



Estimación de la recarga natural en la Cuenca de México mediante la aplicación del método APLIS

Estimation of natural recharge in the Mexico Basin by applying the APLIS method

Palma-Nava Adriana

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería

Correo: APalmaN@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4073-6664>

Pavón-Ibarra Ivonne

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería

Correo: IPavonI@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1676-7818>

Domínguez-Mora Ramón

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería

Correo: RDominguezM@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2321-6408>

Carmona-Paredes Rafael Bernardo

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería

Correo: RCarmonaP@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0727-5093>

Resumen

El objetivo del presente estudio es la estimación de la recarga natural en la Cuenca de México a partir de la aplicación del método APLIS, el cual es una herramienta que permite estimar la tasa media de recarga anual en acuíferos carbonatados, procedente de la infiltración de las precipitaciones en los acuíferos. La tasa es expresada como porcentaje de la precipitación, a partir de las siguientes variables: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), áreas de absorción-Infiltración preferencial (I) y Suelo (S). Para cada variable se han asignado categorías o intervalos, estableciendo un valor entre 1 (mínima influencia en la recarga) y 10 (máxima influencia) y se han almacenado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto permite la superposición en el SIG de las capas de información correspondientes a las variables para calcular la tasa de recarga y obtener la distribución espacial de la misma. Los resultados obtenidos muestran que la tasa media de recarga natural en el área de estudio corresponde a una tasa de recarga Moderada con un valor de 43 %. La tasa de recarga baja aparece representada en la zona central de la cuenca, coincidiendo con los depósitos lacustres. Las mayores tasas de recarga se presentan en la periferia de la zona de estudio, donde se encuentran las mayores pendientes y mayor precipitación. Los resultados ponen en evidencia que la zona más importante en extensión y cantidad de recarga natural de la cuenca se encuentra en la zona poniente y sur de la Ciudad de México, representando casi una tercera parte de su territorio las zonas de recarga y con un valor aproximado de 9 m³/s.

Descriptor: Método APLIS, recarga natural, Sistema de Información Geográfica, agua subterránea, acuífero, Cuenca de México.

Abstract

The objective of this study is the estimation of the natural recharge in the Basin of Mexico from the application of the APLIS method, which is a tool for estimating the average annual recharge rate in carbonate aquifers, from the infiltration of rainfall in aquifers. Rate is expressed as a percentage of precipitation, using the following variables: Altitude (A), Slope (P), Lithology (L), preferential Infiltration layers (I) and Soil (S). Categories or intervals have been assigned for each variable, establishing a value between 1 (minimum influence on recharge) and 10 (maximum influence) and they have been stored in a Geographical Information System. This allows the overlap in the GIS of the layers of information corresponding to the variables to calculate the recharge rate and obtain the spatial distribution of it. The results obtained show that average natural recharge rate in the study area corresponds to a Moderate recharge rate with a value of 43 %. The low recharge rate appears represented in the central area of the basin, coinciding with the lacustrine deposits. The highest recharge rates occur in the periphery of the study area, where the highest slopes and highest rainfall are found. The results show that the most important area in terms of extension and quantity of natural recharge of the basin is found in the west and south of Mexico City, with recharge zones representing almost a third of its territory and with a value of approximately 9 m³/s.

Keywords: APLIS method, Geography Information System, natural recharge, groundwater, aquifer, Mexico Basin.

INTRODUCCIÓN

En nuestros días, el tema del agua es un problema de interés social. Si bien, en términos generales, México no carece del recurso hídrico, existen algunas características que limitan el aprovechamiento: la distribución temporal, la distribución espacial, la distribución de la población sobre el territorio nacional, el deterioro en la calidad y la falta de mantenimiento en la infraestructura hidráulica.

Se presenta una problemática muy compleja en el manejo, administración y planeación del agua, en especial, en aquellas regiones en que es escasa y la fuente principal es el agua subterránea.

La importancia del agua subterránea en la Cuenca de México, radica en que es la fuente que abastece cerca de 62 % del volumen de agua que requieren las localidades que en ella se encuentran y en donde se concentran más de 22 millones de habitantes. Los censos de aprovechamiento de aguas subterráneas realizados por la CONAGUA reportan una extracción de agua subterránea de unos 1,954 hm³/año, de los cuales 87 % corresponde al uso público urbano y 13 % se integra por los demás usos agrícola, industrial y servicios (DOF, 2020). Este volumen se utiliza en el riego de unas 17,783 ha y para el abasto de una población como uso público urbano, mismo que considera servicios, comercial, industria, fugas en la red de distribución y en general, para cubrir todas las necesidades de la población.

Los recursos hídricos subterráneos son considerados una fuente crítica para el suministro de agua potable a la población, por lo que se requiere de una evaluación de las áreas que potencialmente facilitan la infiltración del agua (zonas de recarga) permitiendo la recarga natural y la cuantificación del recurso.

En este trabajo se aplica la metodología APLIS en la Cuenca de México, para estimar la tasa de recarga por infiltración de agua de lluvia y la distribución espacial de la misma. Es importante resaltar que, si bien, la metodología antes mencionada fue desarrollada para la estimación de la tasa media de recarga anual en acuíferos carbonatados, también se ha implementado en diversos estudios en Latinoamérica como son: Aplicación de metodologías para la estimación espacial de recarga y conductividad hidráulica. Caso de los andes centrales en Perú (Tapia, 2011), Comparison of the APLIS and Modified-APLIS Methods to Estimate the Recharge in Fractured Karst Aquifer, Amazonas, Peru (Marina *et al.*, 2015), Estudio de Impacto Ambiental para el Área de Perforación Exploratoria COR-15 (Maurel & PROM, 2020) y el Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Sur de Morelia, Michoacán (IMPLAN, 2015).

ZONA DE ESTUDIO

La Cuenca de México se localiza en la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, limita al Norte con las sierras de Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca, al Sur con las sierras del Chichinautzin y la del Ajusco, al Este con las sierras de Calpulalpan, Nevada y de Río Frío y al Oeste con la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo.

Ubicada entre los paralelos 19° 03' 53" y 20° 11' 09" de latitud norte y los meridianos 98° 11' 53" y 99° 30' 24" de longitud oeste, la cuenca tiene una extensión territorial de 9930 km², lo cual representa el 0.5 % de la superficie continental de México. El área de estudio está constituida por porciones de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México y la totalidad de la Ciudad de México.

El área de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica Administrativa (RHA) XIII Aguas del Valle de México, de acuerdo con la delimitación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

A su vez, a partir de la delimitación fisiográfica, la Cuenca de México se ubica en la Región Hidrológica (RH) número 26 Río Alto Pánuco.

En cuanto a la elevación de la Cuenca de México, esta oscila entre los 2217 y 5200 m sobre el nivel del mar. La presencia de las sierras es uno de los aspectos físicos que caracterizan y limitan el área de estudio; sin embargo, en su interior el relieve es básicamente suave con una altitud promedio de 2 240 m.s.n.m. que solo se ve interrumpida por algunas elevaciones de relativa altura entre las que destacan las sierras de Guadalupe y Santa Catarina, la primera localizada en el norte de la Ciudad de México, y la segunda en la porción suroriental de esta misma entidad federativa.

Las principales corrientes superficiales que conforman la red hidrográfica del área de estudio son: Magdalena, Mixcoac, Tacubaya, San Joaquín, Río Hondo, Río de los Remedios, Tlalnepantla, San Javier, Tepotzotlán, Tlalmanalco, Cuautitlán, de las Avenidas de Pachuca, San Juan Teotihuacán, Papalotle, Amecameca, A. Azoyatla, A. Cerro Gordo y de la Compañía.

La precipitación media anual es del orden de 700 milímetros, las mediciones más altas corresponden a las zonas montañosas donde llueve más de 1200 milímetros anuales. La Cuenca de México cuenta con una temperatura media anual que varía entre los 2° y 18°C.

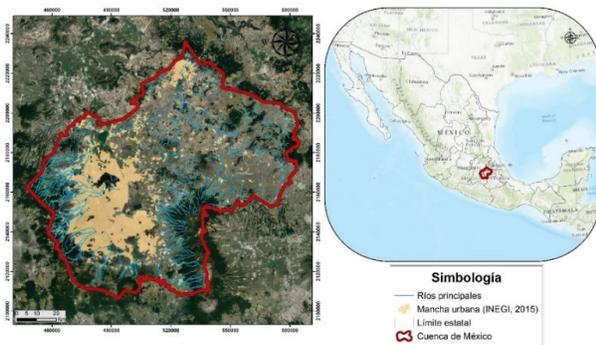


Figura 1. Localización Cuenca de México

METODOLOGÍA

El método APLIS es una propuesta metodológica que permite estimar la tasa de recarga anual procedente de la infiltración de las precipitaciones en acuíferos, expresada como porcentaje de la precipitación anual, y la distribución espacial de dicha tasa (Andreo *et al.*, 2004).

La aplicación del método está fundamentada en el procesamiento y análisis de características o variables intrínsecas de los acuíferos, es decir, características climáticas, geológicas, geomorfológicas, topográficas, edafológicas e hidrogeológicas.

El nombre del método APLIS deriva de las iniciales de las variables consideradas en el modelo: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), zonas preferenciales de Infiltración (I) y Suelo (S).

La estimación de la recarga posee un carácter cuantitativo, por lo que los atributos o variables cuya representación es cualitativa (litología, zonas preferenciales de infiltración y suelo) se transforman en variables cuantitativas, mediante valores ordinales, para su posterior procesamiento.

Con el objetivo de poder asignar un valor a las variables que influyen en la recarga de un acuífero, se determinan una serie de intervalos de clase o categorías para cada atributo, de manera que a cada intervalo le corresponde una puntuación. La puntuación alcanza valores comprendidos entre 1 y 10, siguiendo una progresión aritmética de diferencia 1, lo cual facilita la conversión a porcentajes de recarga. El valor 1 expresa una mínima influencia de los valores de una variable en la recarga, mientras que el valor 10 expresa la máxima incidencia en la recarga del acuífero.

Los valores de la variable Altitud se agrupan en 10 intervalos de clase, estableciendo una puntuación de progresión aritmética (Tabla 1). Se entiende que conforme aumenta la altitud, aumenta la precipitación y la recarga del acuífero.

Tabla 1. Puntuación asignada a los valores de la variable Altitud (Andreo *et al.*, 2004)

Altitud (m)	Puntuación
< 300	1
300 – 600	2
600 – 900	3
900 – 1200	4
1200 – 1500	5
1500 – 1800	6
1800 – 2100	7
2100 – 2400	8
2400 – 2700	9
> 2700	10

La puntuación establecida para la variable Pendiente (Tabla 2) disminuye una unidad conforme aumenta la pendiente, es decir, a mayor pendiente, mayor escurrimiento y menor recarga al acuífero.

Tabla 2. Puntuación asignada a los valores de la variable Pendiente (Andreo *et al.*, 2004)

Pendiente (%)	Puntuación
≤ 3	10
3 – 8	9
8 – 16	8
16 – 21	7
21 – 31	5
31 – 46	4
46 - 76	3
76 - 100	2
> 100	1

La asignación de puntuaciones a la variable Litología (Tabla 3) se genera en función de criterios hidrogeológicos. De tal manera que, al aumentar la permeabilidad, grado de fracturación, karstificación, en nuestro caso porosidad, etcétera, aumenta la recarga del acuífero. Los materiales de baja permeabilidad reciben una menor puntuación para estimar la recarga.

Tabla 3. Puntuación asignada a los valores de la variable Litología (Andreo *et al.*, 2004)

Litología	Puntuación
Calizas y dolomías karstificadas	10 - 9
Mármoles fracturados algo karstificados	8 - 7
Calizas y dolomías fisuradas	6 - 5
Arenas y gravas, coluviones	4
Brechas y conglomerados	3
Rocas plutónicas y metamórficas	2
Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1

La puntuación concedida a la variable Infiltración presenta únicamente dos clases: valor 10 para las áreas con abundantes formas de absorción preferencial y valor 1 para el resto (Tabla 4).

Tabla 4. Puntuación asignada a los valores de la variable zonas preferenciales de Infiltración (Andreo *et al.*, 2004)

Infiltración (I)	Puntuación
Abundantes formas de infiltración preferencial	10
Escasas formas de infiltración preferencial	1

La variable Suelo (Tabla 5) está agrupada en distintas clases en función de las características de espesor y textura que predominan en sus horizontes, que están relacionadas con la permeabilidad del mismo. Así, conforme el espesor es menos y la textura más gruesa, la recarga es mayor.

Tabla 5. Puntuación asignada a las clases de la variable Suelo (Andreo *et al.*, 2004)

Suelos (S)	Puntuación
Leptosoles	10
Arenosoles álbicos y Xerosoles cálcicos	9
Regosoles calcáreos y Fluvisoles	8
Regosoles eútricos, dístricos y Solonchaks	7
Cambisoles cálcicos	6
Cambisoles eútricos	5
Histosoles eútricos, Luvisoles órticos y cálcicos	4
Luvisoles crómicos	3
Planosoles	2
Vertisoles crómicos	1

La ecuación del método APLIS para estimar la tasa de recarga es la siguiente:

$$R = (A + P + 3L + 2I + S) / 0.9$$

La expresión matemática anterior responde a la influencia que ejerce cada una de las variables sobre la recarga. Al dividir entre la constante 0.9 se obtienen valores de la tasa de recarga que varían entre un valor mínimo de 8.88 % y un valor máximo de 88.8 % de la precipitación sobre el acuífero, es decir, siempre se infiltra un mínimo porcentaje, pero la recarga nunca es 100 % de la lluvia.

Además, la recarga se representa agrupada en cinco intervalos regulares. A cada uno de los intervalos de clase le corresponde una categoría de acuerdo con el porcentaje de precipitación que recarga al acuífero.

Tabla 6. Categorías del porcentaje de recarga en el acuífero (Andreo *et al.*, 2004)

Intervalo	Clase de recarga
< 20 %	Muy baja
20– 40 %	Baja
40 – 60 %	Moderada
60 – 80 %	Alta
> 80 %	Muy alta

APLICACIÓN DEL MÉTODO

Los insumos utilizados para la aplicación del Método APLIS en la región de estudio se describen a continuación:

Altitud (A). Se genera a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los datos del producto son un conjunto de celdas de 30 m de resolución, que proporciona las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno. Son valores de altura que permiten representar las formas de montañas, mesetas, valles, depresiones, terrazas y abanicos aluviales.

Pendiente (P). De igual manera que la variable Altitud, los datos para la elaboración del mapa de Pendiente se obtienen a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano.

Litología (L). Para la elaboración del parámetro Litología se hizo acopio de los datos geológicos generados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), referente al Continuo Nacional de Geología de la República Mexicana, escala 1:250,000, serie en formato digital de los

años 1995 y 2005. El conjunto de datos vectoriales geológicos, representa las diversas unidades de rocas que afloran en el área, referidas a un tiempo geológico (unidades cronoestratigráficas), así como las estructuras geológicas originadas por los eventos tectónicos.

Infiltración (I). Para la identificación de las áreas preferenciales de infiltración se hizo uso de la información de Uso de Suelo y Vegetación (INEGI, 2020), escala 1:250 000 Serie VI, donde se presenta la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales y usos agrícolas con sus respectivas variantes de tipos de vegetación e información ecológica relevante.

Suelo (S). La variable concerniente a los suelos se obtiene por medio del mapa de edafología proporcionado por INEGI, escala 1:1,000,000, edición 2014, en la cual se muestra la distribución de los suelos, clasificados de acuerdo con el sistema FAO/UNESCO (1970) modificado por la Dirección General de Geografía. En dicha clasificación se indica la textura o cantidad de arena, limo y arcilla de la parte superficial del suelo; la presencia de fases químicas como salinidad y sodicidad; y la presencia de fases físicas como roca o estratos cementados cercanos a la parte superficial del suelo o fragmentos de ellos en la superficie del mismo.

Precipitación. La información perteneciente a la precipitación ha sido recopilada a través del portal del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Dicho organismo realiza el cálculo de las normales climatológicas cada 10 años para un período consecutivo de 30 años, empezando en un año 1 y terminando en un año 0. Así, se emplearon los datos de las normales climatológicas del último período estándar, es decir, de 1981 a 2010.

VARIABLE ALTITUD (A)

El cálculo de incidencia de la variable Altitud, de acuerdo con el método original, considera únicamente intervalos de clase hasta la cota 2700, ya que el desarrollo de

la metodología fue aplicado en acuíferos del sur de España, donde no se encuentran materiales carbonatados en altitudes superiores a dicha cota. La altitud de la región de estudio del presente trabajo varía entre los 2217 y 5200 m. Por lo anterior, se hace necesario proponer una modificación al método con el objetivo de obtener nuevos intervalos y puntuaciones.

La metodología para establecer los nuevos intervalos de la variable altitud se describe a continuación (Tapia, 2011).

El primer paso consistió en caracterizar la variación de la lluvia en función de la altitud, con la finalidad de obtener una ecuación que describa el comportamiento de la variable. A partir de los archivos históricos de la base de datos de SMN, se extrajeron las precipitaciones mensuales registradas de dos estaciones climatológicas, que representan la altitud mínima y máxima dentro de la zona de estudio. La elección de las estaciones se hizo de acuerdo con la localización y altitud a la que se encuentran, es decir, seleccionando estaciones situadas a diferentes elevaciones y zonas dentro del área de estudio (Tabla 7 y Tabla 8).

Para la obtención de la ecuación se requiere la asignación de la variable dependiente e independiente, por lo que se propone otorgar un factor de ponderación a la variable precipitación. Así, al ser mayor la precipitación anual en la estación Presa Iturbide, le fue asignado un peso en porcentaje de 100 %; mientras que a la estación Chalco San Lucas, le corresponde un peso respecto a la estación anterior de 36.5 %.

De acuerdo con los valores obtenidos (Tabla 9), se hace la representación gráfica y la correlación lineal (Figura 2), la cual permite estimar la precipitación a cualquier altitud multiplicando el factor de ponderación correspondiente por el valor de la precipitación de referencia (Estación Presa Iturbide, 1515.8 mm).

Tabla 7. Datos de estaciones climatológicas

Clave	Nombre de estación	Latitud	Longitud	Altitud
15020	Chalco San Lucas	19.2583	-98.8958	2240
15231	Presa Iturbide	19.5294	-99.4642	3290

Tabla 8. Precipitación mensual de las estaciones climatológicas, mm

Nombre de estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Chalco San Lucas	6.9	7.5	9.3	19.2	39.1	97.6	120	117.1	88.8	38.6	5.8	3	552.9
Presa Iturbide	24.3	27.2	23.3	45.7	95.4	257.8	307.7	292.5	275.9	116.5	36.1	13.4	1515.8

Tabla 9. Estimación hp anual

Altitud	Factor %	hp Anual	Altitud	Factor %	hp Anual
2200	0.33	499.56	3800	1.29	1954.73
2300	0.39	590.51	3900	1.35	2045.68
2400	0.45	681.46	4000	1.41	2136.63
2500	0.51	772.41	4100	1.47	2227.57
2600	0.57	863.35	4200	1.53	2318.52
2700	0.63	954.30	4300	1.59	2409.47
2800	0.69	1045.25	4400	1.65	2500.42
2900	0.75	1136.20	4500	1.71	2591.37
3000	0.81	1227.15	4600	1.77	2682.31
3100	0.87	1318.09	4700	1.83	2773.26
3200	0.93	1409.04	4800	1.89	2864.21
3300	0.99	1499.99	4900	1.95	2955.16
3400	1.05	1590.94	5000	2.01	3046.11
3500	1.11	1681.89	5100	2.07	3137.05
3600	1.17	1772.83	5200	2.13	3228.00
3700	1.23	1863.78			

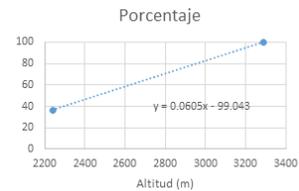


Figura 2. Correlación lineal de la estimación hp anual

Se calcula que, por cada incremento de altitud de 50 m, la precipitación aumenta 45.47 mm. Considerando intervalos de altitud de 350 m se tienen incrementos de la misma del orden de 318 mm.

Dividiendo la precipitación estimada del punto más elevado de la región de estudio (5200 msnm, 3228 mm) entre 318 mm (incremento de precipitación correspondiente a un intervalo de 350 m) es posible obtener un nuevo sistema de puntuación con diez clases (Tabla 10).

Tabla 10. Puntuación asignada a las clases de la variable Suelo (Método APLIS modificado)

Altitud (m)	Puntuación
< 1000	1
1000 – 1350	2
1350 – 1700	3
1700 – 2050	4
2050 – 2400	5
2400 – 2750	6
2750 – 3100	7
3100 – 3450	8
3450 – 3800	9
> 3800	10

Por último, se clasifica el parámetro considerado, de acuerdo con el sistema de puntuación obtenido (Figura 3).

En la Cuenca de México, la variable altitud se clasifica en seis valores de los diez posibles. La mayor porción del área de estudio se encuentra situada a elevaciones entre 2050 y 2400 m.

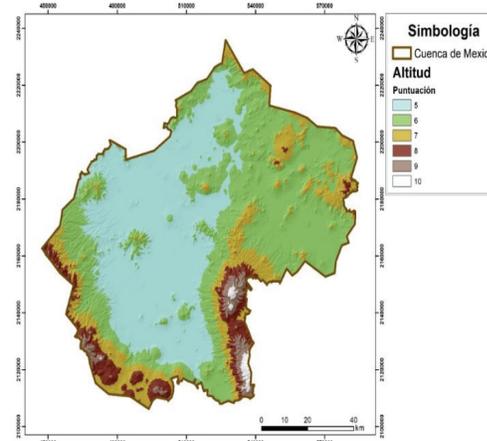


Figura 3. Variable Altitud, A (Método APLIS modificado)

VARIABLE P, PENDIENTE

La variable P se genera a partir de un análisis de superficie del modelo digital de elevaciones, es decir, se calcula la variación máxima entre un pixel y sus vecinos para asignar un valor de pendiente a través del

comando slope del Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.4 de ESRI. Después, los valores de la pendiente (expresados como porcentaje) se agrupan en intervalos para su asignación de puntuación indicada por el método.

La región de estudio presenta terrenos planos con pendientes menores a 15°, que corresponden a 7333 km² (73.8 %). Los restantes 2597 km² son terrenos de montañas con pendientes mayores a 15°, los cuales conforman 26.2 % del total de la superficie. Dicha distribución espacial de la variable aparece expresada en la Figura 4.

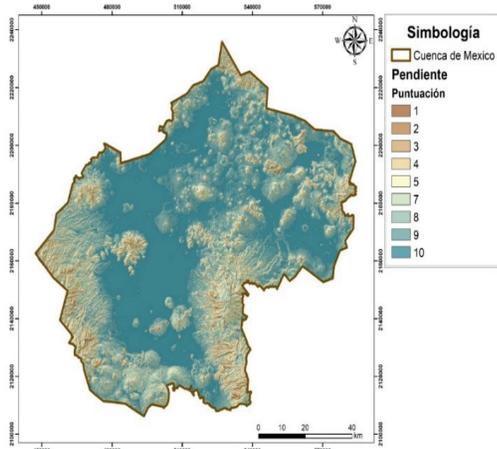


Figura 4. Variable Pendiente, P (Aplicación del método de acuerdo con Andreo *et al.*, 2004)

VARIABLE L, LITOLOGÍA

La variable Litología se ha clasificado de acuerdo con los criterios del método y se muestra la distribución espacial en la Figura 5. Se hace notar que fue preciso revisar las características de algunos materiales con el objetivo de incluirlos en las clases litológicas establecidas, ya que algunos de ellos no estaban considerados en las puntuaciones debido a que la metodología fue desarrollada para acuíferos carbonatados (Tabla 11).

De acuerdo con la agrupación estipulada por la metodología APLIS, en la región de estudio se tienen valores que corresponden a materiales como arcillas, basaltos, andesitas.

VARIABLE I, ZONAS PREFERENCIALES DE INFILTRACIÓN

Para identificar las áreas preferenciales de Infiltración (I) se examinó la información de uso de suelo y vegetación, únicamente discretizando entre las zonas con asentamientos humanos y el resto. Por otro lado, también se tomó en cuenta el área perteneciente al acuitardo,

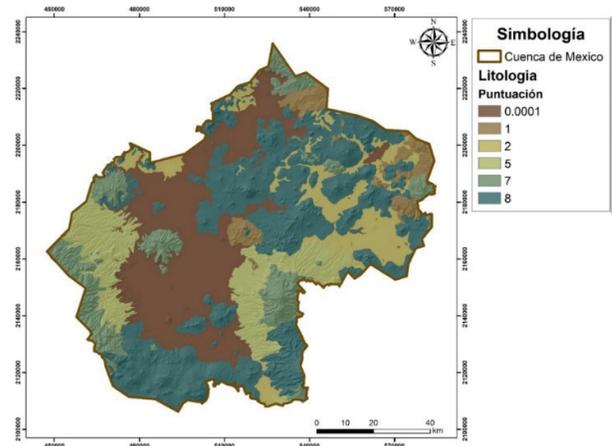


Figura 5. Variable Litología, L (Aplicación del método de acuerdo con Andreo *et al.*, 2004)

Tabla 11. Puntuación asignada a los valores de la variable Litología

Litología	Puntuación
Andesita	8
Toba andesítica	8
Andesita-basalto	7
Andesita-dacita	7
Lacustre	2
Aluvial	2
Riolita-Toba dacítica	1
Riodacita	1
Toba riolítica-Toba dacítica	1
Tranquila	1
Arcillas	0.0001

donde se sabe que la infiltración puede considerarse nula. Y finalmente se hizo la consideración de las zonas con una pendiente menor a 3 %, puesto que, al tener una pendiente pequeña, es favorecida la infiltración del agua. De acuerdo con lo citado, la distribución espacial de la variable analizada queda conforme a la Figura 6.

VARIABLE S, SUELOS

La variable S, concerniente a los suelos, se obtiene por medio del mapa de edafología proporcionado por INEGI, en el cual se hace la clasificación de los tipos de suelo de acuerdo con la FAO y se asigna la puntuación para cada intervalo de acuerdo con lo expuesto por el método. De igual manera que como en la variable litología, se precisó revisar las características de algunos

suelos con el objetivo de incluirlos en las clases establecidas, ya que algunos de ellos no estaban considerados en las puntuaciones debido a que la metodología fue desarrollada para acuíferos carbonatados (Tabla 12).

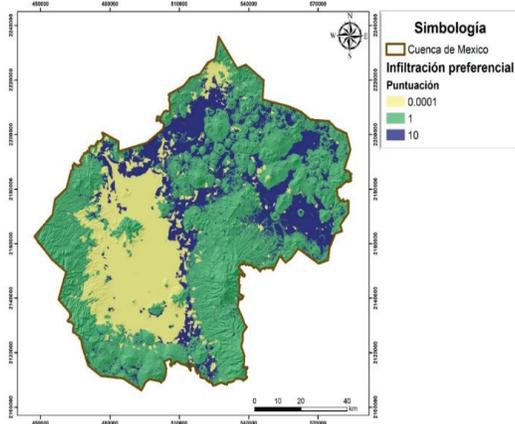


Figura 6. Variable Infiltración, I (Aplicación del método de acuerdo con Andreo *et al.*, 2004)

Tabla 12. Puntuación asignada a las clases de la variable suelo

Suelos (S)	Puntuación
Litosol	10
Andosol	9
Feozem	5

Esta variable aparece en el área de estudio por 7 de las 10 clases propuestas por el método, abarcando en mayor porcentaje el valor de 5 a lo largo de la Cuenca de México (Figura 7).

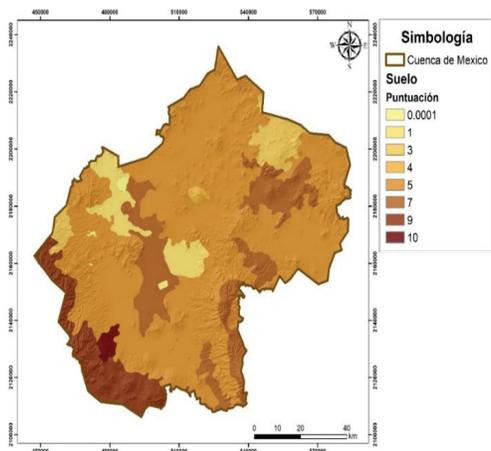


Figura 7. Variable Suelo, S (Aplicación del método de acuerdo con Andreo *et al.*, 2004)

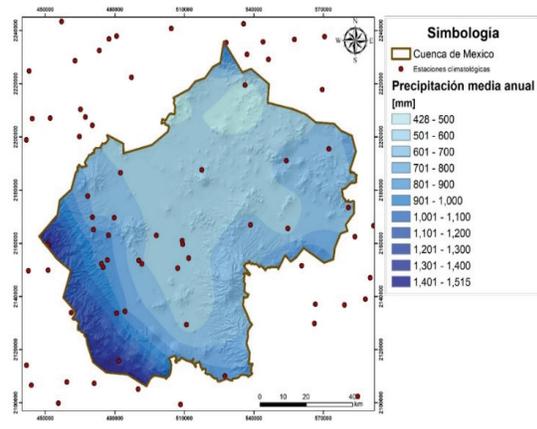


Figura 8. Precipitación media anual, mm

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando la expresión descrita en el método APLIS, con las capas generadas para las diversas variables como son Altitud, Pendiente, Litología, Infiltración y Suelo, se obtiene el mapa de la tasa de recarga referida en porcentaje que se presenta en la Figura 9.

La tasa media de recarga de la Cuenca de México es de 43 %, lo que corresponde a una tasa de recarga moderada. Del total de la superficie analizada, 19 % se asocia con una tasa de recarga muy baja y aparece en la parte central de la cuenca. La clase de recarga baja (intervalo 20-40 %) ocupa una extensión de 16 % del área total. Las mayores tasas de recarga, equivalentes a la clase moderada (intervalo 40-60 %), supone 59 % de la zona de estudio. El 6 % de la región estudiada presenta tasas de recarga de clase alta. No se han reconocido regiones caracterizadas por recarga muy alta (recarga superior a 80 %).

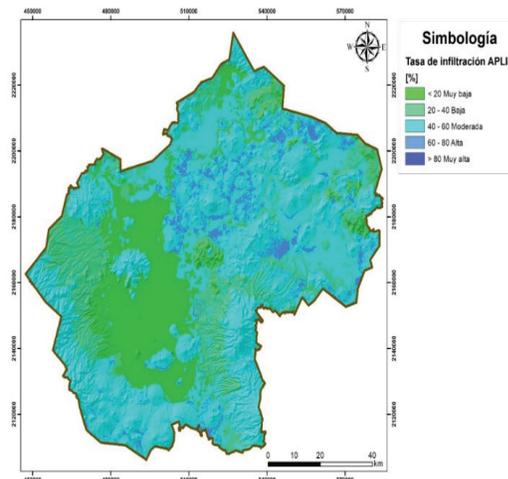


Figura 9. Tasa media de recarga anual, %

Los porcentajes mostrados anteriormente representan la recarga natural haciendo la consideración de que no existe el uso de suelo urbano, no obstante, al colocar la capa de los asentamientos humanos se observa el decremento de las zonas de recarga preferencial a través de los años por la presencia de zonas urbanizadas.

Así, con la información de precipitación media anual en la Cuenca de México y los porcentajes de recarga obtenidos por el método, se realiza un álgebra de mapas, discretizando el área de estudio en celdas que permitan cuantificar el gasto infiltrado. Por consiguiente, el porcentaje asignado para cada celda se multiplica por la cantidad de agua precipitada en la misma, dando como resultado la Figura 10, donde se muestra la distribución espacial de la recarga natural para el año 2015.

Finalmente, los gastos de recarga natural estimados con el método APLIS para cada acuífero, derivados de la precipitación, se señalan en la Figura 11, en la cual se han extraído las celdas que corresponden al área urbanizada, puesto que la aportación al subsuelo en esas zonas es considerada nula.

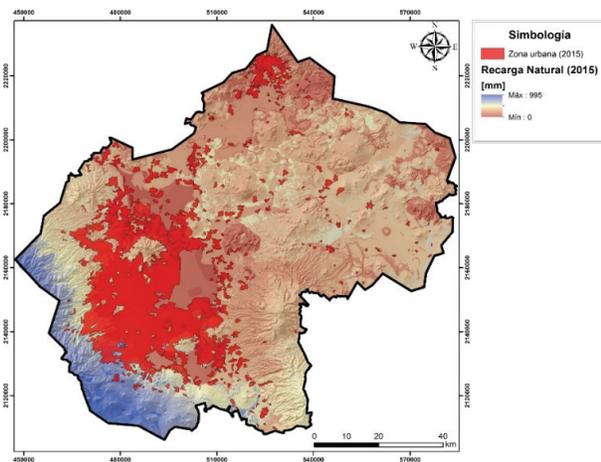


Figura 10. Recarga natural con mancha urbana [mm]

La evolución de la tasa de recarga natural en la Cuenca de México permite tener el conocimiento de la variación de la cantidad de agua almacenada a través del tiempo, ello proporciona una visión general de la disponibilidad de agua subterránea en el territorio. Partiendo de lo anterior, el cálculo de la recarga natural se efectuó a partir de

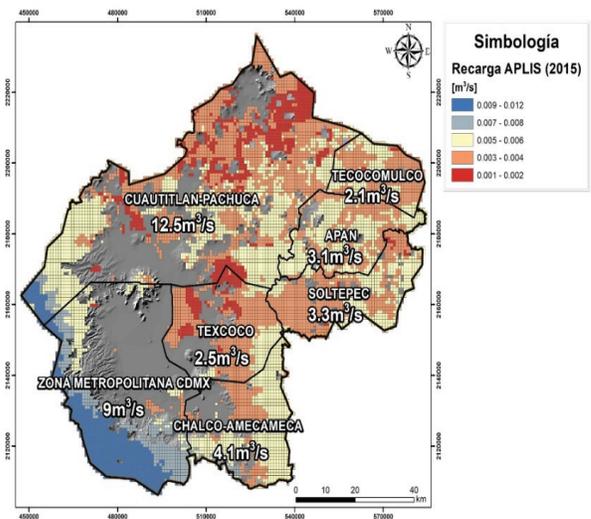


Figura 11. Recarga natural por celda [m³/s]

los mapas de INEGI correspondientes al uso de suelo y vegetación para los años 1980, 2000, 2005 y 2010. En dichos mapas se identificaron las áreas urbanizadas, para así poder hacer el álgebra de mapas de la misma manera que se realizó para el año 2015. La evolución de la estimación de la recarga natural, relacionada con la zona urbana y la población de la Zona Metropolitana del Valle de México se presenta en la Tabla 13.

CONCLUSIONES

En el trabajo descrito, se ha desarrollado la metodología de estimación de la recarga natural APLIS. En primera instancia, se realizó una adaptación del parámetro físico Altitud, con el objetivo de posibilitar la aplicabilidad del método a áreas de estudio con características físicas distintas a las analizadas en la versión original. Una vez realizado el ajuste, se ha aplicado el método para calcular el valor de la tasa de recarga y su distribución espacial.

Se ha estimado una tasa media de recarga natural de 43 %, representando una tasa de recarga Moderada. La tasa de recarga baja aparece representada en la zona central de la cuenca, coincidiendo con los depósitos lacustres. Las mayores tasas de recarga se presentan en la

Tabla 13. Evolución de la recarga natural y zona urbana en la Cuenca de México

Parámetro	Año				
	1980	2000	2005	2010	2015
Recarga Natural (m ³ /s).	44.9	40.7	40.5	39.7	36.6
Zona Urbana (km ²) (INEGI).	622.4	1325.2	1378.0	1517.4	1864.0
Población Zona Metropolitana del Valle de México (millones de habitantes).	12.3	18.3	19.2	20.5	22.2

periferia de la zona de estudio, donde se encuentran las mayores pendientes y mayor precipitación.

Al analizar estos resultados, resulta evidente que la zona más importante en extensión y cantidad de recarga natural de la cuenca se encuentra en la zona poniente y sur de la Ciudad de México, representando casi una tercera parte de su territorio las zonas de recarga y con un valor aproximado de $9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los porcentajes mostrados sobre la evolución de la recarga natural muestran el decremento de las zonas de recarga preferencial a través de los años por la presencia de zonas urbanizadas y por lo tanto, la pérdida de recarga en la Cuenca de México.

Ante lo expuesto, es necesario realizar acciones encaminadas hacia la preservación de las áreas de recarga natural, ya que de ellas depende el volumen almacenado en los acuíferos y, por ende, la cantidad de agua que pueda ser extraída sin causar una afectación al acuífero.

REFERENCIAS

- Andreo, B. *et al.* 2004. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (2): 177-186. https://www.igme.es/Boletin/2004/115_2_2004/ARTICULO%201.pdf
- DOF, Diario Oficial de la Federación, 17 de septiembre 2020. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones administrativas que se indican. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600593&fecha=17/09/2020
- IMPLAN Morelia (2015). Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Sur de Morelia, Michoacán. Recuperado de http://salvemoslaloma.mx/archivos/progparcial/Zona_Sur_Morelia_JUNIO2015.pdf
- INEGI. Censo General de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Marina, M., Espinoza, K., Fortuna, J. H., & Altamirano, F. (2015). Comparison of the APLIS and Modified-APLIS Methods to Estimate the Recharge in Fractured Karst Aquifer, Amazonas, Peru. *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems* (83-90) Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/278662162_Comparison_of_the_APLIS_and_Modified-APLIS_Methods_to_Estimate_the_Recharge_in_Fractured_Karst_Aquifer_Amazonas_Peru
- Maurel & PROM (2020). Estudio de Impacto Ambiental para el Área de Perforación Exploratoria COR-15. Recuperado de <https://maurelyprom.com/src/pdf/eia-cor15/>
- Tapia, N. (2011). Aplicación de metodologías para la estimación espacial de recarga y conductividad hidráulica. Caso de los andes centrales en Perú. Universidad de Málaga. Recuperado

de <https://es.scribd.com/document/444778842/Metodologia-APLIS-Peru>

Cómo citar:

Palma-Nava, A., Pavón-Ibarra, I., Domínguez-Mora, R., & Carmo-Paredes, R. B. (2022). Estimación de la recarga natural en la Cuenca de México mediante la aplicación del método APLIS. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23 (02), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.016>