



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagaj.org.ar/>
Viglianchino, L.E., Grondona, S.I., Bedmar, F., Angelini, H.P. y Massone, H.E.

El mapa de vulnerabilidad del acuífero como instrumento de prevención de la contaminación del agua en áreas agrícolas. La cuenca del Arroyo de los Padres (Partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires, Argentina)
e011, <https://doi.org/10.59069/24225703e011>

El mapa de vulnerabilidad del acuífero como instrumento de prevención de la contaminación del agua en áreas agrícolas. La cuenca del Arroyo de los Padres (Partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires, Argentina)

The aquifer vulnerability map as a tool for preventing water contamination in agricultural areas. The case of Los Padres stream basin (General Pueyrredón district, Buenos Aires province, Argentina)

Liliانا Ester Viglianchino^{1*} Sebastián Iván Grondona^{2,3*} Francisco Bedmar^{4*}

Hernán Pablo Angelini¹ Héctor Enrique Massone²

* Contacto

Recibido: 02 de junio de 2023 • Aceptado: 12 de octubre de 2023 • Publicado: 30 de octubre de 2023

Resumen

El objetivo de este trabajo es comparar y evaluar los resultados que brindan cinco metodologías de evaluación de vulnerabilidad del acuífero en un área de actividad agrícola intensiva en el SE bonaerense, cuatro de ellas evalúan vulnerabilidad intrínseca y una específica. El área de estudio es la Cuenca del Arroyo de Los Padres, donde el acuífero Pampeano es la única fuente de agua. Las metodologías utilizadas son Ekv, GOD/GOD-S y DRASTIC/DRASTIC-P. La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero se realizó en entorno ArcGis 10.1. En general, se observó que las zonas más vulnerables coinciden con las zonas bajas de la cuenca, mientras que las zonas menos vulnerables se encuentran en las zonas altas. El método Ekv identifica más del 75% del área de estudio como de "vulnerabilidad moderada", siendo el menos restrictivo y adecuado para una primera aproximación. Las metodologías GOD y GODS muestran un área extensa de "baja vulnerabilidad", destacándose que GODS muestra una vulnerabilidad baja en el 96% del territorio. DRASTIC y DRASTIC-P muestran mayores áreas de "alta vulnerabilidad", siendo estas metodologías las que utilizan más variables y proporcionan resultados más confiables y cercanos a la realidad. En resumen, los métodos DRASTIC y DRASTIC-P son más útiles para la toma de decisiones y la protección del acuífero, ya que consideran variables importantes relacionados con su vulnerabilidad. Estos métodos proporcionan un mejor equilibrio entre incertidumbre y utilidad en la toma de decisiones en la inestabilidad de la misma.

Palabras clave: agua subterránea, lixiviación, calidad.

1 Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

2 Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario. Universidad Nacional de Mar del Plata. Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires.

3 Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Universidad Nacional de Mar del Plata. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

4 Departamento de Producción Vegetal, Suelos e Ingeniería Rural. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata.

Abstract

The objective of this study is to compare and evaluate the results provided by five methodologies for assessing aquifer vulnerability in an area of intensive agricultural activity in southeastern Buenos Aires, four of them assess intrinsic vulnerability and one specific. The study area is the Arroyo de Los Padres Basin, where the Pampeano aquifer is the sole source of water. The methodologies used include Ekv, GOD/GOD-S, and DRASTIC/DRASTIC-P. The aquifer vulnerability assessment was conducted using ArcGIS 10.1 software. In general, it was observed that the most vulnerable zones coincide with the low-lying areas of the basin, while the less vulnerable zones are found in the higher areas. The Ekv method identifies over 75% of the study area as having moderate vulnerability, making it the least restrictive and suitable for initial assessments. The GOD and GODS methodologies show a large area classified as "low vulnerability," with GODS indicating low vulnerability in 96% of the territory. DRASTIC and DRASTIC-P reveal greater areas of "high vulnerability." These two methodologies utilize more variables and provide more reliable and realistic results. In summary, the DRASTIC and DRASTIC-P methods are more useful for decision-making and aquifer protection, as they consider important variables related to vulnerability. These methods offer a better balance between uncertainty and utility in decision-making processes.

Keywords: groundwater, leaching, quality.

INTRODUCCIÓN

El agua se utiliza para la producción de alimentos de diversas maneras, entre las que se pueden incluir la agricultura, la ganadería y la acuicultura. El uso del agua en la agricultura va desde cultivos de secano, que depende de la humedad del suelo generada por las precipitaciones, hasta el riego total (UNESCO, 2021) y constituye, al mismo tiempo una fuente y un receptor de los problemas de la calidad del agua. Durante las últimas décadas, se ha intensificado la producción de alimentos en muchas economías desarrolladas y en rápido crecimiento que luchan por la seguridad alimentaria; esta intensificación implicó altos niveles de uso de fitosanitarios y nutrientes para maximizar los rendimientos de los cultivos, así como un aumento significativo en la producción ganadera (Lu y Tian, 2017).

En este contexto, las estrategias de prevención de la contaminación del recurso hídrico son estudiadas y recomendadas desde hace décadas. Por ejemplo, Sagardoy (1993) identifica entre las medidas de acción que deberán adoptarse en la agricultura en lo que respecta a la calidad del agua la "prevención de los efectos negativos de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua utilizada en otras actividades sociales y económicas y sobre las tierras húmedas, entre otros medios, mediante el aprovechamiento óptimo de los insumos agrícolas y la reducción, en la medida de los posible, del uso de insumos externos en actividades agrícolas". En áreas rurales bajo riego, Foster et al. (2002) destacan tres cargas contaminantes con potencial afectación al agua subterránea: nitratos, salinidad y fitosanitarios.

Una herramienta válida para la prevención es la utilización de índices que permitan valorar el riesgo de contaminación que pueden representar diferentes compuestos; entre ellos, Arreguí et al., (2013) identifican varios indicadores que se han propuesto en distintos países para estimar el impacto ambiental de fitosanitarios; entre ellos se destacan: GUS (Groundwater Ubiquity Score) (Gustafson, 1989); Niveles de daño ambiental (Higley y Wintersteen, 1992); EIQ (Envi-

ronmental Impact Quotient) (Kovach et al., 1992); SYNOPSIS (Gutsche y Rossberg, 1997), IPEST (Girardin et al., 1999). Rao et al. (1985) desarrollaron un modelo para determinar la contaminación potencial del agua subterránea basado en el riesgo de lixiviación de los plaguicidas a través del perfil del suelo; dicho método establece la determinación de dos índices: factor de atenuación (AF) y factor de retardo (RF). El caso de los fitosanitarios ha sido, tal vez, el más estudiado desde la perspectiva de índices de potencial de lixiviación; estos índices pueden resultar de gran utilidad al comparar los riesgos relativos de diferentes estrategias de manejo en los sistemas productivos con el fin de minimizar el riesgo de contaminación (Bedmar et al., 2015).

Así, evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación proveniente de la superficie independizándose de cuál es el compuesto aplicado y la forma de aplicación, es otra herramienta de prevención y constituye un instrumento de ayuda a la gestión del agua al permitir identificar en un territorio áreas con mayor o menor grado de susceptibilidad del acuífero ante un contaminante que proviene de la superficie. En este sentido, los mapas de vulnerabilidad intrínseca del acuífero son herramientas que contribuyen a enfocar las estrategias de control y así preservar la calidad del agua subterránea. En general, estos mapas definen indirectamente zonas más o menos aptas para la implantación de las diferentes actividades a desarrollarse en función del impacto que estas pueden tener sobre los recursos hídricos subterráneos del área, y zonas en las que no debería implementarse ningún tipo de actividad o en las que deberían llevarse a cabo modificaciones físicas que impidan la llegada de contaminantes (Foster et al., 2002, 2013).

El concepto de vulnerabilidad de acuíferos fue introducido en la década de 1960 (Margat, 1968) basándose en el hecho de que la zona no saturada, ubicada por encima del nivel freático, proporciona normalmente un cierto grado de protección a las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen tanto natural como antrópico. En este sentido, exis-

ten dos grandes corrientes relacionadas a su abordaje: vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica. La primera es aquella que deriva exclusivamente de las propiedades y comportamiento del acuífero y de su entorno (profundidad del agua, permeabilidad de la zona no saturada, cobertura de suelo, recarga neta, etc.); y la segunda, es la que considera, además del comportamiento del medio, el tipo y carga de un determinado contaminante o familia de contaminantes (Vrba y Zaporozec, 1994). Ambas aproximaciones tienen sus ventajas y desventajas, y han sido bien descritas por Foster et al. (2002) y Auge (2004).

Desde mediados de la década de 1980, el marco teórico de este concepto se ha fortalecido de manera constante, mientras que desde lo instrumental la mayoría de los métodos de evaluación de vulnerabilidad intrínseca del acuífero utilizan variables como profundidad del nivel freático, litología de la zona no saturada, pendiente y textura del suelo, dando como resultado una representación del territorio en la que se pueden identificar zonas con distinta susceptibilidad del acuífero ante la llegada de un contaminante desde la superficie. La premisa básica del concepto de vulnerabilidad es, según Foster et al. (2002), que los mecanismos de recarga del agua subterránea y la capacidad de atenuación natural del perfil de suelo a los contaminantes varían ampliamente con las condiciones geológicas cercanas a la superficie del terreno. Así, en lugar de aplicar controles universales sobre los usos del territorio potencialmente contaminantes, es más efectivo y menos perjudicial para el desarrollo econó-

mico, modificar el tipo y nivel de control de acuerdo a cuán susceptible resulta el acuífero en el área de interés, lo que conduce a la necesidad de contar con información cartográfica que logre discriminar, en dicha área, zonas con diferentes categorías de vulnerabilidad (Massone et al., 2008, Masone y Barilari, 2020).

La pregunta que guía la presente investigación es: ¿Cuáles son las potencialidades y restricciones que ofrecen los principales métodos de la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos para las condiciones hidrogeológicas del SE bonaerense?. El objetivo de este trabajo es comparar y evaluar los resultados que brindan cinco metodologías de evaluación de vulnerabilidad (intrínseca y específica) del acuífero en un área de actividad agrícola intensiva en el SE bonaerense.

ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Arroyo de Los Padres (Figura 1) se ubica en el partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires en la República Argentina. Ocupa 103 Km² y el Arroyo de los Padres se extiende a lo largo de unos 18 km, desde las sierras hasta desembocar en la Laguna de Los Padres la cual presenta una longitud máxima de 2,065 km, un área de 2 km² y una profundidad máxima de 2,40 m (Romanelli, 2012). La cuenca es parte de la llanura pampeana argentina, caracterizada por el clima húmedo (unos 979 mm/año de precipitación promedio anual y 732 mm/año de evapotranspiración

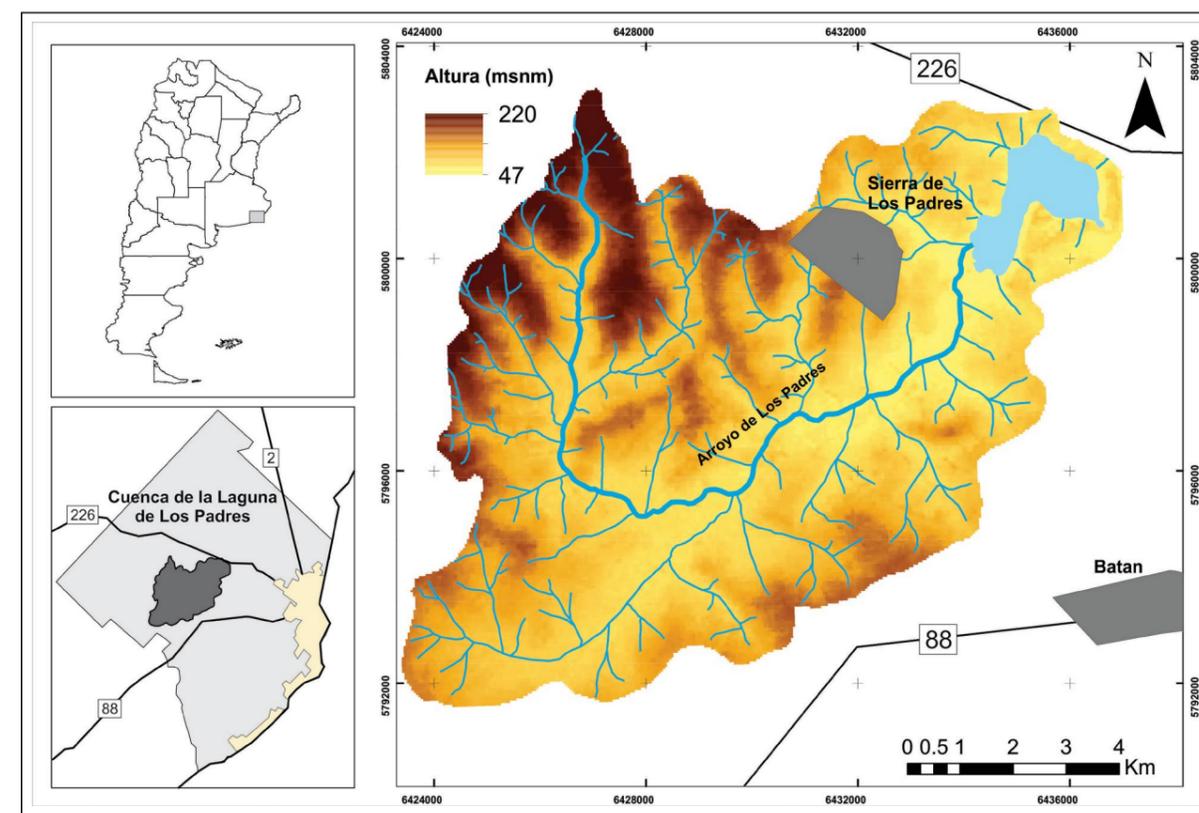


Figura 1. Ubicación del área de estudio

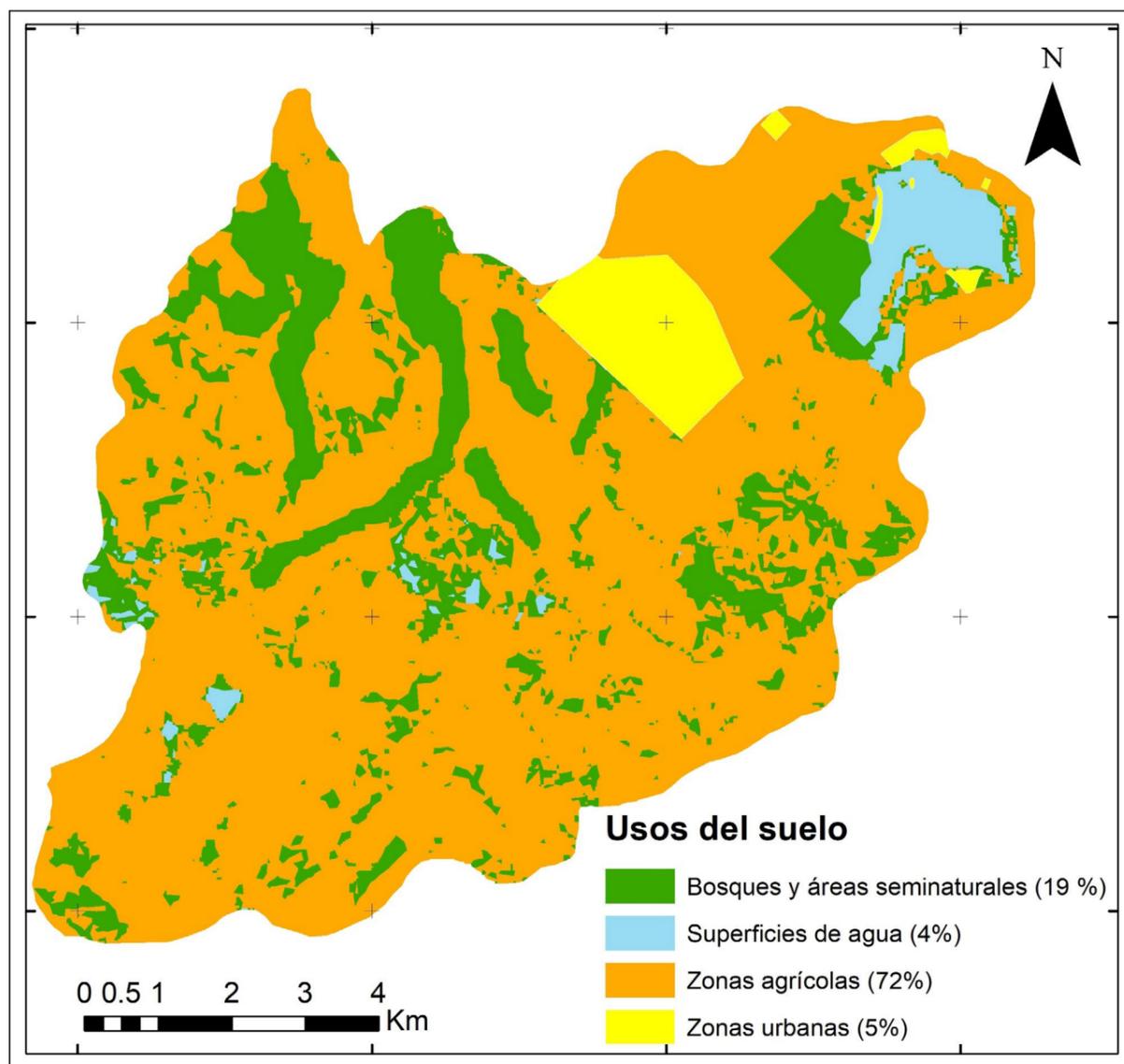


Figura 2. Usos del suelo en la cuenca de la Laguna de Los Padres.

potencial y suelos en su mayoría argiudoles típicos de alta productividad agrícola. Hacia el noroeste y sur de la cuenca aparecen bloques serranos pertenecientes al Sistema de Tandilia, constituidos por estratos de rocas ortocuarcíticas.

Como sucede en gran parte de la región, la única fuente de aprovisionamiento de agua la constituye el acuífero denominado "Pampeano", de tipo libre o freático y que está constituido esencialmente por intercalaciones de limos y arenas finas de origen eólico y fluvial. Esta unidad se apoya directamente sobre el basamento hidrogeológico conformado por rocas de tipo ortocuarcítico (Auge, 2004). La profundidad oscila entre los 35 (zona serrana) y 2 m (hacia laguna de los Padres) y la dirección general del flujo subterráneo es SW-NE (Romanelli, 2012). Este acuífero tiene una transmisividad media del orden de 700 m²/día y una permeabilidad media de 10 a 15 m/día (Bocanegra et al., 1993).

La cuenca forma parte del denominado "Cinturón Hortícola de Mar del Plata" que es uno de los principales centros productivos de hortalizas de hoja y fruto del país, con aproximadamente 1000 productores con diferentes características socio-productivas y tecnológicas (Viglianchino et al., 2021a). Más del 70% de la superficie de la misma se destina a esta producción (Figura 2), y cuenta con 9.500 hectáreas a campo y 650 hectáreas bajo cubierta, totalizando una producción de 220.000 y 98.000 toneladas respectivamente, para el ciclo 2016/2017 (Atucha et al., 2018). Los principales cultivos realizados a campo son maíz dulce, lechuga y zanahoria; en tanto que bajo cubierta se producen tomate, pimiento, lechuga y espinaca. Si bien no existen datos precisos con respecto a la utilización de agua para riego en la cuenca, el municipio lo estima en 2 hm³/año (OSSE, 2010).

En base a encuestas realizadas a los productores, Viglianchino et al. (2021a), registraron 34 productos fitosa-

Tabla 1. Fuentes de datos de los parámetros que componen las metodologías estudiadas.

VARIABLE	DENOMINACIÓN DE LA VARIABLE	FUENTE
Espesor de zona no saturada o profundidad del acuífero	E, G, D	En base a mapa de isopiezas de la cuenca Romanelli (2012) (Escala 1:50.000) y Modelo de Elevación Digital 90 metros de resolución (Jarvis et al., 2008).
Permeabilidad vertical de la zona no saturada y conductividad hidráulica	Kv, C	En base a la litología de las zonas no saturada y saturada, a partir de Auge (2004).
Tipo de acuífero	O	Mapa Hidrogeológico de la Provincia González (2005) (Escala 1:5.000.000)
Litología de la zona no saturada	I	A partir de la geomorfología del Pdo. de Gral Pueyrredón (Martínez, 1998)
Textura de suelo	S	INTA (2015) (Escala 1:50.000).
Recarga	R	Plan director OSSE (2010).
Litología del acuífero	A	A partir de Bocanegra et al. (1992)
Pendiente del terreno	T	Modelo Digital de Elevación del Pdo. de Gral Pueyrredón (Pullar, 2022)

nitarios utilizados en producciones a campo, donde el 41% corresponden a fungicidas (principalmente cyproconazole, fluopicolide y procimidone) el 38% a insecticidas (principalmente imidacloprid, metoxifenocide y tiametoxam) y el 21% a herbicidas (principalmente Atrazina), destacándose frutilla y lechuga como los cultivos con mayor utilización de estos insumos. Respecto a cultivos bajo cubierta, se reportaron 36 ingredientes activos, (el 50% corresponde a fungicidas, un 47% insecticidas, y un 3% a herbicidas), utilizados mayormente en tomate. Respecto a la presencia de fitosanitarios en agua subterránea, no se registraron niveles detectables de ninguno de los fitosanitarios analizados (atrazina, clorpirifos, flurocloridona, imidacloprid, metalaxil, metolacolor, metribuzin, pirimicarb, tebuconazole y glifosato). Por el contrario, en agua de arroyo se detectó la presencia de atrazina, glifosato, imidacloprid, metalaxil, metolacolor, metribuzin y tebuconazole (Viglianchino et al., 2021b).

1) Construcción de los mapas temáticos de base para cada variable a considerar y su posterior transformación a formato raster (resolución espacial de 90 x 90 metros). Según la capa considerada esta transformación se puede hacer de forma directa o en el caso de curvas de nivel o niveles piezométricos, se realizan interpolaciones previamente.

2) Los mapas obtenidos se reclasificaron considerando las distintas variables y se le asignaron los pesos y/o valores a cada capa de información según lo establecido por cada metodología.

3) Con las capas reclasificadas según lo establecido por cada método se aplicó álgebra de mapas, realizando una suma ponderada de las variables mediante la herramienta "Raster calculator", obteniendo como resultado el mapa de vulnerabilidad final.

Las fuentes de datos utilizados para aplicar los índices propuestos se resumen en la Tabla 1. Los valores de los índices obtenidos se agruparon para obtener zonas de diferentes grados de vulnerabilidad, considerando que, a mayor valor de índice, mayor vulnerabilidad a la contaminación.

Los valores de vulnerabilidad por celda obtenidos fueron reclasificados siguiendo el criterio de "código semáforo" para obtener un máximo de 3 categorías, representadas por las etiquetas: alta, moderada y baja (Tabla 2).

Método Ekv

Esta metodología está basada en dos variables: espesor de la zona no saturada (E) y permeabilidad vertical de la zona no saturada (Kv) (Auge, 1995, Tabla 3). La metodología se completa con la construcción de la matriz de interacción entre ambas variables, a partir de la suma de sus valores; así se tiene un resultado por pixel que puede variar entre 2 y 10, reconociendo 3 categorías de vulnerabilidad:

METODOLOGÍA

En este trabajo se han considerado las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos más utilizadas, que corresponden a tres sistemas (Auge, 2004):

- a. Sistema de Matriz: método Ekv (vulnerabilidad intrínseca).
- b. Sistema de valoración: métodos GOD y GOD-S (ambos vulnerabilidad intrínseca).
- c. Sumas ponderadas o suma de conteos por puntos: métodos DRASTIC (vulnerabilidad intrínseca) y DRASTIC-P (vulnerabilidad específica).

La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero se realizó en entorno ArcGis 10.1 (ESRI, 2012) y consistió en tres etapas:

Tabla 2. Clases de vulnerabilidad utilizadas en las metodologías propuestas (modificado a partir de Foster et al., 2002).

CLASE	SIGNIFICADO
ALTA	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
MODERADA	Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
BAJA	Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo.

1. Para índices de E + Kv entre 2 y 4, la vulnerabilidad es baja.
2. Para índices de E + Kv entre 5 y 7, la vulnerabilidad es moderada.
3. Para índices de E + Kv entre de 8 a 10, la vulnerabilidad es alta.

Método GOD

El índice GOD fue desarrollado por Foster e Hirata (1988) para estudiar la vulnerabilidad de un acuífero frente a

Tabla 3. Variables, valores y ratings de la metodología Ekv (Auge, 1995).

VARIABLE	VALOR	VALORACIÓN
E: espesor de la zona no saturada (m)	>30	1
	10-30	2
	5-10	3
	2-5	4
	<2	5
Kv: permeabilidad vertical de la zona no saturada o subsaturada (m/día)	<1x10 ⁻³	1
	10 ⁻³ -0,01	2
	0,01-1	3
	1-50	4
	50-500	5

la percolación vertical de contaminantes a través de la zona subsaturada, sin considerar su migración lateral en la zona saturada (Shrestha et al., 2017) y caracteriza esta vulnerabilidad en función de las siguientes variables (Tabla 4):

Cada una de estas variables está clasificada en tipos o clases (pudiendo ser tanto cuantitativas como cualitativas) con la correspondencia de cada una de ellas a una clasificación entre 0 y 1. El valor final de vulnerabilidad (índice GOD)

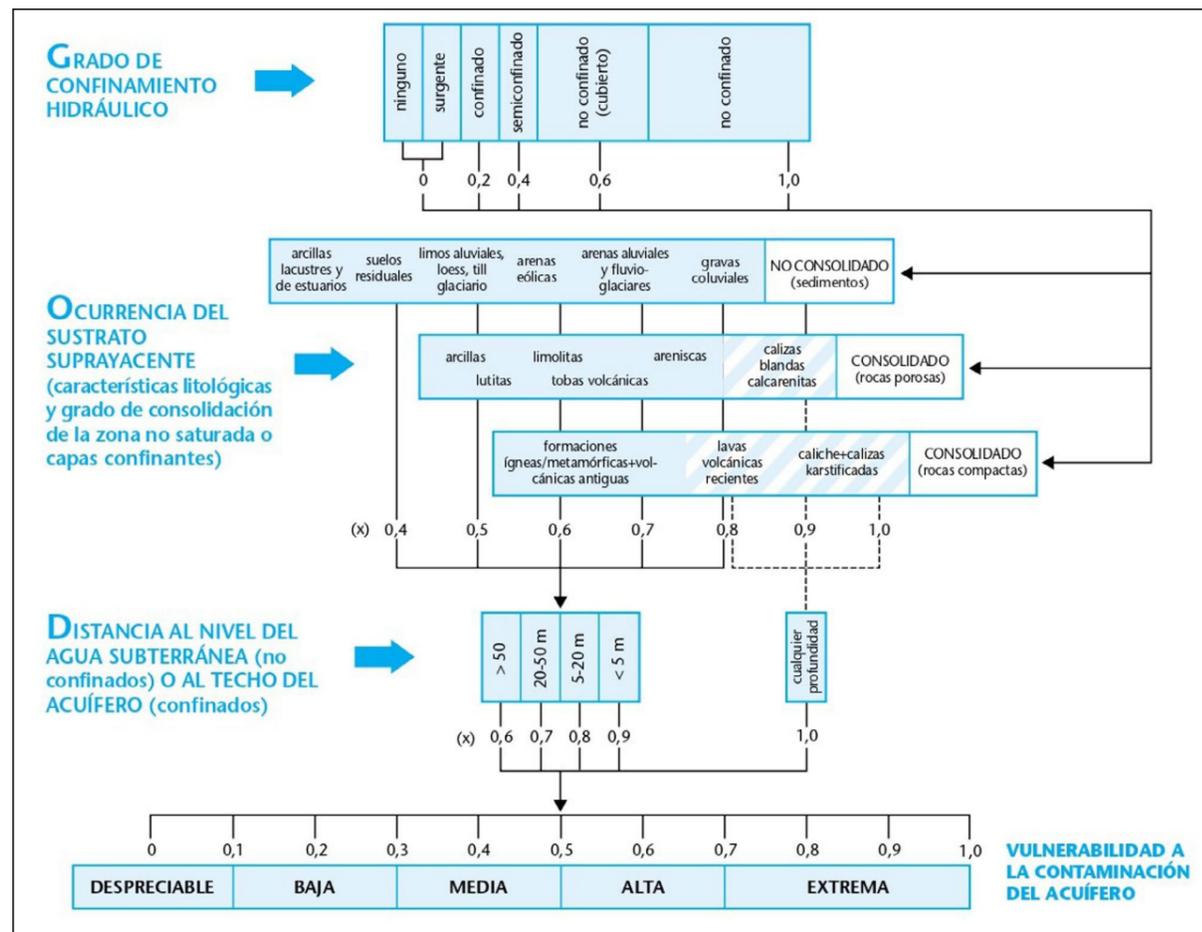


Figura 3. Método GODS para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos (tomado de Foster et al., 2002).

Tabla 4. Variables del método GOD (Foster e Hirata, 1988).

G	Grado de confinamiento hidráulico del acuífero: tipo de acuífero
O	Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de infiltración
D	Distancia al agua determinada como la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados.

se obtiene a partir del producto de los 3 valores en cada pixel (Figura 3).

Método GOD-S

Este método se comporta como una modificación al método GOD, que incorpora el 'índice de susceptibilidad a la percolación del suelo' "S" basado en una clasificación del suelo en función de su textura (Figura 4).

Métodos DRASTIC y DRASTIC-P

Fueron desarrollados por Aller et al. (1987), siendo DRASTIC uno de los métodos más difundidos a nivel internacional para el estudio de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, debido a su simplicidad tanto en el concepto como en la aplicación. DRASTIC-P es una variante donde, a partir de un cambio de ponderación en cuatro de sus variables, se ajusta para representar mejor la vulnerabilidad específica ante pesticidas (en términos genéricos).

Estas metodologías cuantifican la vulnerabilidad relativa por medio de una suma ponderada de siete variables que definen los principales factores que controlan el movimiento del agua subterránea dentro, a través y fuera de un área (Tabla 5, con modificaciones de Grondona, 2014). Los valores de cada variable (subíndice r) se normalizan en una escala de 1 a 10. Además, al valor de cada variable se aplica un índice de ponderación (subíndices w) entre 1 y 5. El cálculo del índice de vulnerabilidad (Di) se realiza según la siguiente expresión:

$$D_i = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (I_r \cdot I_w) + (C_r \cdot C_w)$$

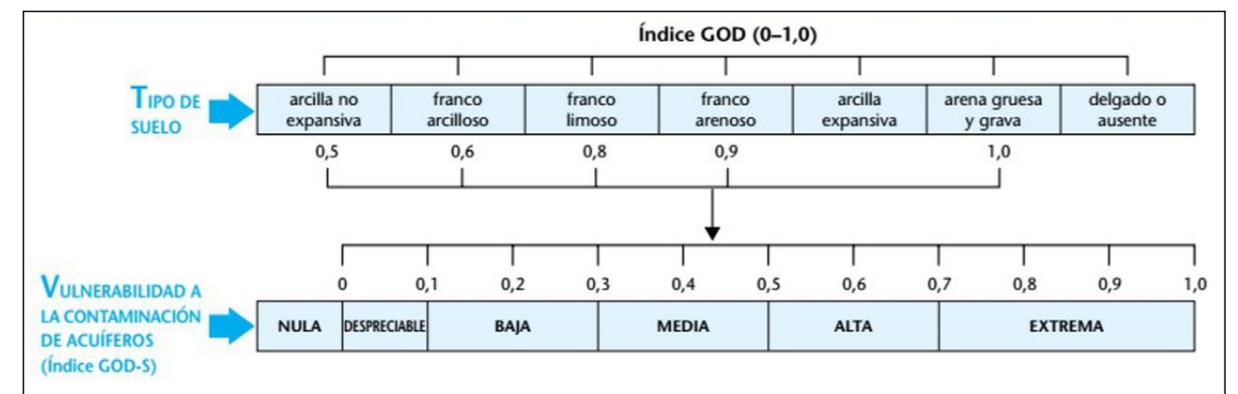


Figura 4. Variable "S" en el método GOD-S (tomado de Foster et al., 2002).

Los valores Di obtenidos fueron clasificados por intervalos iguales en las 3 categorías de vulnerabilidad antes mencionadas (Tabla 2). Como el uso del suelo predominante en el área de estudio es agrícola, se consideró útil trabajar también con la metodología DRASTIC-P, en el cual se modifica el peso de tres de las variables: pendiente, tipo de suelo e impacto de la zona no saturada.

RESULTADOS

Índice de vulnerabilidad utilizando Ekv

Los criterios utilizados para clasificar las variables y su valoración, provienen de lo propuesto en la metodología original y se han vinculado a la geomorfología y litología dominantes (Tabla 6, Figura 5). El mapa final de vulnerabilidad obtenido a partir de la combinación de ambas variables se muestra en la Figura 6. Más del 75% del área de la cuenca se categoriza como de vulnerabilidad moderada.

Índice de vulnerabilidad utilizando GOD/GODS

Los criterios utilizados para clasificar las variables y valorarlos provienen de lo propuesto en la metodología original y se han vinculado a la geomorfología y litología dominantes. (Tabla 7, Figura 7).

Los mapas finales de vulnerabilidad obtenidos se muestran en la Figura 8; ambos métodos muestran una tendencia preferencial a valores bajos de vulnerabilidad, y a su vez los índices son muy homogéneos respecto a su distribución real: GOD con dos categorías con muy similar representación territorial: baja (51,8%) y moderada (48,2%), mientras que GODS resulta más homogéneo todavía, con un 96% del territorio en vulnerabilidad baja.

Índice de vulnerabilidad utilizando DRASTIC/DRASTIC-P

Los criterios utilizados para clasificar las variables y valorarlos provienen de lo propuesto en la metodología original (Tabla 8, Figura 9). Los mapas finales de vulnerabilidad obtenidos se muestran en la Figura 10; ambos métodos resultan muy similares en cuanto a sus resultados, predominando las categorías baja y moderada; DRASTIC con un leve

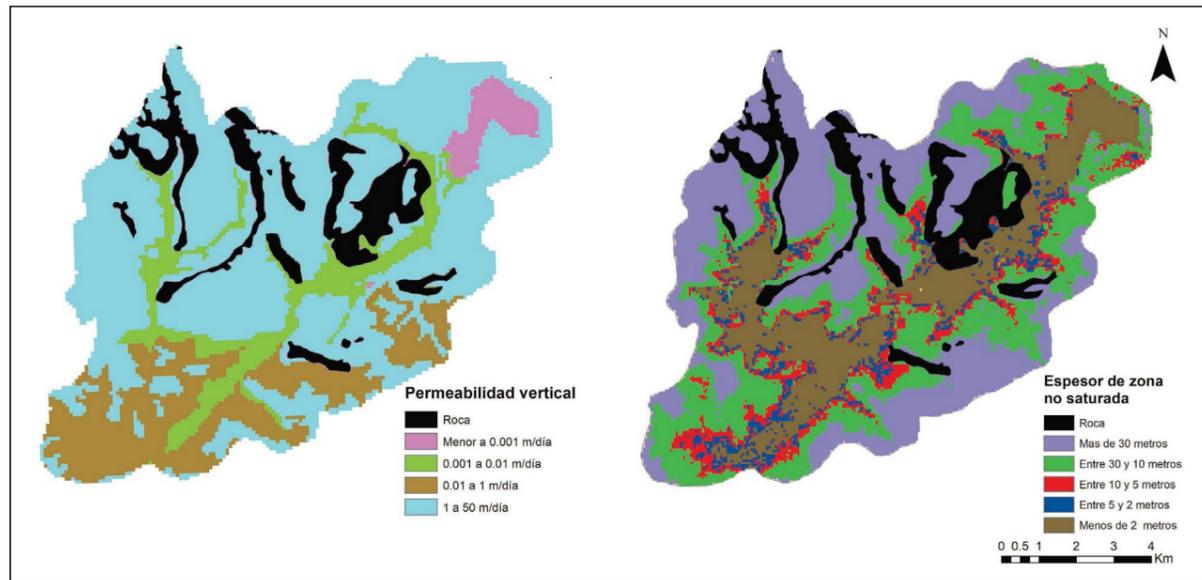


Figura 5. Mapas de parámetros utilizados para el índice Ekv.

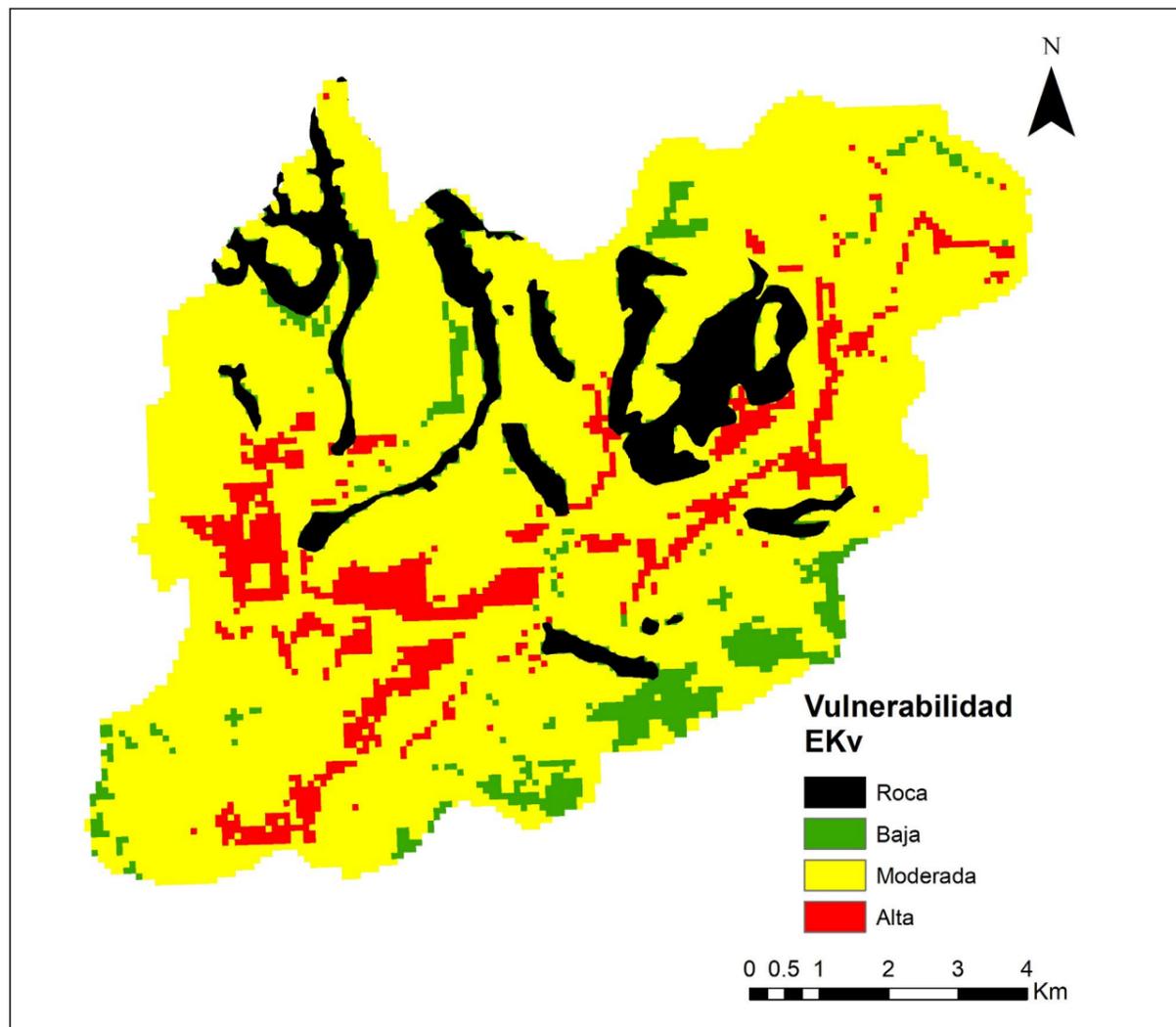


Figura 6. Vulnerabilidad del acuífero por método Ekv

Tabla 5. Variables, valores, ratings y pesos de las metodologías DRASTIC y DRASTIC-P

VARIABLE	CLASE	VALORACIÓN	PESO DRASTIC	PESO DRASTIC-P
D: profundidad del nivel freático (m)	0-1,5	10	5	5
	1,5-5	9		
	5-10	7		
	10-20	5		
	20-30	2		
	>30	1		
R: recarga neta (mm)	0-50	1	4	4
	50-100	3		
	100-180	5		
	180-255	8		
	>255	10		
A: naturaleza del acuífero	Lutita masiva	2	3	3
	Metamórfica/ígneas	3		
	Metamórfica/ ígneas meteorizadas	4		
	Till glacial	5		
	Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	6		
	Arenisca masiva	7		
	Arena o grava	8		
	Basalto	9		
	Caliza kárstica	10		
	S: naturaleza del suelo	Arcilla no compactada y no agregada		
cieno		2		
Arcilla margosa		3		
Limo margoso		4		
Marga		5		
Arenisca margosa		6		
Agregado arcilloso o compactado		7		
Arena		9		
Grava		10		
Delgado o ausente		10		
T: pendiente del terreno (%)	0-2	10	1	3
	2-6	9		
	6-12	5		
	12-18	3		
	> 18	1		
I: impacto de la zona no saturada	Acuífero confinado	1	5	4
	Arcilla	3		
	Lutita	3		
	Caliza	3		
	Metamórfica/ígneas	4		
	Arenisca	6		
	Secuencias de arenisca, caliza y lutita	7		
	Arena y grava	8		
	Basalto	9		
	Caliza karstica	10		

Tabla 5. Variables, valores, ratings y pesos de las metodologías DRASTIC y DRASTIC-P cont.

	<4	1	3	2
	4-12	2		
	12-28	4		
C: conductividad hidráulica (m/día)	28-40	6		
	40-80	8		
	> 80	10		

Tabla 6. Valoración de los parámetros del índice Ekv.

VARIABLE	CLASE	VALOR ASIGNADO
E (m)	> 30 (lomas periserranas)	1
	30-10 (lomas)	2
	10-5 (llanura interserrana)	3
	5-2 (llanura de muy baja pendiente)	4
	> 2 (proximidades de laguna y arroyo)	5
Kv (m/día)	< 0,001 (arcillas limosas)	1
	0,001 a 0,01 (limos arcillosos)	2
	0,01 a 1 (limos)	3
	1 a 50 (limos arenosos)	4

Tabla 7. Valoración de las variables de los índices GOD y GODS.

VARIABLE	CLASE	VALOR ASIGNADO
G	Acuífero no confinado	0,8
	Limo arenoso	0,8
O	Limo	0,6
	Limo arcillo	0,3
D (m)	< 5	0,9
	5-20	0,8
	20-50	0,5
	> 50	0,3
S	Franco	0,75
	Franco arcilloso	0,6

predominio de baja (40,6% del área) y DRASTIC-P de moderada (50,1% del área).

En la Figura 11 se presenta un resumen de las áreas ocupadas por las distintas clases de vulnerabilidad según las metodologías utilizadas en el presente estudio. Se observa que las metodologías GOD y GODS son las que dan lugar a una mayor área con la categoría "baja vulnerabilidad", la metodología Ekv posee la mayor área bajo categoría "moderada vulnerabilidad" y las metodologías DRASTIC y DRASTIC-P son las únicas que muestran áreas bajo la categoría "alta vulnerabilidad". De la observación de los mapas finales de todas las categorías se puede destacar que las áreas de mayor vulnerabilidad coinciden con las zonas bajas de la cuenca, mientras que las zonas de menor vulnerabilidad se desarrollan por lo general, en las zonas más altas de la cuenca.

Tabla 8. Valoración de las variables del índice DRASTIC y DRASTIC-P.

VARIABLE	CLASE	VALOR ASIGNADO
D (m)	> 30	1
	20-30	2
	10-20	5
	5-10	7
	1,5-5	9
	0-1,5	10
R (mm/año)	100-180	6
A	Limos-limos arenosos	4
	Delgado o ausente	10
S	Franco arcilloso	3
	Franco	5
T (%)	> 18	1
	12-18	3
	6-12	5
	2-6	9
I	Limo arcilloso	2
	Limo arenoso	6
C (m/día)	4-12	2

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La aplicación de las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos en la zona de estudio permitió reconocer y sistematizar las variables requeridas en su proceso y, comparar los resultados obtenidos en los índices intrínseca y específica utilizados. Se obtuvo como primer resultado la Tabla 9, en la que comparan las potencialidades y limitaciones de cada metodología analizada.

El mapa resultante del método Ekv identificó más del 75% del área de estudio dentro de la categoría identificada como de vulnerabilidad moderada, esto resulta en reconocer a esta metodología como la menos restrictiva, expeditiva y apropiada para una evaluación básica de la vulnerabilidad específica del acuífero.

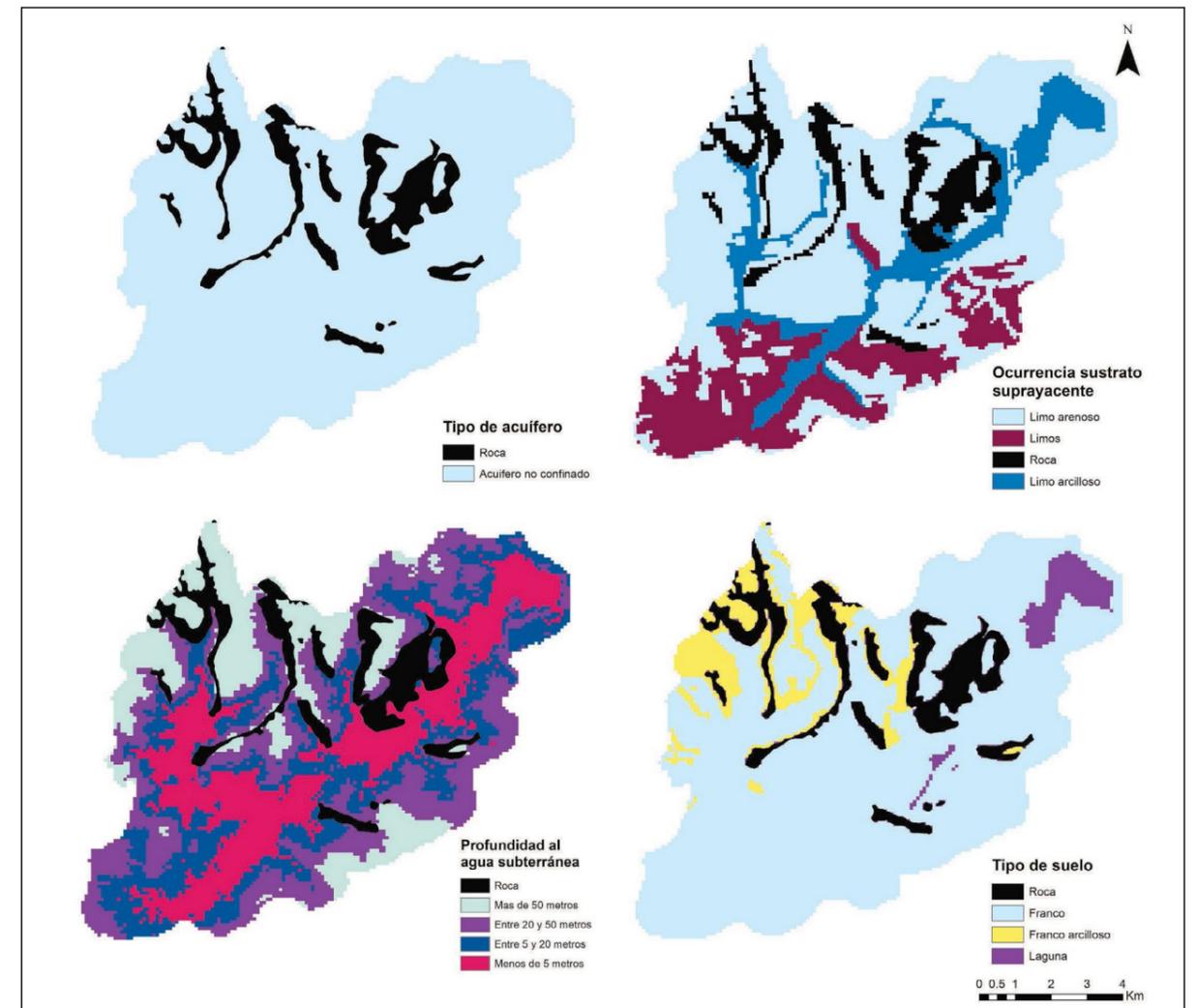


Figura 7. Mapas de parámetros utilizados para los índices GOD y GODS

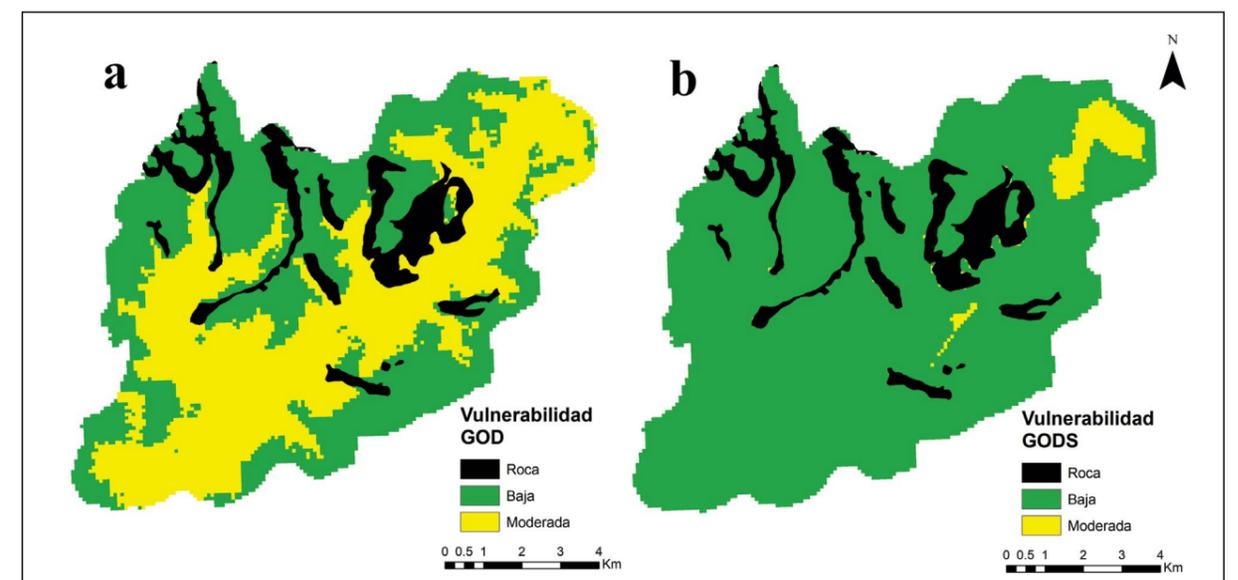


Figura 8. Vulnerabilidad del acuífero por: método GOD (a) y método GODS (b).

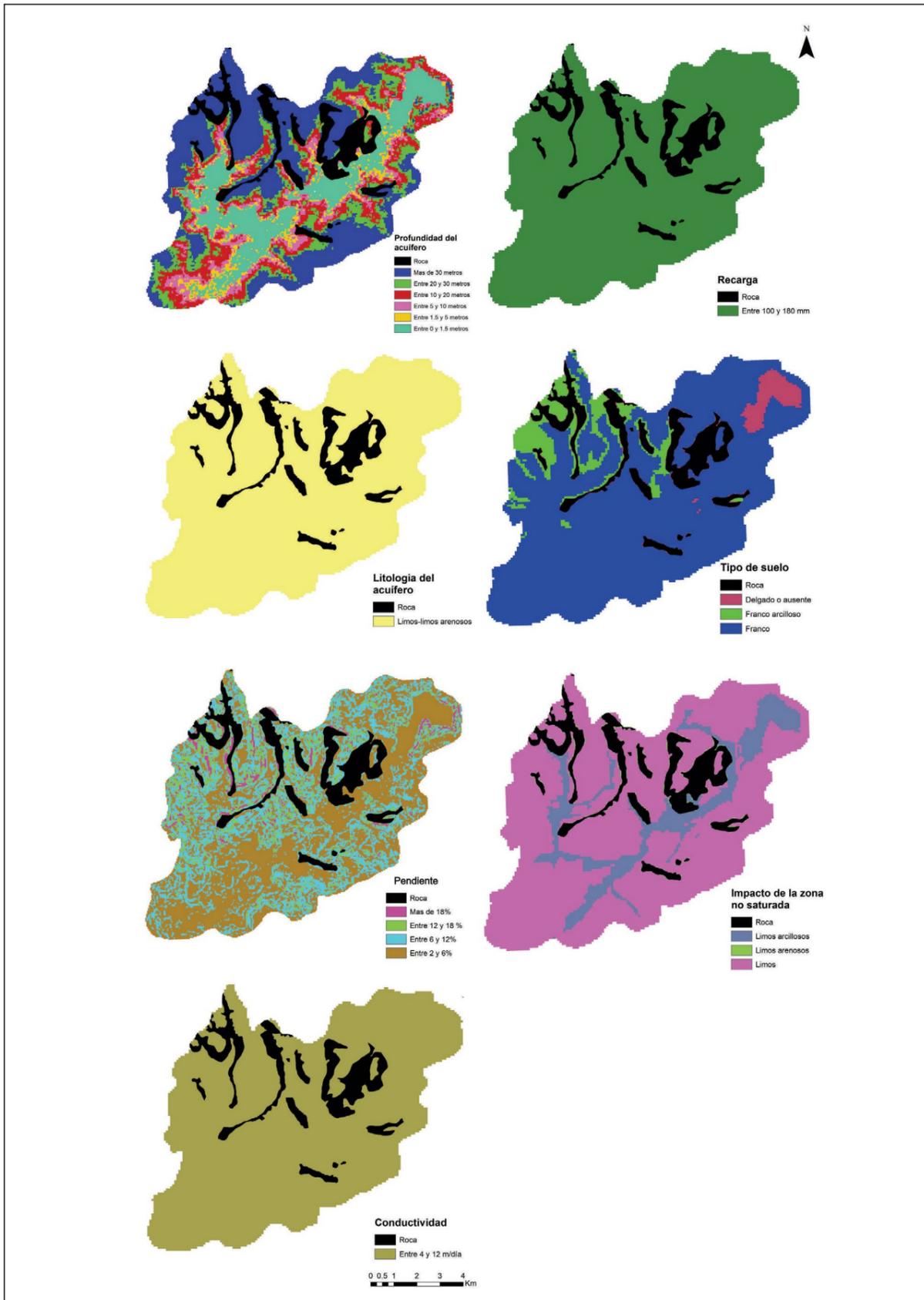


Figura 9. Mapas de parámetros utilizados para el índice DRASTIC

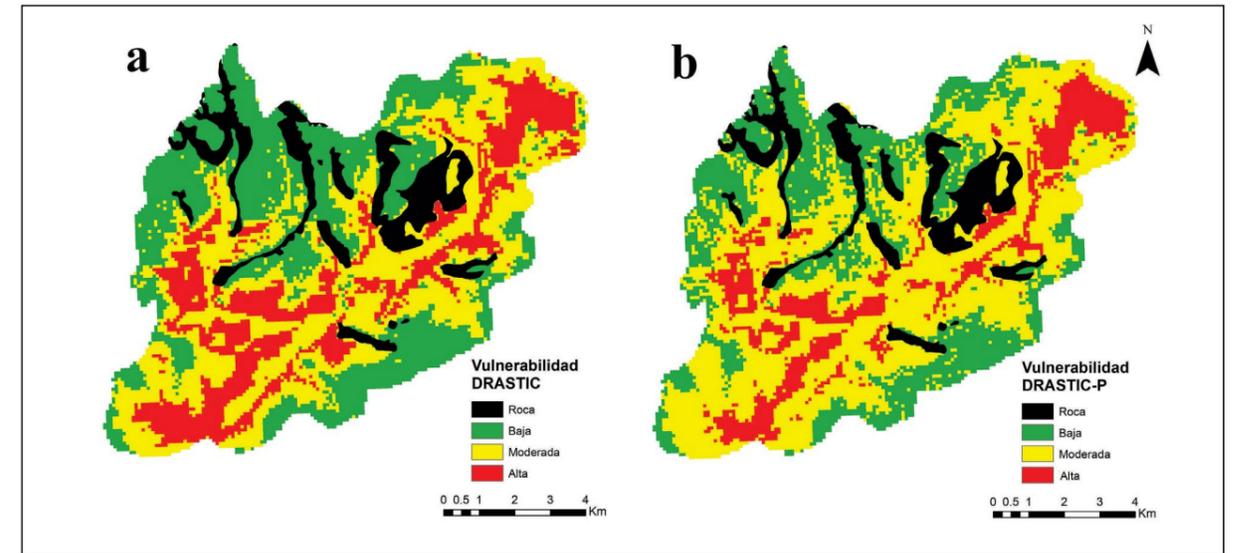


Figura 10. Vulnerabilidad del acuífero por el método DRASTIC (a) y DRASTIC-P (b)

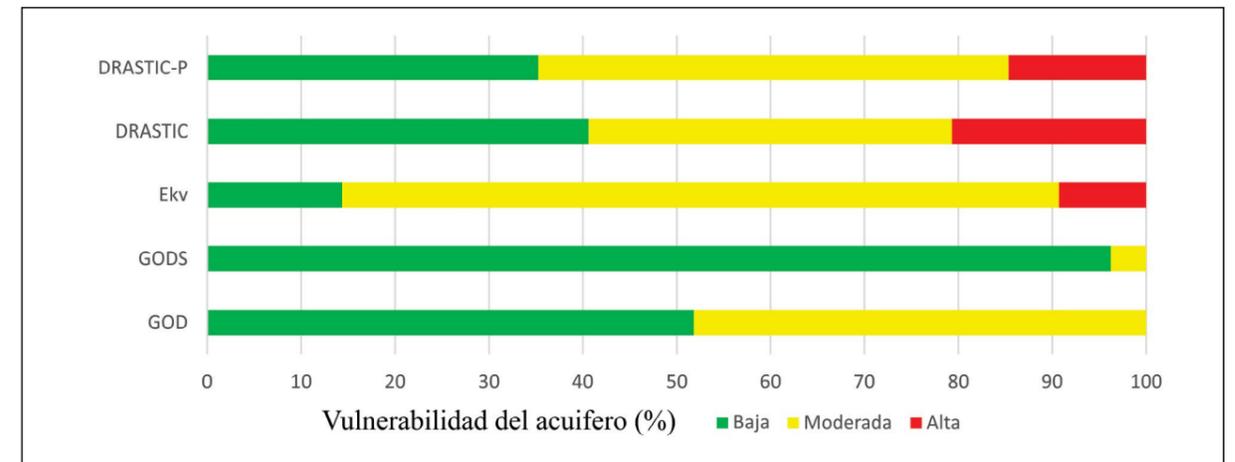


Figura 11. Comparación de las vulnerabilidades según las distintas metodologías empleadas.

GOD reconoce dos categorías de vulnerabilidad, moderada (48,2%) y baja (51,8%), mientras que GODS resulta más homogéneo todavía, con un 96% del territorio en vulnerabilidad baja. Ambos métodos resultan permisivos en cuanto a la toma de decisiones vinculadas al uso del suelo y muy homogéneos en cuanto a sus resultados. Si bien la clase moderada en ambos, ocupa un menor porcentaje de superficie con respecto al Ekv, generando menor incertidumbre, este último permitió visualizar las áreas con alta vulnerabilidad. Esto llevaría a considerar que esta metodología contribuiría a desarrollar políticas más conservadoras y restrictivas respecto a la protección del acuífero.

La metodología GOD-S, al considerar en la valuación de la vulnerabilidad, la capacidad que tiene un suelo de amortiguar el paso de un contaminante en función de su textura y contenido de materia orgánica, disminuye el porcentaje que ocupa la clase de vulnerabilidad moderada del método GOD y clasifica esas áreas dentro de la categoría baja, refinando notoriamente los índices resultantes.

Por su parte, el método DRASTIC emplea una mayor cantidad de variables que los anteriores, lo cual lo vuelve más robusto y más difícil de desarrollar. Sin embargo, al involucrar variables importantes en relación a la vulnerabilidad de acuíferos, el índice obtenido asegura resultados más confiables y cercanos a la realidad. Tanto DRASTIC como DRASTIC P, resultan métodos muy similares en cuanto a sus resultados, predominando las categorías baja y moderada; DRASTIC con un leve predominio de baja (40,6% del área) y DRASTIC-P de moderada (50,1% del área). Además, al obtener el índice de vulnerabilidad específica a la contaminación por fitosanitarios, permite contribuir a la identificación de aquellas zonas que requerirían mayor atención con respecto a esta problemática.

Lo expuesto deja en evidencia que los métodos DRASTIC y DRASTIC-P, a diferencia de Ekv, GOD y GOD-S, resultan de mayor utilidad para la toma de decisiones y el desarrollo de estrategias de uso del suelo y protección la calidad del agua subterránea, generando un mejor balance entre incer-

Tabla 9. Potencialidades y restricciones de los métodos evaluados

MÉTODO	POTENCIALIDADES	RESTRICCIONES
EKv	Utiliza solo dos variables	Una de las variables (Permeabilidad Vertical) presenta una alta homogeneidad para todo el acuífero, lo que contribuye a que el mapa resultado presente poca variabilidad espacial de las distintas categorías de vulnerabilidad. Predomina la categoría "moderada", de mayor incertidumbre que las otras dos.
GOD	Contempla la profundidad del acuífero (una de las variables más importante en acuíferos freáticos)	No contempla la variable alta vulnerabilidad y los resultados son también homogéneos territorialmente.
GODS	Incorpora la variable suelo	Entrega el más homogéneo de todos los resultados (categoría baja).
DRASTIC	Logra una muy buena discriminación territorial entre categorías	Es la metodología que más variables necesita para su desarrollo.
DRASTIC-P	Aumenta el peso de variables relacionadas a la contaminación por pesticidas. Único método aplicado en el presente trabajo que evalúa la vulnerabilidad específica	A igual que la anterior, hace uso de un importante número de variables. Solo considera la carga contaminante relacionada al uso de fitosanitarios.

tidumbre y utilidad para la toma de decisiones.

El presente trabajo forma parte de la tesis de la primera autora en el marco del Doctorado en Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.

y el análisis de datos fueron realizados por Liliana Viglianichino, Sebastian Grondona, Francisco Bedmar, Hernán Angelini y Héctor Massone. El primer borrador del manuscrito fue escrito por estos mismos autores, que posteriormente leyeron y aprobaron el manuscrito final.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación

DECLARACION DE CONFLICTOS DE INTERESES

El/los Autor/res declara/n que no existe algún conflicto de interés

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arregui, M., Grenón, D., Sánchez, D. y Ghione, J. (2013). Evaluación del riesgo de impacto ambiental de plaguicidas en cultivos anuales del centro de Santa Fe. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias*, 12(1/2), 13-22. <https://doi.org/10.14409/fa.v12i1/2.5114>
- Atucha, A., Lacaze, M. y Adlercreutz, E. (2018). Sector rural. En E. Adlercreutz (Ed.), *Segundo Informe de Monitoreo Ciudadano. Para saber qué ciudad queremos, necesitamos saber qué ciudad tenemos* (pp. 242-247). Red Mar del Plata Entre Todos.
- Auge, M. (1995). Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. Universidad de Buenos Aires. (Trabajo inédito).
- Auge, M. P. (2004). Hidrogeología Ambiental. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, *Serie Contribuciones Técnicas, Ordenamiento Territorial N°5*, 131 pp. Buenos Aires. Recuperado de <http://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/82>
- Bedmar, F., Gianelli, V., Angelini, H. y Viglianichino, L. (2015). Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina. *Revista de investigaciones agropecuarias*, 41(1), 70-82.
- Bocanegra, E. y Benavente, M. A. (1994). Simulación numérica del sistema de flujo de las aguas subterráneas en Mar del Plata, Argentina (período 1920-1969). En *II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea (Santiago, Chile)* (pp. 213-224).
- Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. y Cionchi, J. L. (1993). Exploitation effect and saltwater intrusion in the Mar del Plata aquifer, Argentina. En *Proceedings of the XII Salt Water Intrusion Meeting* (Barcelona, España) CIMNE-UPC (pp. 177-191).
- ESRI (2012). ArcGIS Desktop: Release 10.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Foster, S. y Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data. *WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual*, Lima, Peru. 81 pp.

Foster, S., Hirata, R. Gomes, D., D'Elia, M., y Paris, M. (2002). Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. *World Bank, WMATE. Washington*, 101 pp.

Foster, S., Hirata, R. y Andreo, B. (2013). El concepto de vulnerabilidad a la contaminación acuífera: ¿ayuda o impedimento para la promoción de la protección de las aguas freáticas? *Hydrogeology Journal*, 21, 13891392. <https://doi.org/10.1007/S10040-013-1019-7>

Girardin, P., Bockstaller, C. y Der Werf, H. V. (1999). Indicators: Tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 13, 5-21.

González, N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. En R. de Barrio, R. Etcheverry, M. Caballé y E. Llambías (Eds.), *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires, 16° Congreso Geológico Argentino, Relatorio* (pp. 359-374).

Gustafson, D. I. (1989). Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 8, 339-357.

Gutsche, V. y Rosberg, D. (1997). SYNOPSIS 1.1: a model to assess and compare the environmental risk potential of active ingredients in plant protection products. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 64, 181-188.

Grondona (2014). Identificación de los factores y procesos que inciden en la presencia de Compuestos Orgánicos Persistentes (COPs) en el agua subterránea en la Cuenca del Río Quequén Grande. Aplicación en la gestión del recurso hídrico subterráneo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Higley, L. G. y Wintersteen, W. K. (1992). A novel approach to environmental risk assessment of pesticides as a basis for incorporating environmental costs into economic injury levels. *American Entomologist*, 38, 34-39.

INTA. (2015). Cartas de suelo de la Provincia de Buenos Aires. Recuperado el 1 de septiembre de 2022 de <https://inta.gob.ar/documentos/carta-de-suelos-de-la-provincia-de-buenos-aires>

Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. Recuperado el 2 de marzo de 2022 de <http://srtm.csi.cgiar.org>

Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J. y Tette, J. (1992). A method to measure the environmental impact of pesticides. *New York's Food and Life Sciences Bulletin*, 139, 1-8.

Lu, C., y Tian, H. (2017). Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half-century: Shifted hot spots and nutrient imbalance. *Earth System Science Data*, 9, 181-192. <https://doi.org/10.5194/essd-9-181>.

Margat, J. (1968). Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution: bases de la cartographie. *BRGM Publication 68-SGL 198*, Orleans, Francia.

Martínez, G.A. y Cionchi, J.L. (1988). Morfometría e hipsometría en cuencas de drenaje de la mitad septentrional del partido de General Pueyrredon, provincia de Buenos Aires. *Actas II Jornadas Geológicas Bonaerenses (Bahía Blanca)* (pp. 153-161).

Massone, H. y Martinez, D. (2008). Consideraciones metodológicas acerca del proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos. *Revista Ingenierías*, 7(12), 9-22.

Massone, H.E. y Barilari, A. (2020). Groundwater pollution: a discussion about vulnerability, hazard and risk assessment. *Hydrogeology Journal*, 28, 463-466. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02090-0>

OSSE (2010). Sistema de acueducto oeste de provisión de agua potable a la ciudad de Mar del Plata. Parte 1. Plan Director. Documento técnico Obras Sanitarias mar del Plata SE, inédito. 88 pp.

Pullará, C. (2022). *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Pampeano en el Partido de General Pueyrredón*. Tesis de Grado inédita. Facultad de Ingeniería, UFASTA.

Rao, P. S. C., Hornsby, A. G. y Jessup, R. E. (1985). Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. *Soil and Crop Science Society of Florida*, 44, 1-8.

Romanelli, A. (2012). *Evaluación ambiental de lagunas pampásicas del Sudeste Bonaerense. Diagnóstico y perspectivas de gestión sustentable*. Tesis Doctoral inédita. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata.

- Romanelli, A. (2012). Tesis Doctoral: Evaluación ambiental de lagunas pampásicas del sudeste bonaerense. Diagnóstico y perspectivas de gestión sustentable. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Sagardoy, J.A. (1993). An overview of pollution of water by agriculture. En: *Prevention of Water Pollution by Agriculture and Related Activities* (pp. 19-22). Actas de la Consulta de Expertos de la FAO, Water Report 1.
- Shrestha, G., Uchida, Y., Kuronuma, S., Yamaya, M., Katsuragi, M., Kaneko, S., Shibasaki, N. y Yoshioka, M. (2017). Performance evaluation of a ground-source heat pump system utilizing a flowing well and estimation of suitable areas for its installation in Aizu Basin, Japan. *Hydrogeology Journal*, 25(6), 1437-1450. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1536-x>
- Unesco. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. UNESCO, París. Recuperado el 12 de noviembre de 2022 de <https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/07/375751spa.pdf>
- Viglianchino, L., Okada, E., Bedmar, F., Massone, H., y Puricelli, M. (2021b). Uso de fitosanitarios en la producción hortícola: caso de estudio en el Cinturón Hortícola de Mar del Plata. En *41 Congreso Argentino de Horticultura (La Plata)* (p. 424).
- Viglianchino, L., Bedmar, F., Massone, H., Puricelli, M. y Okada, E. (2021a). Caracterización social, productiva y tecnológica del cinturón hortícola de Mar del Plata. En *41 Congreso Argentino de Horticultura (La Plata)* (p.340).
- Vrba, J. y Zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *IAH International Contributions to Hydrogeology*, 16. Heise Publicat