental que corresponde a las laderas de la (C) Sierra de Santa Catarina en Iztapalapa; al sur de ésta hay otra área sobre las inmediaciones de (D) Santa Ana Tlacotenco, en Tlahuac; la zona sur central se presenta un área menor en las inmediaciones de (E) San Salvador Cuauhtenco, en la Delegación Xochimilco y las laderas situadas al sur del Cerro Cuatzín; (F) en las zonas bajas de las laderas de las Sierra del San Miguel y el Ajusco en la Magdalena Contreras; (G) y la pequeña sierra que se encuentra entre el poblado de Tres Marías y la salida de la carretera de cuota México Cuernavaca; y por último la zona de barrancas situada al norte de San Mateo y al oeste de Atizapán de Zaragoza, en el Fraccionamiento la Estadía (H) en el Estado de México.

Las zonas delimitadas por el análisis multicriterio efectuado coinciden en casi todos los casos con sitios detectados para el mismo fin en estudios previos, como las señaladas por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal para la recarga del acuífero (2000), también se encontró coincidencia con la zonas identificadas por la UAM (2009) como zonas estratégicas para la recarga que deben contar con protección (Escolero, *et al.*, 2009); así como en otros artículos publicados en fechas más recientes donde se señalan zonas de recarga (Aguirre, 2010).

Las zonas favorables a la infiltración natural del agua de lluvia se han aprovechado en algunos casos con pozos de infiltración para llevar a cabo una recarga más rápida del acuífero. La zona más extensa que se localizó en este estudio es la zona A y está ubicada en el extremo sur del acuífero (figura 18) que corresponde a laderas volcánicas de material rocoso muy fracturado donde ya existen algunos pozos de absorción que podrían incrementarse en número donde ya el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y las delegaciones llevan a cabo un programa de construcción de pozos de absorción que contempla la infiltración de parte de los torrentes pluviales hacia el subsuelo en distintas zonas (UAM, 2009).

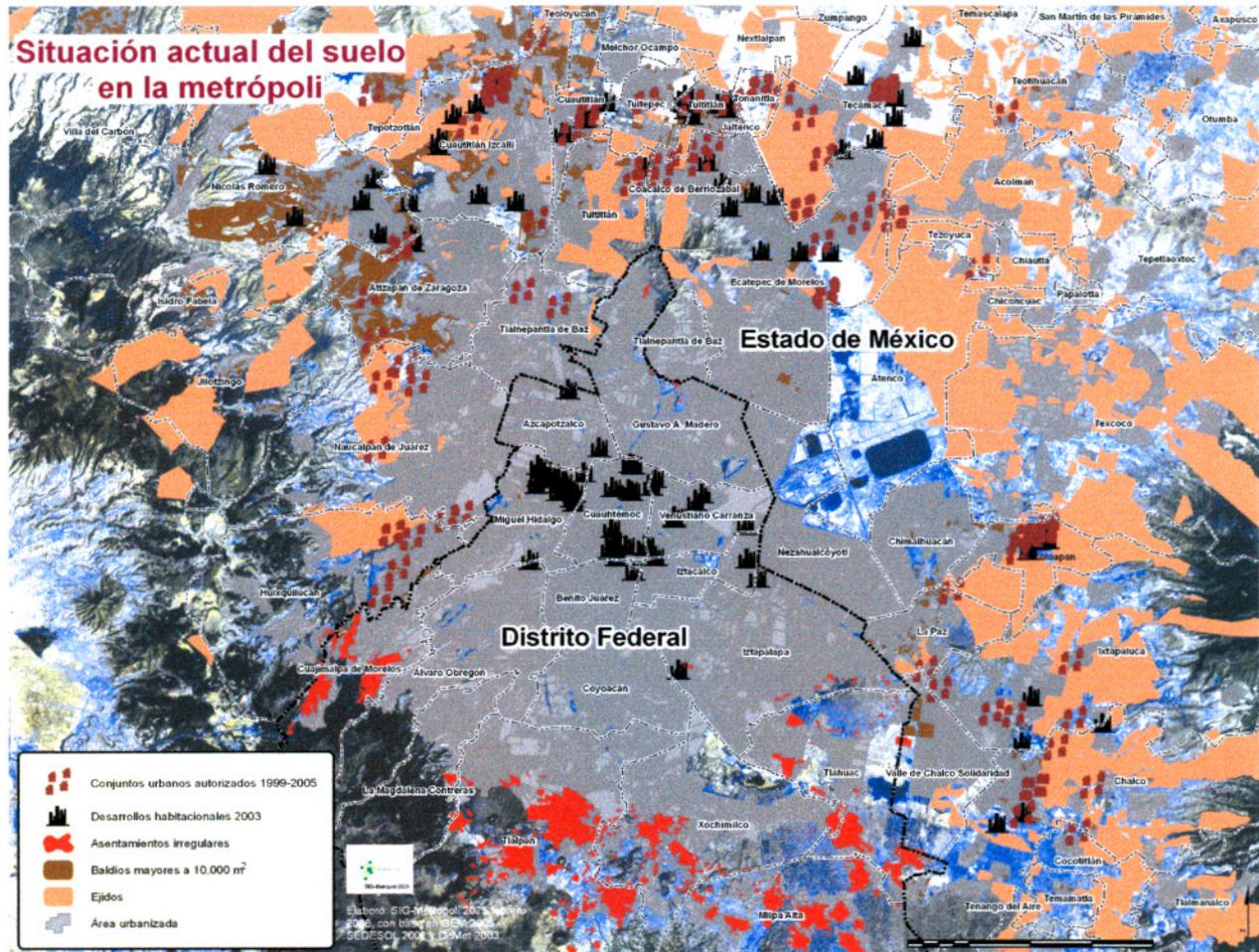


Figura 19. Mapa de la situación actual del uso de suelo en la Ciudad de México (tomado de Escolero, *et al.*, 2009).

La protección de las partes altas de las cuencas debe ser considerada como uno de los temas prioritarios para la protección ambiental así como el cuidado de las zonas de recarga actuales y las que se propone en este estudio. Para esto se requiere la declaración de las zonas de recarga como Áreas Naturales Protegidas (adicionales a las ya existentes que se muestran en la figura 1), además la implementación práctica de estos decretos evitando el avance de los asentamientos irregulares en estas zonas y vialidades que los perjudiquen.

En lo que corresponde al uso del suelo en la zona metropolitana de la Ciudad de México (figura 19), el proceso predominante es la urbanización de las planicies, laderas de la cuenca, ya sean de suelos agrícolas o de conservación. Carrera-Hernández (2007) analizó su impacto sobre la recarga potencial en la cuenca estimando una disminución de 20% (de 1.6 a 1.9 m<sup>3</sup>/s) en la parte suroeste de la

ciudad lo que significa una disminución en 1.5% de la recarga potencial en todo el Valle de México, la cual se estima actualmente en 19 m<sup>3</sup>/s (UAM, 2009).

En los últimos años, el proceso de urbanización en laderas con fraccionamientos nuevos al poniente y los asentamientos ilegales en suelos de conservación al sur en Ajusco, Sierra de San Miguel así como en norte sobre la Sierra de Guadalupe y al oriente en la Sierra de Santa Catarina (figura 19), sitios en donde se identificaron zonas potenciales de recarga en este estudio, representan un riesgo para la sustentabilidad del sistema.

Hacia el sur de la ciudad sobre las laderas de la Sierra del Chichinautzin en las inmediaciones del Ajusco y San Miguel, identificadas como zonas potenciales de recarga en este estudio (figura 18), la falta de servicios de drenaje en los asentamientos irregulares favorece la infiltración a través de las fracturas del subsuelo volcánico, que sujetan a una afectación en la calidad del agua que recarga el acuífero y los manantiales de la región que abastecen a la Ciudad de México.

Sobre los lomeríos en el suroeste y oeste de la cuenca que corresponden a la formación Tarango (figura 4) la cual tiene potencial de recarga al acuífero, la expansión del suelo urbano (figura 19) está disminuyendo la infiltración y en consecuencia aumentando la cantidad e intensidad del escurrimiento lo cual propicia la erosión del suelo y da lugar a inundaciones y al azolve de los canales y de los vasos reguladores que controlan las descargas pluviales.

En este estudio se identificó un área potencial de recarga que corresponde al fraccionamiento la Estadía (figura 18) en el Estado de México situado al norponiente de la ciudad, que es una zona de expansión urbana que está modificando el suelo y afectando a la recarga de acuífero, y que requerirá se considere como zona protegida en el corto plazo lo que afectaría la situación inmobiliaria local.

En el marco de las estrategias del gobierno del Distrito Federal enfocadas a reducir la demanda de agua potable, el programa de recarga con agua pluvial y agua tratada contempla infiltrar 6 m<sup>3</sup>/s en los próximos 10 años (Escolero, *et al.*, 2009); la CONAGUA (2009) emitió una norma sobre la calidad del agua requerida para la recarga de acuíferos; por su parte la Asamblea Legislativa del Distrito Federal aprobó una ley en 2008 que promueve la infiltración de agua pluvial. También el Programa de Recarga Artificial de la Ciudad de México incluye la inyección de agua residual tratada a nivel avanzado como lo que sucede en la planta de

tratamiento de aguas del Cerro de la Estrella. El Programa de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México y la Agenda del Agua 2030 de la CONAGUA está dirigido hacia la conservación de ríos limpios, cuencas, recarga y equilibrio de acuíferos y la cobertura universal de los servicios de agua y asentamientos seguros frente a inundaciones en el largo plazo, particularmente se han hecho algunos avances en el acuífero ZMCDM en conjunto con la delegaciones.

Dentro del entorno nacional, según datos que proporciona el Atlas digital del Agua México 2010 (CONAGUA, 2010), la Región Administrativa de Aguas del Valle de México que comprende en su mayor parte a la cuenca del Valle de México presenta un grado de presión sobre el recurso hídrico del 132.3% que se considera extremo y es el porcentaje que presenta el agua utilizada para usos consuntivos respecto a la disponibilidad total. Por otra parte, Cotler (2010) señala que la cuenca de Valle de México presenta un elevado valor de presión hídrica mayor al 40% y un deterioro extremo en la dinámica funcional a partir de indicadores como la presión hídrica, la transformación humana de ecosistemas, fragmentación de ríos, contaminación potencial difusa y degradación de suelos.

Y en cuanto a los posibles efectos derivados del cambio climático se estima una afectación para las fuentes de agua superficial (Escolero, *et al.*, 2009) debido a la acelerada interacción con los elementos que interviene en el ciclo hidrológico, mientras que la reducción en la recarga puede tener efecto a largo plazo para acuíferos de extensión regional y a corto plazo en sistemas dependientes de recargas locales tal como los manantiales y el flujo base en ríos. Asumiendo un aumento en el escurrimiento y en consecuencia una disminución en la recarga por la reducción en la infiltración.

Ante este frágil escenario que incide directamente sobre los recursos hídricos de esta cuenca y en general sobre otras que guardan características similares, se justifica plenamente el empleo de tecnologías informáticas aplicadas a los SIG como en este caso la extensión MCE-FLOWA para explorar e identificar zonas de recarga para acuíferos, que en este estudio se encontraron ocho zonas potenciales que contribuirán a mantener el equilibrio del acuífero, así como también llevarán a la creación de zonas de protección o resguardo ambiental. Esta aplicación es de utilidad dentro del contexto de los recursos hídricos así como en el ámbito de los recursos naturales en general, donde el análisis AMC sea factible y pueda ser un apoyo a los tomadores de decisiones en la elaboración de políticas públicas encaminadas a la protección de los recursos naturales no renovables considerados también como agotables.

## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES**

- 1.- Se encontraron ocho zonas con potencial para la recarga natural en el área del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México bajo el análisis AMC con la extensión MCE-FLOWA para ArcGIS.
- 2.- Las alternativas de los cuantificadores lingüísticos FEW y HALF obtuvieron los mejores resultados para el objetivo del estudio.
- 3.-Esta metodología es aplicable a la localización de zonas de recarga para aguas subterráneas utilizando los criterios adecuados y puede ser de utilidad para otros estudios similares.
- 4.- Para el caso del Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encontraron coincidencias de las áreas favorables para la recarga natural del agua subterránea, con estudios previos que utilizaron otra metodología. Estos sitios pueden sugerirse para iniciar un estudio de recarga artificial además de proponerlos como áreas protegidas.

### **RECOMENDACIONES**

Con la metodología empleada es relativamente sencillo encontrar zonas que pueden ser consideradas como favorables para la recarga natural de un acuífero empleando capas geográficas aplicadas para tal efecto, que contengan atributos fisiográficos, geológicos, edafológicos, hidrológicos y de vegetación que brinda como resultado un mapa para una primera etapa de exploración en el laboratorio de sistemas de información geográfica, lo cual representa un avance muy importante ya que se puede partir de la información geográfica disponible para que en una segunda etapa se realice la verificación en campo. Esta metodología puede hacerse tan detallada como se desee, y se le puede dar la aplicación que se requiera.

El uso de la extensión MCE FLOWA es una herramienta que sirve de guía a través del análisis multicriterio, y que ayuda a explorar diferentes escenarios con el apoyo de un SIG mediante el uso de la herramienta del ArcGis o cualquier otra similar, con objeto de obtener una mejor comprensión de las alternativas que se obtienen en el estudio para la toma de decisiones.

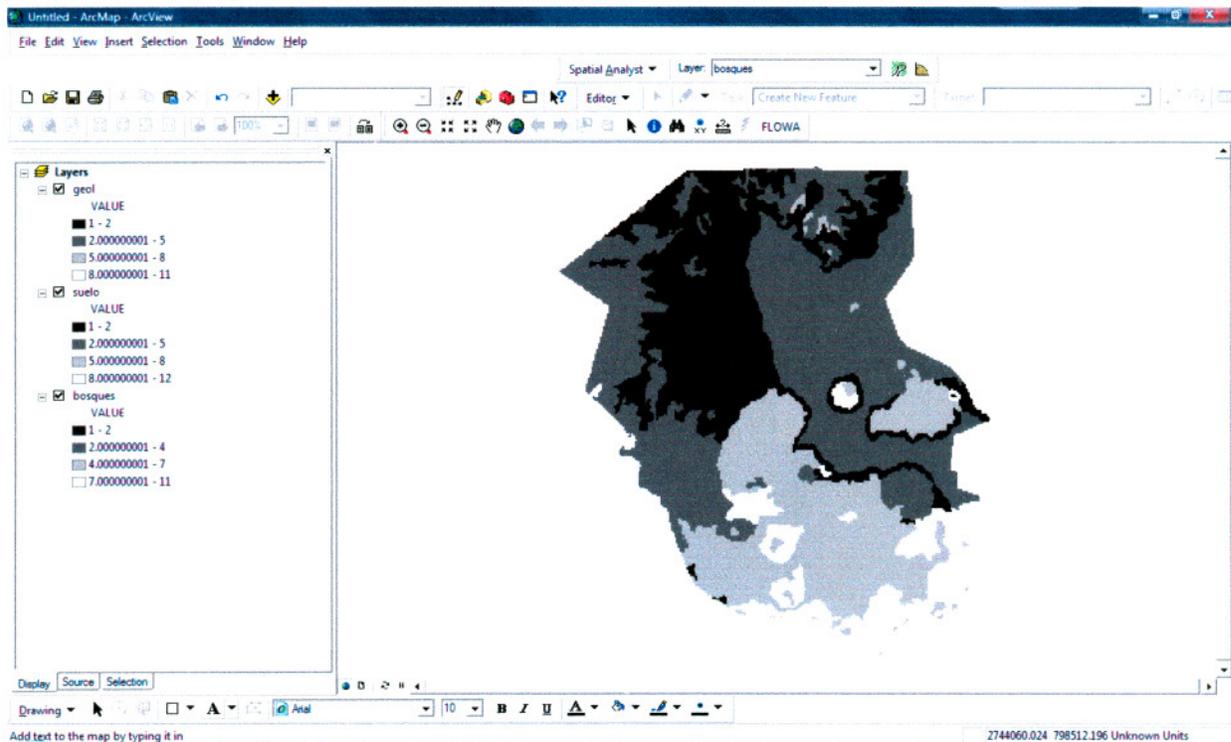
## ANEXO 1

### METODOLOGÍA

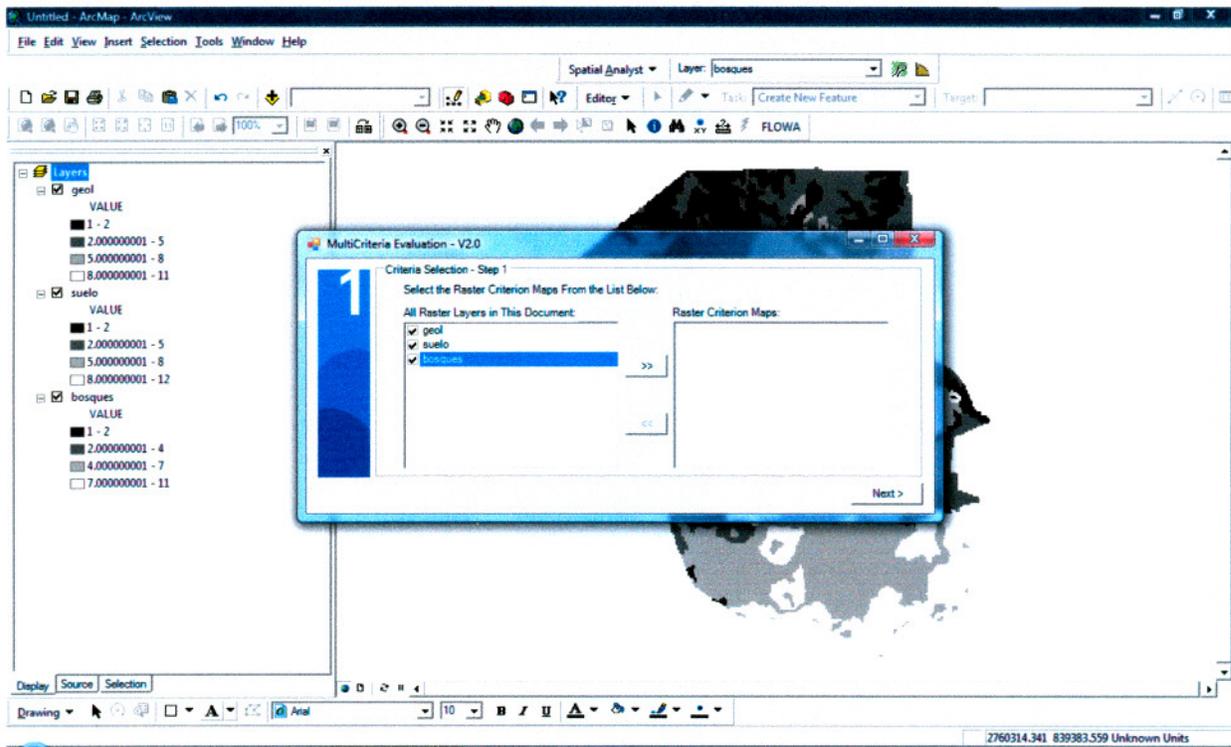
Ejemplo del método aplicado MCE FLOWA donde a partir de archivos de mapas raster se obtuvieron los resultados de este estudio, descargando previamente la extensión e instalándola en el ArcGis.

Usando el módulo de MCE-FLOWA en ArcGIS para demostrar cómo MCE-FLOWA trabaja, se utilizó un sistema de 3 archivos raster que se agregó para seguir esta instrucción que consta de 15 pasos.

Paso 1: Con el ArcMap abierto se agregan los mapas raster.

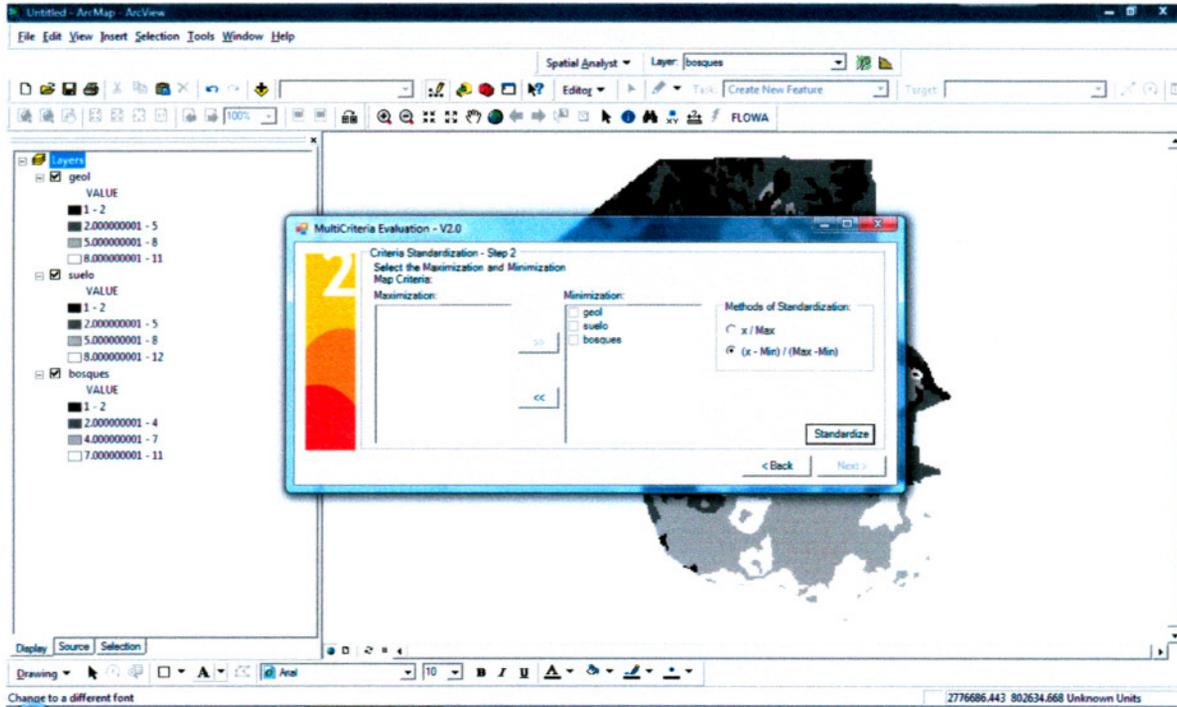


Paso 2: Seleccione el botón de tecléo FLOWA en la barra de las herramientas. La ventana de la evaluación de los criterios múltiples se abrirá. Leerá todas las capas raster en el documento.



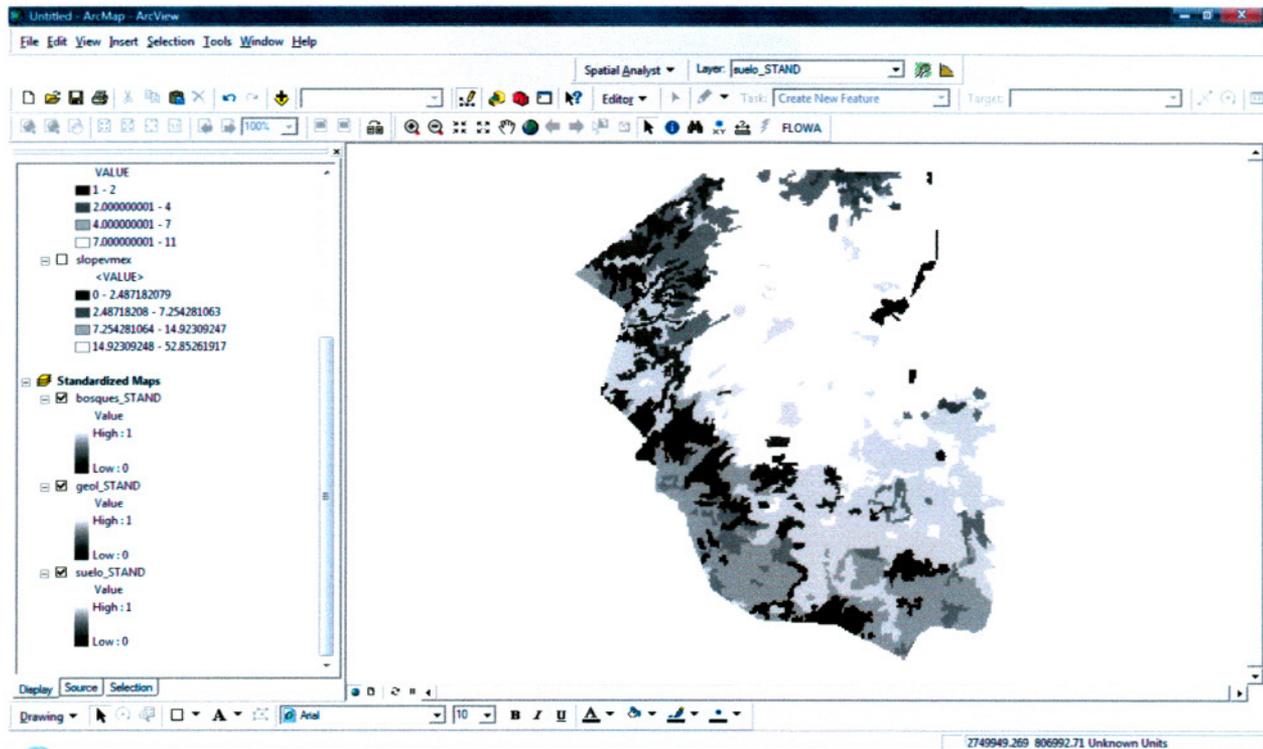
Paso 3: Seleccione los mapas raster y adiciónelos al mapa raster criterio; puede agregar a los mapas de criterio en un máximo de 10. Cuando usted haya hecho la selección de los mapas criterios presione NEXT.

Paso 4: Seleccione los mapas criterio y deposítelos en la ventana de la minimización. Entonces seleccione el método de "Standardization" (normalización). Cuando termine con la selección de criterios, presione el botón de Standardize.

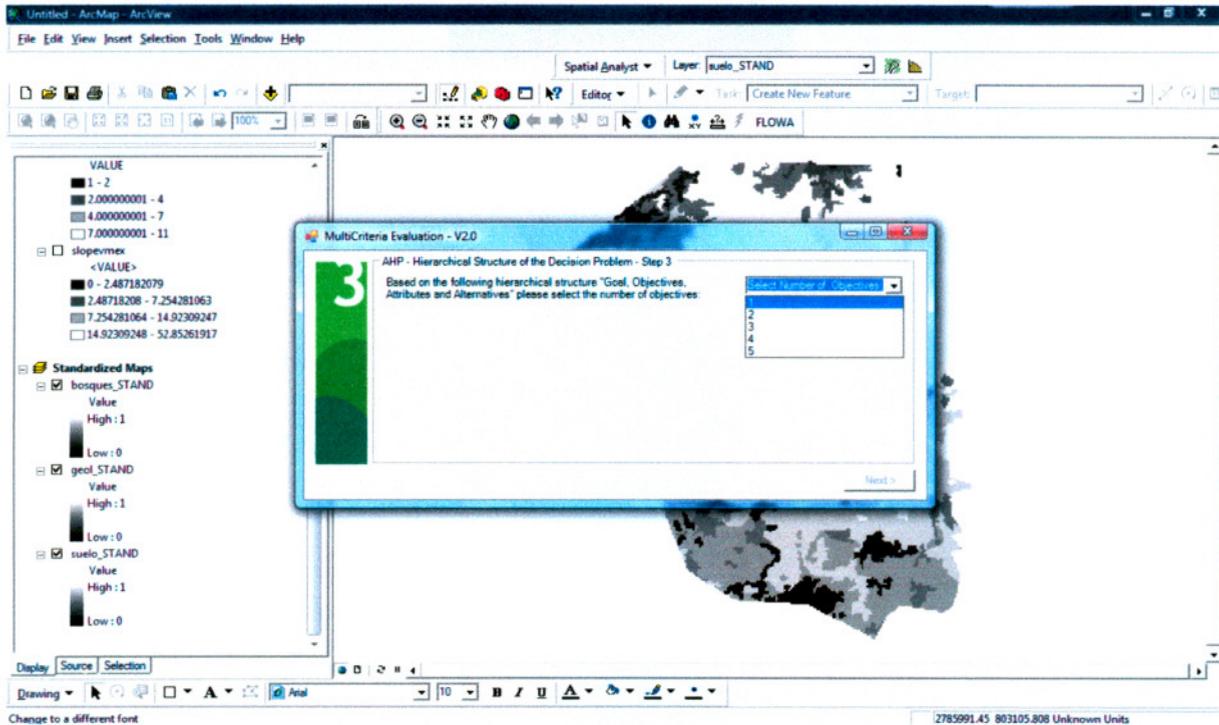


Cuando termine presione NEXT para ir al paso siguiente.

Paso 5: Nuevos mapas se agregarán al documento. Las capas “standardizadas” muestran los valores para cada célula.

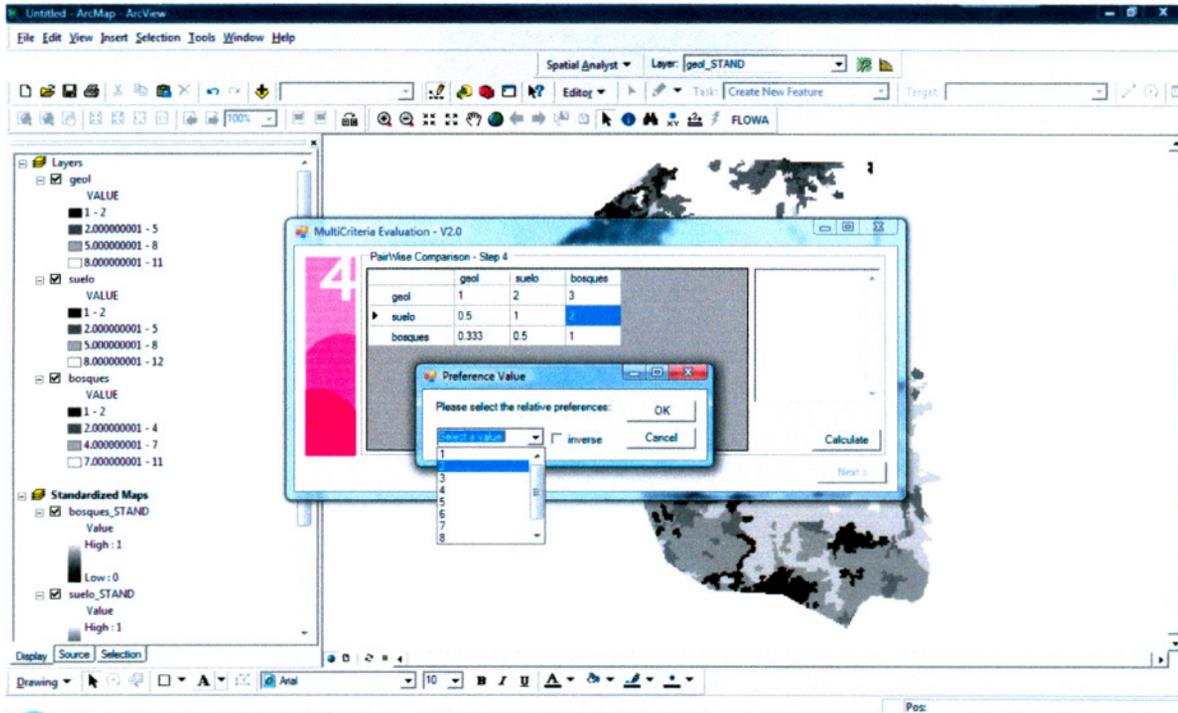


Paso 6: Seleccione el número de objetivos para el problema de la toma de decisión. Usted puede tener de 1 hasta 5 objetivos. Considere que aquí tiene un objetivo.



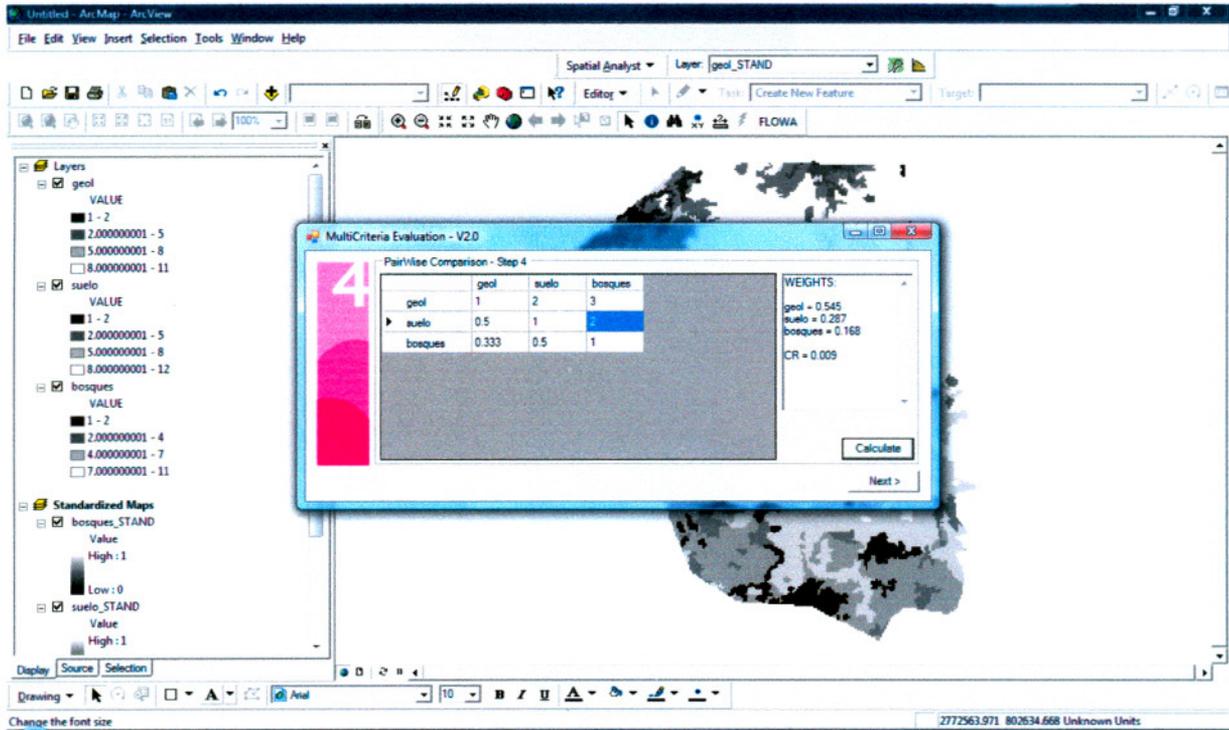
Cuando termine presione NEXT para ir al paso siguiente.

Paso 7: Ahora tiene que hacer en parejas la comparación para los objetivos. Presione doble clic en una célula vacía e incorpore las preferencias según lo que despliega en la parte de abajo.



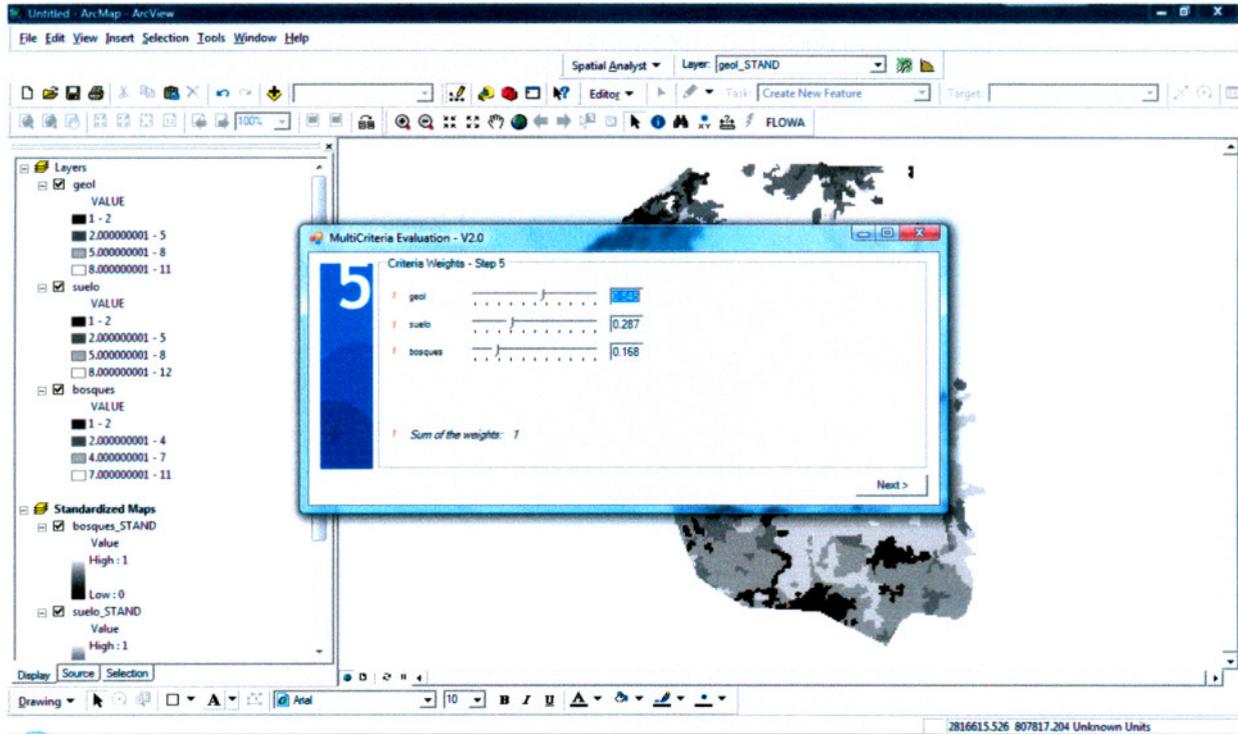
Cuando termine presione NEXT para ir al paso siguiente.

Paso 8: Entonces seleccione 'calculate' para ver los pesos para cada objetivo y para comprobar el valor del CR.



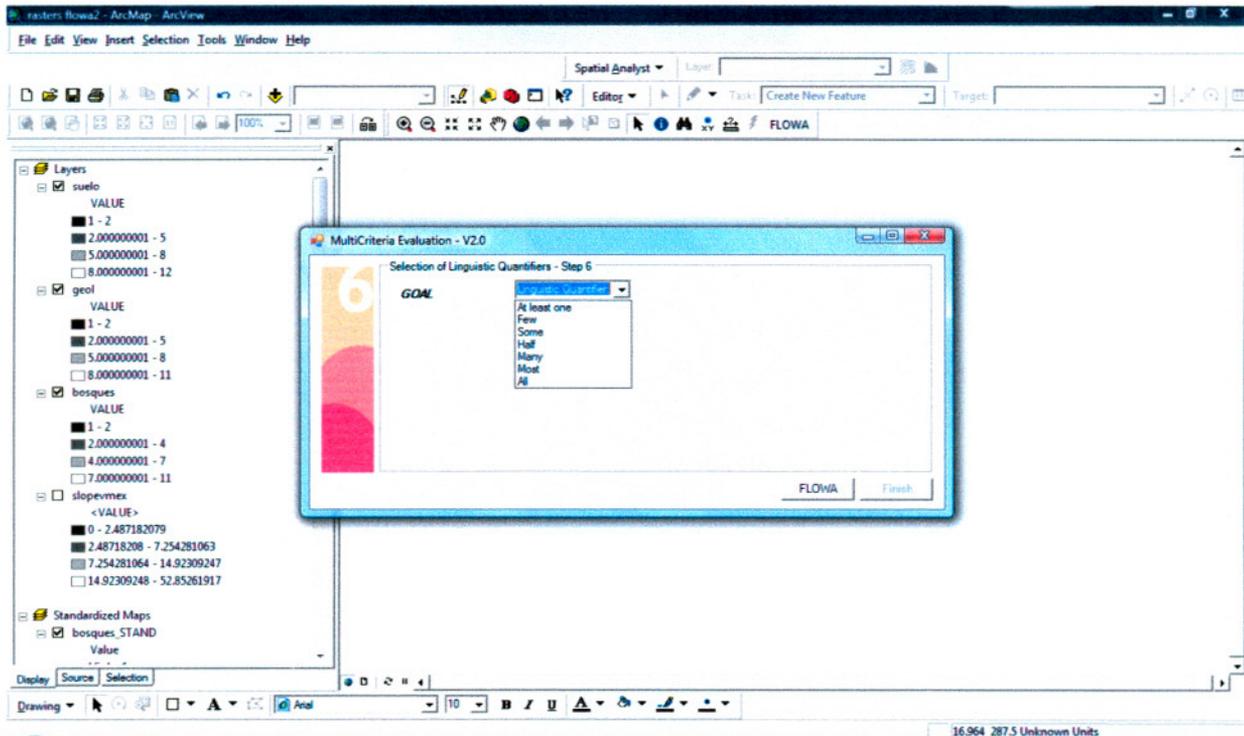
Cuando termine presione NEXT para ir al paso siguiente.

Paso 9: Usted puede comprobar los pesos objetivos en este paso. Cerciórese de que la suma del peso sea igual a 1. Usted también puede cambiar los pesos en este paso, aunque otra vez, la suma de los pesos deba ser igual a 1.



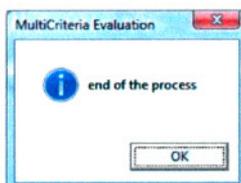
Cuando termine presione NEXT para ir al paso siguiente.

Paso 10: Ahora tiene que seleccionar la etiqueta lingüística para agregar la meta del problema de decisión y de los objetivos. Entonces presione FLOWA. Usted tiene que esperar hasta que se consiga el mensaje de término de los procesos. Para las rejillas grandes y de alta resolución tarda algunos minutos para cada proceso.



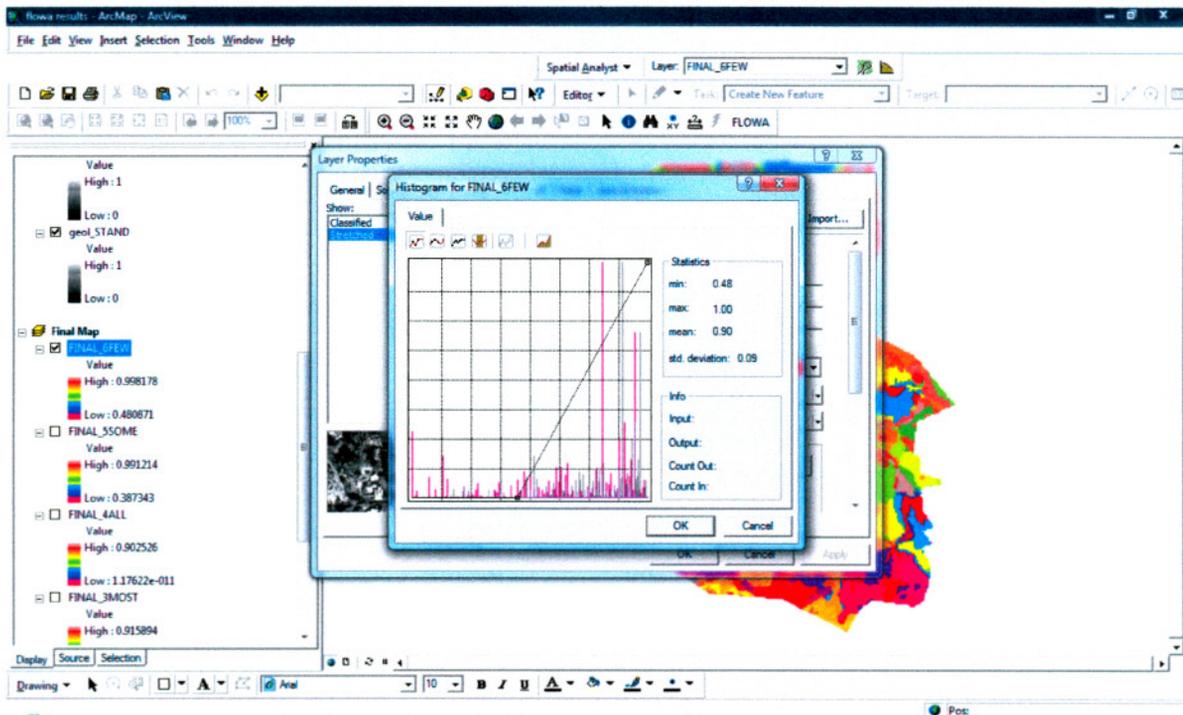
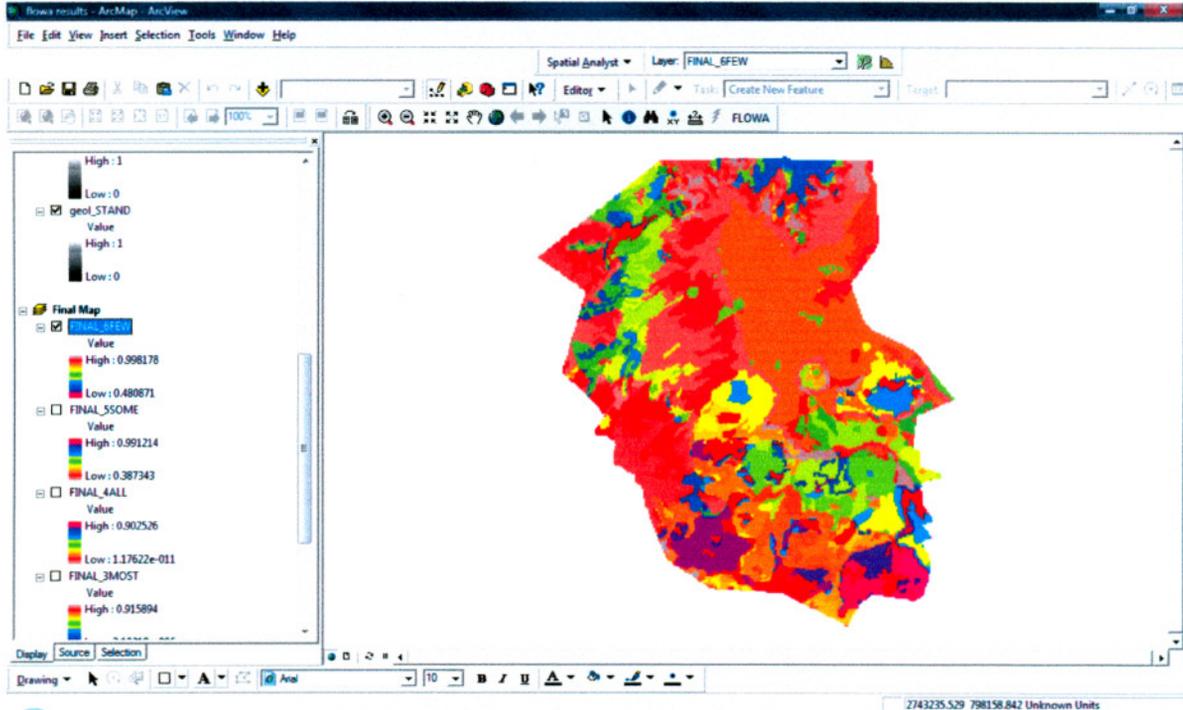
Paso 11: Un nuevo mapa (mapa final) será agregado al documento. Es el resultado del proceso del MCE.

Paso 12: Se pueden cambiar los cuantificadores lingüísticos para conseguir un nuevo mapa. Mientras no cierre el uso del MCE FLOWA puede generar un nuevo mapa final. Cuando usted cierra el uso de MCE-FLOWA, ya no puede funcionar el proceso otra vez, tiene que cerrar ArcMAP y VACIAR el directorio TEMP. En este caso se utilizaron los 7 cuantificadores lingüísticos que dispone el programa.

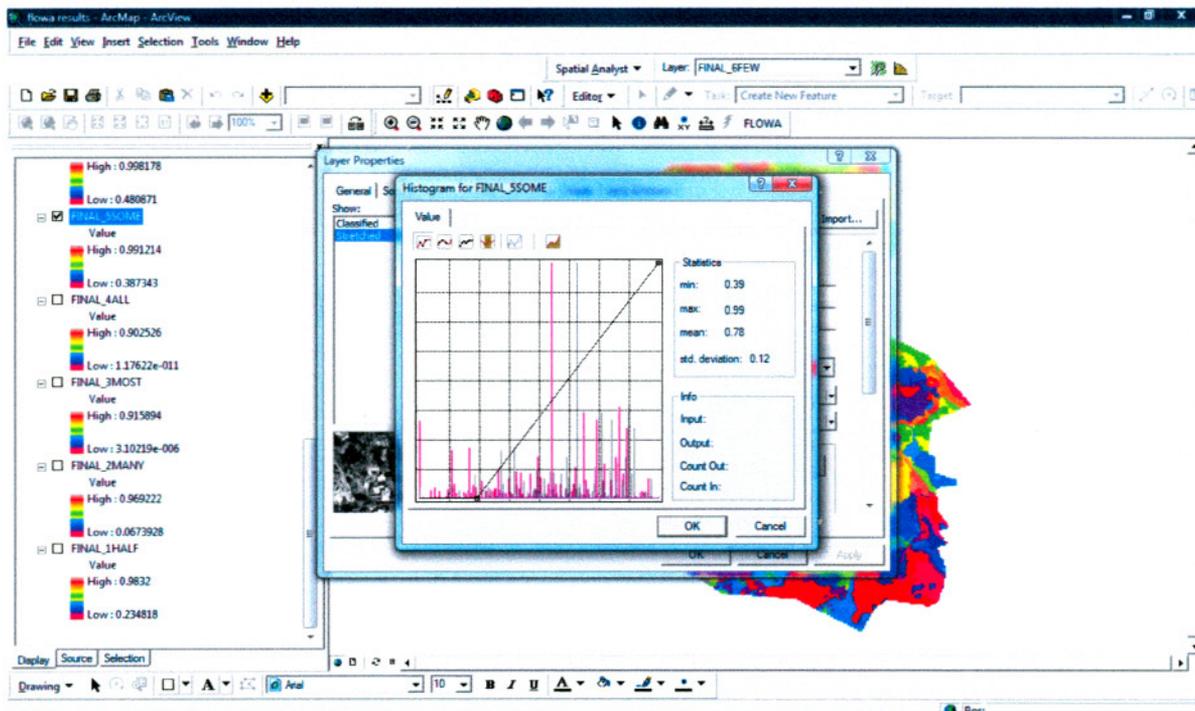
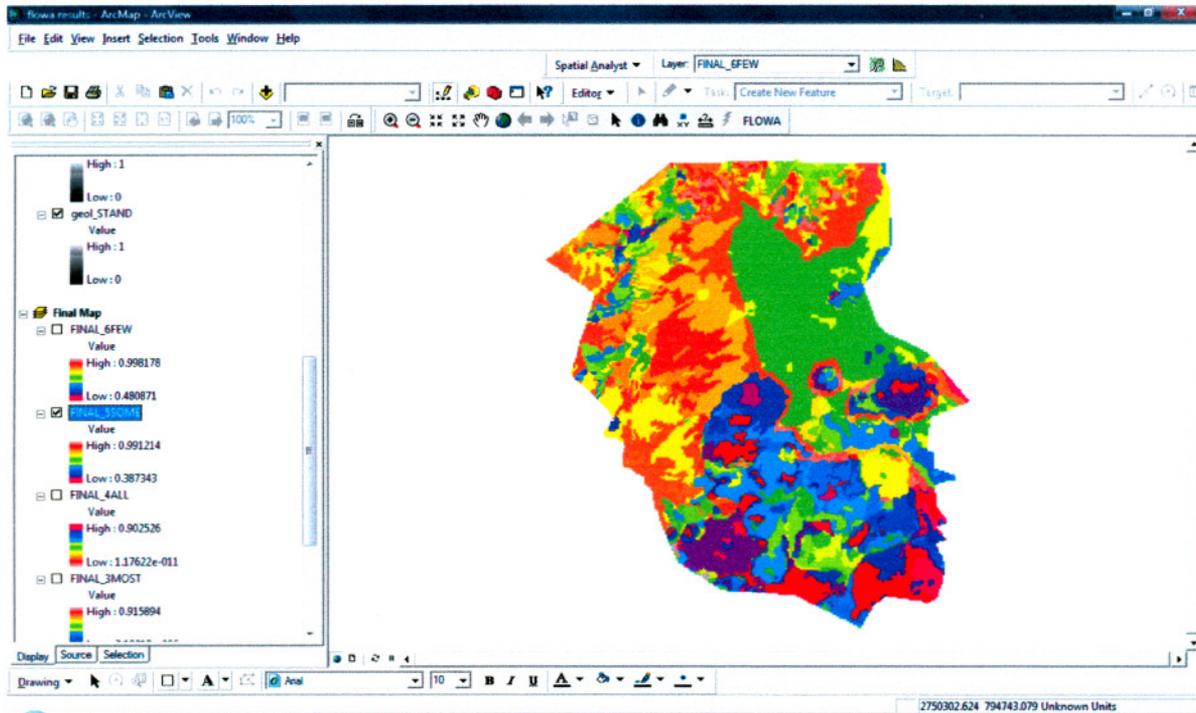


A continuación se ilustran los 7 resultados obtenidos en este proceso:

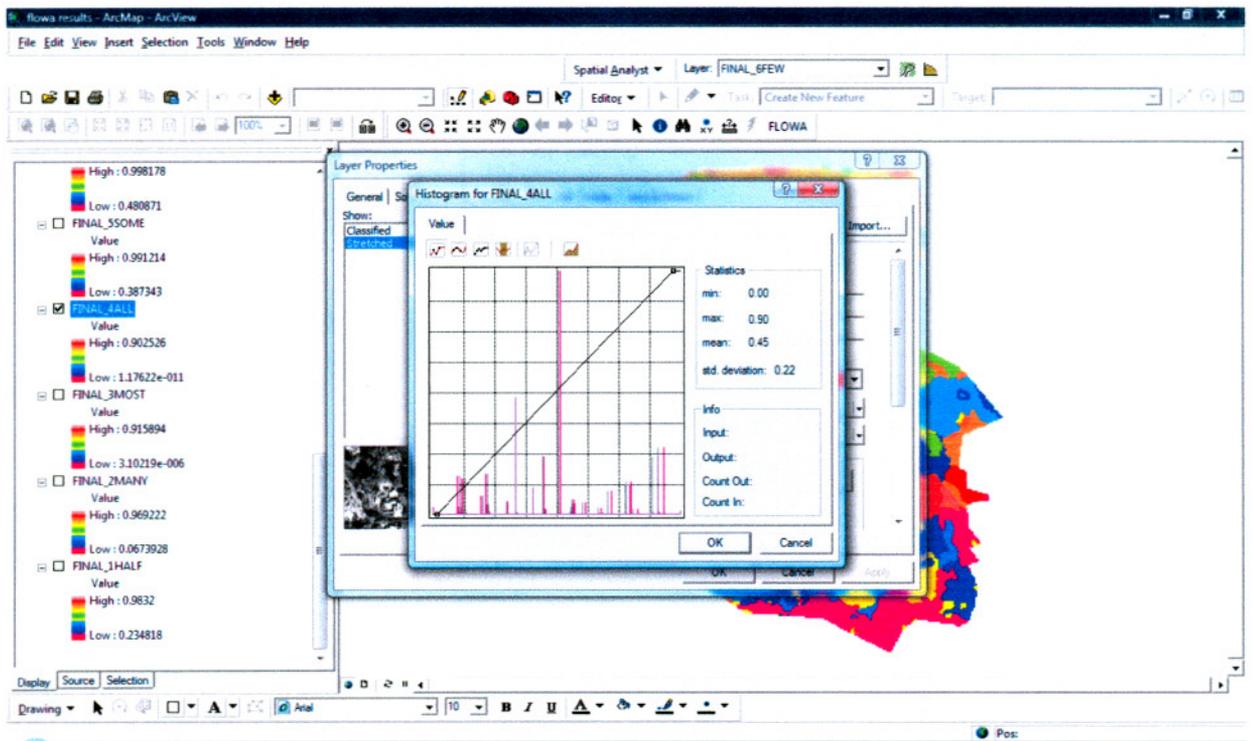
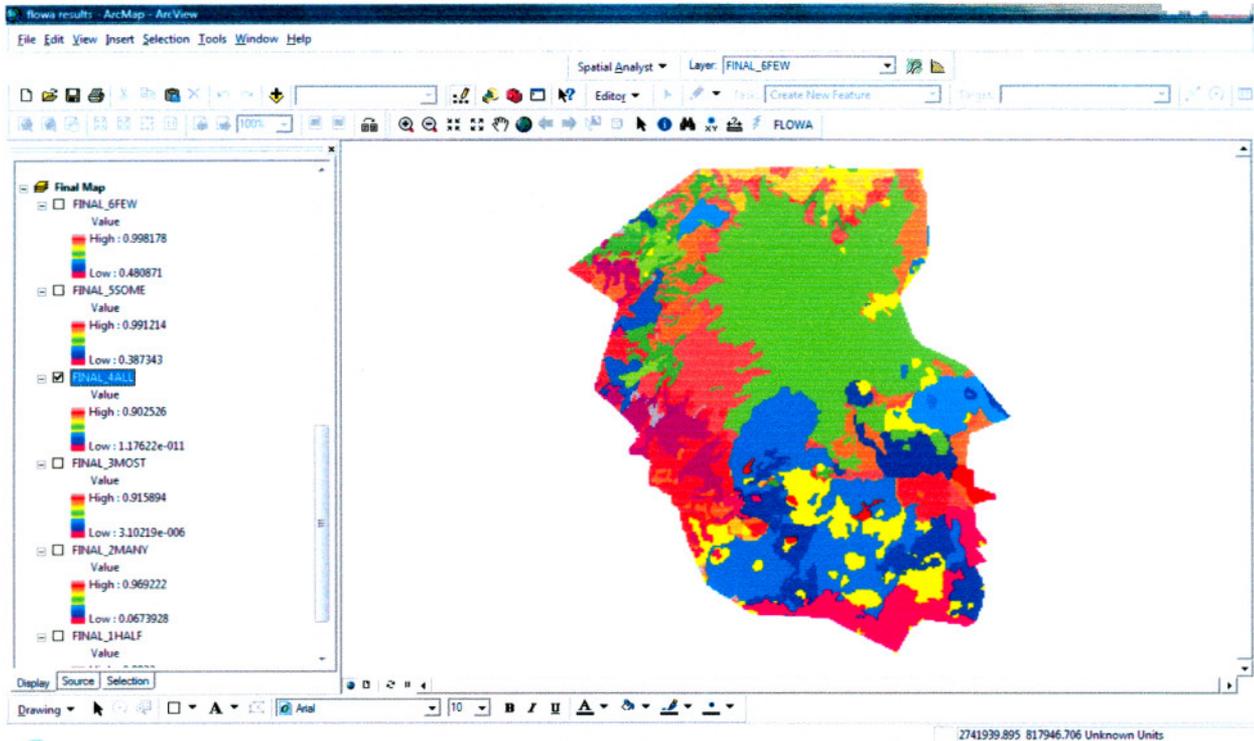
## 1.- Cuantificador lingüístico FEW, mapa y sus datos estadísticos:



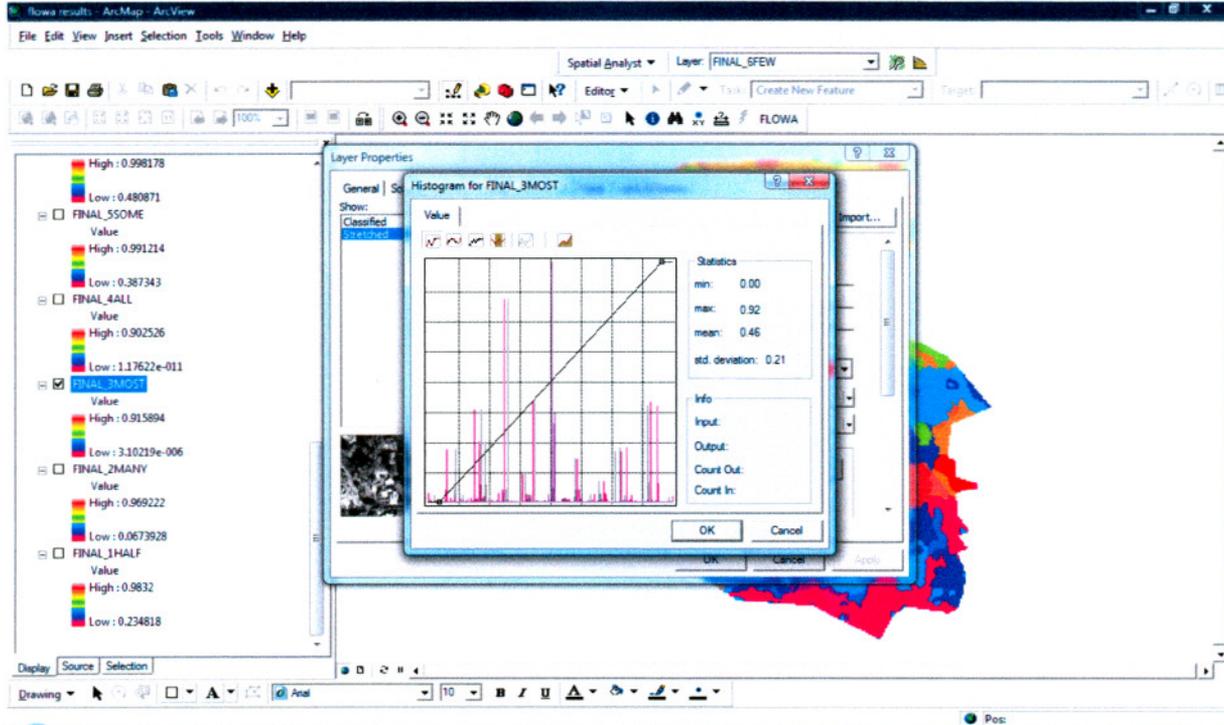
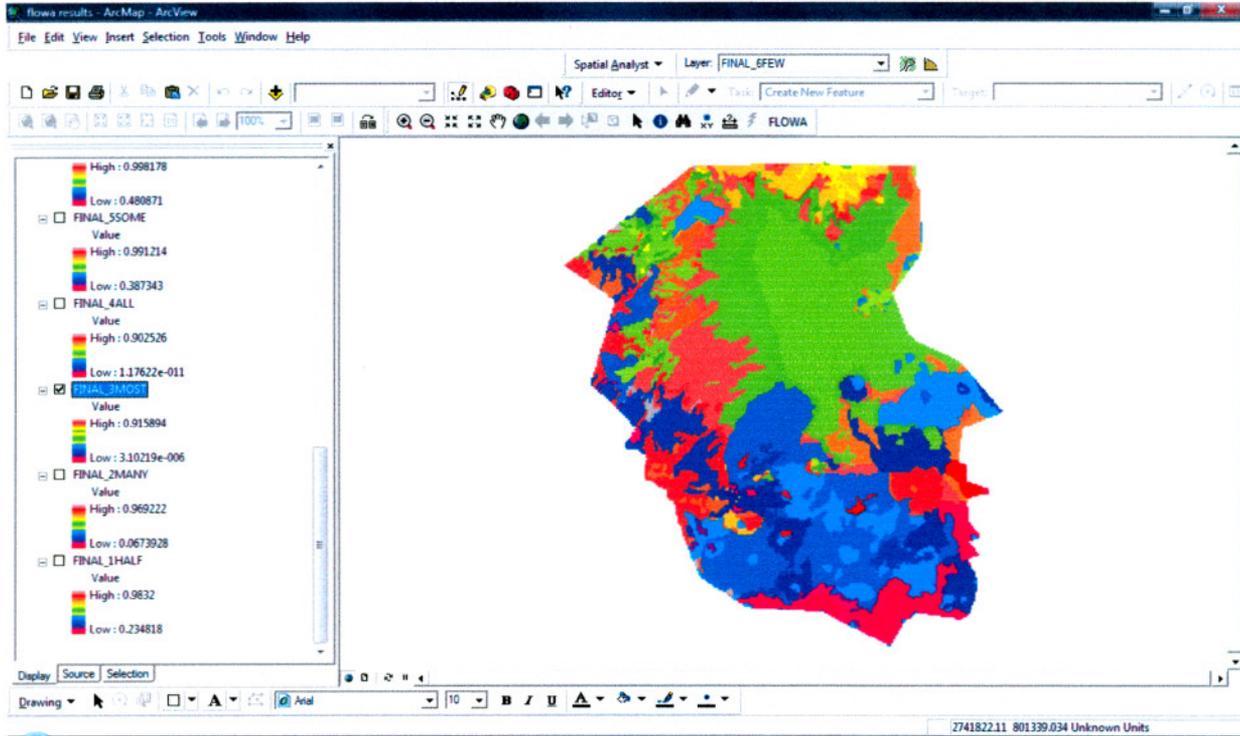
## 2.-Cuantificador lingüístico SOME, mapa y sus datos estadísticos:



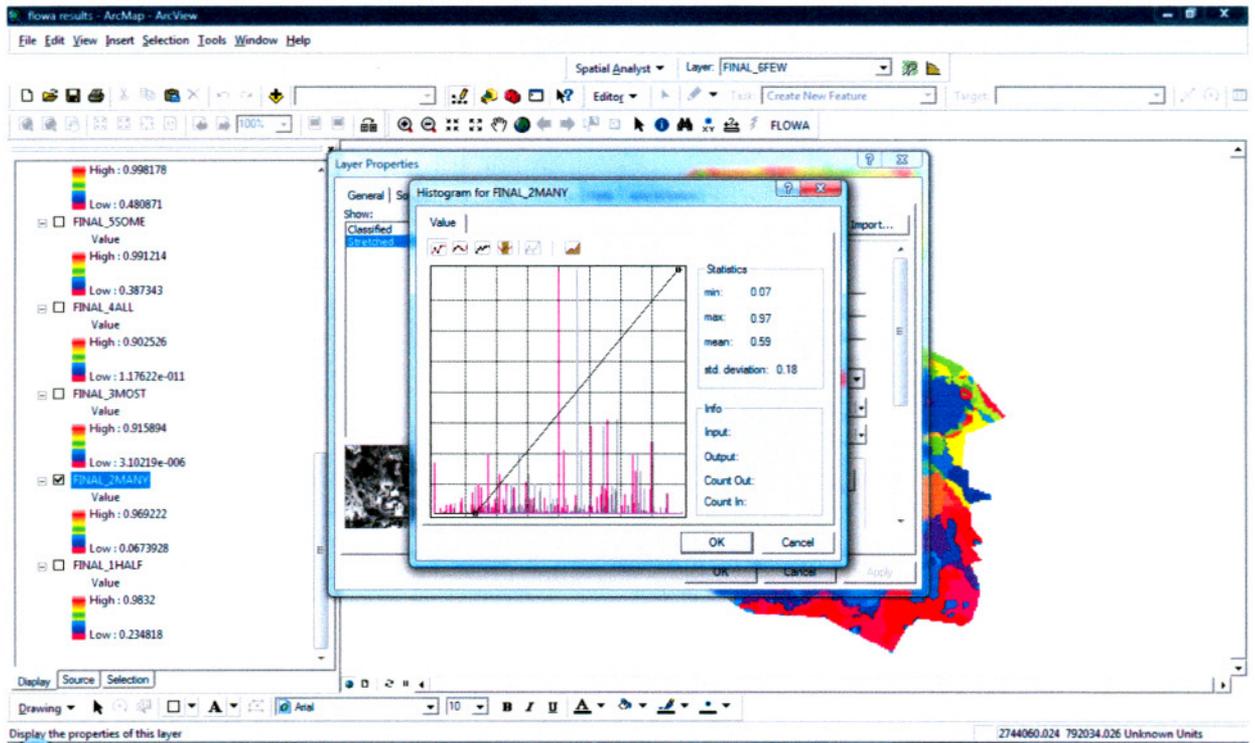
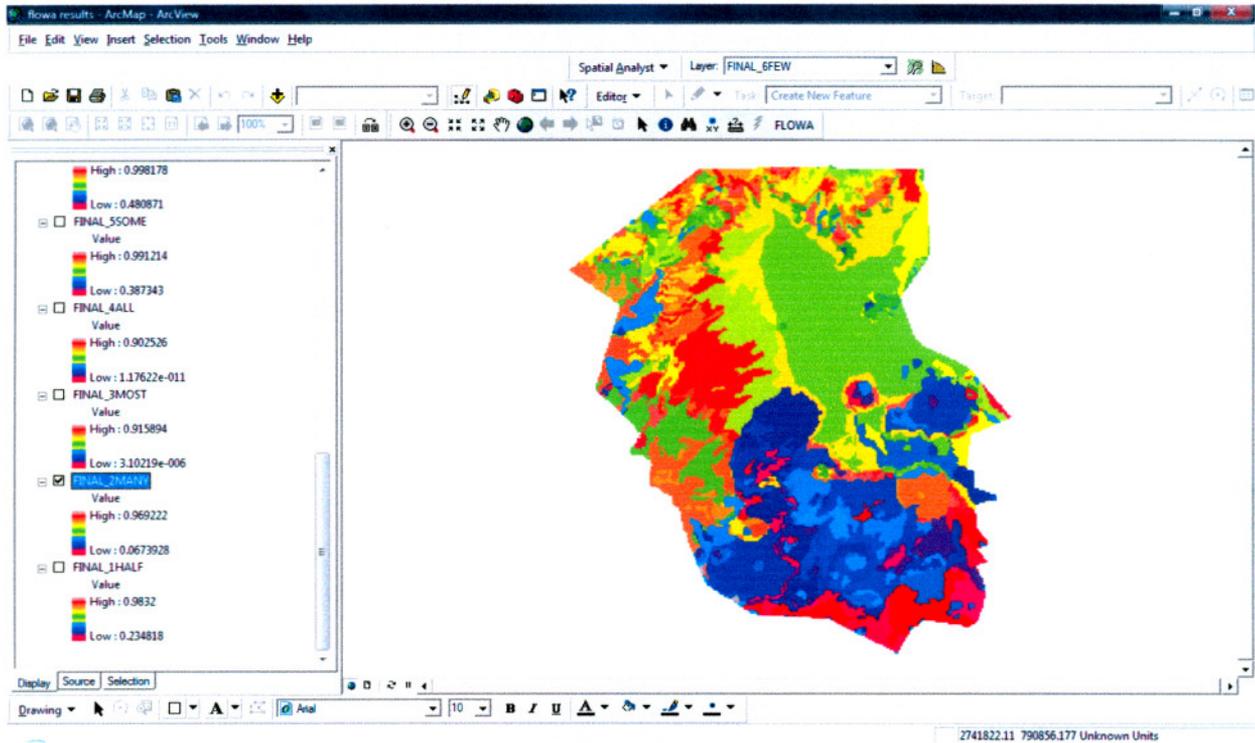
### 3.-Cuantificador lingüístico ALL, mapa y sus datos estadísticos:



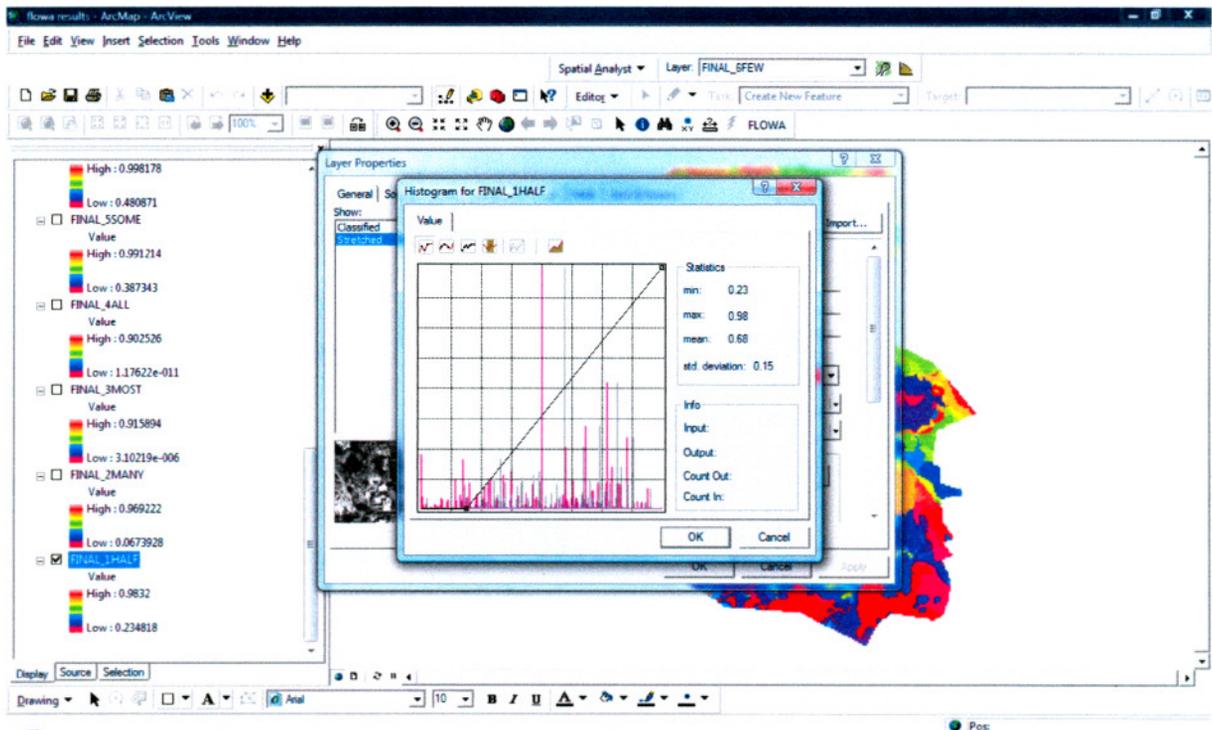
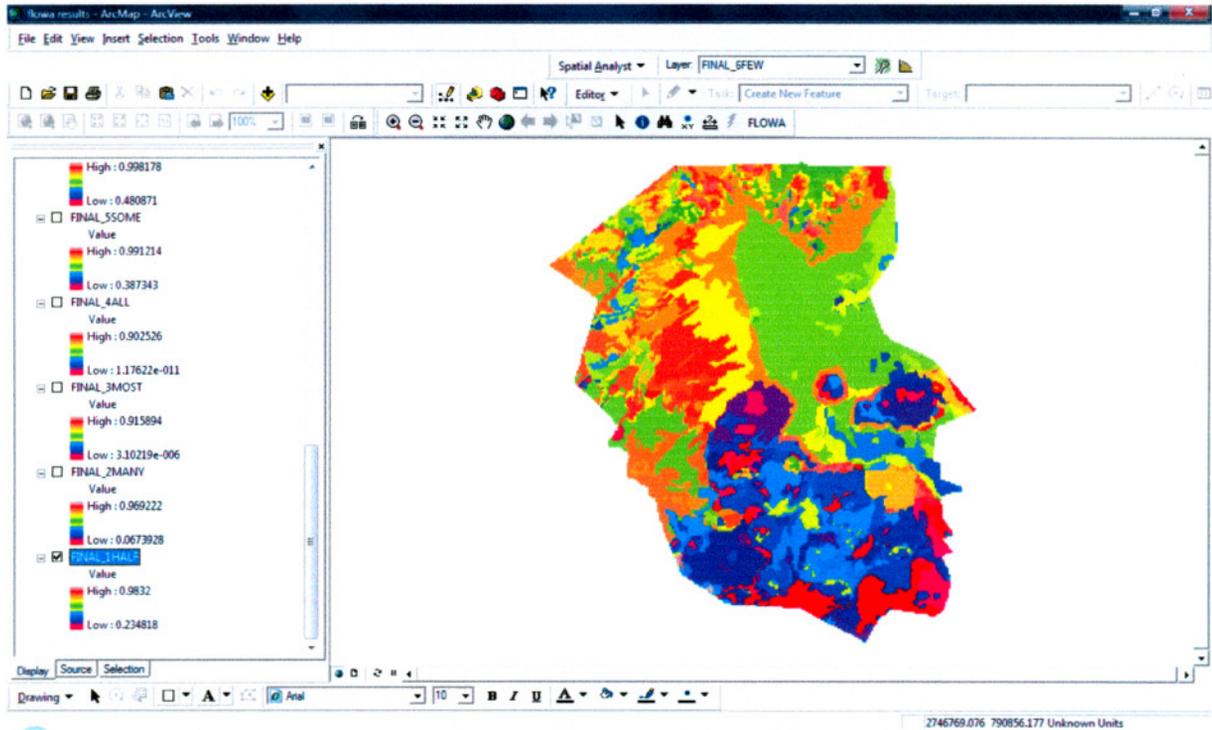
#### 4.-Cuantificador lingüístico MOST, mapa y sus datos estadísticos:



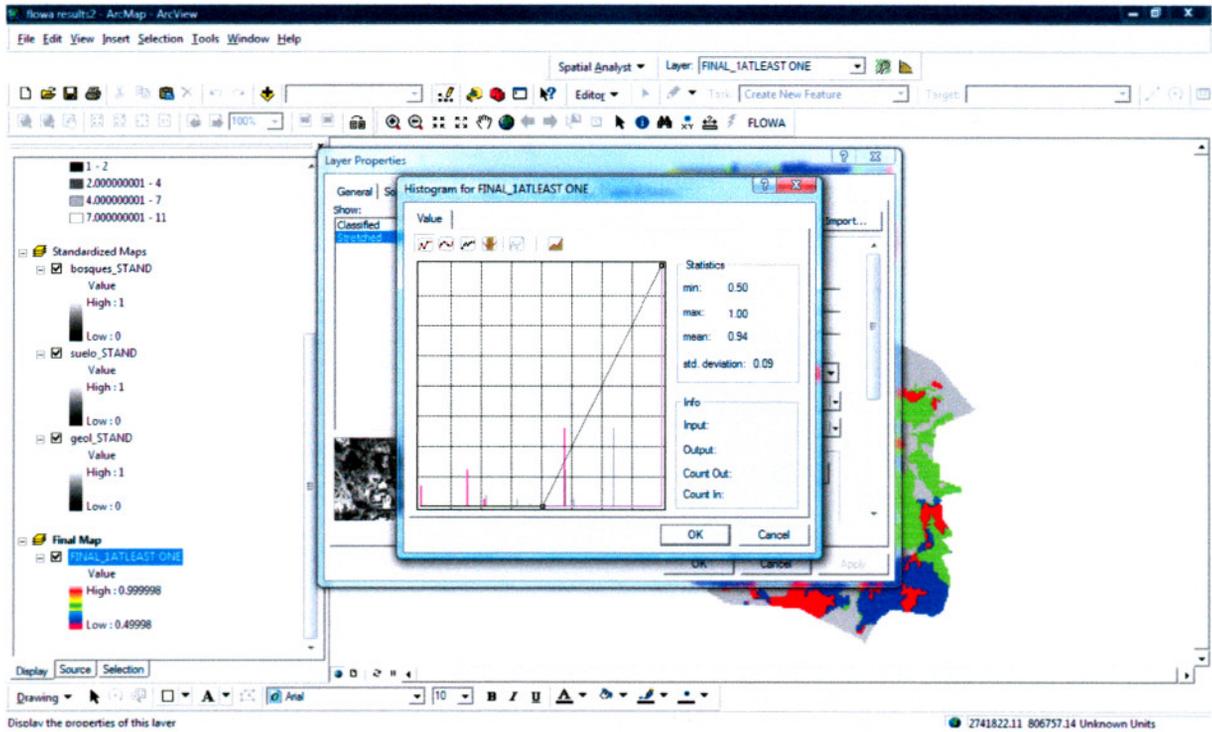
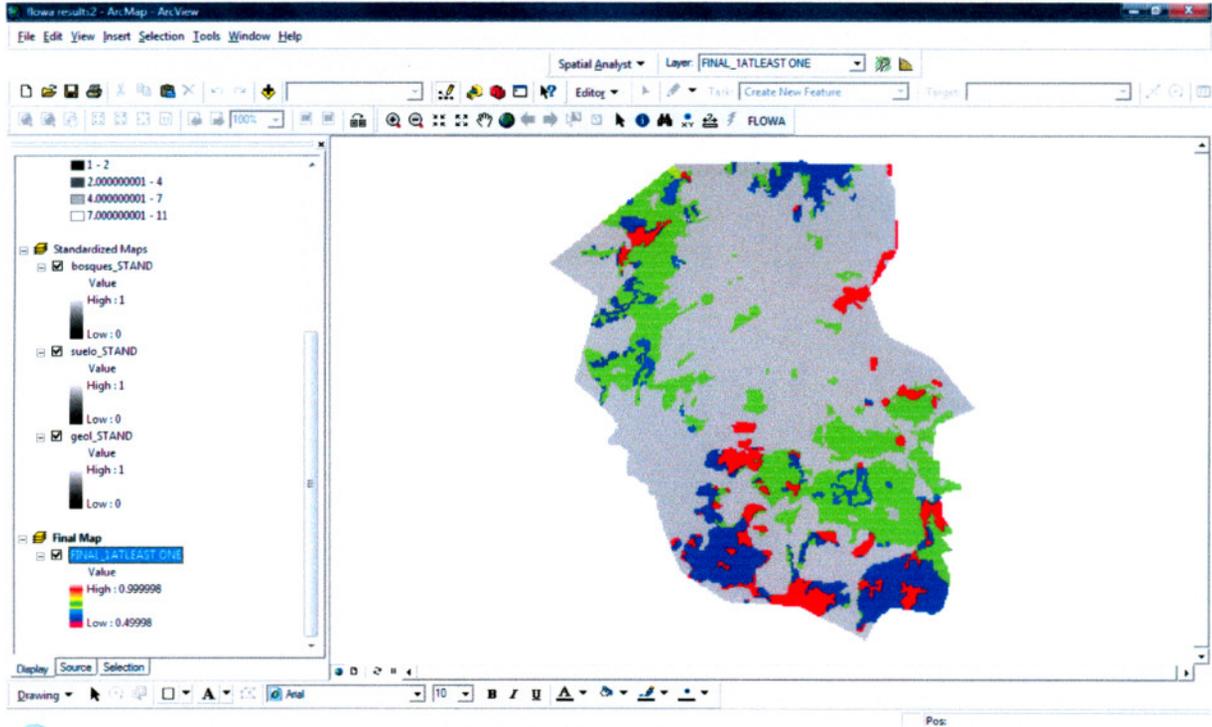
## 5.-Cuantificador lingüístico MANY, mapa y sus datos estadísticos:



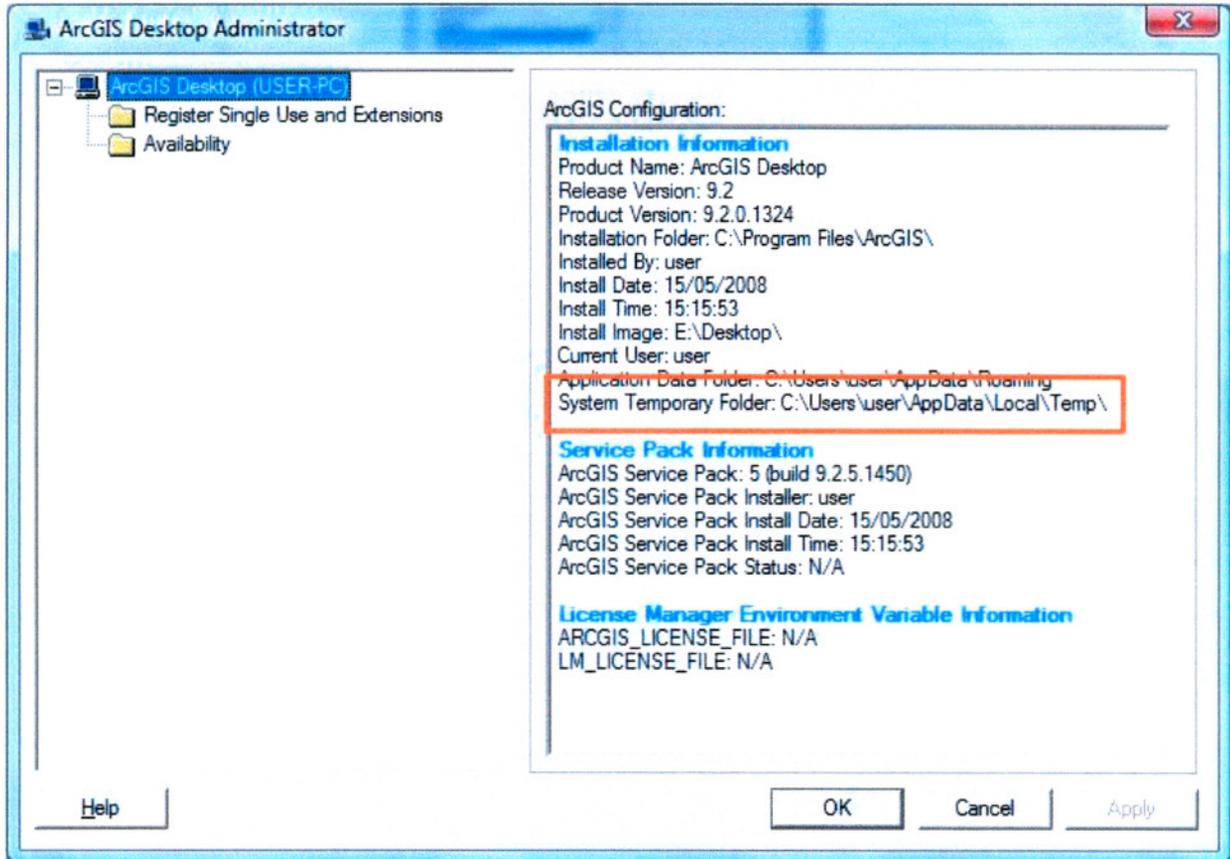
## 6.-Cuantificador lingüístico HALF, mapa y sus datos estadísticos:



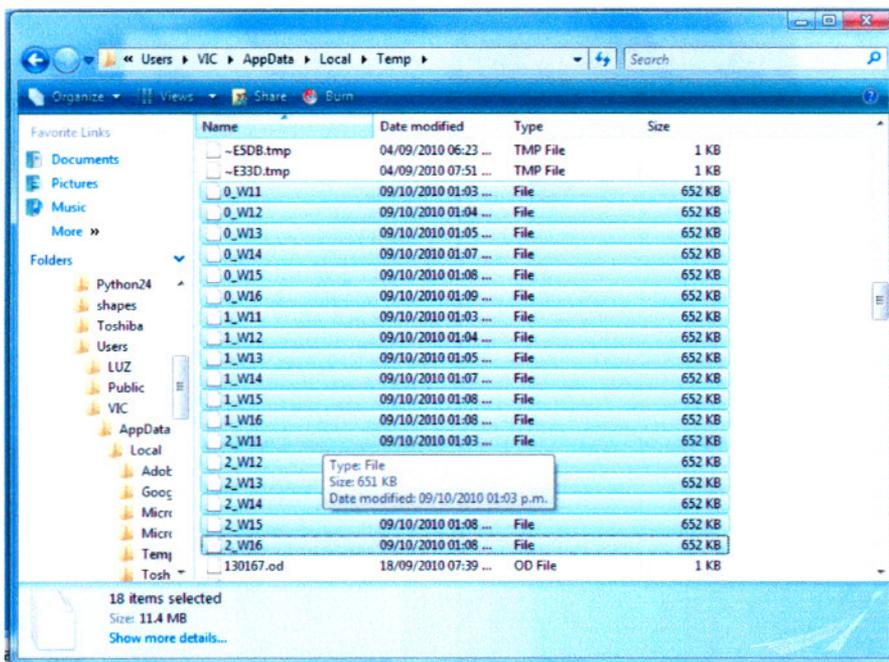
## 7.-Cuantificador lingüístico ATLEAST ONE, mapa y sus datos estadísticos:



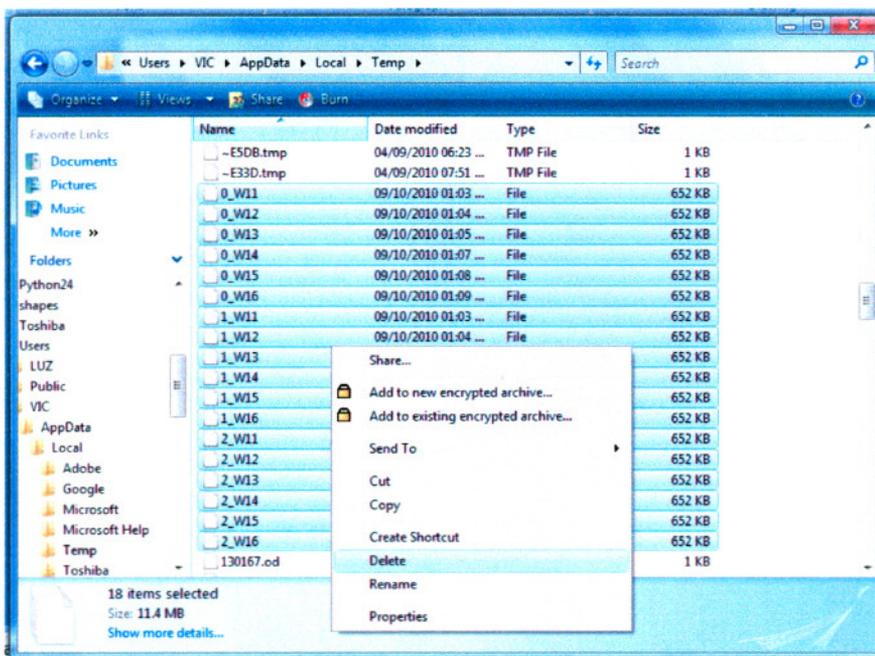
Paso 13: Vacíe la carpeta de archivos temporales. Una vez que utilizó el MCE-FLOWA tiene que vaciar la carpeta del Temp para que pueda utilizarla otra vez. Para encontrar la carpeta del Temp en su sistema, abra el Administrador de Escritorio de ArcGIS (ArcGIS Desktop Administrator):



Paso 14: En la ventana de la configuración de ArcGIS, encuentre el Carpeta Temporal del Sistema. Para vaciar la carpeta, ArcMap debe estar CERRADO. Vaya a la carpeta y vaciela.



Paso 15: Cerciórese de que usted suprima todos los archivos que tengan el formato siguiente (#\_W##).



## BIBLIOGRAFÍA

ACADEMIA DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA. 1995. Mexico City's Water Supply: Improving the Outlook of Sustainability. National Academic Press. 256p. <http://www.nap.edu./catalog/4937.html>.

AGUIRRE, R. 2010. Recarga artificial del acuífero de la Ciudad de México. Ingeniería Civil. Num. 495. Pp. 20-24.

BOROUSHAKI S. y J. MALCZEWSKI . 2008. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. Computers and Geosciences V. 34 No. 4: pp. 399-410

CARRERA-HERNÁNDEZ, J.J., GASKIN, S.J., (2007). Spatio-temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. Journal of Hydrology, 336(3-4):231-249, DOI 10.1016/j.jhydrol.2006.12.021

CHEN Y., KHAN S. y PADAR Z. 2008. Irrigation Intensification or Extensification Assessment: a GIS-Based Spatial Fuzzy Multi-Criteria Evaluation. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Spatial accuracy assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Shanghai, P.R., China, June 25-27, Pp.309-318.

CONAGUA. 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010. Comisión Nacional del Agua. México. 258pp.  
[http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/EAM2010\\_Espanol\\_16Junio2010.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/EAM2010_Espanol_16Junio2010.pdf).

CONAGUA. 2010. Atlas digital del Agua México 2010. Comisión Nacional del Agua. México. <http://www.conagua.gob.mx/atlas/#>

CONAGUA. 2009. Acuerdo por el que se dan a conocer la ubicación geográfica del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos.(Publicado en el D.O.F. 28 de agosto de 2003). Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA. 2009. NORMA Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua. (Publicado en el Diario Oficial de la Federación el martes 18 de agosto de 2009). Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA. 2008. GEOBASE CONAGUA. Subdirección General de Programación. Comisión Nacional del Agua. México. (DVD).

CONAGUA. 2007. Informe del censo de aprovechamientos en la región XIII Aguas del Valle de México. Subdirección General de Administración del Agua. Comisión Nacional del Agua. México (DVD).

CONAGUA. 2003. Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización. (Publicado en el D.O.F. 31 de enero de 2003). Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero zona metropolitana de la ciudad de México. Comisión Nacional del Agua. 29 p. [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR\\_0901.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_0901.pdf)

COTLER, H., 2010. Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México. 232 pp.

ESCOLERO FUENTES, O., MARTÍNEZ, S., KRALISH, S. y PEREVOCHTCHIKOVA, M., 2009. Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático. Informe final. 169 pp. [http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua\\_Escolero\\_%20InfFinal\\_org.pdf](http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua_Escolero_%20InfFinal_org.pdf).

ESRI (AHP-OWA 2.0-MultiCriteria Evaluation  
<http://arcscrips.esri.com/details.asp?dbid=14894> )

FREEZE, R.A. AND CHERRY, J.A., 1979. Groundwater. Hemel Hempstead: Prentice-Hall International. xviii + 604 p.

HERRERA–ZAMARRÓN, G; CARDONA–BENAVIDES, A.; ESCALANTE–SANDOVAL, C.; GONZÁLEZ–HITA, L.; GUTIÉRREZ–OJEDA, C; HERNÁNDEZ–LALOTH, N.; LÓPEZ–HERNÁNDEZ, R.I.; SÁNCHEZ–DÍAZ, L.F.; BÁEZ–DURÁN, J.A.; DE LA CRUZ–BARTOLÓN, J. Estudio para obtener la disponibilidad del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), contrato núm. 06–CD–03–10–0267–1–05., 2005, 300 p.

INGEBRITSEN, S.E., SANFORD, W.E. y C.E. NUEUZIL, 2006. Groundwater in geologic processes. 2nd Edition. Cambridge University Press. 562 pp.

GARCIA-PALOMO, A., ZAMORANO, J.J., LÓPEZ-MIGUEL, C., GALVÁN-GARCÍA, A., VALERIO, V., ORTEGA, R. y MACÍAS, J., 2008. El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Rev. mex. cienc. geol.*, vol.25, n.1, pp. 158-178. ISSN 1026-8774.

LESSER-I. J., SANCHEZ-D., F., y GONZÁLEZ-P., D., 1990. Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México. *Ingeniería Hidráulica en México* I(5):52-60, México, D.F.

MALCZEWSKI J. 2006. Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS- based multicriteria evaluation for land use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8, Pp.270-277.

MARÍN–CORDOVA, S., AGUAYO, C.J., 1989, Evolución geológica de la Cuenca de México e importancia de sus rasgos estructurales, en Gío–Argáez, R., Hernández–Ruíz, I., Sáinz–Hernández, E. (eds.), *Ecología Urbana: México, D.F.*, Sociedad Mexicana de Historia Natural, p. 65–75.

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

MOOSER, F., y MOLINA, C. 1993. Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México. *Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Barros Sierra*. México D.F.. Vol. 3 N. 1, Pp.68-84

LEYVA, E. 2010. Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM. 220p.  
<http://mmc.geofisica.unam.mx/mmc/tesis/EstherLeyva/EstherTesis-II.pdf>

PEREVOCHTCHIKOVA M., CARRILLO RIVERA, J., GODOY ARAÑA, A., 2006. Gestión integral del agua en la Cuenca de México: ¿coincide la cuenca superficial con la subterránea?

[http://www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/congresos/MORELOS/Extenso/CB/EO/CBO-26.pdf](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/congresos/MORELOS/Extenso/CB/EO/CBO-26.pdf).

PHUKON, P., PHUKAN, S. DAS, P. y SARNA, B. 2004. Multicriteria evaluation in GIS environment for groundwater resource mapping in Guwahati City areas, Assam. *Gis Development Net. Map India Conference 2004.* 10p. <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/ground/mi04026.htm>

RUMMAN, N., LIN, G. y LI, J. 2005. Investigation of GIS-based Surface Hydrological Modelling for Identifying Infiltration Zones in an Urban Watershed. *Environmental Informatics Archives, Volume 3,* Pp. 315-322.

SAATY, T. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation (Decision Making Series).* McGraw-Hill, New York. 287 pp.

SAATY, T. 1991. *Prediction, Projection and Forecasting.* Kluwer Academic Pub. Dordrecht. 251 pp.

SANTOYO-VILLA, E., OVANDO-SHELLEY, E., MOOSER, F. y E. LEÓN-PLATA, 2005. *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México.* Ciudad de México. TGC Geotecnia S.A. de C.V. 171 pp.

SARAF, A. y SARMA K. 1998. Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *International Journal of Remote Sensing.* Vol. 19, Issue 10, Pp. 1825-1841.

SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE. GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, 2005. *Estudio para la recarga del acuífero en el suelo de conservación del Distrito Federal. Resumen ejecutivo.* 7 p.

[http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/estudio\\_recarga\\_acuifero\\_suelo\\_%20de\\_conservacion.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/estudio_recarga_acuifero_suelo_%20de_conservacion.pdf)

SHANKAR, R. y MOHAN, G. 2005. GIS based hydrogeomorphic approach for identification of site-specific artificial-recharge techniques in the Deccan Volcanic Province. *J. Earth Syst. Sci* 114. No. 5, October 2005, pp, 505-514.

SISTEMA DE INFORMACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO (SIAPS). El Colegio de México A.C. México. <http://siaps.colmex.mx/previo.html>

VELÁZQUEZ, S., CARRILLO, J. y MORALES, L. 2004. Sistemas de información geográfica en la delimitación de unidades de recarga y descarga.. XXXIII Congress IAH y 7th Congress ALHSUD. Abstract. Zacatecas, México 11 al 15 de octubre.

UAM (Universidad Autónoma Metropolitana) 2009. Repensar la Cuenca: la gestión de los ciclos del agua en el Valle de México. USAID: Oficina para América Latina y el Caribe.

[http://www.consejosdecuenca.org.mx/modules.php?name=Web\\_Links&l\\_op=viewlink&cid=6&min=0&orderby=titleA&show=10](http://www.consejosdecuenca.org.mx/modules.php?name=Web_Links&l_op=viewlink&cid=6&min=0&orderby=titleA&show=10)

YU, J. CHEN, Y. y WU, J. 2009. Cellular automata and GIS based landuse suitability simulation for irrigated agriculture. 18<sup>th</sup> World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July. Pp.2584-3590.