

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-01-09

Artículos

Evaluación de pesos de los factores del método DRASTIC en el acuífero del Valle Central de Cochabamba, Bolivia

Weight assessment of DRASTIC method factors within the aquifer of the Central Valley of Cochabamba, Bolivia

Laura Rosales¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6132-0179>

Oliver Saavedra², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1674-7737>

¹Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA),
Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia,
laurarosales1@upb.edu

²Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA),
Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia,
oliversaavedra@upb.edu

Autora para correspondencia: Laura Rosales, laurarosales1@upb.edu

Resumen

En el valle central de Cochabamba se ha evaluado la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas analizando los pesos de los factores del método DRASTIC, utilizando herramientas SIG. Se analizaron cuatro

escenarios para identificar los factores más críticos y se evidencia que su influencia y vulnerabilidad varían según las características de la zona. Al noroeste se identificó vulnerabilidad de media alta a alta debido a sus condiciones favorables para la recarga. En la zona central-este, la vulnerabilidad es de baja a media baja, influenciada por una capa confinante que proporciona una protección natural al acuífero. La zona sur está influenciada por bajas pendientes, deposición de sedimentos finos y recarga baja. En las áreas urbanas se presenta vulnerabilidad de muy baja a baja. En cambio, en el extremo sur, la vulnerabilidad varía de media baja a media alta por las actividades agrícolas aledañas al río Rocha. De forma general, los parámetros más influyentes fueron la profundidad del agua subterránea (D), el impacto en la zona vadosa (I), la recarga (R), la geología del acuífero (A), la conductividad hidráulica (C) y el tipo de suelo (S), con pesos de 5, 5, 4, 3, 3 y 3, respectivamente, y en menor medida, la topografía (T), con un peso de 2. Se recomienda priorizar el noroeste y el extremo sur de la zona para elaborar estudios y planes de gestión participativos, así como aplicar el esquema propuesto en valles fluvio-lacustres.

Palabras clave: aguas subterráneas, vulnerabilidad, DRASTIC, Valle Central de Cochabamba, Bolivia.

Abstract

In the central valley of Cochabamba, groundwater vulnerability to contamination was assessed by analyzing the weighting of factors in the DRASTIC method, using GIS tools. Four scenarios were analyzed to identify the most critical factors, revealing that their influence and vulnerability behave differently depending on the characteristics of the

area. In the northwest, vulnerability was identified as medium-high to high, due to favorable conditions for recharge. In the central-eastern zone, vulnerability ranged from low to medium-low, influenced by a confining layer that provides natural protection for the aquifer. The southern zone is influenced by low slopes, fine sediment deposition and low recharge. Urban areas exhibit very low to low vulnerability. Conversely, in the far south, vulnerability varies from medium-low to medium-high due to agricultural activities near the Rocha River. Overall, the most influential parameters were found: depth to water (D), impact of the vadose zone media (I), recharge (R), aquifer media (A), hydraulic conductivity (C) and soil media (S), with weights of 5, 5, 4, 3, 3, and 3, respectively, while topography (T) showed the least influence, with a weight of 2. It is recommended to prioritize the northwest and far southern zones for further studies and participatory management plans, as well as to apply the proposed framework in fluvio-lacustrine valleys.

Keywords: Groundwater, vulnerability, DRASTIC, Central Valley of Cochabamba, Bolivia.

Recibido: 17/06/2024

Aceptado: 21/05/2025

Publicado *ahead of print*: 17/06/2025

Versión final: 01/01/2026

Introducción

El agua subterránea es un recurso clave para el desarrollo sostenible, el bienestar humano y el desarrollo económico (Guppy, Uyttendaele, Villholth, & Smakhtin, 2018). Sin embargo, el uso intensivo de los acuíferos ha afectado su cantidad y calidad. Los acuíferos son vulnerables a la contaminación, aunque su grado de susceptibilidad varía según las condiciones hidrogeológicas (Al-Hallaq & Elaish, 2012). Esta vulnerabilidad se define como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado por contaminantes (Árcega, Otazo, Galindo, Acevedo, & Romo, 2015).

Entre los métodos de evaluación existentes destaca el método DRASTIC, que combina siete factores para evaluar el potencial de contaminación de las aguas subterráneas. Este enfoque, aplicando sistemas de información geográfica (SIG), ha permitido identificar las zonas vulnerables en acuíferos superficiales al norte de India (Rahman, 2008) y también ha sido comparado con otros métodos (Shirazi, Imran, Akib, Yusop, & Harun, 2013). En Latinoamérica se ha empleado en los valles de México (Árcega *et al.*, 2015), con modelos de flujo en Colombia (Ríos-Rojas & Vélez-Otálvaro, 2008), y en cuencas agrícolas y urbanas de Paraguay (Musálem, McDonald, Jiménez, & Laino, 2015).

El valle central de Cochabamba, Bolivia, enfrenta un crecimiento acelerado de la mancha urbana impulsado por la migración rural hacia la zona metropolitana (Cabrera, Alarcón, Terraza, Maleki, & Lew, 2013; INE, 2020). Esto genera, en gran medida, un estrés hídrico, especialmente en zonas con climas semiáridos, debido a la extracción insostenible de agua superficial y subterránea para el consumo humano de agua; ello altera el ciclo hidrológico, reduce las zonas de infiltración natural y agrava la contaminación (OECD, 2015; SDC & DGIA, 2014).

Este valle tiene un origen fluvio-lacustre, con abanicos aluviales favorables para la recarga. Depende, en gran medida, de la explotación del agua subterránea extraída de una extensa red de pozos públicos y privados (MMAyA, 2014; Rosales, Saavedra, & Soruco, 2020). Sin embargo, la expansión urbana ha impermeabilizado las zonas de recarga, mientras que las actividades antrópicas incrementan el riesgo de contaminación, especialmente en acuíferos libres (Renner & Velasco, 2000). En tal sentido, es esencial realizar un análisis de vulnerabilidad para mitigar la contaminación de las aguas subterráneas y preservar la recarga.

El objetivo del presente estudio es evaluar la influencia de los pesos en el método DRASTIC para identificar variaciones espaciales de vulnerabilidad en el Valle Central de Cochabamba.

Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio, ubicada en el acuífero productivo del Valle Central de Cochabamba (Figura 1a), abarca unos 67 km². La elevación varía de 2 500 a 3 000 m s. n. m. Limita al norte con la cordillera Tunari, al este con el municipio de Cochabamba y al oeste con el de Quillacollo. La zona abarca principalmente Colcapirhua, Tiquipaya y Quillacollo. El río Rocha, el curso principal de la cuenca, atraviesa la zona de este a suroeste.

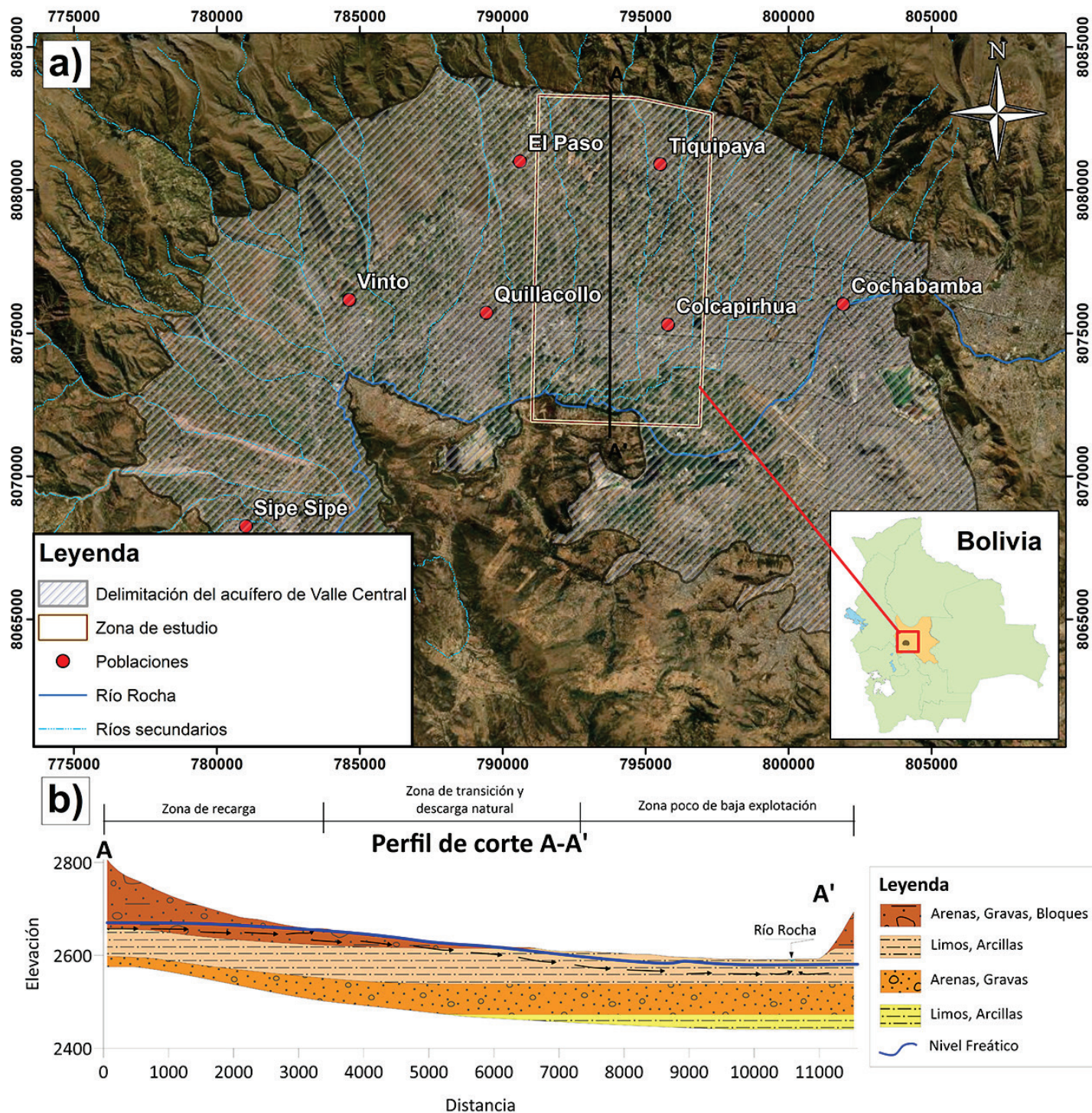


Figura 1. a) Mapa de ubicación de la zona de estudio; b) perfil de corte estratigráfico A-A'. Fuente: adaptado de López, Rosales y Saavedra (2023).

Geológicamente, el valle presenta formaciones cuaternarias heterogéneas, con depósitos de abanicos aluviales al norte compuestos por sedimentos sueltos de grano grueso, como gravas, arenas, limos y arcillas, que favorecen la recarga. Hacia el sur, en la parte central, los sedimentos son más finos, lo que genera una zona de transición y descarga con pozos surgentes. En el sector sur predominan intercalaciones de material lacustre y fluvio-lacustre, compuestas sobre todo por arcillas y limos (Renner & Velasco, 2000), que forman un acuífero semiconfinado con baja explotación (Figura 1b).

De esta manera, el acuífero presenta tres sectores diferenciados: 1) acuífero libre con pozos y niveles de agua profundos en el norte; 2) acuífero confinado con pozos surgentes en la zona central, y 3) semiconfinado con pozos profundos en el sur.

Metodología

La vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos es, por lo general, el grado de protección natural contra contaminantes naturales o antrópicos (Albinet & Margat, 1970). El método DRASTIC destaca por su capacidad y facilidad de uso (Barbulescu, 2020) con base en cuatro supuestos. El primero indica que el contaminante se introduce a través de la superficie. El segundo considera que este contaminante se traslada al agua subterránea por la infiltración de la precipitación. El tercero indica que el contaminante es móvil en el agua. Y, finalmente, el área de evaluación debe ser mayor a 0.405 km² (Aller, Bennett, Lehr, Petty, & Hackett, 1987).

DRASTIC es un acrónimo de siete factores hidrogeológicos que controlan el movimiento de agua subterránea. Los factores se combinan mediante un esquema de clasificación relativa, asignando pesos y valores para generar un índice de vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

La Figura 2 presenta la metodología para obtener dicho índice. Primero, los atributos de cada factor se reclasifican en una escala del 1 al 10. Luego, se asigna un peso entre 1 y 5. Por último, mediante álgebra de mapas en un SIG, los factores se combinan para generar el mapa del índice de vulnerabilidad (NRC, 1993). Para este estudio, se utilizó ArcGIS 10.8; sin embargo, es posible implementarlo en cualquier otro SIG.

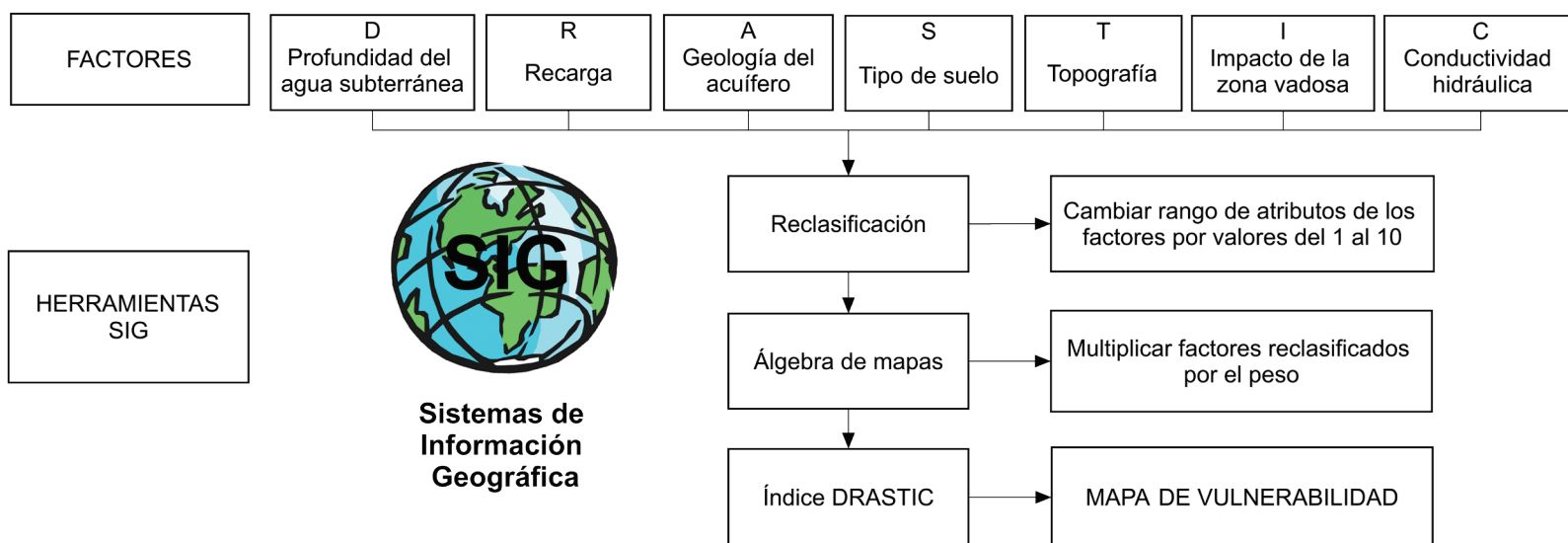


Figura 2. Metodología para obtener el mapa de vulnerabilidad.

La Ecuación (1), que combina los siete factores mencionados para obtener el índice DRASTIC, se describe a continuación:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

Donde:

D, R, A, S, T, I, C = factores hidrogeológicos que considera el método
Subíndice r = rango de los atributos de cada factor, clasificados por valores del 1 al 10

Subíndice w = peso asignado a cada factor en un rango del 1 al 5

La ecuación original de DRASTIC se diseñó para evaluar el potencial de contaminación en acuíferos libres. En acuíferos confinados es necesario ajustar los parámetros, lo que generalmente reduce el valor del índice. Para acuíferos semiconfinados no hay adaptación específica, por lo que el usuario debe definir su grado de confinamiento y ajustar las condiciones dentro del sistema (Aller *et al.*, 1987). Por tanto, la zona central se ha trabajado como confinado y la zona sur como no confinado.

D: profundidad del agua subterránea

Este parámetro es fundamental, pues determina la profundidad de material que el contaminante debe atravesar para alcanzar el acuífero, es decir, a mayor profundidad, mayor atenuación. En acuíferos libres, corresponde a la profundidad desde la superficie hasta el nivel freático. En acuíferos confinados se mide desde la superficie hasta la base de la capa confinante (Aller *et al.*, 1987).

Para la zona norte (acuífero libre) y la zona sur (semiconfinado), se utilizaron profundidades de niveles estáticos medidos en pozos de producción durante campañas de monitoreo en 2021 (López *et al.*, 2023). Para ello, se solicitó permiso a los propietarios para acceder a los pozos y apagar las bombas varias horas antes de la medición. Se utilizó una sonda

de nivel manual. No fue posible acceder a todos los pozos y tampoco se encontraron pozos de monitoreo. Los niveles estáticos muestran valores de hasta 28.3 m en la zona norte, y de 2.14 a 23.7 m en la zona sur.

En la zona central (acuífero confinado) se identificaron pozos surgentes. Se utilizaron perfiles litológicos de pozos perforados para determinar la profundidad de la capa confinante, cuyo espesor varía entre 14 y 45 m.

Las profundidades fueron interpoladas en ArcGIS mediante el método Kriging y reclasificadas en rangos según la Tabla 1. El mapa correspondiente a este parámetro se presenta en la sección de Resultados.

Tabla 1. Factor D: profundidad del agua subterránea.

Rangos de profundidad del agua subterránea (m)		Valor asignado
2.16	4.6	9
4.6	9.1	7
9.1	15.2	5
15.2	22.9	3
22.9	30.5	2
> 30.5		1

Fuente: Aller *et al.* (1987).

R: recarga

La recarga es la cantidad de agua que penetra la superficie del suelo y alcanza el nivel freático y desempeña un papel crucial en el transporte de contaminantes. A mayor recarga, mayor es el potencial de contaminación,

en especial en acuíferos libres, donde la recarga ocurre con mayor facilidad. En acuíferos confinados, las capas de baja permeabilidad limitan este proceso. Para estos casos, se puede elegir un valor bajo para la recarga (Aller *et al.*, 1987).

Según el Proyecto Integrado de Recursos Hídricos en Cochabamba (PIRHC), entre el 15 y 25 % de la precipitación se infiltra, en particular en los abanicos aluviales (Neumann-Redlin, Renner, & Torres, 2000; Renner & Velasco, 2000).

En vista de que el norte del valle es una zona favorable para la recarga natural, se le ha asignado el 25 %. En cambio, a la parte central, se ha asignado 20 % y a la zona sur el 15 %. Los datos de precipitación se obtuvieron de estaciones meteorológicas; se pudo determinar que la mayor recarga ocurre al norte con 182 mm, y la mínima al sur con 85 mm (Tabla 2). La interpolación espacial se hizo mediante el método Kriging (ver sección de Resultados).

Tabla 2. Factor R: recarga.

Rangos de recarga (mm)		Valor asignado
84.9	102	3
102	120	4
120	140	5
140	160	6
160	178	7
178	182.2	8

Fuente: Aller *et al.* (1987).

A: geología del acuífero

Este factor relaciona el tipo de roca, que actúa como medio acuífero, con la superficie de contacto del contaminante (Gijón-Yescas, 2007), determinando su ruta y atenuación. Por tanto, a mayor tamaño de grano o presencia de más fracturas, mayor será la permeabilidad y capacidad de filtración (Aller *et al.*, 1987).

Se utilizó la litología del modelo hidrogeológico de López *et al.* (2023), identificando sedimentos gruesos al norte (arenas, gravas y bloques) y sedimentos finos hacia el sur (limos y arcillas con intercalaciones de arenas y gravas). Los valores se asignaron según la Tabla 3 y su representación espacial se encuentra en la sección de Resultados.

Tabla 3. Factor A: geología del acuífero.

Tipo de material	Valor asignado
Matrix de arcilla/limo con presencia de arenas/gravas	5
Arenas, gravas y bloques	8

Fuente: Aller *et al.* (1987).

S: tipo de suelo

El factor hace referencia al tipo de suelo en la zona vadosa, que influye en la infiltración y desplazamiento vertical de los contaminantes. La presencia de materiales finos, como limos y arcillas, puede disminuir la permeabilidad y restringir la migración de contaminantes (Aller *et al.*, 1987).

Se utilizó el mapa de tipo de suelo del Plan Director de la Cuenca del Río Rocha (SEI, 2019), donde predominan suelos franco, con franco arcilloso al norte y franco arcillo-arenoso al sur. Esta información se combinó con un mapa de cobertura y uso de suelo generado a partir de una imagen satelital *Sentinel* de 10 m. Las categorías que predominan son agricultura intensiva (en casi toda la zona), lecho de río y zonas urbanas impermeables. Los valores asignados a cada categoría se describen en la Tabla 4, cuyo mapa correspondiente se encuentra en la sección de Resultados.

Tabla 4. Factor S: tipo de suelo.

Tipo de Suelo	Valor asignado
Gravas	10
Zonas agrícolas	8
Franco arcillo arenoso	4
Franco	5
Franco arcilloso	3
Zonas urbanas	1

Fuente: Aller *et al.* (1987).

T: topografía

Este factor representa la variabilidad de la pendiente del terreno, que influye en la probabilidad de escorrentía e infiltración de un contaminante (Aller *et al.*, 1987). Es decir, zonas planas tienen mayor probabilidad de infiltración.

El ASTER GDEM de 30 m se utilizó para determinar la pendiente; la zona sur es la de menor pendiente. La Tabla 5 muestra los valores asignados y el mapa correspondiente se presenta en la sección de Resultados.

Tabla 5. Factor T: topografía (pendiente).

Rangos de pendiente (%)		Valor asignado
0	2	10
2	6	9
6	12	5
12	18	3
>	18	1

Fuente: Aller *et al.* (1987).

I: impacto de la zona vadosa

Se refiere a la zona por encima del nivel freático que no está saturada o lo está de forma discontinua. Este medio influye en las características de atenuación del agua hacia la zona saturada (Aller *et al.*, 1987).

Para caracterizarla, se utilizó el mapa geológico de la cuenca del río Rocha (SEI, 2019) y se identificaron materiales del cuaternario, con cantos, gravas, arenas, limos y arcillas. Al norte predominan abanicos aluviales y al sur, depósitos fluviales y de terraza. En los extremos norte y sur, la cadena montañosa presenta materiales del Ordovícico, con limolitas, areniscas y cuarcitas. En la zona central, el acuífero confinado restringe el movimiento de agua hacia el interior del acuífero por la capa impermeable, y se clasifica como capa de confinamiento.

Los valores asignados se observan en la Tabla 6 y su representación espacial se detalla en la sección de Resultados.

Tabla 6. Factor I: impacto de la zona vadosa.

Descripción	Valor asignado
Capa confinante	1
Cuarcitas	3
Limolitas, areniscas	4
Gravas, arenas, limos y arcillas	6
Cantos, gravas, arenas y limos	7
Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas	8

Fuente: Aller *et al.* (1987).

C: conductividad hidráulica

Este factor define la capacidad del acuífero para transmitir agua, determinando la velocidad de flujo y, por tanto, el desplazamiento de contaminantes (Aller *et al.*, 1987).

Dada la falta de datos de pruebas de bombeo, se usaron las conductividades hidráulicas aplicadas en el modelo hidrogeológico de López *et al.* (2023). Los valores asignados se observan en la Tabla 7 y el mapa obtenido se describe en la sección de Resultados.

Tabla 7. Factor C: conductividad hidráulica.

Tipo de material	Conductividad hidráulica m/s	Valor asignado
Limos, arcillas	0.0001	2
Arenas, gravas, bloques	0.005	10

Fuente: Aller *et al.* (1987).

Resultados

Los valores obtenidos de cada factor (Tabla 1 a Tabla 7) se reclasificaron en un SIG y se generaron los mapas de la Figura 3.

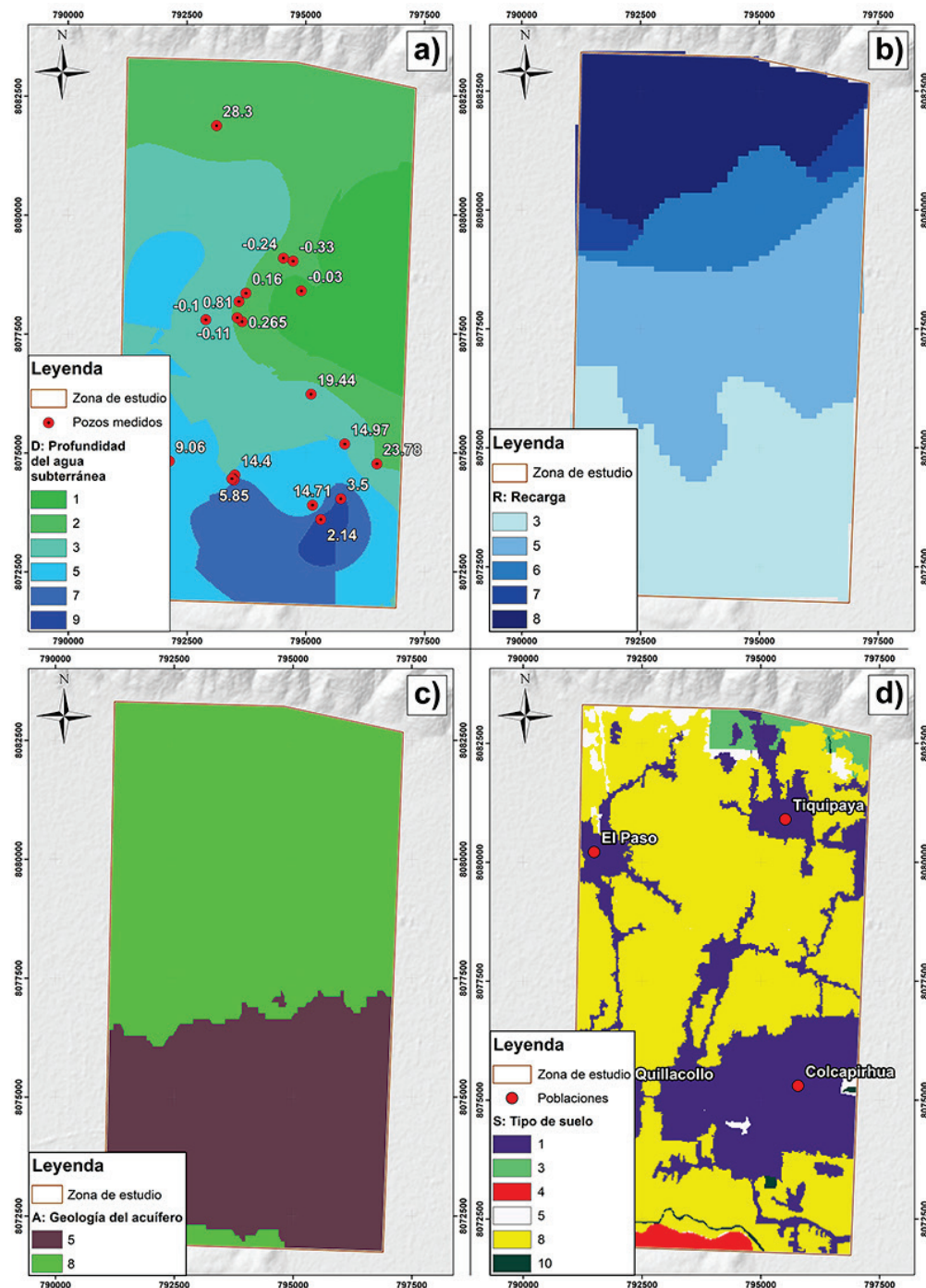


Figura 3. Mapas de los factores reclasificados para obtener el mapa de vulnerabilidad según el índice DRASTIC: (a) profundidad del agua subterránea, *D*; (b) recarga, *R*; (c) geología del acuífero, *A*; (d) tipo de suelo, *S*.

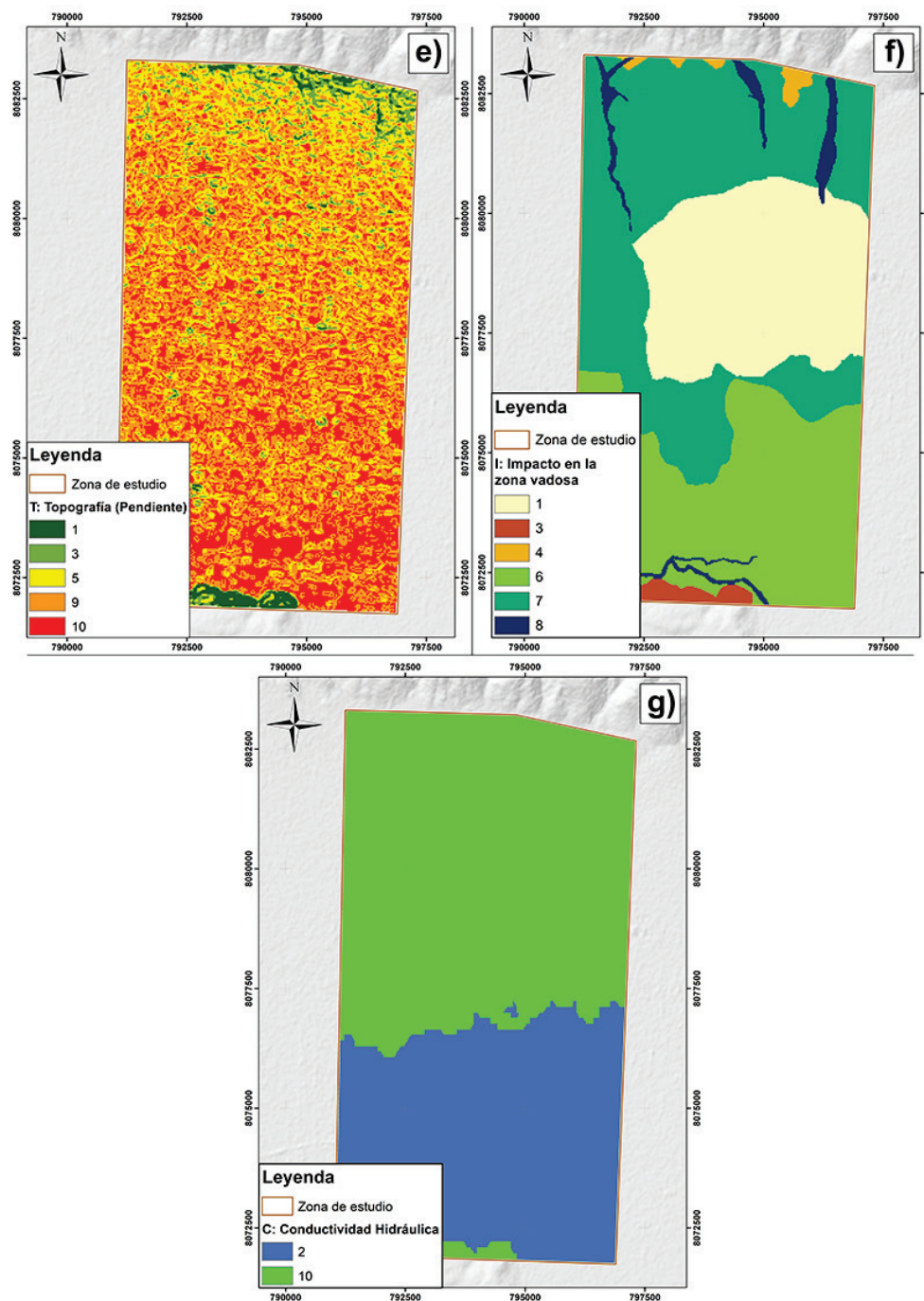


Figura 3 (continuación). Mapas de los factores reclasificados para obtener el mapa de vulnerabilidad según el índice DRASTIC: (e) topografía, *T*; (f) impacto en la zona vadosa, *I*; (g) conductividad hidráulica, *C*.

En la Figura 3(a), el factor profundidad del agua subterránea ("D") presenta valores bajos (entre 1 y 2) en el sector este debido a la zona confinante. En cambio, los valores altos se encuentran en el sector suroeste (entre 5 y 9). En la Figura 3(b), la recarga ("R") es mayor en el norte y disminuye hacia el sur. En la Figura 3(c), el factor geología del acuífero ("A") muestra mayor permeabilidad en el norte. Dicho factor está relacionado con el factor conductividad hidráulica ("C") en la Figura 3(g). En la Figura 3(d), el factor tipo de suelo ("S") destaca valores de 1 para zonas urbanas, y 8 para áreas agrícolas. En la Figura 3(e), la topografía ("T") se presenta con menor pendiente al sur, lo que incrementa el potencial de contaminación. La Figura 3(f) muestra que el impacto en la zona vadosa ("I") tiene valores altos (7-8) en los abanicos y depósitos aluviales en la zona norte, y se reduce a 6 en el sur hacia los depósitos fluvio-lacustres. En la capa confinante se ha asignado 1.

Para calcular el índice DRASTIC se aplicó álgebra de mapas, combinando los factores con pesos específicos y reclasificando los resultados según su nivel de vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987; Musálem *et al.*, 2015). Cabe mencionar que un índice bajo no indica ausencia de contaminación, sino menor susceptibilidad (Shirazi, Imran, & Akib, 2012).

Los pesos varían entre 1 y 5, donde 5 es el más significativo (Aller *et al.*, 1987). Sin embargo, las circunstancias de cada caso de estudio pueden justificar la modificación de los pesos asignados (Shirazi *et al.*, 2012), pues el método DRASTIC ha sido criticado porque los pesos constantes no siempre reflejan las particularidades de cada estudio. En estos casos, los resultados de vulnerabilidad pueden considerarse de dudosa utilidad (Pacheco, Pires, Santos, & Sanches-Fernandes, 2015).

Por tal motivo, se han analizado cuatro escenarios para la asignación de pesos, como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Escenarios de pesos asignados a cada factor para obtener la vulnerabilidad a partir del índice DRASTIC.

Escenario	Descripción	D	R	A	S	T	I	C
Escenario a	Todos los factores tienen el mismo grado de importancia	3	3	3	3	3	3	3
Escenario b	Pesos asignados por bibliografía	5	4	3	2	1	5	3
Escenario c	Incremento en 1 a los factores tipo de suelo (S) y topografía (T)	5	4	3	3	2	5	3
Escenario d	Incremento en 1 solo al tipo de suelo (S)	5	4	3	3	1	5	3

Dentro del caso de estudio, se analizaron cuatro escenarios:

- Escenario a: se asignó un peso de 3 a cada factor, asumiendo la misma importancia relativa. El objetivo es verificar si algún factor predomina sobre los demás.
- Escenario b: se utilizaron los pesos recomendados en la bibliografía, donde el factor "D" e "I" tienen mayor relevancia (Aller *et al.*, 1987). Dicho escenario sirve como referencia para comparar la vulnerabilidad con los otros escenarios.
- Escenario c: la zona de estudio es mayormente agrícola, lo que podría favorecer la infiltración de contaminantes. También existen áreas urbanizadas con suelos impermeabilizados. Asimismo, al norte, la pendiente varía entre 2 y 12 %; y al sur de 0 a 2 %, siendo un sector plano con mayor susceptibilidad a la contaminación. Por tanto, se

incrementaron los pesos del factor “S” de 2 a 3 y del factor “T” de 1 a 2. El objetivo es evaluar cómo estos cambios afectan la vulnerabilidad con el escenario b.

- Escenario d: se aumentó solo el peso del factor “S” bajo el mismo análisis anterior. Se busca analizar la variación en la vulnerabilidad con respecto al escenario b, para verificar pesos y factores predominantes.

A continuación, en la Figura 4 se observan los mapas de vulnerabilidad de los cuatro escenarios analizados.

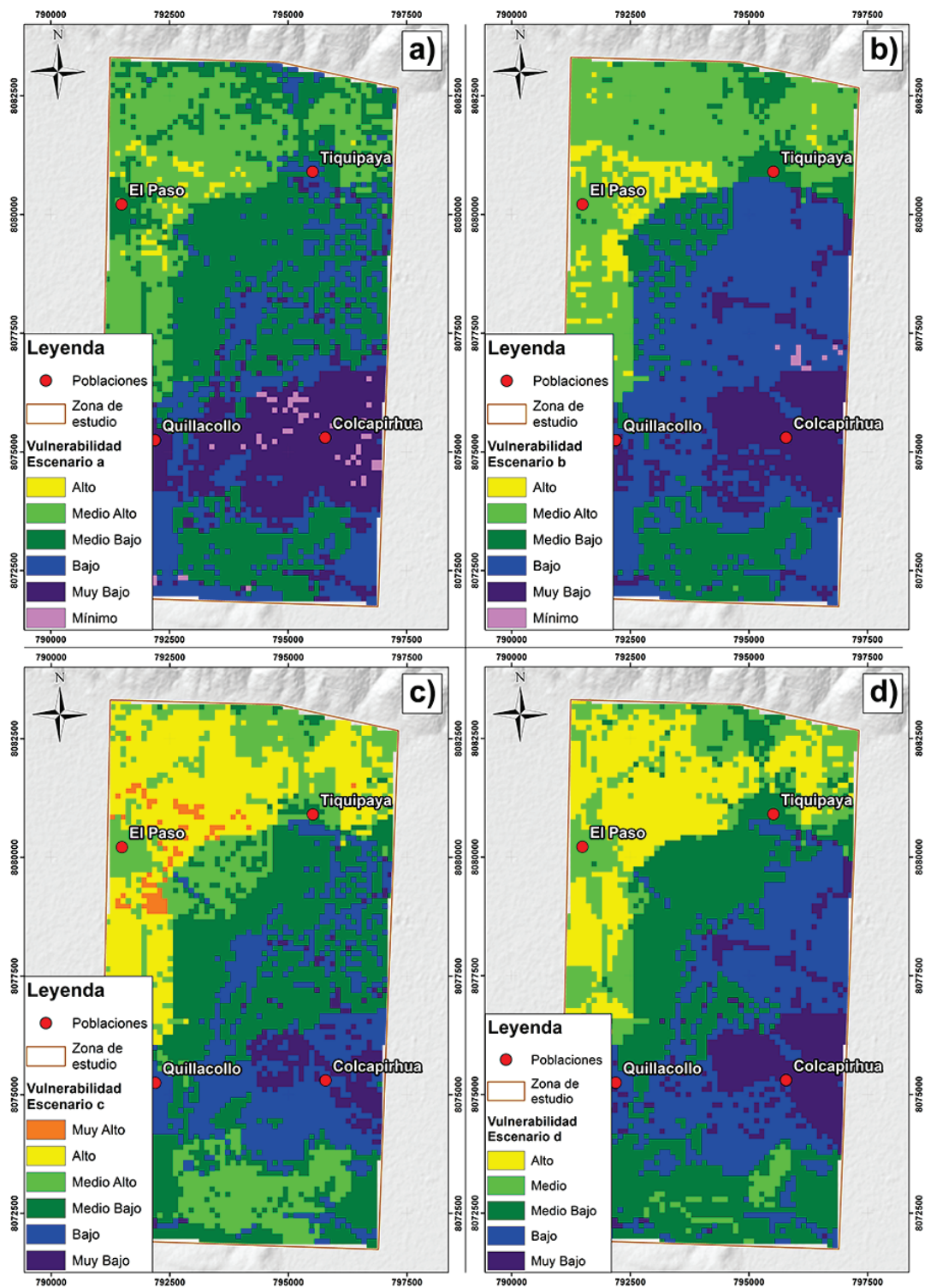


Figura 4. Mapas de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de la zona: (a) escenario a; (b) escenario b; (c) escenario c; (d) escenario d.

Una vez obtenidos los mapas del índice DRASTIC, se calculó el porcentaje y área de influencia de cada grado de vulnerabilidad en los escenarios, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Área y porcentaje del grado de vulnerabilidad por escenario.

Reclasificación		1	2	3	4	5	6	7
Color		Violeta	Índigo	Azul	Verde oscuro	Verde claro	Amarillo	Naranja
Vulnerabilidad		Mínima	Muy baja	Baja	Media baja	Media alta	Alta	Muy alta
Escenario a	Área (km ²)	0.8	13.6	13.9	23.5	13.7	0.8	-
	(%)	1.2	20.5	21.0	35.4	20.7	1.2	-
Escenario b	Área (km ²)	0.1	10.6	25.6	11.0	16.1	2.9	-
	(%)	0.2	15.9	38.7	16.5	24.2	4.4	-
Escenario c	Área (km ²)	-	3.1	14.8	20.7	13.0	13.7	1.0
	(%)	-	4.7	22.3	31.2	19.7	20.6	1.5
Escenario d	Área (km ²)	-	7.4	17.3	21.1	9.2	11.4	-
	(%)	-	11.1	26.0	31.9	13.8	17.2	-

Escenario a

La mayor vulnerabilidad se localiza en el sector noroeste, mientras que las menores están en el este y sur (Figura 4a). La vulnerabilidad media alta alcanza el 20.7 %, con presencia de media baja y alta (1.2 %). En la zona central predomina la vulnerabilidad media baja (35.4 %), mientras que hacia el sur disminuye de forma progresiva hasta niveles bajos y mínimos (21 y 1.2 %, respectivamente).

Escenario b

La distribución general de vulnerabilidad se mantiene, con variaciones en extensión e intensidad (Figura 4b). En el noroeste, la vulnerabilidad alta aumentó a 4.4 % y la media alta a 24.2 %. En la zona central, la vulnerabilidad baja se incrementa de forma significativa (38.7 %) y se extiende hacia el sur. Las áreas urbanas en el sureste y suroeste presentan vulnerabilidad muy baja (15.9 %); al sur se presenta vulnerabilidad media baja (16.5 %).

Escenario c

Se aumenta el peso de los factores "S" y "T" para evaluar su impacto en áreas agrícolas, urbanas y de baja pendiente. En la Figura 4(c) se observa un incremento en la vulnerabilidad alta (20.6 %) y la aparición de una categoría muy alta (1.5 %). La vulnerabilidad media alta se reduce a 19.7 % y aparece en la zona sur, mientras que la media baja se expande en la parte central y sur (31.2 %). Esto conlleva una disminución de las categorías baja (22.3 %) y muy baja (4.7 %), y evidencia un aumento general en la vulnerabilidad.

Escenario d

Al incrementar solo el peso del factor "S", los resultados son similares a los del escenario c, con cambios en la magnitud. La vulnerabilidad muy alta desaparece, mientras que la vulnerabilidad alta se reduce al 17.2 %, y se mantiene en el noroeste. La vulnerabilidad media alta disminuye (13.8 %), mientras que la media baja aumenta (31.9 %). En el este, la vulnerabilidad media baja se reduce a baja (26 %), mientras que en el sur aumenta a media alta. En los centros urbanos al sur, la vulnerabilidad muy baja se incrementa (11 %). A través de esto se han logrado identificar sectores donde la topografía tiene mayor influencia.

Discusión

La combinación y modificación de pesos de los factores del método DRASTIC ha permitido obtener cuatro mapas de vulnerabilidad. De estos mapas, se ha analizado el comportamiento de los factores según el peso y valores asignados.

Escenario a

El factor "I" tiene mayor influencia, dado que la distribución de vulnerabilidad (Figura 4a) se asemeja a las de este factor (Figura 3f), incluso tras reducir su peso de 5 a 3. En la zona central, donde el valor de "I" es 1, se generan vulnerabilidades bajas.

El factor "D" afecta principalmente el sector este, donde sus valores bajos (1 y 2) reducen la vulnerabilidad (Figura 3a). En el suroeste, donde

los valores de "D" son altos (5 a 9), se esperaría mayor vulnerabilidad; sin embargo, la baja vulnerabilidad en este sector sugiere que predomina otro factor.

El factor "R" es determinante en el norte, donde los valores elevados contribuyen al incremento de la vulnerabilidad (Figura 3b).

Los factores "A" y "C" tienen mayor impacto en el norte, donde los valores altos aumentan la vulnerabilidad (Figura 3c y 3g), cuyos pesos se han mantenido. El factor "S" también es influyente, pues su peso ha incrementado a 3. Esto ocurre sobre todo en las áreas urbanas, donde, con un valor de 1, la vulnerabilidad disminuye; mientras que en las áreas agrícolas, con un valor de 8 la vulnerabilidad aumenta (Figura 3d). El factor "T" tiene mayor efecto en el sector sur, donde la baja pendiente favorece la infiltración de contaminantes.

En este análisis, los factores con mayor impacto son "I", "D", "S" y "R" como principales, seguidos de los factores "A", "C" y "T" que muestran variaciones espaciales en su influencia.

Escenario b

En este escenario, los factores más influyentes son "D" e "I", con un peso de 5, seguidos del factor "R", con un peso de 4. Los factores "A" y "C", con pesos de 3, tienen impacto medio; los factores "S" y "T", con pesos de 2 y 1, respectivamente, tienen menor influencia.

Los factores "D" e "I", al tener el peso máximo, reducen la vulnerabilidad en el sector este. En cambio, en el noroeste, los factores "I" y "R" elevan la vulnerabilidad por la presencia de los abanicos aluviales.

En la zona norte, los factores "A" y "C" también incrementan la vulnerabilidad por sus valores elevados.

Los factores "S" y "T" han reducido su peso, siendo "S" influyente en los sectores urbanos, reduciendo la vulnerabilidad, mientras que "T" impacta en el sur por la baja pendiente. No obstante, debido a su peso bajo, su influencia es más limitada.

Por tanto, se destacan los factores "D", "I" y "R" como los más influyentes, seguidos de "A" y "C". En menor medida, están los factores "S" y "T", que tienen un comportamiento distinto por zonas.

Escenario c

En el escenario c, el aumento de los pesos de los factores "S" y "T" incrementa la vulnerabilidad en casi toda la zona de estudio, en especial en las áreas agrícolas con valores altos asignados.

Comparado con el escenario anterior, el impacto es más notable en la zona noroeste, con vulnerabilidad alta que aumentó de 4.4 a 20.6 %. También en la zona central, donde la media baja aumentó de 16.5 a 31.2 %. En el sur, la vulnerabilidad media alta redujo de 24.2 a 19.7 %.

Por otro lado, en las áreas urbanas, el incremento del peso al factor "S" no redujo significativamente la vulnerabilidad. En cambio, se ha mantenido o incluso aumentado debido a la influencia del factor "T", por los valores asignados entre 9 y 10, sobre todo en el área central y sur.

Escenario d

En comparación con el escenario anterior, la vulnerabilidad media alta disminuyó en el límite sur, pasando de 19.7 a 13.8 %, siendo reemplazado por vulnerabilidad media baja, que aumentó de 31.2 a 31.9 %, que refleja la influencia del factor “T” asociado con la baja pendiente.

En el sector este, la vulnerabilidad redujo de media baja a baja, también por la influencia del factor “T”. Además, la vulnerabilidad muy baja aumentó de 4.7 a 11.1 %, en particular en el sector sureste, influenciado por el factor “S” en las áreas urbanas.

La vulnerabilidad alta sigue predominante al noroeste por la influencia del factor “S”.

Por tanto, el factor “T” impacta más en el sector central-este, y en el sur-central. En cambio, el noroeste y sureste están influenciados por el factor “S” en las áreas urbanas y agrícolas.

Comportamiento por zonas

En el noroeste, los escenarios a y b presentan vulnerabilidad media alta con sectores de vulnerabilidad alta y media baja. En contraste, en los escenarios c y d, la vulnerabilidad alta aumenta, con pequeñas zonas de vulnerabilidad muy alta. Esto se debe a la presencia de abanicos y depósitos aluviales que favorecen la recarga el acuífero.

Los factores “R” e “I” tienen un gran impacto en el incremento de la vulnerabilidad. En cambio, el factor “D” alcanza niveles profundos que reducen la vulnerabilidad, aunque con menor influencia.

Otros factores que influyen en el alza de la vulnerabilidad son “A” y “C” por sus valores altos. Asimismo, la expansión urbana en este sector limita la agricultura, asociada con el factor “S”. Las zonas urbanas han sido clasificadas con valores bajos, al presentar vulnerabilidad media baja a media alta, que es ligeramente menor que el resto, representado por suelos agrícolas con valores altos.

En la zona central, la vulnerabilidad es similar en los escenarios a y c, influenciadas en especial por los factores “D” e “I”, debido a la presencia de una capa confinante. La recarga (factor “R”) disminuye hacia el sur porque los sedimentos se van tornando más finos y por la reducción de la precipitación. Asimismo, los factores “A” y “C” van disminuyendo su impacto hacia el sur. La influencia de los factores “S” y “T” se ha evidenciado en este sector a partir del análisis de escenarios.

En el sur se identifican dos sectores. El primero se encuentra en las zonas urbanas, cuya vulnerabilidad varía de muy baja a baja, mostrando una similitud notable entre los escenarios b y d, lo que resalta la influencia del factor “S” por la impermeabilización de estas áreas. En el escenario c, la vulnerabilidad aumenta a baja por la influencia del factor “T”, pues las pendientes bajas incrementan la probabilidad de infiltración de un contaminante.

Los factores “D” e “I”, al tener un peso de 5, contribuyen a la reducción de la vulnerabilidad por los niveles estáticos profundos (15-24 m). La recarga “R” es baja en este sector, al igual que los valores de los factores “A” y “C”, que favorecen la baja de la vulnerabilidad.

El segundo sector se encuentra al extremo sur, donde la vulnerabilidad es similar entre los escenarios a y b, cuya categoría es entre baja y media baja. En cambio, en los escenarios c y d, la

vulnerabilidad ha crecido entre media baja y media alta. La influencia de los factores es similar a la cercana a las zonas urbanas; sin embargo, la comparación de escenarios muestra que el factor "S" tiene mayor impacto y el factor "T" influye en la parte sur-central. Se destacan las pendientes bajas, áreas agrícolas, el río Rocha y niveles estáticos entre 2 y 14 m, que contribuyen al incremento de la vulnerabilidad.

En general, las zonas de mayor vulnerabilidad se localizan en el noroeste del área de estudio, donde los abanicos aluviales favorecen un alto potencial de recarga natural. En el sector central-este, la vulnerabilidad es baja a media baja, asociada con la presencia de limos y arcillas, que proporcionan una protección natural al acuífero. Hacia el sur, cerca de los centros poblados de Colcapirhua y Quillacollo, la vulnerabilidad disminuye de muy baja a baja. No obstante, en la parte sur cercana al río Rocha, la vulnerabilidad varía entre baja y media alta, influenciada tanto por actividades agrícolas como por la presencia del río. Además, la pendiente del terreno contribuye a las condiciones observadas en este sector.

Estos resultados son consistentes con los reportados por Ghielmi, Mondaca y Luján (2008) en el río Tamborada, afluente del río Rocha, con dirección de flujo de sureste a noroeste, ubicado al sureste del acuífero del valle central de Cochabamba. En dicho estudio, las zonas bajas de la cuenca presentaron menor vulnerabilidad debido a la presencia de sedimentos arcillosos de origen lacustre. En contraste, se identificó una mayor vulnerabilidad en los abanicos aluviales del sur, que recargan al acuífero, así como a lo largo del curso del río Tamborada.

De manera similar, el acuífero del valle de Santiago de Chile muestra características comparables con las del valle central de Cochabamba. Según Espinoza (2005), en zonas de acuíferos no

confinados con presencia de arenas y gravas, se identificó una vulnerabilidad de moderada a alta. En cambio, en sectores de acuíferos semiconfinados y confinados, la vulnerabilidad fue de baja y nula, respectivamente, debido a la protección natural que otorgan los sedimentos finos, como limos y arcillas.

En ese sentido, los resultados obtenidos muestran una coherencia con estudios previos realizados tanto en zonas aledañas como en otras regiones con características hidrogeológicas similares, lo que respalda la consistencia del análisis de vulnerabilidad realizado.

Conclusiones

El estudio se enfocó en evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en el Valle Central de Cochabamba, utilizando el método DRASTIC. Este método ha demostrado ser útil para diferenciar las zonas que podrían ser afectadas por la contaminación del acuífero. Además, se enfatizó la variación de los pesos y sus efectos a través de un análisis de escenarios. Esto permitió identificar una priorización de factores influyentes, observando zonas diferenciadas según su comportamiento, como son las zonas noroeste, central-este y sur.

La zona noroeste presenta vulnerabilidad de media alta a alta con presencia de media baja y muy alta. Esta zona es importante para la recarga natural por la presencia de abanicos y depósitos aluviales que conforman un acuífero libre. Las condiciones hidrogeológicas están influenciadas por la recarga "R" y el impacto en la zona vadosa "I". Ambos tienen mayor influencia que el factor profundidad del agua subterránea "D", cuyos niveles estáticos (cerca de los 28 m) contribuyen a la reducción de la vulnerabilidad. Además, los factores "A" y "C" también presentan

una influencia significativa debido a los altos valores asignados que condicionan el movimiento de las aguas subterráneas. Lo mismo ocurre con el factor "S", cuya influencia en las zonas agrícolas y urbanas contribuye al incremento de la vulnerabilidad. Tales condiciones hacen que este sector sea más propenso a la infiltración y el movimiento de contaminantes en el acuífero.

En la parte central-este se distingue una vulnerabilidad de baja a media baja por la presencia de una capa confinante con pozos surgentes. Los factores predominantes son la profundidad del agua subterránea "D" y el impacto en la zona vadosa "I", por sus valores bajos con pesos altos. La influencia del factor "R" disminuye hacia el sur por la reducción de la recarga, al igual que de los factores "A" y "C" al formar una zona de transición. Los factores "S" y "T" influyen por las actividades agrícolas y por las pendientes de medias a bajas, siendo el factor "T" más influyente en el extremo este. Por tanto, dicho sector es menos propenso a ser contaminado directamente gracias a la capa confinante que protege al acuífero.

En la zona sur, cerca de las áreas urbanas, la vulnerabilidad varía de muy baja a baja por diversos motivos. Primero, la deposición de sedimentos finos (arcilla y limo con intercalaciones de grava y arena) la convierte en una zona poco favorable para el aprovechamiento de agua subterránea. Esto se asocia con el factor impacto en la zona vadosa "I". Segundo, las áreas urbanas (factor "S") contribuyen a la reducción de la vulnerabilidad. Tercero, los niveles estáticos se encuentran entre 15 y 24 m, relacionados con el factor "D". Cuarto, la poca pendiente, asociado con el factor "T", permite que incremente la vulnerabilidad. Quinto, la recarga es más baja (factor "R"). Sexto, los factores "A" y "C" tienen valores más bajos en este sector. De esta manera, los factores "I", "S", "D", "R", "A"

y "C" favorecen a la reducción de la vulnerabilidad; en cambio, el factor "T" lo aumenta.

En el extremo sur, cerca del límite de la zona y del río Rocha, la vulnerabilidad varía de media baja a media alta debido principalmente a la influencia de la agricultura y del río, relacionados con los factores "I" y "S". El sector tiene poca pendiente, donde influye el factor "T", en especial en el extremo sur-central. Los niveles estáticos varían entre 2 y 14 m, con lo que el factor "D" favorece incrementar la vulnerabilidad. Los otros factores tienen el mismo comportamiento que el del resto de la zona sur. Por tanto, la combinación de dichos factores permite obtener vulnerabilidades bajas.

El análisis de escenarios confirmó que la vulnerabilidad se mantiene en los mismos sectores, con variaciones en la magnitud. Así, los factores más influyentes son "D" e "I", con un peso de 5; recarga "R", con un peso de 4; "A", "C" y "S", con 3; y en menor medida "T", con un peso de 2.

Las áreas de mayor vulnerabilidad se localizan al noroeste y en el extremo sur de la zona de estudio. Tales áreas se asocian sobre todo con zonas de recarga natural, lechos de ríos provenientes de las torrenteras de la cordillera Tunari, abanicos aluviales, uso agrícola del suelo y niveles profundos de agua subterránea. En contraste, el sector central hacia el este presenta baja vulnerabilidad, atribuida a la presencia de una capa confinante que actúa como barrera natural. Al sur, cerca de las áreas urbanas, la baja vulnerabilidad se relaciona con procesos de impermeabilización del terreno.

Estos resultados reflejan tendencias de vulnerabilidad consistentes con las observadas en otras zonas con características hidrogeológicas similares, lo que refuerza la validez del enfoque empleado. En ese sentido,

la metodología propuesta es replicable en otras regiones de interés para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos en explotación, sobre todo en valles fluvio-lacustres con recarga principal en abanicos aluviales.

Se puede dar continuidad a este estudio con un análisis de la calidad de agua, que permita caracterizar los tipos de contaminantes presentes y sus posibles fuentes. Asimismo, se recomienda profundizar en la definición de los parámetros hidrogeológicos clave a través de investigaciones específicas, como estudios geofísicos y pruebas de bombeo, que aporten mayor detalle a la caracterización del sistema acuífero del valle central de Cochabamba; esto permitiría la formulación de planes de gestión con participación de actores locales, que apoye la toma de decisiones apropiadas y fomente el compromiso con la implementación de medidas de protección y el uso sostenible del acuífero.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Jhonatan Enrique Ureña Camacho por su apoyo en la generación de datos de precipitación; a Brayan López Gonzales por su colaboración en el trabajo en campo y en la preparación de datos, y a Waldir Enrique Soruco Rodríguez por su valiosa discusión de los resultados basados en su experiencia en la zona y sus recomendaciones para el desarrollo del estudio.

Referencias

- Al-Hallaq, A. H., & Elaish, B. S. A. (2012). Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip-Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(4), 833-847. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0284-9>
- Albinet, M., & Margat, J. (1970). Groundwater pollution vulnerability mapping. *Bulletin du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres Bull BRGM 2nd Series*, 3(4), 13-22.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings* (No. EPA/600/2-87/035). Ada, OK: U.S. Environmental Protection Agency.
- Árcega, I., Otazo, E., Galindo, E., Acevedo, O., & Romo, C. (2015). Determinación del índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(7), 39-49.
- Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: A review. *Water*, 12(5), 1356. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12051356>
- Cabrera, J. E., Alarcón, A., Terraza, H., Maleki, D., & Lew, S. (2013). *Plan de acción: área metropolitana de Cochabamba sostenible*. Cochabamba, Bolivia: ICES-Banco Interamericano de Desarrollo. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1673.4961>

- Espinoza, C. (2005). Dinámica de aguas subterráneas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación. Aplicación al acuífero de Santiago Norte. En: Peralta, J. M. (ed.). *Taller de capacitación en evaluación ambiental de planteles ganaderos* (pp. 69-127). Temuco, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Ghielmi, G., Mondaca, G., & Luján, M. (2008). Diagnóstico sobre el nivel de contaminación de acuíferos en el distrito 9 del municipio de Cercado en la ciudad de Cochabamba y propuesta para su protección y control. *Acta Nova*, 4(1), 51-86.
- Gijón-Yescas, G. N. (2007). *Análisis espacial de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el estado de Yucatán, México* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.
- Guppy, L., Uyttendaele, P., Villholth, K. G., & Smakhtin, V. (2018). *Groundwater and sustainable development goals: Analysis of interlinkages* (UNU-INWEH Report Series, Issue 04). Hamilton, Canada: United Nations University Institute for Water, Environment and Health. DOI: <https://doi.org/10.53328/JRLH1810>
- INE, Instituto Nacional de Estadística. (2020). *Censo y proyecciones de población sociales*. Recuperado de <https://www.ine.gob.bo/index.php/censos-y-proyecciones-de-poblacion-sociales/>
- López, B., Rosales, L., & Saavedra, O. (2023). Modelación hidrogeológica en el Valle Central de Cochabamba-Bolivia. *Investigación & Desarrollo*, 23(1). DOI: <https://doi.org/10.23881/idupbo.023.1-2i>

- MMAyA, Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2014). *Plan Maestro Metropolitano de Agua y Saneamiento de Cochabamba Bolivia: Informe Final. Resumen Ejecutivo*. La Paz, Bolivia: Ministerio de Medio Ambiente y Agua.
- Musálem, K., McDonald, M., Jiménez, F., & Laino, R. (2015). Mapeo de la vulnerabilidad del agua subterránea en dos cuencas afectadas por la represa Yacyreta en Paraguay. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 49-61.
- Neumann-Redlin, C. M., Renner, S., & Torres, J. (2000). *Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba, Bolivia*. São Paulo, Brasil: Águas Subterráneas. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24016>
- NRC, National Research Council. (1993). *Ground water vulnerability assessment: Predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty*. Washington, DC: National Academy Press.
- OECD. (2015). *Drying wells, rising stakes: Towards sustainable agricultural groundwater use (OECD Studies on Water)*. Paris, France: OECD Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264238701-en>
- Pacheco, F. A. L., Pires, L. M. G. R., Santos, R. M. B., & Sanches-Fernandes, L. F. (2015). Factor weighting in DRASTIC modeling. *Science of the Total Environment*, 505, 474-486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.092>

- Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, 28(1), 32-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.008>
- Renner, S., & Velasco, C. (2000). *Geología e hidrogeología del Valle Central de Cochabamba* (Boletín No. 34). Cochabamba, Bolivia: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Ríos-Rojas, L., & Vélez-Otálvaro, M. V. (2008). Vulnerabilidad la contaminación, zona sur acuífero del valle del Cauca, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (23), 69-84.
- Rosales, L., Saavedra, O. C., & Soruco, W. (2020). Modelación hidrogeológica en un abanico aluvial de Cochabamba-Bolivia. *Investigación & Desarrollo*, 20(1), 51-66. DOI: <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-4i>
- SDC & DGIA, Servicio Departamental de Cuencas & Dirección de Planificación y Gestión Integral del Agua. (2014). *Plan Director de la Cuenca del río Rocha: estado de situación y propuesta de lineamientos estratégicos*. La Paz, Bolivia: Impresiones Quality SRL.
- SEI, Stockholm Environment Institute. (2019). *Formulación y actualización del Plan Director de la Cuenca del Río Rocha, bajo un enfoque de adaptación al cambio climático (Informe técnico, Entregable J)*. Cochabamba, Bolivia: Stockholm Environment Institute. Recuperado de <https://sites.google.com/view/giac/plan-director-pdcrr>

- Shirazi, S. M., Imran, H. M., & Akib, S. (2012). GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: A review. *Journal of Risk Research*, 15(8), 991-1011. DOI: <https://doi.org/10.1080/13669877.2012.686053>
- Shirazi, S. M., Imran, H. M., Akib, S., Yusop, Z., & Harun, Z. B. (2013). Groundwater vulnerability assessment in the Melaka State of Malaysia using DRASTIC and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 70(5), 2293-2304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2360-9>