

Métodos de clasificación de datos en SIG para estimar recarga de agua subterránea en México

Data classification methods in GIS for groundwater recharge estimation in Mexico

Miguel Ángel González-Núñez^{1*}, Alejandro Villalobos-Aragón¹, Álvaro Enrique Fernández-Escalante², Nuria Naranjo-Fernández³

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). Circuito Universitario, Campus 2. C. P. 31125. Chihuahua, Chihuahua, México.

²Grupo Tragsa, Subdirección de Innovación, 28006 Madrid, España

³Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España.

*Correspondencia: Correo electrónico: manunez@uach.mx (Miguel Ángel González Núñez)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.2020>

Recibido: 21 de julio de 2025; Aceptado: 12 de septiembre de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editora de Sección: Mérida Gutiérrez Ph.D.

Resumen

Este estudio evaluó cinco métodos de clasificación de datos en ArcMap 10.5 para analizar la recarga media anual de agua subterránea en trece regiones hidrológico-administrativas de México. Los datos de recarga ($\text{hm}^3/\text{año}$) fueron obtenidos del Geoportal de CONABIO (2008) y normalizados mediante recarga específica ($\text{mm}/\text{año}$) para permitir comparaciones entre regiones de diferente tamaño. El análisis se basó en intervalo, clase y rango. Se generaron mapas coropléticos aplicando intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales/Jenks e intervalos geométricos, con un máximo de cinco clases. Los resultados evidenciaron diferencias en la representación espacial: los intervalos iguales simplificaron la interpretación (cada clase abarca $4,816 \text{ hm}^3/\text{año}$), pero no reflejaron la concentración de datos bajos; los cuantiles distribuyeron uniformemente los valores, aunque agruparon datos heterogéneos (e.g. $7,566$ y $25,316 \text{ hm}^3/\text{año}$); la clasificación manual, sacrificó el detalle intermedio y muestra solo dos intervalos grandes ($8,000$ y $18,000 \text{ hm}^3/\text{año}$); los intervalos naturales/Jenks y geométricos representaron con mayor precisión la variabilidad y datos sesgados. Se identificaron zonas de alta recarga (Península de Yucatán: $213.2 \text{ mm}/\text{año}$) y baja (Baja California: $8.4 \text{ mm}/\text{año}$). El trabajo concluye que no existe un método ideal único; la elección depende de los objetivos, la naturaleza de los datos y la audiencia. La aplicación combinada de varios métodos mejora la interpretación y apoya una gestión hídrica más informada.

Palabras clave: métodos de clasificación; ArcGIS; clasificación cartográfica; recarga de agua subterránea; México.

Abstract

This study evaluated five data classification methods in ArcMap 10.5 to analyze the mean annual groundwater recharge in thirteen hydrologic-administrative regions of Mexico. Recharge data (hm^3/year) were obtained from CONABIO's Geoportal (2008) and normalized using specific recharge (mm/year) to allow comparisons among regions of different sizes. The analysis was based on interval, class, and range. Choropleth maps were generated using equal intervals, equal frequency/quantiles, manual classification, natural breaks/Jenks, and geometric intervals, with a maximum of five classes. The results revealed differences in spatial representation: equal intervals simplified interpretation (each class covering $4,816\text{hm}^3/\text{year}$) but did not reflect the concentration of low values; quantiles distributed values evenly, although they grouped heterogeneous data (e.g., $7,566$ and $25,316\text{hm}^3/\text{year}$); manual classification sacrificed intermediate detail and displayed only two broad intervals ($8,000$ and $18,000\text{hm}^3/\text{year}$); natural breaks/Jenks and geometric intervals represented variability and skewed data with greater accuracy. Areas of high recharge (Yucatán Peninsula: $213.2\text{mm}/\text{year}$) and low recharge (Baja California: $8.4\text{mm}/\text{year}$) were identified. The study concludes that no single ideal method exists; the choice depends on the objectives, the nature of the data, and the target audience. The combined application of multiple methods enhances interpretation and supports more informed groundwater management.

Keywords: classification methods; GIS; thematic maps; groundwater recharge; Mexico.

1. Introducción

La recarga de acuíferos forma parte del ciclo hidrológico y ocurre desde hace millones de años en zonas de montaña, regiones fracturadas, ríos, arroyos, sitios granulares y homogéneos. Sin embargo, este fenómeno se ha modificado por factores como el cambio climático, alteraciones del ciclo hidrológico, riego agrícola, disposición de aguas residuales tratadas en cuerpos de agua, e impermeabilización de suelos en zonas urbanas (Roger et al., 2011; Moukoko et al., 2023; Asaka et al., 2024; Saraf y Regulwar, 2024). Como resultado de esto, se ha documentado la disminución del nivel estático con efectos indeseables, tales como: incremento del costo de bombeo, subsidencia de terreno, desecación de humedales, pérdida de flujo base, disminución de la calidad del agua subterránea, entre otros (Scanlon et al., 2016). Estos problemas se agravan en zonas áridas, donde el porcentaje de recarga natural de agua subterránea es bajo.

En este contexto, se han realizado estudios que determinan valores de recarga natural considerando factores como tiempo, espacio, clima y geología. Estos estudios demuestran porcentajes de recarga basados en la precipitación: al sur de EUA del 6 al 22 % (Hogan et al., 2004), en Etiopía 20 % (Andualem et al., 2021), en India 17 % (Mohan & Pramada, 2023), en rocas ígneas del 4 al 19 % con altas tasas de infiltración en rocas fracturadas (Cai y Offerdinger, 2016), en climas húmedos del 30 al 50 %, en climas mediterráneos del 10 al 20 % y en climas secos del 0 a 2 % (Bouwer, 2002), en sedimentos, arenas y gravas del 5.6 % al 8.3 %, en calizas y dolomías 34.3 %, en margas, yesos, limos y arcillas 3.3 %, y en rocas duras 1.3 % (Sanz et al., 2011). De estos valores, se desprende que el conocimiento cuantitativo de los valores de recarga forma las bases para la evaluación, desarrollo y utilización óptima del agua subterránea, por lo que se requieren herramientas emergentes para mejorar el entendimiento de los procesos de recarga. Así mismo, los procesos y mecanismos de recarga, factores que los afectan, técnicas precisas y adecuadas para estimar la recarga en tiempo y

espacio, y áreas prioritarias para futuras investigaciones, deben estudiarse con prioridad (Healy y Scanlon, 2010). Dentro de las herramientas emergentes para la gestión y entendimiento de la recarga de agua subterránea se encuentran vuelos con dron, inteligencia artificial, análisis de imágenes satelitales y los Sistemas de Información Geográfica (en lo sucesivo, SIG).

Un SIG puede definirse como “un sistema computacional que maneja, almacena, analiza y muestra datos geoespaciales” (Chang, 2022). Los SIG, pese a considerarse una herramienta novedosa, tienen más de 50 años en el mercado (Chang, 2022) y factores como internet, GPS y la mejora de rendimiento de los ordenadores han permitido su aplicación a nivel global, incluso por usuarios no especializados fuera del campo de la cartografía (Snyman et al., 2024). Pese a sus múltiples ventajas, los SIG presentan retos, tales como datos inexactos, estructura de datos vectoriales compleja, diferencia de sistemas de coordenadas nativos, datos desactualizados, alto costo del software y falta de estandarización de datos, por mencionar algunos (Paramasivam, 2019). Así, algunos de los principales retos de los SIG se asocian a los datos de entrada y salida que los programas de cómputo proporcionan (Flores-Garnica y Flores-Rodríguez, 2020).

En el caso de México, se han identificado inconsistencias en la información geoespacial utilizada para la gestión de los acuíferos, lo que muestra la necesidad de evaluar y optimizar datos y métodos de clasificación en SIG (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007). También, diversos estudios han reportado las diferencias que arrojan los métodos de clasificación de datos en diversas partes del mundo, aun considerando los mismos archivos de entrada (Chang, 2022; Slocum et al., 2023). Por todo lo anterior, el objetivo de esta investigación fue aplicar cinco métodos de clasificación de datos en el software ArcGIS 10.5 (intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales/Jenks e intervalos geométricos), utilizando los mismos datos (valores de recarga de agua subterránea en México en $\text{hm}^3/\text{año}$), y comparar resultados.

2. Descripción de la zona de estudio

2.1 Ubicación

México se localiza al sur de Norteamérica, entre las coordenadas 32° y 14° Norte y 86° y 118° Oeste. Al norte tiene una frontera de 3,152 km con los Estados Unidos de América, al sur una frontera de 278 km con Belice y de 962 km con Guatemala, extendiéndose al sureste en la región de la Península de Yucatán. La superficie de México es de 1,964,000 km^2 , por lo tanto, a nivel mundial, ocupa el puesto número 13 en cuanto a su extensión territorial. Al este, el país está bordeado por el Golfo de México y el Mar Caribe, mientras que al oeste y al sur se encuentra el Océano Pacífico. El país se divide en 32 entidades federativas.

2.2 Clima

Diversos factores determinan el clima de México. En primer lugar, por su ubicación geográfica, el sur del país se encuentra en la zona intertropical, en tanto que el norte se localiza en la zona templada (México se encuentra a la misma latitud que los desiertos del Sahara y el Árabe). En segundo lugar, los accidentes geográficos caracterizan el relieve de México. Así, los climas áridos y semidesérticos se encuentran en el norte, con temperaturas superiores a 40°C en verano, mientras

que, en las zonas altas del centro del país, el clima es templado, con temperaturas promedio de 15 °C (Lutgens et al., 2018). En zonas costeras del Golfo de México y del Pacífico, predomina el clima cálido-húmedo con altas temperaturas, y en el sureste, el clima es tropical con temperaturas promedio de 24 °C.

En general, en el país prevalecen los climas secos y semisecos, con lluvias de 200 a 500 mm/año (Lutgens et al., 2018). En contraste, el sureste del país tiene un clima tropical húmedo, con lluvias de más de 2,000 mm/año. Las zonas montañosas presentan climas templados con lluvias moderadas y temperaturas frescas durante gran parte del año. En la mayor parte del territorio la lluvia es torrencial en verano, con una media de 740 mm/año, mientras que el 68 % de la precipitación normal mensual es de junio a septiembre (CONAGUA, 2023). En las regiones áridas del norte, la evapotranspiración es alta debido a elevadas temperaturas con tasas superiores a 2,000 mm/año (CONAGUA, 2023). En zonas tropicales y costeras, la evapotranspiración también es elevada debido a la alta humedad y las temperaturas cálidas, aunque las lluvias regulares compensan esta pérdida de agua. En las áreas montañosas, la evapotranspiración es baja debido a las temperaturas moderadas y la presencia de bosques, que actúan como reservorios de agua y contribuyen a la conservación del recurso hídrico. La radiación solar tiene promedios anuales que van de 4 a 6 kWh/m² al día, siendo más intensa en los desiertos del norte debido a la falta de nubosidad, mientras que las regiones tropicales del sur y las áreas montañosas experimentan una radiación solar más moderada debido a la mayor cobertura de nubes y lluvias frecuentes (CONAGUA, 2023).

2.3 Hidrografía

Los ríos y arroyos de México constituyen una red hidrográfica de 633,000 km de longitud, en la que destacan 51 ríos por los que fluye el 87 % del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65 % de la superficie territorial (CONAGUA, 2023). Por su superficie, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por longitud destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma y Nazas-Aguanaval pertenecen a la vertiente interior. México comparte ocho cuencas transfronterizas: tres con Estados Unidos (Bravo, Colorado y Tijuana), cuatro con Guatemala (Grijalva-Usumacinta, Suchiate, Coatlán y Candelaria) y una con Belice y Guatemala (río Hondo).

El país se divide en tres regiones hidrológicas: la vertiente del Pacífico, la vertiente del Golfo y el interior sin salida al mar, con más de 700 cuencas hidrológicas en todo el territorio (CONAGUA, 2023). Dentro de estas cuencas, las más importantes incluyen la Cuenca del Río Bravo (188,459 km²), la Cuenca del Grijalva-Usumacinta (100,000 km²) y la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago (190,366 km²). Por su longitud, destaca el Río Bravo con 3,034 km, actuando como frontera entre México y Estados Unidos. Otros ríos importantes son el Lerma, que recorre 750 km desde el centro del país hasta desembocar en el Océano Pacífico a través del Río Santiago, así como el Río Grijalva y el Usumacinta, claves en el sureste y conforman una de las zonas más ricas en recursos hídricos de México (CONAGUA, 2023).

En cuanto a los cuerpos de agua dulce, el Lago de Chapala es el lago natural más grande de México (1,100 km²), mientras otros lagos importantes son Pátzcuaro y Cuitzeo, ambos en Michoacán. También destacan lagunas costeras, como la Laguna de Términos en Campeche, de gran importancia ecológica. La gestión de los recursos hídricos en México es un desafío ya que el 60 % del agua se encuentra en el sureste y el 70 % de la población vive en el centro y norte, donde los recursos hídricos son escasos.

2.4 Uso de suelo y vegetación

En México, las actividades urbanas, agrícolas, ganaderas e industriales dominan el 26 % de territorio (INEGI, 2017). La vegetación de zonas áridas y semiáridas ocupa el 29 % del país y es el ecosistema menos alterado, en zonas como el altiplano, y se compone de pastizales, cactáceas y matorrales semiáridos, donde la vegetación es escasa. El 20 % del territorio nacional está cubierto por bosque de pino y encino, principalmente en áreas montañosas, como la Sierra Madre y el Eje Neovolcánico (INEGI, 2017). Finalmente, el 25 % de la superficie consta de manglares, selvas húmedas y tropicales, como la selva Lacandona, las regiones costeras y el Golfo de México. Los principales desafíos para la conservación de estos ecosistemas son la deforestación y el cambio de uso de suelo para agricultura y urbanización.

2.5 Geología

La geología de México es diversa debido a procesos geológicos que han afectado la región durante millones de años, y el país abarca rocas que datan del Precámbrico al Cuaternario (Tarbuck et al., 2013). En México se encuentran secuencias de rocas sedimentarias marinas y continentales del Mesozoico, testimonio de la existencia de mares que cubrieron grandes partes del país. Durante el Cretácico, el país estaba sumergido en un mar que depositó calizas, lutitas y areniscas en áreas como la Sierra Madre Oriental y la península de Yucatán. Las formaciones volcánicas más jóvenes (Cenozoico), predominan en el Eje Neovolcánico, mientras que el noroeste está compuesto por basamentos rocosos más antiguos del Precámbrico (INEGI, 1999; Tarbuck et al., 2013; SGM, 2019; CONAGUA, 2024).

México está moldeado por la interacción de las placas tectónicas de Norteamérica, Cocos y el Pacífico, lo que genera estructuras geológicas complejas y una intensa actividad sísmica y volcánica. El país está atravesado por sistemas de fallas, como la Falla de San Andrés en Baja California, y grandes cadenas montañosas formadas por plegamientos y fallamientos, como las sierras Madre Occidental y Oriental. Estas estructuras son fundamentales en la formación del relieve del país, además de influir en los patrones de drenaje y en la formación de cuencas sedimentarias. La subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica también ha generado el Eje Neovolcánico, una zona activa de vulcanismo que incluye volcanes como el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl (Tarbuck et al., 2013). Respecto a la litología, las montañas del país están formadas por rocas volcánicas como basaltos, andesitas y riolitas, mientras que las regiones costeras y llanuras contienen rocas sedimentarias como areniscas y calizas. En la península de Yucatán, las formaciones carbonatadas son predominantes y están asociadas con sistemas de cuevas y cenotes. En el norte y noreste del país se encuentran extensiones de rocas sedimentarias, que registran los ciclos de avance y retroceso oceánicos (Tarbuck et al., 2013).

En términos de hidrogeología, las formaciones geológicas permiten el almacenamiento y el flujo de agua subterránea. Los acuíferos más importantes del país se encuentran en áreas de rocas sedimentarias, como las calizas kársticas de la península de Yucatán, donde se han formado extensos sistemas subterráneos de agua. Los acuíferos volcánicos, comunes en el Eje Neovolcánico y en las zonas de montaña, están compuestos por rocas fracturadas que permiten el almacenamiento y movimiento del agua subterránea. En términos de recarga total media anual, se estima en 78,594 hm³/año (Tarbuck et al., 2013; CONAGUA, 2023).

3. Materiales y métodos

3.1 Datos por clasificar

Se generaron cinco mapas de recarga media anual de agua subterránea en México a partir de archivos Shape de descarga gratuita obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para la Biodiversidad (en lo sucesivo, CONABIO). Los datos disponibles más recientes datan de 2008 y fueron descargados en 2025 de la URL <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.

Tabla 1 | Recarga media por región hidrológico-administrativa en México (CONABIO, 2008).

Table 1 | Average recharge by hydrological-administrative region in Mexico (CONABIO, 2008).

Región Hidrológico-Administrativa (RHA)	Recarga media (hm ³ /año)	Área (km ²)	Recarga específica (mm/año)
I. Península Baja California	1.233	146.804	8,4
IX. Golfo Norte	1.392	138.360	10,1
V. Pacífico Sur	1.696	91.547	18,5
XIII. Valle de México	1.835	15.206	120,7
VII. Cuencas Centrales del Norte	2.297	243.081	9,4
II. Alto Noroeste	2.870	197.235	14,6
III. Bajo Noroeste	3.194	155.646	20,5
X. Golfo Centro	3.849	113.748	33,8
IV. Pacífico Centro	4.220	174.743	24,1
VI. Frontera Norte	5.081	319.288	15,9
VIII. Lerma Santiago	7.566	132.718	57,0
XI. Golfo Sur	18.015	102.797	175,2
XII. Península de Yucatán	25.316	118.735	213,2

Para el análisis, se empleó un sistema de coordenadas proyectadas en unidades métricas con el datum horizontal y el elipsoide WGS84. Los valores de recarga de acuíferos (ordenados de menor a

mayor) y el área de cada región hidrológico-administrativa (RHA) se presentan en la Tabla 1. A partir de esos datos se calculó la recarga específica como cociente entre recarga media anual y área de cada RHA (mm/año), lo que permitió una comparación más justa entre regiones de distinto tamaño y facilitó la clasificación de datos en ArcMap. Finalmente, la simbología adaptó el modelo de color CMYK con una gradación azul.

Antes de analizar los métodos de clasificación de datos, se definieron conceptos elementales según la literatura (Slocum et al., 2023): a) **Intervalo**: conjunto de valores que toma una magnitud entre dos límites (al dividir de 1 a 100 en 4 clases, los intervalos serían de 25); b) **Clase**: conjunto de elementos con caracteres comunes (al dividir de 1 a 100 en cuatro clases, estas serían 0-25, 26-50, 51-75, 75-100); c) **Rango**: variación de un fenómeno entre el límite menor y mayor (volumen mayor de recarga 25,316, menos volumen menor de recarga 1,233, igual a rango de 24,083 hm³/año).

Una vez definidos estos conceptos, se seleccionó un número apropiado de clases para cada método de clasificación de datos. En este trabajo se usaron diferentes cantidades de clases dependiendo del método utilizado, y se consideró como límite cinco, teniendo en cuenta la dificultad que supondría distinguir entre la luminosidad del azul usando más clases. Otra consideración fue determinar el nivel de precisión de los datos que mostró cada método. Dicho nivel fue función de los datos iniciales disponibles, la calidad de dichos datos y la facilidad con la que se cree que los lectores pueden interpretar los valores numéricos proporcionados.

También se consideró qué tipo de mapa cuantitativo se utilizaría (puntos, coropletas, símbolos graduados, gráficos, flujo o isarítmico). A continuación, se definen estos conceptos:

1. **Mapa de puntos.** Utiliza puntos para mostrar datos geoespaciales, y cada punto representa un valor unitario. Es un mapeo de puntos de uno a muchos y el valor unitario es mayor que uno (Slocum et al., 2023).
2. **Mapa de coropletas.** Simboliza con sombreado datos basados en unidades administrativas. Los datos se agrupan en clases antes de la cartografía y se simbolizan utilizando un esquema de colores para datos cuantitativos; así, la apariencia se ve afectada por la clasificación de datos y se genera un mapa clasificado. Los cartógrafos crean varios mapas de coropletas a partir de los mismos datos y, eligen uno con una buena organización espacial de clases para la versión final (Slocum et al., 2023).
3. **Mapa de símbolos graduados.** Cubre mapas coropléticos y dasimétricos, porque ambos tipos utilizan un esquema de colores graduados para mostrar variación en datos espaciales. Utilizan símbolos como círculos o triángulos para representar diferentes clases de valores (Slocum et al., 2023).
4. **Mapa de gráficos.** Utiliza gráficos circulares (muestra dos conjuntos de datos cuantitativos) o de barras (comparan datos uno contra otro, y utilizan la altura de las barras verticales para representar datos cuantitativos) (Slocum et al., 2023).
5. **Mapa de flujo.** Muestra datos de interacción espacial, como tráfico y migración. Uno de los métodos para realizar mapas de flujo consiste en representar clases de valores variando el ancho de la línea (Slocum et al., 2023).
6. **Mapa isarítmico.** Utiliza isolíneas para representar una superficie, donde cada isolínea conecta puntos de igual valor. Estos mapas muestran el terreno y la superficie estadística creada mediante interpolación espacial (Slocum et al., 2023).

En este trabajo se utilizaron mapas de coropletas debido a la naturaleza de los datos (valores numéricos de recarga natural asociados a polígonos de regiones hidrológico-administrativas) y porque estos mapas son fáciles de interpretar debido al número limitado de colores, además de la facilidad con la que se pueden relacionar con los colores de leyenda apropiados. Pese a sus ventajas, los mapas de coropletas presentan algunos problemas, tales como:

1. **Elección de colores y patrones de sombreado.** Los colores y patrones de sombreado influyen en la lectura del mapa por el usuario. Es normal utilizar la convención "cuanto más oscuro, mayor" al especificar patrones. Sin embargo, surge confusión entre mapas en los que un valor alto es negativo (desempleo, contaminación) y aquellos en los que un valor alto es positivo (empleo, alfabetización) (Chang, 2022). En este trabajo, el azul más oscuro se asoció a mayores volúmenes de recarga y viceversa.
2. **Elección del sistema de clasificación.** Se debe especificar el número de clases utilizadas y los intervalos de clases asignados, ya que cuanto mayor es el número de clases, el mapa es más confuso (a mayor cantidad de clases, mayor complejidad del mapa). Hay métodos para especificar intervalos de clase que se basan en reglas aritméticas, o en hacer coincidir los patrones estadísticos de los datos que se presentan (Chang, 2022). En este trabajo, el límite máximo fue de cinco clases.
3. **Elección de la unidad espacial.** La fusión de datos conduce a una pérdida de información al enmascarar variaciones y patrones internos. Este problema (denominado MAUP en inglés) significa que los límites de las unidades espaciales ocultan patrones subyacentes en los datos. Si se agregan datos en unidades espaciales grandes, es normal hacerlo sobre la base de relaciones formales (ciudades que se anidan en estados o países). Como resultado cartógrafos sin escrúpulos pueden dibujar mapas de coropletas con patrones elegidos para representar datos mal, por lo que se debe estudiar críticamente el mapa antes de llegar a conclusiones sobre los datos presentados (Chang, 2022). En este trabajo, la unidad espacial fueron trece RHA definidas por CONAGUA.

3.2 Métodos de clasificación de datos

La clasificación de datos implica usar un método y una serie de clases para organizar datos del mapa (Li y Shan, 2022). Con cambios en el método de clasificación, número de clases, o intervalos, los mismos datos producen mapas diferentes y patrones espaciales diversos. Por ello se debe experimentar con la clasificación de datos antes de elegir un método de clasificación final; dicha elección debe guiarse por el propósito y los principios de comunicación del mapa (Heywood et al., 2010; Chang, 2022; Slocum et al., 2023). Para la clasificación de datos, ArcMap 10.5 ofrece seis métodos: intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales/Jenks, intervalos geométricos, media/desviación estándar. Dentro de estos métodos, hay criterios que pueden usarse para elegir o juzgar su utilidad: 1) Considerar la distribución de datos en una recta numérica, 2) Facilidad de comprensión del concepto, 3) Facilidad de cálculo, 4) Facilidad de comprensión de simbología, 5) Coincidencia de valores de simbología con rangos de datos en cada clase y 6) Apoyo para seleccionar el número de clases (Slocum et al., 2023).

Un problema con los métodos de clasificación es que dependen del entorno informático del que dispone el cartógrafo (que haya software disponible para aplicar los métodos de clasificación) y del

conocimiento del usuario (que el cartógrafo por lo menos tenga conocimientos de la zona de estudio, así como de cálculo y estadística).

a) Método de intervalos iguales

Este método divide los datos en un número de rangos de igual ancho especificado por el usuario, es decir, cada clase ocupa un intervalo igual a lo largo de la recta numérica (Slocum et al., 2023). Como desventaja, crea clases con distribución desigual de datos y/o clases que no contienen datos. Los pasos para el cálculo de un mapa de X rangos son: 1) Determinar el intervalo que ocupa cada clase en la recta numérica dividiendo el rango de datos por el número de clases (Ec. 1), 2) Determinar el límite superior de cada clase sumando el intervalo de clase al valor más bajo, 3) Determinar el límite inferior de cada clase de modo que este justo por encima del valor más alto en una clase de menor valor, 4) Especificar los límites de clase que se muestran en la leyenda (deben reflejar la precisión de los datos en los que se basa la clasificación) y 5) Determinar qué datos pertenecen a cada clase comparando los valores de los datos sin procesar con los límites de leyenda del paso 4.

$$\text{Intervalo} = \frac{\text{Mayor-menor}}{\text{Número de clases}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Una ventaja del método es que los cinco pasos se pueden completar con calculadora o lápiz y papel, además de que el método facilita la comprensión de la simbología ya que no hay espacios en la leyenda y los intervalos son fáciles de entender (e.g., 1,233–6,049, 6,049–10,866). Las lagunas se evitan creando leyendas continuas. Sin embargo, este enfoque no indica el rango real de valores que pertenecen a una clase. Otra ventaja es que los límites de la leyenda no contienen espacios vacíos: para este trabajo, la diferencia entre el valor superior de recarga en una clase y el valor inferior en la siguiente clase fue 0. Otra ventaja es que los límites de la leyenda se simplifican de modo que solo se muestran los valores más altos y bajos de los datos y el límite superior de cada clase, lo que permite una interpretación más rápida del mapa, pero también crea confusión respecto de los límites de cada clase (por ejemplo, el lector podría preguntarse si en la Fig. 1, 6,049 hm³/año cae en la primera o segunda clase). Como desventaja, las lagunas que ocurren en este método de clasificación (como ocurre con la clase 3 de la Fig. 1, cuyos valores van de 10,866 a 15,682 hm³/año), podrían hacer que el lector se pregunte por qué hay datos en la simbología que no aparecen en el mapa.

La principal desventaja del método es que los límites de clase no consideran cómo se distribuyen los datos a lo largo de la recta numérica. Por ejemplo, al inspeccionar la dispersión de datos de recarga, se observa que la clase 5 de la Fig. 1, parece estar desperdiciada, ya que esta clase solo tiene datos de 20,499 a 25,316 hm³/año. Sin embargo, en el lado positivo, se debe tener en cuenta que los valores de datos inusuales (como los valores atípicos de 10,866 a 15,682 hm³/año) aparecieron en su propia clase única. Por lo tanto, aunque no se utilizan varias clases para los datos superiores de recarga, la distribución cartografiada en la Fig. 1 muestra que la Península de Yucatán es diferente del resto de los datos.

b) Método de frecuencias iguales/cuantiles

El método de frecuencia igual o cuantiles divide la cantidad total de datos por la cantidad de clases y garantiza que cada intervalo contenga la misma cantidad de valores de datos. Así, los datos se ordenan por rango y se colocan el mismo número de valores en cada clase (Ec. 2). Este método tiene diferentes nombres según el número de clases: los mapas de cuantiles de cuatro, cinco y seis clases se denominan cuartiles, quintiles y sextiles, respectivamente (Slocum et al., 2023).

$$\text{Numero de datos por clase} = \frac{\text{Total de datos}}{\text{Número de clases}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Para definir los límites de leyenda para el método de frecuencia igual son posibles dos enfoques. Uno es especificar los valores más altos y bajos de los miembros de una clase, mientras que el otro enfoque es evitar estas brechas calculando un límite de clase como un promedio del valor más alto de una clase y el valor más bajo de la siguiente clase. En este trabajo, se utilizó el primer enfoque porque refleja con mayor precisión el rango de valores de datos que pertenecen a una clase.

Como ocurre con los intervalos iguales, una ventaja de los cuantiles es que los límites de clase se pueden calcular manualmente; además, debido a que en cada clase hay un número igual de datos, el porcentaje de datos en cada clase también será el mismo. Dependiendo del número de clases, esto podría simplificar la discusión de los datos mapeados. Por ejemplo, en el mapa de recarga natural de quintiles, cada clase muestra el 20 % de los datos. Una ventaja es que la mediana (una medida de tendencia central en los datos) se asociará con las clases. Para un número impar de clases, la mediana está en el centro de la clase media, mientras que para un número par de clases, la mediana está entre las dos clases medias (o cerca de este punto; en el caso de los datos de recarga, la mediana tiene un valor de 3,194 hm³/año y se encuentra dentro de la tercera clase). La tercera ventaja de los cuantiles es que, debido a que la asignación de clases se basa en el orden de clasificación, los cuantiles son útiles para datos de nivel ordinal. Una cuarta ventaja es que, si las unidades de enumeración son del mismo tamaño, cada clase tendrá la misma área de mapa (Slocum et al., 2023).

El método de los cuantiles comparte la principal desventaja de los intervalos iguales: no considera cómo se distribuyen los datos a lo largo de la recta numérica. Por ejemplo, para los datos de recarga de acuíferos, los valores del centro y sureste del país (de 7,566 a 25,310 hm³/año, respectivamente) se incluyen en la clase 5, la cual tiene valores de magnitud muy distintos (Fig. 1). Por lo tanto, se eliminó el problema de las clases vacías, pero se colocaron valores de datos muy diferentes en la misma clase.

c) Método de clasificación manual

Este método permite al usuario elegir los intervalos apropiados o significativos. Por ejemplo, al cartografiar las tasas de cambio de la precipitación municipal, el usuario puede elegir cero o el promedio nacional como ruptura de clase (Chang, 2022). En este método no existe una fórmula matemática predefinida, sino que los intervalos son elegidos por el usuario con base en criterios o conocimiento específico de los datos, donde la única restricción es que cada intervalo I_i debe ser un subconjunto de $[X_{\min}, X_{\max}]$ que no se solape con otros intervalos. Para el plano de clasificación

manual de recarga natural de México, se generaron dos clases, dividiendo al país en una zona de recarga baja relativa al centro y norte del país (clase 1, de 0 a 8,000 hm³/año) y una zona de recarga alta relativa al sureste del país (clase 2, de 8,000 a 26,000 hm³/año) (Fig. 1). Como desventaja se crearon valores límite que no corresponden a los datos medidos de recarga natural (0 y 26,000 hm³/año). De la aplicación de este método se desprende que puede ser sumamente subjetivo y está sujeto a la comprensión que tenga el cartógrafo del área de estudio, así como de los valores que se estén mapeando.

d) Método de intervalos naturales/Jenks

El método de intervalos naturales/Jenks optimiza la agrupación de valores de datos al utilizar un algoritmo informático para minimizar diferencias entre valores de datos de la misma clase y maximizar diferencias entre intervalos (Chang, 2022). El algoritmo divide los datos en clases según los intervalos naturales representados en el histograma de datos. Proporciona un método de sentido común cuando se producen intervalos naturales, pero a menudo los datos están muy dispersos para proporcionar intervalos claros. Divide los datos usando media, cuartiles superiores e inferiores, valores atípicos y extremos y describe la distribución de los datos. En la clasificación de intervalos naturales, los gráficos de dispersión o histogramas se examinan para determinar clases lógicas en los datos. El propósito de los intervalos naturales es minimizar las diferencias entre valores de datos en la misma clase y maximizar las diferencias entre clases. Para ilustrar el cálculo de los intervalos naturales, se dividieron los datos de recarga de acuíferos en cinco clases (Fig. 1). Los valores cercanos a 2,000 (1,233, 1,392, 1,696, 1,835) se agruparon para crear una primera clase. A continuación, los valores cercanos a 2,000 y 3,000 (1,835, 2,297, 2,870, 3,194) se agruparon en una segunda clase. La tercera clase fueron valores cercanos a 3,000 y 5,000 (3,194, 3,849, 4,220, 5,081), y la cuarta clase, valores cercanos a 5,000 y 8,000 (5,081, 7,566). Los valores más altos (18,015, 25,316) fueron muy diferentes del resto de los datos, por lo que se ubicaron en una quinta clase. Un problema obvio con los intervalos naturales es que las decisiones sobre los límites de clase son subjetivas y varían entre cartógrafos. Otro factor a considerar es que un mapa con más clases es más difícil de interpretar, ya que será necesario diferenciar una mayor cantidad de símbolos de área. El algoritmo de Jenks ajusta las clases de manera iterativa hasta que la suma de las varianzas intraclase se minimiza (Slocum et al., 2023).

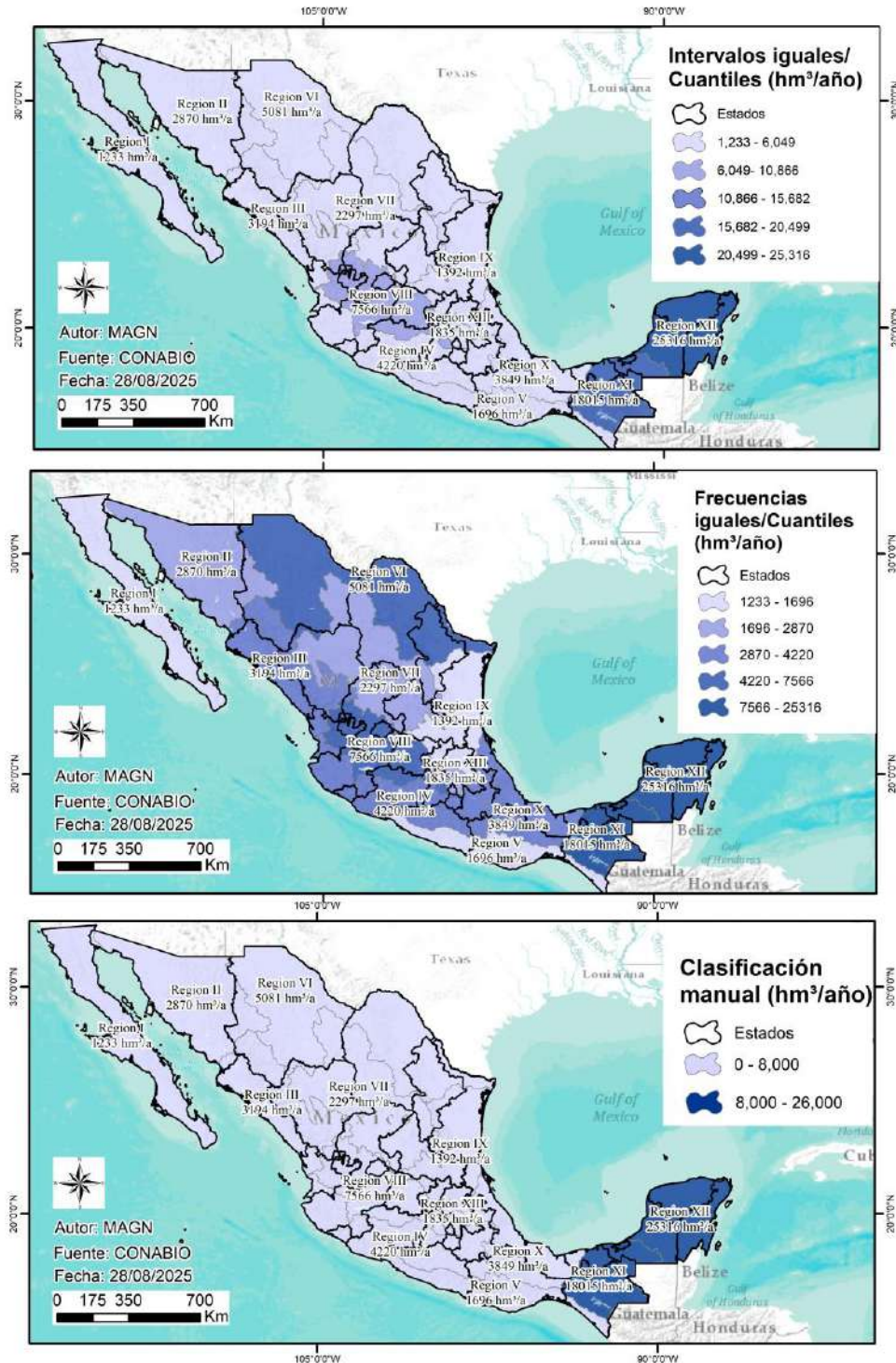
e) Método de intervalos geométricos

Este método divide los datos en clases utilizando una progresión geométrica (los intervalos crecen proporcionalmente en lugar de ser equidistantes). Los límites de las clases y la razón geométrica se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Razón geométrica} = \left(\frac{\text{Valor máximo de la serie}}{\text{Valor mínimo de la serie}} \right)^{\frac{1}{\text{Número de clases}}} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\text{Límite superior} = (\text{Límite inferior}) * (\text{Razón geométrica}) \quad \text{Ec. (4)}$$

En este método se eligió utilizar tres clases, por lo que se obtuvo la razón geométrica para los datos de recarga fue de 2.74 (Ec. 3); así mismo, el límite superior de la primera clase fue $1,233 \times 2.74 \approx 2,454$; el límite superior de la segunda fue $2,454 \times 2.74 \approx 7,164$, y el límite superior de la tercera fue $7,164 \times 2.74 \approx 25,316$ (Ec. 4). De estos resultados se obtiene que este método utiliza una razón de crecimiento constante entre los límites de clases, lo que genera intervalos crecientes a medida que aumenta el valor de los datos. Esto permite una mejor representación de datos altamente sesgados o con una amplia dispersión, como es el caso de estos datos de recarga natural de acuíferos.



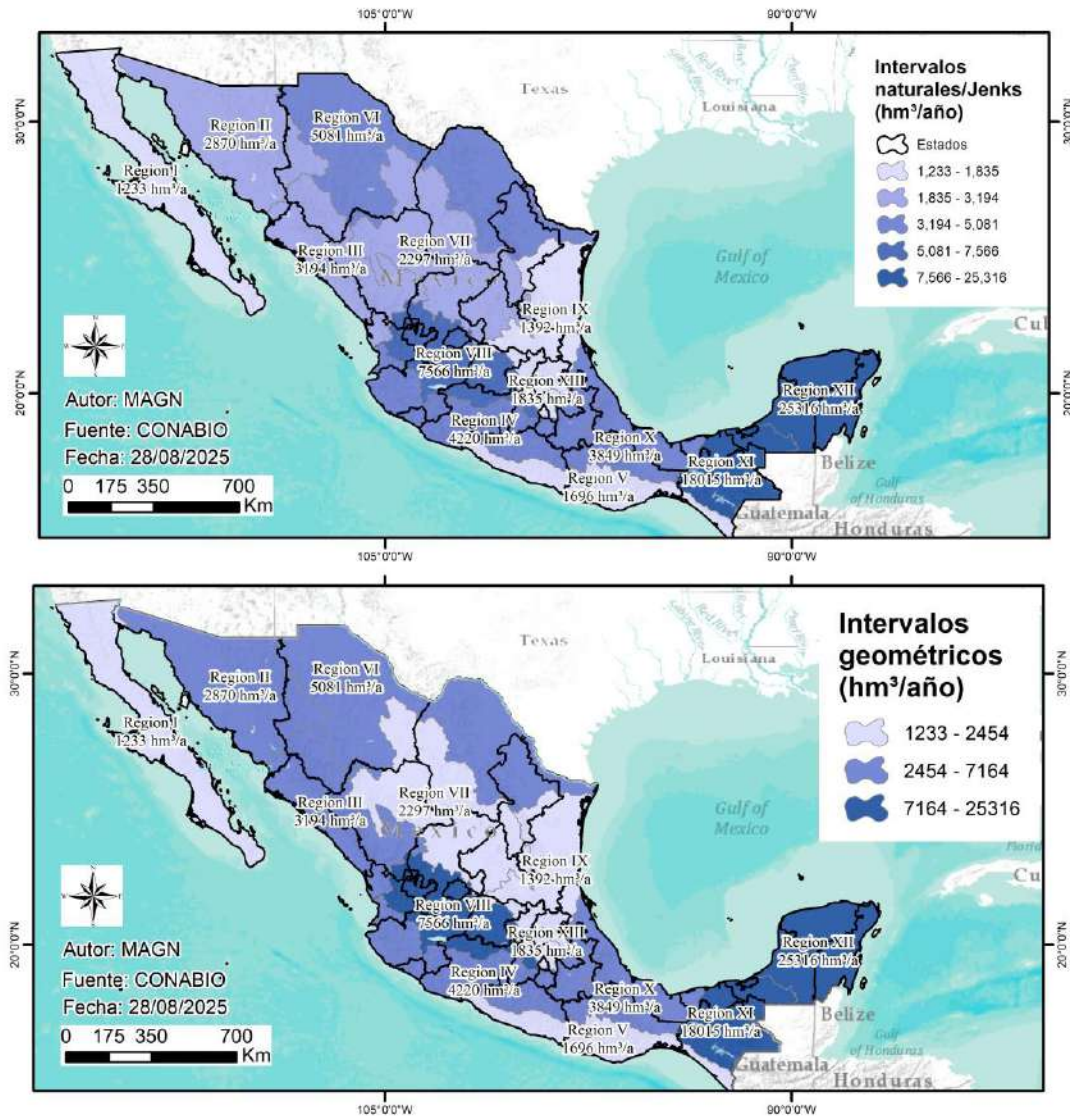


Figura 1 | Métodos de clasificación de datos aplicados a la recarga en México.

Figure 1 | Data classification methods applied to recharging in Mexico.

3. Resultados y discusión

La Fig. 1 se basa en los mismos datos (recarga de agua subterránea en $\text{hm}^3/\text{año}$) y las mismas unidades espaciales (regiones hidrológico-administrativas en km^2), pero generaron configuraciones divergentes en la distribución de los datos, lo que resalta la importancia de seleccionar el enfoque más adecuado según el objetivo del análisis (Tabla 2).

Tabla 2 | Resultados obtenidos para cada método de clasificación de datos.**Table 2** | Results obtained for each data classification method.

Método	Clases	Intervalos	Rango
Intervalos iguales	5 clases: 1.233 a 6.049, 6.049 a 10.866, 10.866 a 15.682, 15.682 a 20.499 y 20.499 a 25.316	1 intervalo homogéneo (4.816)	24.083
Frecuencias iguales/cuantiles	5 clases: 1.233 a 1.696, 1.696 a 2.870, 2.870 a 4.220, 4.220 a 7.566, 7.566 a 25.316	4 intervalos heterogéneos (463, 1.035, 1.026, 20.235)	24.083
Clasificación manual	2 clases: 0 a 8.000 y 8.000 a 26.000	2 intervalos heterogéneos (8.000 y 18.000)	26.000
Intervalos naturales/Jenks	5 clases: 1.233 a 1.835, 1.835 a 3.194, 3.194 a 5.081, 5.081 a 7.566 y 7.566 a 25.316	5 intervalos heterogéneos (602, 1.359, 1.887, 2.485, 17.750)	24.083
Intervalos geométricos	3 clases: 1.233 a 2.454, 2.454 a 7.164 y 7.164 a 25.316	3 intervalos heterogéneos (1221, 4710, 18152)	24.083

Los mapas generados mostraron que los métodos basados en conjuntos iguales de datos (Intervalos y Frecuencias iguales/Cuantiles) generaron clases más equilibradas en términos de número de observaciones, mientras que los métodos basados en distribución de datos (Clasificación manual, Intervalos naturales/Jenks, e Intervalos geométricos) identificaron con mayor precisión patrones espaciales de recarga. De los datos analizados, los valores más bajos de recarga fueron 1,233 hm³/año en la península de Baja California, con un área de 146,804 km² (7.47 % de la superficie del país), mientras que los valores más altos fueron 25,310 hm³/año en la península de Yucatán, con un área de 118,735 km² (6.04 % de la superficie del país).

Una limitación de la mayoría de los métodos de clasificación es que no consideran la distribución espacial de los datos, aunque existen técnicas que resuelven este problema, como minimizar la diferencia entre clases para unidades de enumeración contiguas (minimizar el error de límite), maximizar la autocorrelación espacial general en el mapa clasificado e igualar el área en cada clase (Snyman et al., 2024). En este trabajo, los métodos solo consideraron los valores de recarga a lo largo de la recta numérica y se trató de simplificar e interpretar los mapas de coropletas considerando la distribución espacial de los datos durante la clasificación de datos. Otra limitante fue que la información corresponde a un estudio de 2008 (CONABIO, 2008), por lo que los datos no se

encuentran actualizados si se comparan con otras publicaciones como Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2023), ya que hay 15 años entre publicaciones (Tabla 3). Así, existe una diferencia relativa a valores de recarga, temporalidad de datos y nombres de las RHA en ambos trabajos. Todo esto dificulta realizar una comparación precisa entre los datos de ambos estudios.

Tabla 3 | Recarga media en las regiones hidrológico-administrativas de México (CONAGUA, 2023).

Table 3 | Average recharge in the hydrological-administrative regions of Mexico (CONAGUA, 2023).

Región	Recarga media (hm³/año)	Precipitación pluvial (mm/año)
Hidrológico-Administrativa		
1. Península Baja California	1.648	159.4
2. Pacífico Sur	1.936	1.205,2
3. Aguas del Valle de México	2.289	659
4. Cuencas Centrales del Norte	2.462	388
5. Pacífico Norte	3.061	759.1
6. Noroeste	3.307	425.8
7. Golfo Norte	4.099	851
8. Golfo Centro	4.599	1.820
9. Balsas	4.871	926,2
10. Río Bravo	6.370	384,2
11. Lerma Santiago-Pacífico	9.831	810,3
12. Frontera Sur	22.718	2.001,3
13. Península de Yucatán	25.316	1.250,6

Los datos descritos en este trabajo podrán ser criticados porque son un conjunto antiguo (del 2008) y pequeño (13 polígonos con valores de recarga), y a que solo se ha considerado una posible manipulación de dicho conjunto de datos (el tipo de método de clasificación). Sin embargo, dichos datos se pueden descargar de manera oficial, por lo que se debe reflexionar respecto a si vale la pena mantener estos datos accesibles o si se deben reemplazar por estudios más recientes como el elaborado por CONAGUA en 2023 (ver Tabla 3). Por otro lado, para ampliar esta noción a conjuntos de datos más grandes y considerar múltiples criterios para modificar la clasificación, existen

enfoques de clasificación de datos que consideren criterios para clasificar un conjunto de datos: 1) minimizar la varianza del error en cada clase, 2) minimizar la diferencia entre clases para unidades de enumeración contiguas, 3) maximizar la autocorrelación espacial general en el mapa clasificado resultante, y 4) igualar el área en cada clase (Li y Shan, 2022). Las tres últimas son restricciones espaciales.

4. Conclusiones

Los métodos de clasificación de datos integran y analizan grandes volúmenes de datos espaciales, lo que los convierte en una herramienta valiosa para la cartografía y la hidrogeología. En este estudio se aplicaron cinco métodos en ArcGIS 10.5 para identificar la distribución de las zonas de recarga natural de agua subterránea en México. Los métodos utilizados fueron intervalos iguales, frecuencias iguales/cuantiles, clasificación manual, intervalos naturales, e intervalos geométricos y los hallazgos mostraron que la selección del método de clasificación influye en la interpretación de la recarga de agua subterránea.

El método de intervalos iguales (clases iguales de la recta numérica) es apropiado cuando los intervalos producen valores redondeados fáciles de interpretar. El método de frecuencias iguales/cuantiles (mismo número de valores en cada clase) es deseable porque puede referirse fácilmente a un porcentaje fijo de valores en cada clase, y es el único método que se puede utilizar para datos ordinales. Una limitación de los intervalos y cuantiles iguales es que no consideran la distribución de los datos a lo largo de la recta numérica, mientras que el método de desviación estándar media y el óptimo son dos métodos de clasificación que sí lo hacen. El método de clasificación manual (cada clase definida por el usuario) es útil si se tiene un conocimiento previo de los datos y se desea enfocar en una diferencia específica (se mostró el alto nivel de recarga natural de la Península de Yucatán en comparación con el resto del país). Como desventaja, se perdió detalle del resto de valores de recarga del país, ya que las clases fueron muy generales. El método de intervalos naturales (basado en la distribución natural de los datos) se ajustó mejor a la distribución de los datos y agrupó los valores de manera más representativa; como desventaja, no todas las clases mostraron el mismo número de datos. El método de intervalos geométricos (basado en una progresión geométrica) permitió realizar una segmentación equilibrada de los datos al minimizar la distorsión; como desventaja, se redujo la precisión en la identificación de patrones específicos de recarga.

Cabe señalar que, a pesar de los avances significativos en los SIG en las últimas décadas, la hidrogeología sigue siendo una ciencia interpretativa y no exacta. En este contexto, mientras mayor sea la superficie estimada de recarga, mayor será también la incertidumbre asociada a los datos generados. No obstante, resulta valioso analizar los valores obtenidos de recarga específica y precipitación. Se identificaron tres RHA con valores elevados tanto de recarga como de precipitación: XII. Frontera Sur, XIII. Península de Yucatán y VIII. Golfo Centro. Asimismo, se observaron tres RHA con valores bajos de recarga: I. Península de Baja California, IV. Cuencas Centrales del Norte y X. Río Bravo y dos casos con discrepancias notables entre recarga y precipitación: Lerma Santiago-Pacífico y Río Bravo.

Los valores mínimos a nivel nacional se registraron en la RHA I “Península de Baja California”, con una recarga de 8.4 mm/año, derivada de una precipitación media anual de 159.4 mm/año, lo que

representa el 5.2 % del total. En contraste, los valores máximos se presentaron en la RHA XIII “Península de Yucatán”, con una recarga de 213.2 mm/año a partir de 1,250.6 mm/año de precipitación (17 %). Destacan también regiones donde no existe una correlación aparente entre precipitación y recarga, como la RHA X “Río Bravo”, donde se registra una recarga de 15.9 mm/año, a partir de 384 mm/año de precipitación, equivalente al 4.5 %. Estos porcentajes coinciden con lo reportado en la literatura, que señala una amplia variabilidad en la recarga de acuíferos, la cual puede oscilar entre el 0 % y el 50 % de la precipitación total, dependiendo de factores como el clima, la pendiente, la geología y el régimen de lluvias, entre otros (Bouwer, 2002; Hogan et al., 2004; Healy y Scanlon, 2010; Cai y Offerdinger, 2016; Andualet et al., 2021).

A través de la integración de variables como simbología, clases, intervalos y rangos, se buscó mejorar la comprensión de los métodos de clasificación de datos y proporcionar información relevante para la toma de decisiones relativa a la recarga de acuíferos y la gestión hídrica, la cual es un desafío global de creciente importancia. Como conclusión, no existe un único método de clasificación ideal, sino que se debe considerar el propósito del mapa y el conocimiento del público objetivo antes de seleccionar un método de clasificación. Se concluye que, en lugar de utilizar solo un método de clasificación, se utilicen varios métodos y así, el conjunto de mapas resultante será mucho más útil que un enfoque utilizando un solo método.

Para usuarios de SIG que tienen un enfoque hacia la gestión hídrica, es recomendable seleccionar los métodos de clasificación de datos considerando la naturaleza de la información, el objetivo de análisis y el público al que se dirigen. Ningún método es superior, por lo que se aconseja aplicar y comparar diferentes enfoques para obtener una visión completa de la recarga hídrica. Además, se deben validar los resultados con conocimiento hidrogeológico de los acuíferos locales, ya que la hidrogeología es una ciencia interpretativa con cierto grado de incertidumbre. Por último, generar varios mapas a partir de distintos métodos de clasificación de datos enriquece la toma de decisiones en la gestión hídrica, aportando insumos más robustos para enfrentar la variabilidad espacial y temporal que caracteriza la recarga de acuíferos en México.

Contribuciones de los autores

"Conceptualización, M.A.G.N. y A.V.A.; metodología, M.A.G.N. y A.V.A.; software, A.E.F.E.; validación, N.N.F.; análisis formal, A.E.F.E.; investigación, M.A.G.N. y A.V.A.; recursos, M.A.G.N. y A.V.A.; conservación de datos, M.A.G.N. y A.V.A.; redacción-redacción del borrador original, M.A.G.N.; redacción-revisión y edición, A.V.A., A.E.F.E. y N.N.F.; visualización, A.E.F.E. y N.N.F.; supervisión, M.A.G.N.; administración del proyecto, M.A.G.N.; obtención de financiación, M.A.G.N. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Agradecimientos

Los autores agradecen las valiosas contribuciones de los revisores anónimos para la mejora de esta investigación, y también agradecen a la Facultad de Ingeniería de la UACH el apoyo proporcionado para la realización de este trabajo.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran influir en el trabajo presentado en este artículo.

5. Referencias

- Andualet, T. G., Demeke, G. G., Ahmed, I., Dar, M. A., & Yibeltal, M. (2021). Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100917. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100917>
- Asaka, J. O., Argomedo, D. W., & Jones, N. P. (2024). Climate change risks to water security: Exploring the interplay between climate change, water theft, and water (in)security. *Water Policy*, 26(4), 359–380. <https://doi.org/10.2166/wp.2024.213>
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10, 121–142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>
- Cai, Z., & Ofterdinger, U. (2016). Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology*, 535, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.066>
- Carrera-Hernández, J. J., & Gaskin, S. J. (2007). The Basin of Mexico aquifer system: Regional groundwater level dynamics and database development. *Hydrogeology Journal*, 15, 1577–1590. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0194-9>
- Chang, K.-T. (2022). Introduction to geographic information systems (10 Ed). 418 pp. McGraw Hill.
- CONABIO. (2008). Recarga media total de acuíferos Escala: 1:1,000,000.
- CONAGUA. (2023). Estadísticas del Agua en México (1 Ed). 312 pp. SEMARNAT. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html
- CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901), Ciudad de México. 33 pp. Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/cmdx/DR_0901.pdf
- Flores-Garnica, J. G., & Flores-Rodríguez, A. G. (2020). Comparative analysis of the number and intervals of forest fire risk classes. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62), 4-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.775>
- Healy, R. W., & Scanlon, B. R. (2010). Estimating groundwater recharge (1st. ED). 245 pp. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745>
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2010). An introduction to Geographical Information Systems (3 Ed). 464 pp. Pearson Education.
- Hogan, J. F., Phillips, F. M., & Scanlon, B. R. (2004). Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States. In *Water Science and Application* 9 (1st ed.). 172 pp. American Geophysical Union. <http://dx.doi.org/10.1029/WS009>

- INEGI. (1999). Estudio hidrológico del estado de Chihuahua (INEGI, Ed.; Primera Ed). 244 pp. Colección: Estudio hidrológico del estado de. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825221768>
- INEGI. (2017). Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie VII. Colección: Guía para la interpretación de cartografía. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463902836>
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. G. (2018). *The atmosphere: an introduction to meteorology* (13 Ed). 712 pp. Pearson College Div.
- Li, S., & Shan, J. (2022). Adaptive Geometric Interval Classifier. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(8), 430. <https://doi.org/10.3390/ijgi11080430>
- Mohan, S., & Pramada, S. K. (2023). Natural groundwater recharge estimation using multiple methods combined with an experimental study. *Water Supply*, 23(5), 1972–1986. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.090>
- Moukoko, G. B. M., Mvoundou, C. N., Mangouende, J., Lendzea, R., & Tathy, C. (2023). Study of the Impact of Climate Change on Water Resources in the Sangha Watershed at Ouessou Hydrological Station, Republic of the Congo-Brazzaville (1961-2020). *Journal of Water Resource and Protection*, 15(11), 611–630. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2023.1511034>
- Paramasivam, C. R. (2019). Chapter 2 - Merits and demerits of GIS and geostatistical techniques. In: Venkatramanan, S., Prasanna, M. V., & Chung, S. Y. (Eds.). *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science* (pp. 17–21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00002-X>
- Roger, F., Benjamin, N. N., Ghislain, T. Y. J., & Emmanuel, E. G. (2011). Relationship between Climate and Groundwater Recharge in the Besseke Watershed (Douala – Cameroon). *Journal of Water Resource and Protection*, 03(08), 607–619. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2011.38070>
- Sanz, E., Menéndez, I., Menéndez Pidal de Navascués, I., & Távara, C. (2011). Calculating the average natural recharge in large areas as a factor of their lithology and precipitation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 8, 4753–4788. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-4753-2011>
- Saraf, P., & Regulwar, D. G. (2024). Integrated Hydrological Modeling of the Godavari River Basin in Maharashtra Using the SWAT Model: Streamflow Simulation and Analysis. *Journal of Water Resource and Protection*, 16(1), 17–26. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2024.161002>
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Faunt, C. C., Pool, D., & Uhlman, K. (2016). Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona. *Environmental Research Letters*, 11(3), 035013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035013>
- SGM. (2019). Carta Geológico Minera 'República Mexicana'. <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>
- Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. (2023). Thematic Cartography and Geovisualization. In: *Thematic Cartography and Geovisualization* (4 Ed). 612 pp. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003150527>
- Snyman, L., Coetzee, S., & Rautenbach, V. (2024). Assessing the Suitability of Data Classification Methods for Choropleth Maps Depicting Population Distribution in South Africa. *Abstracts of the ICA*, 7, 160. <https://doi.org/10.5194/ica-abs-7-160-2024>

Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2013). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física (10 Ed.). Pearson Education

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>