

Vulnerabilidad intrínseca de acuíferos. Estudio de Caso: Huerta Mayu, Cochabamba, Bolivia

Intrinsic vulnerability of aquifers. A Case Study: Huerta Mayu, Cochabamba, Bolivia

Galo Osvaldo Muñoz Vásquez^{1, *}, José Carlos Chambi Gonzales²

*Correo de correspondencia: g.munoz@umss.edu

Resumen

El estudio evalúa la vulnerabilidad intrínseca del acuífero freático en Huerta Mayu, Cochabamba, mediante el método paramétrico DRASTIC. Los resultados (índices 91-127) identifican zonas de vulnerabilidad moderada al norte y este, y baja al sur. Se determinó que la vulnerabilidad está controlada principalmente por la geología local, la diferencia entre depósitos aluviales permeables al norte y materiales más finos al sur, así como por la profundidad del nivel freático.

Estos hallazgos permiten la generación de mapas de riesgo al integrar vulnerabilidad y amenaza, facilitando la identificación de sectores críticos para la recarga hídrica. La delimitación de estas áreas podrá fundamentar propuestas de gestión técnica y ambiental orientadas a la planificación del uso del suelo y la conservación del recurso subterráneo.

Palabras clave: vulnerabilidad, DRASTIC, acuíferos.

Abstract

This study assessed the intrinsic vulnerability of the phreatic aquifer in Huerta Mayu, Cochabamba, using the DRASTIC method. Results (indices 91-127) identified moderate vulnerability zones in the north and east, and low vulnerability in the south. Vulnerability was determined to be primarily controlled by local geology—distinguishing between permeable alluvial deposits in the north and finer materials in the south—as well as by the depth to the water table. These findings enable the generation of risk maps by integrating vulnerability and hazards, facilitating the identification of critical groundwater recharge sectors. The delimitation of these areas could be a good support for technical and environmental management proposals aimed at land-use planning and groundwater resource conservation.

Keywords: Vulnerability, DRASTIC, aquifers.

1. Introducción

El agua es una necesidad fundamental para el desarrollo de las actividades domésticas, agrícolas y económicas. En zonas donde la oferta del agua superficial es escasa, las aguas subterráneas resultan una opción confiable, desempeñando un papel crucial ante el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial con el objetivo de mantener la sostenibilidad, la protección y la distribución equitativa del recurso hídrico (Das, 2023). No obstante, una débil gestión y la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos pueden tener graves consecuencias, como la contaminación del suelo y el agua, el agotamiento del agua subterránea, y el hundimiento de suelos (F. J. Chang et al., 2017). El hundimiento del suelo, atribuido principalmente a la extracción de aguas subterráneas (Poland & Davis, 1969), ha impactado numerosas regiones en el mundo, incluyendo casos notorios como el Valle de San Joaquín en California (Galloway et al., 2008), y grandes urbes como Beijing (Zhu et al., 2015), Shanghai (Shi et al., 2008) y Ciudad de México (Ortiz-Zamora & Ortega-Guerrero, 2010).

Por otra parte, la presión sobre los recursos hídricos subterráneos es especialmente crítica en regiones con climas áridos y semiáridos (Watto & Mugerá, 2016), (Shiferaw, 2021) donde la demanda de agua para la agricultura ha

¹ Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0008-2232-0562>

² Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0003-5375-6629>

impulsado una explotación insostenible de los acuíferos. Esta situación no es ajena a Cochabamba, Bolivia, una región climatológicamente semiárida y vulnerable a las sequías. El crecimiento de la población y el desarrollo urbano no planificado han llevado a la proliferación de pozos y a la sobreexplotación de las aguas subterráneas en el Valle de Cochabamba, superando la capacidad de recarga del acuífero (Stockholm Environment Institute US CENTER, 2019). Un área representativa de esta problemática es Huerta Mayu, una zona agrícola de 17 hectáreas ubicada en la parte oriental del Valle de Cochabamba. El área está delimitada al sur por las serranías del cerro San Pedro y que enfrenta la presión de la expansión urbana desde el oeste y el norte. Su vocación agrícola ha resultado en una alta densidad de pozos excavados para la extracción de agua desde un acuífero freático (o no confinado) que yace a poca profundidad. Se postula que la recarga principal del acuífero proviene de la infiltración de agua de lluvia y del flujo subsuperficial del río Wara Wara, originado en la Cordillera del Tunari (Muñoz Vásquez & Pérez Mercado, 2024). Fuentes de recarga adicionales incluyen el retorno de riego de las parcelas agrícolas hacia el subsuelo con el riesgo de introducir contaminantes como pesticidas (Salas García, 2025). Otra fuente adicional de degradación potencial de la calidad del agua del acuífero es la infiltración de las aguas contaminadas desde río Rocha hacia el acuífero. Esta interacción con potenciales fuentes puntuales y difusas de contaminación (Foster, 1987) (Toledo Medrano & Amurrio Derpic, 2006), unida a una sobreexplotación que amenaza el agotamiento del acuífero, compromete el desarrollo agrícola y la seguridad alimentaria de la zona. Dada la interacción de estos factores de riesgo, es necesario implementar medidas de mitigación y preservación del recurso hídrico subterráneo (Stockholm Environment Institute US CENTER, 2019).

Una herramienta analítica apropiada para abordar la aptitud natural del acuífero a ser dañado es la evaluación de la vulnerabilidad hidrogeológica intrínseca del sistema. Las evaluaciones de vulnerabilidad describen los estados de susceptibilidad al daño a acuíferos ayudando a identificar zonas de alto o bajo riesgo, aspecto que permite formular estrategias de mitigación ante amenazas de contaminantes. Existen diversos métodos paramétricos para mapear la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, tales como GOD (Foster, 1987), DRASTIC (Foster, 1987), EPIK (Doerflinger et al., 1999) y SINTACS (Civita & Maio, 2004). Cada uno de los métodos tiene ventajas y desventajas de aplicación; por ejemplo, GOD es aplicado en estudios preliminares de vulnerabilidad a escala regional y por ello emplea únicamente tres variables hidrogeológicas (tipo de acuífero, litología de la zona no saturada y la profundidad del agua) siendo útil para evaluaciones preliminares. El método DRASTIC es el método más utilizado y validado mundialmente; emplea siete factores hidrogeológicos tanto externos como intrínsecos a la constitución del subsuelo. De la aplicación de este método en el Valle de Cochabamba se tiene resultados alcanzados en la zona de Vinto – Sipe Sipe (Zurita, 2007) y La Mayca (Gonzales, 2007) o, como las de (Gonzales Amaya et al., 2018; Rosales et al., 2024) que evaluaron la vulnerabilidad del acuífero de Punata. El método EPIK está exclusivamente concebido para su utilización en acuíferos cársticos que no están presentes en las formaciones geológicas del Valle de Cochabamba.

El objetivo del estudio, es evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero freático de Huerta Mayu, aplicando la metodología paramétrica DRASTIC (Aller et al., 1987). Los hallazgos de esta investigación están destinados a proporcionar una base cartográfica para la gestión del acuífero y para el desarrollo de estrategias de prevención de la contaminación.

2. Material y métodos

La investigación se desarrolló en el área agrícola de Huerta Mayu. Esta zona se ubica en el límite entre los municipios de Cochabamba y Sacaba. Huerta Mayu es una comunidad agrícola enclavada al pie de la serranía del Cristo de la Concordia en la ciudad de Cochabamba. La comunidad se halla a tres cuadras al sur de la rotonda del Servicio de Caminos (SEDCAM) y cuatro cuadras al este del Puente Siles sobre el río Rocha. Las siguientes son las coordenadas de ubicación general: zona 19 K; 805147 Este y 8076102 Sur; su elevación promedio es de 2 590 msnm.

Huerta Mayu queda situada a la vera del río Rocha, a corta distancia de la confluencia con el río Wara Wara y es parte de su abanico aluvial. En general, subsuelo está conformado por material grueso apto para la infiltración. No obstante, el suelo superficial ha sido acondicionado para las prácticas agrícolas obteniéndose un huerto de provisión de vegetales para los mercados de la ciudad. Huerta Mayu cuenta con una densidad considerable de pozos excavados, todos ellos destinados a la provisión de agua para riego suplementario en momentos de estrés hídrico, pues el resto del tiempo, el agua para riego proviene de tres pozos profundos en la zona.

Según el Plan Director de la Cuenca del Río Rocha (Stockholm Environment Institute US CENTER, 2019), el subsuelo de Huerta Mayu está formado por depósitos lacustres en la parte norte y material aluvial al sur. La recarga al sistema hidrogeológico es compleja y no está completamente comprendida. Se disponen de indicios que parte del agua subterránea llega a través de antiguos cauces del río Wara Wara que confluye hacia el río Rocha; esta agua es de buena calidad y se manifiestan sus excesos a través de vertientes y humedales durante la época de lluvias (Muñoz Vásquez & Pérez Mercado, 2024). La otra fuente la constituiría el flujo del agua contaminada que desde el río Rocha se infiltra a través su lecho y alcanza el acuífero freático (Toledo Medrano & Amurrio Derpic, 2006). La tercera fuente es el agua empleada para el riego de las parcelas y que por infiltración llega al mismo acuífero. Esta agua puede acarrear elementos químicos de los pesticidas empleados en la agricultura (Salas García, 2025). La posibilidad y el riesgo de que estos elementos contaminantes alcancen el acuífero dependerá de la facilidad que presenten las capas del subsuelo para la movilidad del agua y los solutos, es decir, suelos con baja permeabilidad se constituirán en una capa protectora que retarde o detenga en tránsito de solutos; suelos con textura liviana serían propicios para facilitar la degradación de la calidad del agua; pero por otra parte, también dependerá de las características individuales de cada soluto para moverse en los tipos de suelo. Uno de los primeros pasos en la gestión de protección de los recursos hídricos subterráneos es la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos, como una propiedad intrínseca que determina su sensibilidad a ser afectado negativamente por los contaminantes (Martínez et al., 1998). Esta investigación aplica la metodología DRASTIC para estudiar la vulnerabilidad del acuífero bajo Huerta Mayu.

Método de evaluación de vulnerabilidad: DRASTIC

Las metodologías para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos buscan definir las características intrínsecas del sistema (acuífero y capas suprayacentes) que controlan el transporte y la atenuación de contaminantes. El método paramétrico DRASTIC evalúa el potencial de contaminación a partir de siete variables hidrogeológicas. Los parámetros del método son: D (Depth to water): profundidad del agua subterránea; R (Net recharge): recarga efectiva; A (Aquifer media): medio poroso que conforma el acuífero; S (Soil media): medio poroso de la capa de suelo más superficial del terreno (horizonte A); T (Topography): la inclinación topográfica del terreno; I (Impact of the vadose zone): tipo de material geológico que se encuentra debajo de la capa de suelo y por encima del acuífero; C (Conductivity): conductividad hidráulica del acuífero.

El método DRASTIC funciona como un modelo de suma ponderada. A cada uno de los siete parámetros se le asigna un valor numérico en una escala del 1 al 10, donde valores más altos indican una mayor vulnerabilidad. Además, cada parámetro tiene un peso relativo asignado según su importancia. El índice de vulnerabilidad DRASTIC final se calcula multiplicando el valor de cada parámetro por su peso y sumando los resultados. La ecuación 1 presenta la estructura de los parámetros y los pesos relativos (Aller et al., 1987).

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

Los valores del índice resultante, que generalmente varían entre 50 y 200, se clasifican en categorías de vulnerabilidad (baja, moderada, alta, etc.) para facilitar la interpretación y la creación de mapas de vulnerabilidad. La Tabla 1 presenta los valores aceptados para los parámetros asociados con la naturaleza del medio poroso del suelo, el acuífero y de la zona vadosa.

Tabla 1

Valores de los parámetros del DRASTIC asociados con el medio poroso de subsuelo

Parámetro A		Parámetro S		Parámetro I	
Litología del acuífero	Rango	Suelo superficial	Rango	Zona no saturada	Rango
Pizarra masiva	2	Fina o ausente, grava	10	Caliza kárstica	10
Metamórfica/ígneas	3	Arenisca y turba volcánica	9	Basalto	9
Metamórfica/ígneas meteorizadas	4	Turba	8	Arena y grava	8
Arenas y gravas de origen glacial	5	Arcilla agregada, aluvión	7	Grava, arena	7
Secuencias de arenisca, caliza y pizarras	6	Franco arenoso, pizarra, arena	6	Caliza, grava, arcilla arenosa	6
Arenisca maciza	6	Franco	5	Limo arenoso	5
Caliza maciza	6	Franco limoso	4	Grava y arenisca metamórfica	4
Arena o grava	8	Franco arcilloso	3	Pizarra, limo y arcilla	3
Basaltos	9	Granitoide	2	Arcilla limosa	2
Caliza kárstica	10	Arcilla sin contracción ni agregados	1	Capa confinante, granito	1

(Aller et al., 1987; Vargas Quintero, 2010)

La Tabla 2 presenta los valores de los parámetros complementarios para conformar el índice DRASTIC de la vulnerabilidad de un acuífero.

Tabla 2

Valores de los parámetros complementarios del método DRASTIC

Parámetro D		Parámetro T		Parámetro C		Parámetro R	
Profundidad del agua (m)	Rango	Pendiente topográfica (%)	Rango	Conductividad Hidráulica (m/d)	Rango	Recarga (mm)	Rango
0 a 1.5	10	0 a 2	10	0.04 a 4.08	1	0 a 50	1
1.5 a 4.6	9	2 a 6	9	4.08 a 12.22	2	50 a 103	3
4.6 a 9.1	7	6 a 12	5	12.22 a 28.55	3	103 a 178	6
9.1 a 15.2	5	12 a 18	3	28.55 a 40.75	6	178 a 254	8
15.2 a 22.9	3	>18	1	40.75 a 81.49	8	> 254	9
22.9 a 30.5	2			> 81.49	10		
> 30.5	1						

(Aller et al., 1987; Auge, 2007; Vargas Quintero, 2010)

El Laboratorio de Hidráulica realizó un estudio geoelectrico para conocer la configuración de los estratos bajo la superficie, pues ellos son el medio por donde transita la humedad proveniente del riego y la lluvia logrando alcanzar el nivel freático. La resistividad de los suelos tiene un amplio margen de variación lo que implica que pueden interpretarse diferentes tipos de suelo para un mismo valor de resistividad. La identificación completa se apoya en información complementaria de calicatas, perfiles estratigráficos, análisis de muestras de suelo y la experiencia del geólogo.

El equipo ABEM Terrameter LS de industria sueca fue empleado para realizar el estudio geoelectrico. Se tendieron 17 segmentos longitudinales de líneas de corriente que cubrieron toda el área de interés. Los valores registrados de resistividad abarcan un rango de resistividades entre 10 – 1000 Ohm-m. Los valores de 10 – 100 Ohm-m representan

suelos finos como limos y arenas con y sin presencia de humedad. Los valores de 100 – 400 Ohm-m indican una mezcla de arenas y gravas con un poco de finos. Finalmente, valores encontrados mayores a 400 Ohm-m representan el material grueso como gravas, bolones y rocas.

Se han practicado calicatas en diversos sitios de las parcelas agrícolas a fin de identificar y confrontar los horizontes de suelo obtenidos en el estudio geoeléctrico. El reconocimiento visual de los estratos y el análisis de laboratorio de las muestras de suelo extraídas de ellos, permitieron conocer la secuencia de horizontes de suelo: se identificó una capa superficial de suelo arable caracterizado como suelo franco; por debajo de él, un horizonte de suelo franco arenoso, seguido de un suelo franco arenoso y un estrato de material más fino. Las muestras de suelos fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la UMSS.

El valor de los parámetros que definen el índice DRASTIC fueron determinados en función a un trabajo de campo que se extendió durante los años 2023 a 2024, en el marco de la investigación “Estudio del intercambio de agua y contaminantes del río rocha con el acuífero freático de Huerta Mayu, empleando modelación matemática” realizado por el LHUMSS y el C.A.S.A de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UMSS (Muñoz Vásquez & Pérez Mercado, 2024). Los valores son:

Parámetro Depth (D):

Corresponde a la distancia vertical desde la superficie hasta el nivel freático. Este parámetro es crítico, ya que una mayor profundidad implica un mayor tiempo de viaje del contaminante a través de la zona no saturada. Esto aumenta la probabilidad de que procesos de atenuación natural, como la filtración, sorción y biodegradación, reduzcan la concentración del contaminante antes de que alcance el acuífero (Auge, 2007). Por el contrario, un nivel freático somero reduce el tiempo de atenuación y eleva el riesgo de contaminación. En el caso de Huerta Mayu y como resultado del monitoreo quincenal de casi dos años, de la profundidad de agua en los pozos excavados, ha constatado que la profundidad de agua fluctúa entre los 0.3 a 5 m. El primer valor es representativo de la zona norte de Huerta Mayu, mientras que el segundo corresponde a la parte sur. La Figura 1 muestra el mapa de Huerta Mayu una vez que han sido valorados por sectores y las ponderaciones que les correspondiese según el método DRASTIC para la profundidad.

Parámetro Net Recharge (R)

Es la cantidad total de agua por unidad de área que se infiltra a través de la superficie y llega efectivamente al acuífero. Proviene principalmente de la precipitación, pero también puede incluir el riego o las fugas de infraestructuras. La recarga es el vehículo de transporte para los contaminantes desde la superficie hasta el acuífero. El agua de recarga es el agente que lixivia los contaminantes de las capas superficiales del suelo y los transporta verticalmente a través de la zona vadosa. Una mayor cantidad de agua de recarga significa un mayor potencial de transporte. La recarga efectiva al acuífero freático de Huerta Mayu fue calculada utilizando el modelo matemático HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) (Schroeder, 1994) para ello se utilizaron los registros mensuales de 10 años de precipitación en las estaciones meteorológicas del Laboratorio de Física de la UMSS y la información de suelos obtenida en este estudio. La recarga efectiva calculada fue de 41 a 64 mm. La Figura 2 muestra la variación espacial de la valoración de la recarga efectiva según el método DRASTIC.

Figura 1
Parámetro D de la profundidad

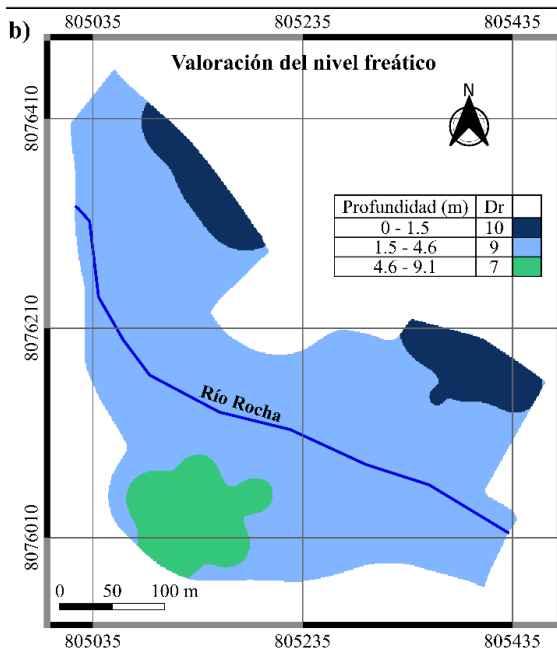
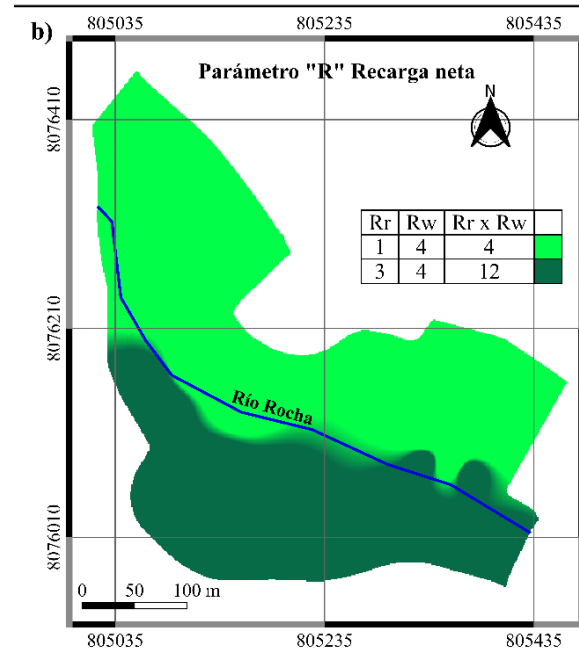


Figura 2
Parámetro R de la recarga efectiva



Parámetro Acuífer media (medio poroso del acuífero)

Describe la naturaleza del material geológico que compone la zona saturada del acuífero (suelo o roca) en que el agua está almacenada y se mueve. Expresa la capacidad del acuífero para almacenar y transmitir agua, y la facilidad y la velocidad con la que un contaminante puede dispersarse una vez que ha llegado al agua subterránea. Un material muy permeable permite que el contaminante se difunda rápidamente y se extienda ampliamente. Un material menos permeable confina el contaminante y ralentiza su avance. El acuífero freático de Huerta Mayu está constituido para material aluvial gravo arenoso a franco arenoso, según la prospección geofísica realizada.

Parámetro Soil media (tipo de suelo)

Este parámetro se refiere a la capa más superficial del terreno, la cubierta edáfica que se encuentra justo debajo de la superficie. Esta es la capa en la que se desarrolla la actividad biológica (raíces y microorganismos) y está sujeta a procesos de meteorización. Es la capa que controla la cantidad de agua y contaminantes disueltos que se infiltran hacia las capas inferiores.

En Huerta Mayu, esta capa está constituida por suelo agrícola especialmente preparado cuya textura corresponde a suelo franco. En la parte norte del sitio de estudio, el suelo exhibe una textura más gruesa entre arenas a limo arenosa; mientras que en la parte sureña el material es más fino siendo limo arcilloso. La zona radicular, dependiendo del cultivo, se extiende a una profundidad de hasta 90 cm. La Figura 4 presenta la variación del tipo de suelo valorado según la metodología DRASTIC.

Parámetro T (Pendiente topográfica)

Se refiere este parámetro a la pendiente o relieve de la superficie del terreno. Dependiendo de la inclinación del suelo, el agua de lluvia o de riego permanecerá en la superficie el tiempo suficiente para infiltrarse o si, por el contrario, se convertirá rápidamente en escorrentía superficial. Cuando el terreno es casi llano o con pendientes pequeñas, el agua tiende a acumularse y moverse lentamente sobre la superficie, lo que maximiza el tiempo

disponible para la infiltración. En terrenos con pendientes pronunciadas, el agua fluye rápidamente como escorrentía, reduciendo la cantidad que se infiltraría. El terreno de Huerta Mayu es relativamente llano. Gran parte de él está conformado por parcelas sobre las que se riegan por el método de inundación o por surcos, de esa manera el agua tiene mayor oportunidad de infiltrarse. Las otras áreas que no son de cultivo, las constituyen los caminos, sendas y techos de viviendas sobre las cuales solo incide el agua de lluvia. El relevamiento topográfico realizado muestra pendientes dominantes menores al 2%. La Figura 4 muestra la variación del parámetro T según el método DRASTIC.

Figura 3

Parámetro S del tipo de suelo

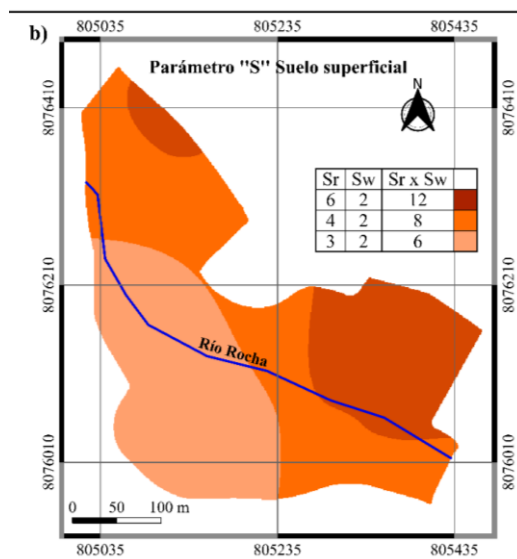
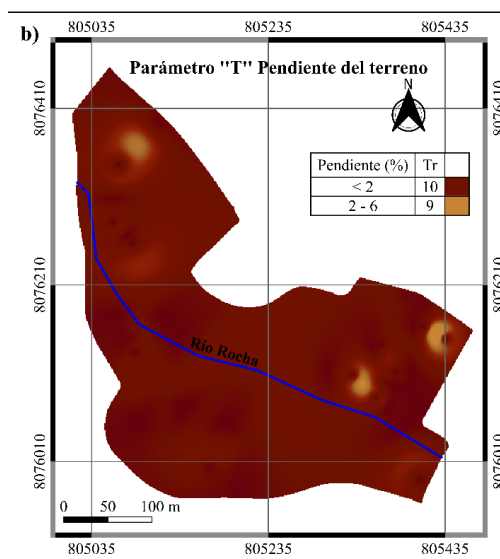


Figura 4

Parámetro T de la pendiente del terreno



Parámetro I (Impacto de la zona vadosa)

Se refiere al material geológico que se encuentra debajo de la capa de suelo y por encima del nivel freático. Su función es controlar el tiempo de viaje y la atenuación del contaminante una vez que ha pasado la capa de suelo. La naturaleza de esta zona vadosa condicional el tiempo de residencia del agua y contaminantes en su viaje vertical al acuífero; un material permeable permitirá un paso rápido mientras que un material poco permeable demorará significativamente el flujo de agua dando mayor oportunidad a que desarrollen los procesos naturales de atenuación. En Huerta Mayu la zona vadosa está conformada, en general, por un horizonte franco al que le subyace un horizonte franco arenoso, debajo de él un horizonte franco limoso que confinare el acuífero freático; le sucede una capa de limo y nuevamente un suelo franco arenoso que conforma el acuífero libre. En la parte norte, los suelos son más granulares que los de la zona sur en los que se evidencia mayor presencia de finos. La Figura 5 exhibe la variación espacial del parámetro I en Huerta Mayu, según el método DRASTIC.

Parámetro C (Conductividad hidráulica)

Este parámetro expresa la capacidad de un material del acuífero para transmitir agua. Aunque está intrínsecamente relacionada con el parámetro "Acuífer media" (A), este parámetro es un valor numérico específico que define la velocidad del flujo subterráneo y la posibilidad del ritmo al que se extendiera una pluma de contaminación si alcanza el acuífero. Para la determinación de la conductividad hidráulica en Huerta Mayu, se realizaron ocho ensayos de

infiltración empleando el método de la doble anillas y pruebas de recuperación en los pozos de la zona. Los valores de conductividad hidráulica son más altos en la zona norte (40 m/día) y menores en la zona sur (0.9 m/día) del área de estudio. La Figura 6 muestra la distribución del factor C en el mapa de la zona.

El índice de vulnerabilidad DRASTIC final se calculó como un modelo de suma ponderada, según la Ecuación 1 y los pesos relativos presentados en la Tabla 3.

Figura 5
Parámetro I del impacto de la zona vadosa

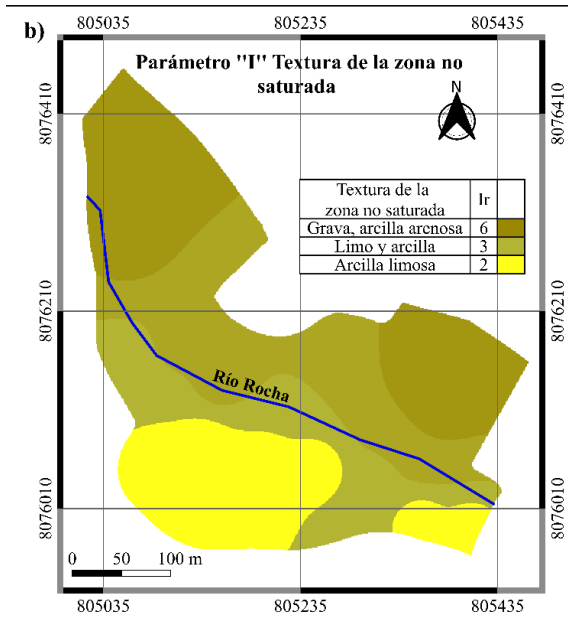


Figura 6
Parámetro C de la conductividad hidráulica

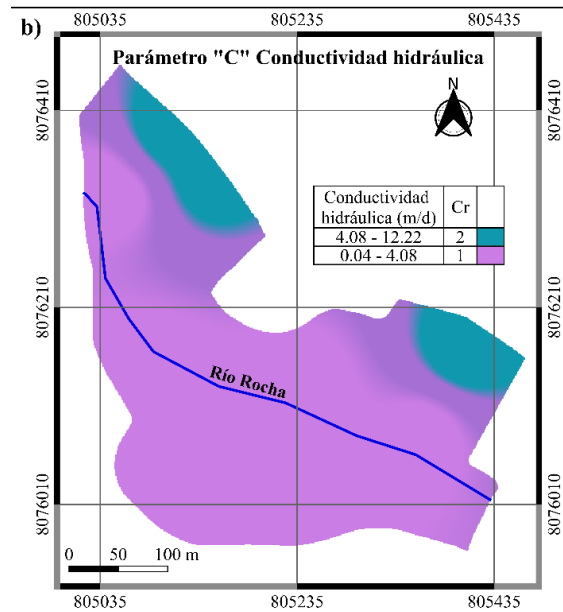


Tabla 3

Factores de ponderación (peso relativo) de los parámetros del método

Profundidad	Recarga neta	Medio Acuífero	Tipo suelo	Topografía	Impacto zona vadosa	Conductividad hidráulica
D	R	A	S	T	I	C
5	4	3	2	1	5	3

(Aller et al., 1987)

Se utilizó Google AI Studio para la revisión lexicográfica de la redacción del texto de este artículo y los autores asumen la responsabilidad total de los contenidos de la publicación.

4. Resultados y discusión

La Figura 7 muestra los valores del índice DRASTIC resultante; estos valores se enmarcan entre 91 y 127. La Figura 8 presentan al grado de vulnerabilidad según el índice DRASTIC encontrado. La vulnerabilidad para Huerta Mayu distingue a la zona en dos sectores: la parte norte y la parte este son calificadas de moderada vulnerabilidad, mientras que la parte más sureña se cataloga como de baja vulnerabilidad.

Figura 7
Mapa del índice de vulnerabilidad

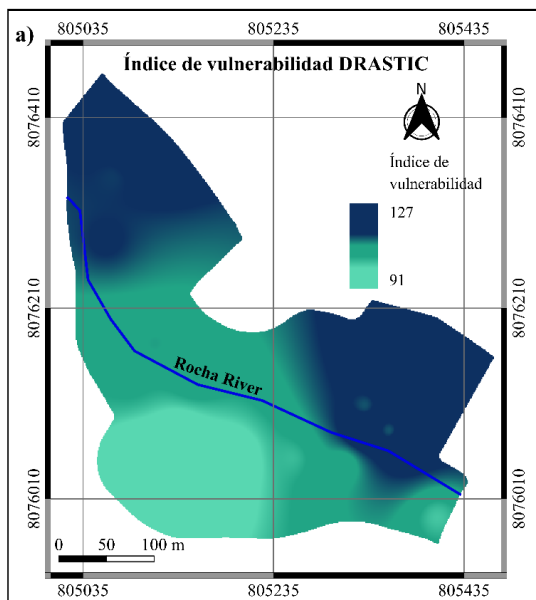
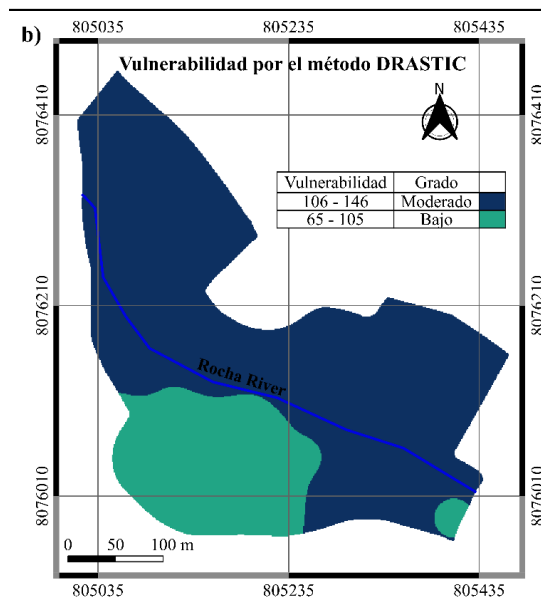


Figura 8
Vulnerabilidad según DRASTIC



A pesar de la reducida extensión del área de estudio (17 ha), se identificaron dos zonas con grados de vulnerabilidad distintos. Este hallazgo se entiende si uno toma en cuenta la historia geológica del Cuaternario y la configuración de la red de drenaje local, elementos que han modelado las características hidrogeológicas del subsuelo. El mapa geomorfológico del Valle de Cochabamba identifica suelos de origen lacustre en la zona norte de Huerta Mayu mientras que, al sur, suelos aluviales al pie de la serranía del Cristo de la Concordia (Renner & Velasco, 2000). Por el análisis granulométrico de los suelos y los niveles de agua en los pozos y por las conductividades eléctricas medidas, se puede afirmar la existencia de dos acuíferos. Uno en la parte norte y otro en la parte sur. Se infiere que el acuífero freático norte, de mayor vulnerabilidad, está asociado a un paleocauce del río Wara Wara. Este antiguo curso, con depósitos aluviales más gruesos y permeables, seguiría funcionando como una vía preferencial para el flujo subterráneo proveniente del subálveo del Wara Wara. Esta hipótesis es respaldada por la presencia de vertientes estacionales en la zona norte, que manifiestan el carácter somero del acuífero durante la época húmeda. En contraste, la zona sur de baja vulnerabilidad se caracteriza por la presencia de materiales de origen lacustre, más finos y menos permeables, y una mayor profundidad del nivel freático, que en conjunto actúan como una barrera protectora más eficaz contra la infiltración de contaminantes. Los pozos excavados exhiben presencia de agua con variaciones próximas a un metro entre meses húmedos y lluviosos. Por otra parte, y conforme la información de los lugareños, en las faldas de la serranía del Cristo de la Concordia durante los meses de lluvia, se observan el alumbramiento de algunas vertientes pero que tienen presencia efímera pues desaparecen en los meses secos; el agua en los pozos excavados, de esta zona sur, está en torno a una profundidad de cinco metros pero que se agotan en la época de estiaje. La calidad del agua declina espacialmente, observándose lecturas de conductividad eléctrica tres veces mayor valor que en la zona norte. Se deduce que el agua subterránea en esta parte sur proviene de las fracturas en el macizo rocoso, el escurrimiento del agua de lluvias sobre las faldas del cerro y en menor grado, por la recarga debido al riego excedente en las parcelas. La textura del subsuelo es franco a franco limoso; por encima de él se halla el suelo agrícola, un suelo especialmente acondicionado por los agricultores para mejorar su textura y favorecer la retención de agua y humedad. Este aspecto reduce su conductividad hidráulica constituyendo una

primera barrera para la infiltración y protección del acuífero. Se entiende que este horizonte de suelo protege a los acuíferos del norte y del sur, pero la profundidad del nivel freático es mucho menor en el norte que en el sur. Estos elementos y la textura de los suelos, permiten explicar los dos valores de vulnerabilidades encontrados.

Debe tenerse en cuenta que la vulnerabilidad hallada para Huerta Mayu en esta investigación está referida a la posibilidad de la afectación por agua de lluvia y el riego en las parcelas, pero no así, a la posibilidad de que el acuífero freático pueda ser degradado por el flujo de solutos desde el río Rocha hacia el sistema subterráneo. Los resultados encontrados con DRASTIC se los considera consistentes con estudios realizados en otras zonas del Valle de Cochabamba; por ejemplo, en el caso de la determinación de la vulnerabilidad en el sistema hidrogeológico de Vinto Sipe Sipe (Zurita, 2007) indica una vulnerabilidad media general, pero en sitios particulares, una vulnerabilidad alta. Se atribuye aquello a la ponderación inducida por la textura de suelos gruesos (gravas gruesas y arenas) que son depositados por las quebradas que descienden con alta pendiente de la cordillera del Tunari. Así mismo el estudio de vulnerabilidad llevado adelante en la zona de La Maica (Gonzales, 2007) caracterizada por acuíferos de suelos de textura pesada, reportan vulnerabilidades entre media y baja. En aquel estudio se comparó los resultados de aplicar el método DRASTIC y el método GOD hallándose resultados similares entre ambos, a pesar que DRASTIC fue concebido para análisis detallados mientras que GOD es empleado en etapas iniciales de caracterización de acuíferos.

5. Conclusión

Se concluye que los valores de vulnerabilidad del acuífero freático, a pesar de la reducida extensión del área, explicable por la constitución de los horizontes de suelo resultados de los procesos climáticos desarrollados durante el Cuaternario. La zona noreste de vulnerabilidad moderada se asocia a la reducida profundidad a la que se halla el acuífero freático y al valor de la conductividad hidráulica que exhibe el subsuelo, condiciones que limitan un rápido transporte de contaminantes desde la superficie. En contraste, la zona de baja vulnerabilidad en el sur se caracteriza por la presencia de materiales de origen aluvial, pero con presencia de horizontes de suelo fino depositados durante la fase lacustrina del Valle, aspecto que confiere menor permeabilidad. A ello se suma la mayor la profundidad comparativa a la que se halla el acuífero somero. Por otra parte, el horizonte de suelo agrícola particularmente conformada por los agricultores de Huerta Mayu, se constituye como una barrera protectora eficaz contra la infiltración de contaminantes pero que, a la vez, limita el proceso de infiltración y percolación del agua de lluvia y riego hacia el acuífero somero subyacente. Este último aspecto ha sido estudiado por Salas (2025), encontrándose concordancia la vulnerabilidad y disposición natural que tienen los estratos de Huerta Mayu a ser afectados por la acción antrópica.

Si bien la vulnerabilidad es el primer paso en camino a la protección de los recursos hídricos subterráneos en la zona, se recomienda al Municipio de Sacaba y la Gobernación de Cochabamba que se realicen análisis de presencia de compuestos químicos en perfiles de suelos que permitan corroborar los resultados hallados con DRASTIC, particularmente en el área contigua al río Rocha por la posibilidad de migración de solutos desde el río hacia el acuífero de interés.

Los autores declaran no existir ningún tipo de conflicto de interés en la investigación realizada.

5. Referencias bibliográficas

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. In US Environmental Protection Agency (p. 455).
- Auge, M. (2007). Vulnerabilidad de acuíferos - Conceptos y métodos. CONICET.
- Chang, F. J., Huang, C. W., Cheng, S. T., & Chang, L. C. (2017). Conservation of groundwater from over - exploitation - Scientific analyses for groundwater resources management. *Science of the Total Environment*, 598, 828–838.
- Civita, M., & Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: the Italian combined approach. *Geofísica Internacional*, 43(4), 513–532.
- Das, S. (2023). Groundwater Sustainability, Security and Equity: India Today and Tomorrow. *Journal of the Geological Society of India*, 99(1), 5–8. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2260-x>
- Doerfliger, N., Jeannin, P.-Y., & Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method. *Environmental Geology*, 39, 165–176.
- Foster, S. S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy.
- Galloway, D. L., Bawden, G. W., Leake, S. A., & Honegger, D. G. (2008). Land subsidence hazards. In *Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines: US Geological Survey Open-File Report*.
- Gonzalez A. (2007) “Spatial determination of the phreatic aquifer of La Maica” *International Congress on Development, Environmental and Natural Resources: Multi-level and Multiscale Sustainability. Cochabamba, Bolivia*
- Gonzales Amaya, A., Dahlin, T., Barmen, G., & Rosberg, J.-E. (2018). A geoelectrical and geomorphological based method for groundwater vulnerability assessment in alluvial fans: a case study in the Punata fan (Bolivia).
- Lara, E. L., Simeón, C. P., & Navarro, J. G. M. (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11, 16.
- López Lara, E. J., Posada Simeón, J. C., & Moreno Navarro, J. G. (1998). Los sistemas de información geográfica.
- Martínez, M., Delgado, & Fabregat, V. (1998). Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Jornadas sobre la continuación de las aguas subterráneas*.
- Muñoz Vásquez, G., & Pérez Mercado, L. F. (2024). Estudio del intercambio de agua y contaminantes del río Rocha con el acuífero freático de Huerta Mayu, empleando modelación matemática. *Universidad Mayor de San Simón*.
- Ortiz-Zamora, D., & Ortega-Guerrero, A. (2010). Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, 46(1).
- Poland, J. F., & Davis, G. H. (1969). Land subsidence due to withdrawal of fluids.
- Renner, S., & Velasco, C. (2000). *Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba (Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería, Ed.; Vol. 34). SERGEOMIN*.
- Rosales, L., Saavedra, O., López, B., & Ureña, J. (2024). Evaluación de la vulnerabilidad en pozos del Valle Central de Cochabamba. *Investigación & Desarrollo*, 24(2), 69–78.
- Salas García, B. (2025). Estimación de la recarga al acuífero freático de Huerta Mayu por infiltración de agua de riego, aplicando el modelo Hydrus 1D [Tesis de Licenciatura]. *Universidad Mayor de San Simón*.
- Schroeder, P. R. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3. Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development.
- Shi, X., Wu, J., Ye, S., Zhang, Y., Xue, Y., Wei, Z., Li, Q., & Yu, J. (2008). Regional land subsidence

- simulation in Su-xi-Chang area and Shanghai City, China. *Engineering Geology*, 100(1–2), 27–42.
- Shiferaw, B. (2021). Addressing groundwater depletion: Lessons from India, the world's largest user of groundwater. *Worldbankgroup.Org/Blog/Addressinggroundwater-Depletion-Lessons-India-Worlds-Largest-User-Groundwater*.
- Stockholm Environment Institute US CENTER. (2019). *Formulación y Actualización del Plan Director de la cuenca del Río Rocha, bajo un enfoque de adaptación al cambio climático. Proyecto Piloto de Resiliencia Climática*.
- Toledo Medrano, R., & Amurrio Derpic, D. (2006). Evaluación de la calidad de las aguas del río Rocha en la jurisdicción de SEMAPA en la provincia Cercado de Cochabamba - Bolivia. *Acta Nova*.
- Vargas Quintero, M. C. (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Ed.).
- Watto, M. A., & Mugerá, A. W. (2016). Groundwater depletion in the Indus Plains of Pakistan: imperatives, repercussions and management issues. *International Journal of River Basin Management*, 14(4), 447–458.
- Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193, 243–255.
- Zurita C. (2007) “Evaluación de la vulnerabilidad a contaminación de las aguas subterráneas mediante aplicación de SIG” *International Congress on Development, Environmental and Natural Resources: Multi-level and Multiscale Sustainability*. Cochabamba, Bolivia.