

## EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN POZOS DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA EVALUATION OF VULNERABILITY IN WELLS OF THE CENTRAL VALLEY OF COCHABAMBA

<sup>1</sup>Laura Rosales, <sup>1,2</sup>Oliver Saavedra, <sup>1,2</sup>Brayan López, <sup>1</sup>Jhonatan Ureña

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Universidad Privada Boliviana

oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 2 de julio 2024, aceptado para publicación el 23 de julio 2024)

### RESUMEN

En el valle central de Cochabamba, el aumento de la población y la creciente demanda de agua para consumo humano, industrial y riego ha provocado un incremento en la cantidad de pozos perforados, elevando el riesgo de la contaminación de las aguas subterráneas. Por esta razón, se ha visto necesario identificar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en una zona productiva del valle central de Cochabamba, para el cual se ha utilizado la herramienta DRASTIC. El método considera la combinación de siete factores hidrogeológicos utilizando herramientas SIG para los cuales se ha alimentado con información hidrogeológica local y actualizada. Para obtener el índice de vulnerabilidad se han analizado cuatro escenarios en base a los pesos asignados a cada factor. Los resultados indican que los factores con mayor afectación son la profundidad del nivel estático, la geología del acuífero, el impacto en la zona vadosa, la recarga y el tipo de suelo. La zona norte presenta vulnerabilidad Media Alta al ser zona de recarga con pozos profundos, la zona central indica vulnerabilidad Alta a Muy Alta por la presencia de pozos surgentes y actividades agrícolas, y la zona sur presenta de forma general vulnerabilidad Baja a Media Baja al ser una zona de descarga, urbanizada, acuíferos confinados y niveles de agua profundos. Por tanto, se recomienda dar un mayor énfasis a la zona norte y zona central, validar con estudios hidrogeoquímicos, elaborar planes de gestión, al igual que emplear el esquema propuesto en otras zonas de gran interés hidrogeológico.

**Palabras Clave:** Aguas Subterráneas, Vulnerabilidad, DRASTIC, Valle Central de Cochabamba.

### ABSTRACT

In the central valley of Cochabamba, the increase in population and the growing demand for water for human consumption, industry and irrigation has led to an increase in the number of wells drilled, raising the risk of groundwater contamination. For this reason, it has been necessary to identify the vulnerability to aquifer contamination in a productive zone of the central valley of Cochabamba, for which the DRASTIC tool has been used. The method considers the combination of seven hydrogeological factors using GIS tools for which it has been fed with local and updated hydrogeological information. To obtain the vulnerability index, four scenarios were analyzed based on the weights assigned to each factor. The results indicate that the factors with the greatest impact are the depth of the static level, the geology of the aquifer, the impact on the vadose zone, recharge and soil type. The northern zone presents Medium High vulnerability because it is a recharge zone with deep wells, the central zone indicates High to Very High vulnerability due to the presence of emerging wells and agricultural activities, and the southern zone generally presents Low to Medium Low vulnerability because it is a discharge zone, urbanized, confined aquifers and deep-water levels. Therefore, it is recommended that greater emphasis be given to the northern and central zones, validate with hydrogeochemical studies, develop management plans, and use the proposed scheme in other zones of great hydrogeological interest.

**Keywords:** Groundwater, Vulnerability, DRASTIC, Central Valley of Cochabamba.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el valle central de Cochabamba se experimenta un crecimiento acelerado de la mancha urbana [1], reflejado en el último censo nacional y proyecciones [2], los cuales indican que la principal razón es la migración de la población rural a la zona metropolitana de Cochabamba generando gran estrés hídrico en la zona [3]. Esto implica una gran cantidad de pozos públicos y privados para atender necesidades de agua para consumo humano, industrial y riego [4]. En ese sentido la protección de los acuíferos de esta zona es de vital importancia.

La hidrogeología del valle central de Cochabamba está formada por una zona semiárida de baja precipitación y alta evapotranspiración, con intercalaciones por la deposición de material fluvial y lacustre [5]. La parte norte está conformada por abanicos aluviales, que junto a los trayectos de los lechos de río son las zonas principales de recarga (alta infiltración). En cambio, en la zona sud se caracteriza con material menos permeable siendo principalmente zonas

de descarga por la topografía. De esta manera, se han identificado tres tipos de acuíferos y pozos en la zona: al norte de acuíferos libres y profundos, al medio de pozos surgentes y al sur de acuíferos confinados con pozos profundos [6].

Si bien se ha establecido en la cuenca del río Rocha, el preservar la vegetación y asegurar la infiltración; la mancha urbana ha venido impermeabilizando, reduciendo las zonas de recarga a los acuíferos libres [3].

Por otra parte, las actividades antropogénicas aumentan el riesgo de la contaminación de los acuíferos libres [5]. Debido a estos factores, un análisis de vulnerabilidad se presenta prácticamente imprescindible con el fin de analizar el comportamiento natural de la zona, y promover someternos a él para buscar una mejor relación con el ecosistema.

De esta manera, mediante el presente estudio se busca identificar las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas de los acuíferos superficiales en una zona del valle central de Cochabamba utilizando el método DRASTIC, haciendo énfasis en los pozos de explotación de la región.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en una zona productiva del valle central de Cochabamba, el cual limita al norte con la cordillera Tunari y al sur con serranías, al este con el municipio de Cochabamba y al oeste con el municipio de Quillacollo. Esta incluye parte de los municipios de Tiquipaya, Colcapirhua y Quillacollo, ver Figura 1. Tiene un área aproximada de 67 km<sup>2</sup> y su elevación varía cerca de los 2500 a 2800 m.s.n.m.

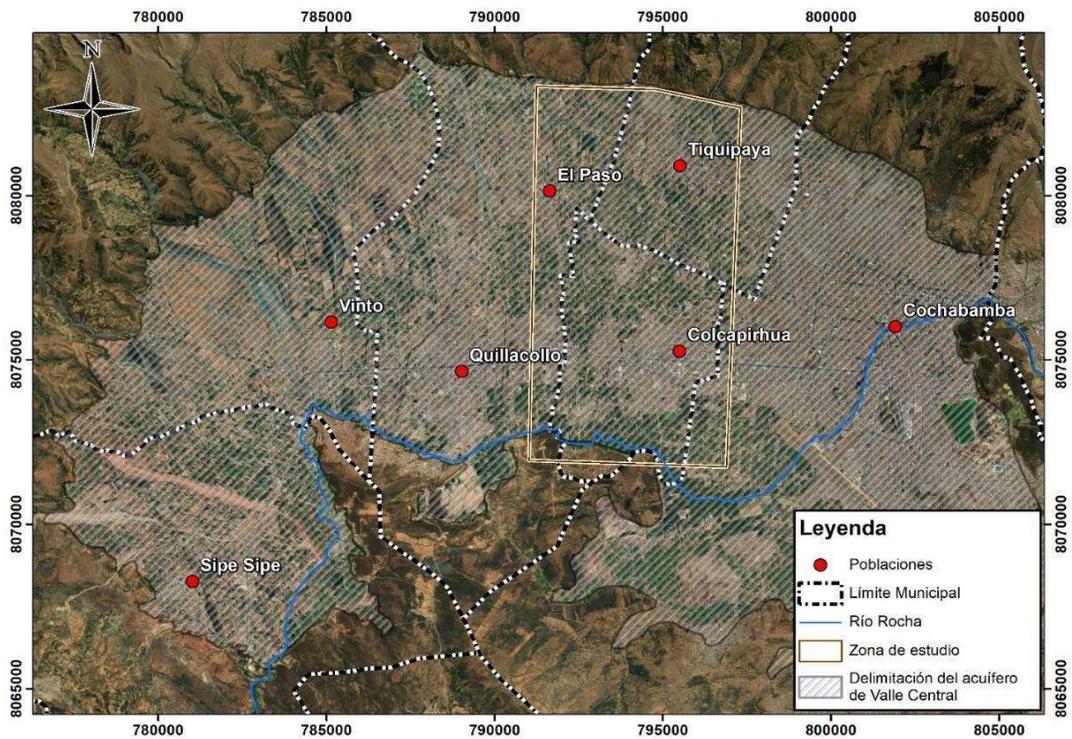


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## 3. METODOLOGÍA

La vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos es el grado de protección que el ambiente natural proporciona ante el ingreso de contaminantes naturales o antropogénicos [7], es decir, la sensibilidad de un acuífero a ser afectado negativamente por factores que ingresan a los acuíferos superficiales [8]. Uno de los métodos más conocidos es el DRASTIC debido a su capacidad y facilidad de uso [9], el cual corresponde a un acrónimo de siete factores hidrogeológicos que afectan y controlan el movimiento de aguas subterráneas, tales como: profundidad del nivel estático (D), Recarga neta (R), Geología del acuífero (A), Tipo de suelo (S), Topografía (T), Impacto en la zona vadosa (I) y Conductividad Hidráulica (C) [10]. El método considera estos factores en base a tres supuestos: el contaminante se introduce por la superficie, es trasladado al agua subterránea por la precipitación y es móvil en el agua [8]. Los factores

se combinan incorporándose en un esquema de clasificación relativa que utiliza la combinación de pesos y valores para producir un valor numeral que se denomina índice DRASTIC [10]. En la Figura 2 se observa la metodología para obtener este índice a partir de la reclasificación de los atributos de cada factor, posteriormente la asignación de un peso a cada factor y finalmente con un álgebra de mapas utilizando herramientas SIG, obtener el índice de vulnerabilidad [11]. Para el caso de estudio, se utilizó el software ArcGIS 10.8.

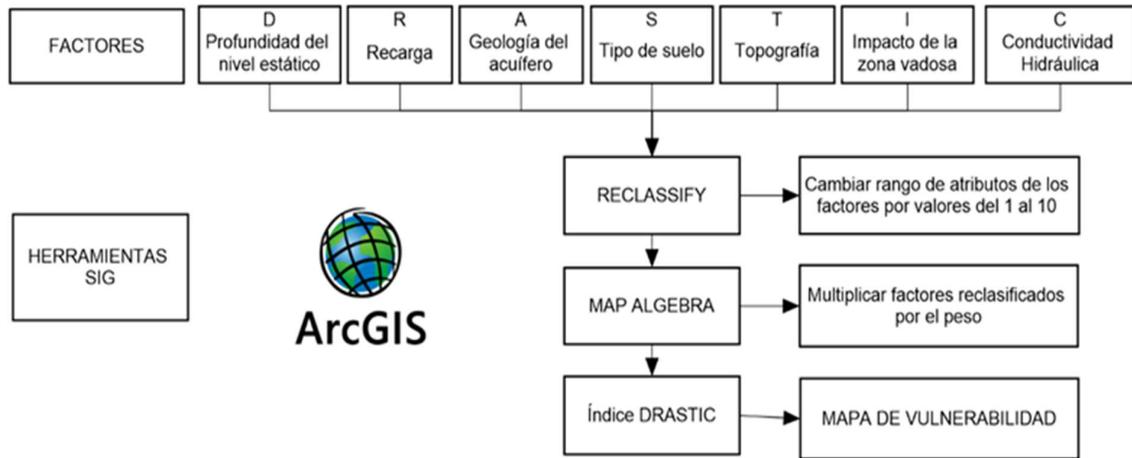


Figura 2: Metodología para obtener el mapa de vulnerabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

La ecuación (1) describe la fórmula que combina los siete factores mencionados para obtener el índice DRASTIC:

$$Índice_{DRASTIC} = Dr Dw + Rr Rw + Ar Aw + Sr Sw + Tr Tw + Ir Iw + Cr Cw \quad (1)$$

donde:

- r: subíndice en la fórmula que indica el rango de los valores de cada factor, clasificados en un rating del 1 al 10 (ver Tabla 1).
- w: subíndice en la fórmula que representa el peso asignado a cada factor en un rango del 1 al 5 (ver Tabla 2).

Se ha utilizado los valores recomendados de Aller & Thornhill [12], para los rangos de los atributos de cada factor y el rating asignado (ver Tabla 1):

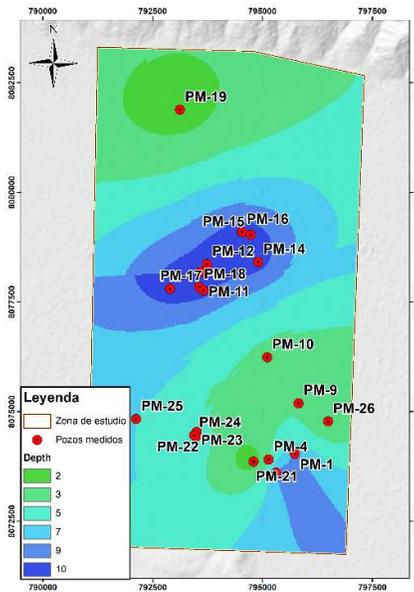
TABLA 1 – RESUMEN DE LOS FACTORES UTILIZADOS PARA OBTENER EL ÍNDICE DRASTIC

Acrónimo	Factor	Información utilizada	Tipo	Rango		Rating	
				Inicio	Fin		
D	Profundidad del nivel estático	Campañas de monitoreo de niveles de agua en pozos de explotación durante el año 2021 en los municipios de Tiquipaya y Colcapirhua [6]. Se identificaron pozos surgentes y niveles superficiales en la parte central y sur de la zona, y pozos profundos al norte.		0	1.5	m	10
				1.5	4.6		9
				4.6	9.1		7
				9.1	15.2		5
				15.2	22.9		3
				22.9	30.5		2
R	Recarga	Datos de precipitación diaria de las estaciones de SENAMHI [13] y Universidad Privada Boliviana [14]. La recarga estimada por precipitación en la zona es alrededor del 20% [4] & [5], por tanto, la recarga estimada es de 100 a 127 mm.		100	102	m	3
				102	127.5		4
A	Geología del acuífero	Durante las campañas de 2021, se recopiló la litología para un modelo hidrogeológico [6] identificando arcillas, limos, arenas y gravas debido a la presencia de abanicos aluviales al norte de la zona.	Matrix de arcilla/limo con presencia de arenas/gravas				5
			Arena y grava				8
S	Tipo de suelo	El tipo de suelo según la textura se obtuvo del Plan Director de la Cuenca del río Rocha [3], donde predomina la presencia de Franco, al norte Franco arcilloso y al sur Franco arcillo	Gravas				10
			Zonas agrícolas				8
			Franco arcillo arenoso				4
			Franco				5

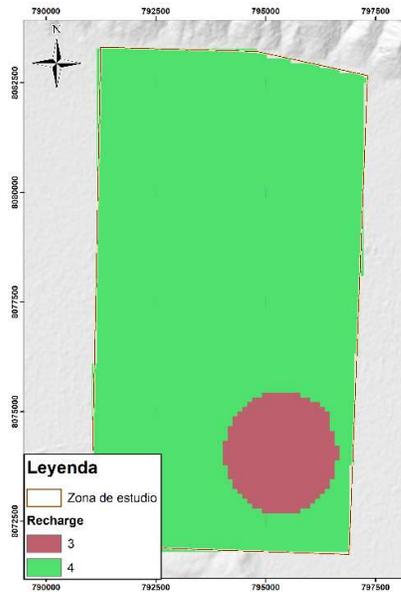
Acroním o	Factor	Información utilizada	Tipo	Rango		Ratín g	
		arenoso. Se optó por actualizar las zonas de agricultura intensiva y zonas urbanas (impermeabilizado).	Franco arcilloso			3	
			Zonas urbanas			1	
T	Topografía	Se ha utilizado el GDEM ASTER de 30 m. [15], para determinar la pendiente de la zona, identificando la zona sur como de poca pendiente.		0	2	10	
				2	6	9	
				6	12	5	
				12	18	3	
				>	18	1	
I	Geología de la zona vadosa	Se ha utilizado el mapa geológico de la cuenca del río Rocha [3], encontrando que la mayor parte de la zona se encuentra con materiales del cuaternario como depósitos aluviales y de abanicos aluviales, al sur depósitos fluviales y de terraza; y en la cadena montañosa (al norte y sur) con materiales del Ordovícico, con limolitas, areniscas y cuarcitas.	Limolitas, areniscas			4	
			Cuarcitas			3	
			Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas			8	
			Cantos, gravas, arenas y limos			7	
			Gravas, arenas, limos y arcillas			6	
			Cantos, gravas, arenas y limo			7	
C	Conductividad Hidráulica	Al igual que la Geología del Acuífero (A), se ha utilizado las conductividades del estudio de [6].	Limos, arcillas	$4.72 \times 10^{-5}$	$1.41 \times 10^{-4}$	m/s	2
			Arenas, gravas, bloques	>	$9.43 \times 10^{-4}$		10

Fuente: [12].

Finalmente, una vez obtenidos los valores para la reclasificación de los atributos de cada factor (ver Tabla 1), se utilizó herramientas SIG (ver Figura 2) para obtener los mapas temáticos como se muestra en la Figura 3.

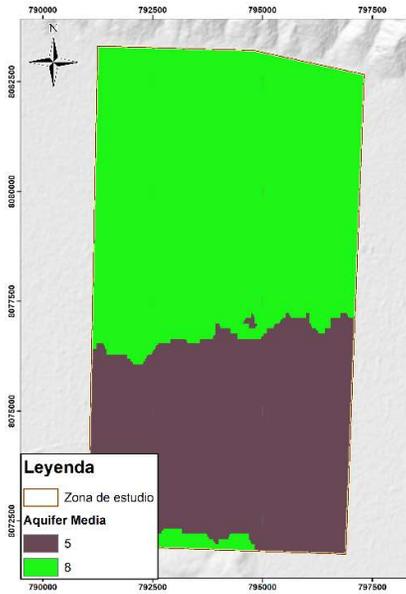


Profundidad del nivel estático

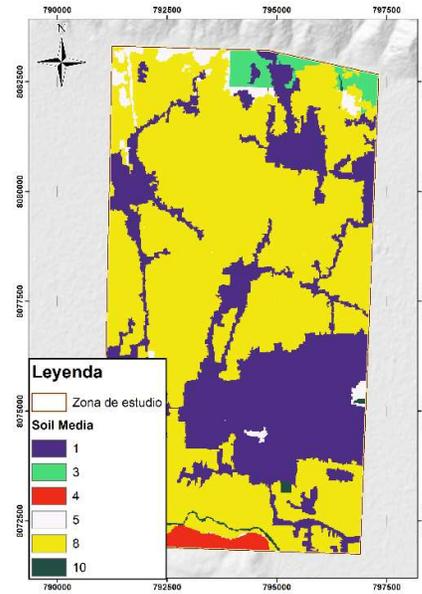


Recarga

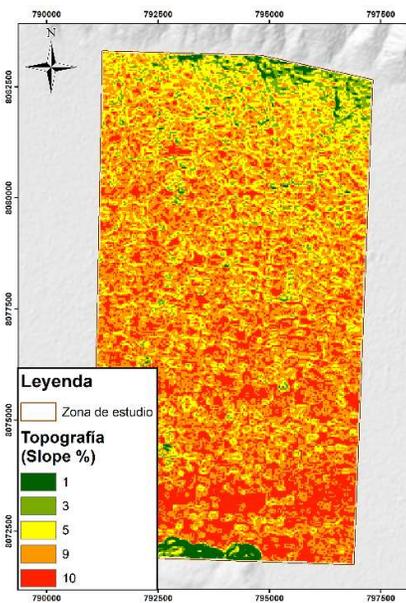
EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN POZOS DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA



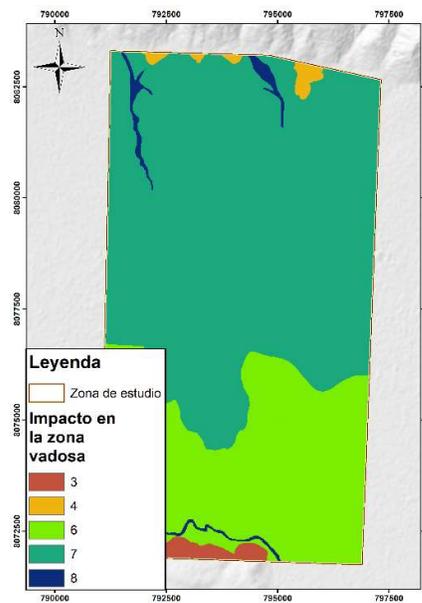
Geología del acuífero



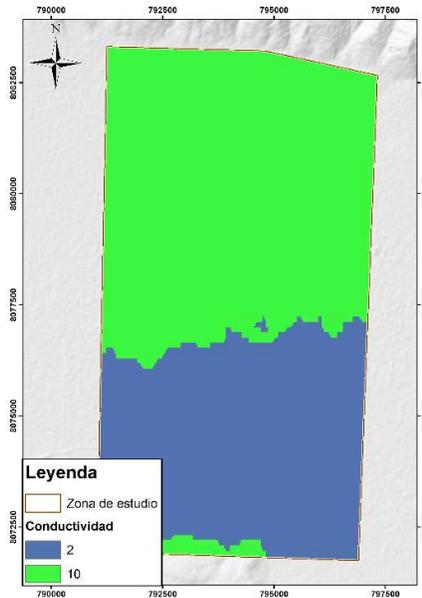
Tipo de suelos



Topografía



Impacto en la zona vadosa



**Conductividad Hidráulica**

**Figura 3:** Mapas de los factores reclasificados para obtener el mapa de vulnerabilidad según el índice DRASTIC.  
**Fuente:** Elaboración Propia.

**4. RESULTADOS**

La fórmula del índice DRASTIC indica que se debe utilizar un álgebra de mapas para asignar un peso a cada factor y combinarlos en un solo mapa de manera que se pueda graficar visiblemente y asignar colores para visualizar el rango de áreas con respecto a la vulnerabilidad [10]. El peso asignado puede ir en un rango del 1 al 5, donde 5 indica que el factor es más significativo y un valor de 1 que es menos significativo [10] siendo estos valores constantes (ver Tabla 2 Escenario 2). Las circunstancias de cada caso de estudio pueden justificar la modificación de los pesos asignados [16], ya que el método DRASTIC ha sido criticado ya que los pesos constantes no siempre cumplen las particularidades del estudio, en cuyo caso, los resultados de vulnerabilidad pueden considerarse de dudosa utilidad [17]. Por esta razón, para estudiar la influencia de los factores, se han analizado cuatro escenarios para la asignación de pesos como se observa en la Tabla 2:

**TABLA 2 – PESOS ASIGNADOS A CADA FACTOR PARA OBTENER LA VULNERABILIDAD A PARTIR DEL ÍNDICE DRASTIC**

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

**Fuente:** [10].

Una vez obtenido los mapas del índice DRASTIC de cada escenario, se reclasificó de acuerdo a la asignación de colores específicos según los rangos que asigna el índice [10] & [18]. Estos resultados se observan en la Tabla 3 y Figura 4:

TABLA 3 – 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		Mínimo	Muy Bajo	Bajo	Medio Bajo	Medio Alto	Alto	Muy Alto
Escenario 1	Área	1.1	10.6	9.8	18.6	19.0	6.9	
	(%)	1.6	16.0	14.8	28.2	28.8	10.5	
Escenario 2	Área		8.2	12.4	14.3	15.8	13.5	1.8
	(%)		12.4	18.7	21.7	23.9	20.5	2.8
Escenario 3	Área		2.6	9.1	13.1	15.7	13.3	12.3
	(%)		3.9	13.8	19.8	23.8	20.1	18.6
Escenario 4	Área		6.7	8.4	14.8	16.4	13.4	6.3
	(%)		10.2	12.8	22.4	24.9	20.3	9.5

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se describen los escenarios de la Tabla 3 y Figura 4 donde se observa de forma general que al sur predominan las vulnerabilidades bajas y al norte las altas. Sin embargo, cabe mencionar que un valor bajo del índice DRASTIC no indica que las aguas subterráneas están libres de contaminación, sino que son menos susceptibles a estas [16].

#### Escenario 1

En la zona central predomina la vulnerabilidad Media Alta (29%) a Alta (11%). No existen zonas de vulnerabilidad Muy Alta a comparación de los otros escenarios. Al sur predomina una vulnerabilidad Muy Baja (16%) a Media Baja (28%) y una mínima de 1.6%. A pesar de contar con el mismo peso asignado, se observa la predominancia del factor Profundidad del nivel estático “D” en la zona central (ver Figura 3) ya que los niveles medidos son superficiales [6].

#### Escenario 2

Las zonas predominantes de vulnerabilidad mantienen su ubicación, cambiando solamente en la extensión y apareciendo vulnerabilidad Muy Alta en la parte central en menor extensión (2.8%). En la zona sureste predomina la vulnerabilidad Muy Baja (12%) y Medio Baja (22%) y al suroeste Baja (19%). Al norte se observa vulnerabilidad Media Alta (24%) y al centro, Alta (21%). En este caso, los factores con mayor influencia son la profundidad del nivel estático “D” e Impacto en la zona vadosa “I” observando en la Figura 3 que la mayor influencia está en la parte central y norte.

#### Escenario 3

Las zonas mantienen su ubicación cambiando, al igual que el anterior, en su extensión. La zona de vulnerabilidad Muy Baja redujo a 4% e incrementó la Muy Alta a 19%. Al sur predomina la vulnerabilidad Baja (14%) y Media Baja (20%). Al norte se ha mantenido la vulnerabilidad Media Alta (24%), y al centro predomina la Alta (20%) y Muy Alta. En este se ha incrementado en 1 el factor suelo y topografía observando que si influye en la parte central y sur incrementando la vulnerabilidad.

#### Escenario 4

Es muy similar al Escenario 2, con un incremento en la vulnerabilidad Muy Alta a 9.5%. Al sur predomina de Muy Bajo (10%) a Medio Bajo (22%) y en la zona norte y parte central entre Medio Alto (25%), seguido de Alto (20%) a Muy Alto. Para este escenario se ha incrementado en 1 al factor suelo, observando que, con respecto al anterior escenario, la vulnerabilidad Muy Alta reduce en extensión, pero aun teniendo influencia en la zona central. En cambio, al sur se mantienen las Vulnerabilidades bajas ya que es una zona impermeable.

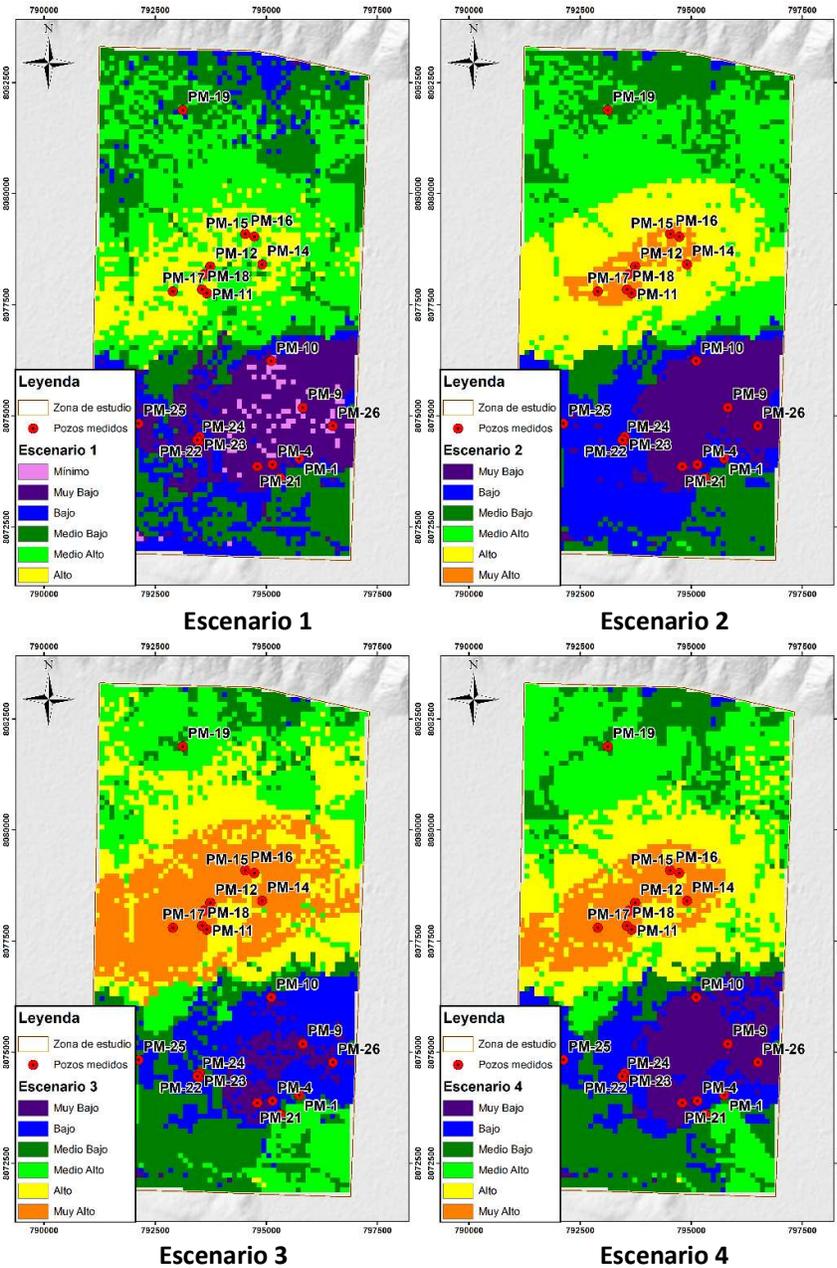


Figura 4: Mapas de Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la zona bajo cuatro escenarios.  
Fuente: Elaboración Propia.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha utilizado la herramienta DRATIC para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en una zona del valle central de Cochabamba debido a la vital importancia que tiene la explotación de aguas subterráneas en la zona. Para el método se han utilizado niveles estáticos de campañas de medición realizadas en 2021, precipitación y mapas temáticos de la cuenca del río Rocha, un DEM ASTER de 30 m para obtener las pendientes, e insumos generados en una modelación hidrogeológica realizada en la zona. El mapa de tipo de suelo según la textura se ha combinado con un mapa actualizado de uso de suelo para definir las zonas impermeables (mancha urbana) y de intensa producción agrícola. Los atributos de estos factores fueron reclasificados y finalmente combinados utilizando herramientas SIG, donde a cada factor se le ha asignado un peso de acuerdo a su grado de importancia, considerando cuatro escenarios para el presente estudio.

El primer escenario parte de la hipótesis de que todos los factores tienen el mismo grado de importancia. En cambio, para el segundo escenario se ha utilizado los pesos de bibliografía. Para el tercer escenario se ha incrementado en 1 a los factores de suelo y topografía y finalmente para el cuarto escenario se ha incrementado en 1 sólo el factor suelo. Se ha observado que las vulnerabilidades mantienen la misma ubicación variando en la extensión, excepto en el escenario 1 donde no existe vulnerabilidad Muy Alta en la parte central, pero si existe Mínima en la zona sureste y en el escenario 3 existe una gran extensión de vulnerabilidad Muy Alta en la parte central.

En base al análisis de escenarios, se ha determinado que al norte predomina una vulnerabilidad Media Alta por ser una zona de recarga por la presencia de abanicos y depósitos aluviales y presentar niveles profundos (cerca de los 30 m.).

En la parte central, se ha identificado vulnerabilidad Alta a Muy Alta debido a la presencia de pozos surgentes (ver superposición de pozos en los escenarios en la Figura 4), abanicos aluviales y zonas de agricultura, lo cual demuestra que los factores: profundidad del nivel estático (D), Geología del Acuífero (A), Impacto en la zona vadosa (I) y Tipo de suelo (S) tienen gran influencia. Esto respalda los supuestos del método que indica que el contaminante es introducido por la superficie de la tierra y es móvil en el agua, por tanto, se evidencia altas vulnerabilidades. Esto implica la necesidad de dar prioridad a esta zona para evitar posibles contaminaciones de los acuíferos.

La parte sur se ha identificado como una de vulnerabilidad Baja a Media Baja, por la presencia de acuíferos confinados, ser una zona de descarga, niveles de agua profundos y zonas urbanas (impermeables), considerando que uno de los supuestos del método es que el contaminante ingresa por la recarga de la precipitación. En los Escenarios 3 y 4 se observa que la Topografía influye en cierta medida al ser una zona plana, apareciendo en menor extensión vulnerabilidad Media Alta en la esquina sureste e incrementando la Baja en el Escenario 3 y reduciendo la Muy Baja.

Al suroeste, en todos los escenarios, se observa que existe normalmente una vulnerabilidad Baja a Media Baja (y en menor extensión Media Alta al incrementar la topografía en el Escenario 3). Esta sección se ha visto afectada principalmente por: los niveles medidos son bajos debido a la presencia de acuíferos confinados, al igual de ser una zona influenciada parcialmente por una zona urbana impermeable, razón por la cual, salen vulnerabilidades bajas.

El escenario 1, respalda todas estas afirmaciones ya que, asignando el mismo peso a todos los factores, la tendencia a la vulnerabilidad (excepto la Muy Alta), se mantiene en las mismas ubicaciones, concluyendo que los factores analizados por zona son influyentes en estas y en cambio los otros no tienen mucha influencia. Sin embargo, el hecho que exista una vulnerabilidad baja no implica que no exista contaminación. Por tanto, se recomienda validar el análisis con estudios hidrogeoquímicos, especialmente a las zonas de mayor vulnerabilidad, para identificar presencia de contaminantes, los cuales pueden servir de insumos para un modelo numérico, al igual que elaborar planes de gestión. También se recomienda replicar en otras zonas con gran interés en la explotación de acuíferos.

## REFERENCIAS

- [1] J. E. Cabrera, A. Alarcon, H. Terraza, D. Maleki, and S. Lew, "Plan de acción: Área metropolitana de Cochabamba sostenible," ICES - Banco Interamericano de Desarrollo, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1673.4961>.
- [2] Instituto Nacional de Estadística (INE), "Proyecciones de Población, Revisión 2020," Población y Hechos Vitales. [Online]. Available: <https://www.ine.gob.bo/index.php/censos-y-proyecciones-de-poblacion-sociales/>
- [3] Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba (GADC), and Servicio Departamental de Cuencas (SDC), "Formulación y Actualización del Plan Director de la cuenca del río Rocha, bajo un enfoque de adaptación y Cambio Climático," 2018. [Online]. Available: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2020/02/resumen-ejecutivo-r%C3%ADo-rocha.pdf>.
- [4] L. Rosales, O. C. Saavedra, and W. Soruco, "Modelación hidrológica en un abanico aluvial de Cochabamba-Bolivia," *Investig. Desarro.*, vol. 20, no. 1, pp. 51-66, Jul. 2020. doi: 10.23881/idupbo.020.1-4i.
- [5] S. Renner and C. Velasco, "Geología e hidrología del Valle Central de Cochabamba," Servicio Nacional de Geología y Minería (Bolivia), 2000.
- [6] B. López, L. Rosales, and O. Saavedra, "Modelación hidrogeológica en el Valle Central de Cochabamba-Bolivia," *Investigación & Desarrollo*, vol. 23, no. 1, Jul. 2023. doi: 10.23881/idupbo.023.1-2i.
- [7] M. Albinet and J. Margat, "Groundwater pollution vulnerability mapping," *Bull. Bur. Res. Geol. Min.*, vol. 3, pp. 13-22, 1970.
- [8] I. Árcega, E. Otazo, E. Galindo, O. Acevedo, and C. Romo, "Determinación del índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 7, pp. 39-49, 2015.

- [9] A. Barbulescu, "Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: A review," *Water*, vol. 12, no. 5, p. 1356, May 2020. doi: 10.3390/w12051356.
- [10] L. Aller and J. Thornhill, "DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings," Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, 1987.
- [11] National Research Council (NRC), "Ground water vulnerability assessment: Predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty," National Academies Press, 1993.
- [12] L. Aller, T. Bennett, J. H. Lehr, R. J. Petty, and G. Hackett, "DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings," Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1987.
- [13] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), "Información Nacional de Datos Hidrometeorológicos - INADHI," [Online]. Available: <https://senamhi.gob.bo/index.php/sysparametros>. Accessed: Oct. 29, 2023.
- [14] Universidad Privada Boliviana (UPB), "Estación Meteorológica UPB," [Online]. Available: <http://weatherst.lrc.upb.edu/>. Accessed: Oct. 29, 2023.
- [15] U.S. Geological Survey (USGS), "ASTER Mount Gariwang image from 2018," 2018. [Online]. Available: [https://lpdaac.usgs.gov/user\\_resources/data\\_in\\_action/aster\\_ultimate\\_2018\\_winter\\_olympics\\_observer](https://lpdaac.usgs.gov/user_resources/data_in_action/aster_ultimate_2018_winter_olympics_observer). Accessed: Oct. 29, 2023.
- [16] S. M. Shirazi, H. M. Imran, and S. Akib, "GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: a review," *J. Risk Res.*, vol. 15, no. 8, pp. 991-1011, Sep. 2012. doi: 10.1080/13669877.2012.686053.
- [17] F. A. L. Pacheco, L. M. G. R. Pires, R. M. B. Santos, and L. F. Sanches Fernandes, "Factor weighting in DRASTIC modeling," *Sci. Total Environ.*, vol. 505, pp. 474-486, Feb. 2015. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.09.092.
- [18] K. Musálem, M. McDonald, F. Jiménez, and R. Laino, "Mapeo de la vulnerabilidad del agua subterránea en dos cuencas afectadas por la represa Yacyreta en Paraguay," *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 6, no. 6, pp. 49-61, 2015.