

7. Evaluación multicriterio aplicada al riesgo de contaminación de acuíferos

gabicalderon.arq@gmail.com (*)

lourlimas@gmail.com (**)

asuncionromanelli@gmail.com (***)

massoneh@gmail.com (****)

- (*) Gabriela Calderon Dra. en Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible, Arquitecta. Becaria Posdoctoral del CONICET, IHAM FAUD UNMdP.
- (**) María Lourdes Lima Dra. en Ingeniería, Máster en Planificación y Gestión de Recursos Hídricos, Ingeniera Ambiental. Investigadora Adjunta del CONICET, IGCyC, FCEyN, UNMdP/CIC.
- (***) Asunción Romanelli Dra. en Ciencias Biológicas, Licenciada en Ciencias Biológicas, Investigadora Adjunta del CONICET, IIMyC, CONICET/UNMdP e IGCyC, FCEyN, UNMdP/CIC.
- (****) Héctor E. Massone Dr. en Cs. Naturales, MSc en Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano, Geólogo. Director del grupo de investigación Hidrogeología, IGCyC, FCEyN, UNMdP/CIC.

El presente capítulo expone resultados de una investigación que evaluó el riesgo de contaminación del agua subterránea en un área de interfase urbano-rural de la ciudad de Mar del Plata mediante el uso de herramientas de análisis de decisión multicriterio. Partiendo de la perspectiva del riesgo, se diseñó un modelo combinando la peligrosidad de contaminación del acuífero y la vulnerabilidad social de la población expuesta. El objetivo de este modelo,

basado en criterios naturales y socioeconómicos, fue establecer áreas prioritarias para la gestión del agua subterránea, así como definir recomendaciones para minimizar dicho riesgo en el sector periurbano oeste de la ciudad.

En este sentido, el estudio se vincula tanto al ODS 6, tendiente a garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos; como al ODS 11, que propone lograr ciudades y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, aportando indicadores e índices de sustentabilidad. El artículo publicado por Lima *et al.* (2019) en *Environmental Monitoring and Assessment* sirvió de partida para este capítulo.

ÁREA DE ESTUDIO

Para desarrollar esta investigación se seleccionó un territorio concreto: el área serrana del Partido de General Pueyrredon (PGP) la cual constituye el 30,12 % (102,63 km²) del periurbano de Mar del Plata y está fuertemente vinculada a esta ciudad a través de la Ruta Nacional N° 226. Además, se inserta en el segundo cinturón hortícola más importante del país en cuanto a superficie cultivada (cerca de 10.000 Ha.) (Fernández Lozano, 2012). Este territorio está integrado por asentamientos de diversas características socioeconómicas con aproximadamente 7.000 habitantes permanentes según el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (INDEC, 2013). Asimismo, se localiza en un ámbito de sierras y lagunas, con potencialidades tales como: el alto valor paisajístico que le otorga el Sistema Serrano de Tandilia; la biodiversidad comprendida en el área de Reserva Natural Laguna de Los Padres; la disponibilidad y calidad de recursos hídricos y edáficos; el desarrollo de usos residenciales, turísticos, recreativos y productivos (agricultura extensiva e intensiva, principalmente frutihortícola pero también avícola).

Por otro lado, la contaminación del agua subterránea resulta potencialmente crítica si se tiene en cuenta: a) la falta de red de desagües cloacales en toda la

zona; b) el uso inadecuado de fertilizantes y agroquímicos en los cultivos (De Gerónimo *et al.*, 2014; Baccaro *et al.*, 2006; Bedmar *et al.*, 2015); c) aproximadamente el 75% de la población del área no cuenta con el servicio de agua por red (INDEC, 2013); d) el agua para consumo humano se extrae de pozos que, en algunos casos, no reúnen los requisitos en cuanto a calidad de construcción, profundidad y distancia de los pozos ciegos, cámaras sépticas o corrales de encierro de animales; e) en muchos casos, el agua no recibe ningún tratamiento de potabilización previo al consumo; f) se trata de un acuífero libre que es la única fuente de abastecimiento para todo uso en el PGP y el área de estudio forma parte del área de recarga regional (Romanelli, 2012).

¿PARA QUÉ SE REALIZA LA INVESTIGACIÓN?

En países del Sur Global existen fuertes conflictos entre los objetivos de desarrollo económico y los objetivos ambientales. Además, la incapacidad para implementar políticas ambientales también está relacionada con la discontinuidad de estas políticas, la falta de incentivos y los escasos recursos humanos e infraestructura. Por otro lado, en estos países, el crecimiento poblacional sobre áreas periurbanas resulta en serias presiones sobre los recursos hídricos, las cuales se enmarcan en una deficiente gestión del agua.

Los problemas de decisión de tipo territorial, como la gestión del riesgo de contaminación de acuíferos, suelen implicar un amplio conjunto de alternativas y criterios de evaluación múltiples, conflictivos e inconmensurables. En este sentido, el Análisis de Decisión Multicriterio (ADM) se ha convertido en una de las metodologías más utilizadas para el soporte a la toma de decisiones espaciales (Ferretti y Montibeller, 2016; Della Spina, 2016). El ADM proporciona una gran variedad de técnicas y procedimientos para estructurar problemas de decisión relacionados con sistemas biofísicos y socioeconómicos, así como para diseñar, evaluar y priorizar decisiones alternativas (Karimipour *et al.*, 2005; Zeng y Trauth, 2005; Malczewski, 2006; Zhang y Huang, 2011).

Partiendo de esta metodología, en el modelo de decisión multicriterio se definieron criterios y subcriterios a fin de priorizar áreas para la implementación de estrategias para la prevención y gestión del riesgo de contaminación de acuíferos (Figura 1).



Figura 1. Estructura del modelo de decisión multicriterio para la gestión del riesgo de contaminación de acuíferos en el área serrana del PGP.

Fuente: Elaboración propia.

PERSPECTIVA CONCEPTUAL

La presente investigación se inserta en la perspectiva del riesgo, el cual puede entenderse a partir de la interacción entre una amenaza o peligrosidad y el daño que ésta ocasiona. Por un lado, la peligrosidad se define como la probabilidad (o posibilidad) de que ocurra, en determinado tiempo y espacio, un evento natural o antrópico potencialmente dañino. El daño, por otro lado, implica una pérdida en vidas, salud, bienes, una afectación (directa o indirecta, tangible o intangible) y está en relación estrecha con la vulnerabilidad de la población, es decir, con las características propias de esa población que la predisponen a sufrir daños en diversos grados (Massone, 2013; Cardona, 2001).

En este sentido, el riesgo de contaminación del agua subterránea resulta de la combinación de la peligrosidad que ocurra un evento de contaminación del acuífero y el daño que éste puede producir. A diferencia de otros procesos naturales, no se trata de un proceso recurrente (como el caso de las inundaciones, por ejemplo) sino que la mayoría de las veces responde a eventos que pueden ser puntuales o difusos, tanto en el tiempo como en el espacio (Massone, 2013). Dicho peligro se refiere a la probabilidad de que el agua subterránea se contamine en concentraciones que superen los valores máximos admisibles para consumo humano. Esto ocurre cuando la carga de contaminantes sobre el suelo, generados por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agrícolas o mineras, no es controlada adecuadamente, y en ciertos componentes excede la capacidad natural de atenuación del suelo y de los estratos subyacentes (Foster *et al.*, 2002). La peligrosidad estará dada entonces por la vulnerabilidad intrínseca del acuífero a la contaminación y la carga contaminante.

La primera es consecuencia de las características naturales del acuífero y de los estratos que lo separan de la superficie del suelo, es decir, está determinada esencialmente por el entorno hidrogeológico natural. En este sentido, la Zona No Saturada (ZNS) merece especial atención ya que ella representa la primera y más importante defensa natural contra la contaminación del agua subterránea (Romanelli, 2012). Por el otro lado, la carga contaminante (real o potencial, puntual o difusa), que se aplica o podría ser aplicada en la superficie, es resultado de la actividad humana y puede estimarse a partir de los usos del suelo (Foster *et al.*, 2002; Massone, 2013).

¿CUÁLES FUERON LAS CONCLUSIONES?

El modelo de decisión multicriterio, desarrollado por un equipo multidisciplinario, contempló indicadores del medio físico-natural y de vulnerabilidad social relacionados con la contaminación del agua subterránea en

áreas complejas desde el punto de vista socio-ecológico como los son las áreas de interfase urbano-rural. Este modelo permitió establecer un ranking de prioridades e identificar criterios y subcriterios para proponer medidas de gestión para mitigar el riesgo de contaminación de acuíferos.

La priorización de alternativas (unidad territorial de análisis) (de muy alta a muy baja) contribuye a la toma de decisión y esto resulta de gran importancia en países del Sur Global, donde los gobiernos cuentan con limitados recursos económicos. En ese sentido, el modelo contribuye a determinar, de manera objetiva, por dónde empezar a prevenir este riesgo. Asimismo, la planificación y gestión ambiental sobre una base científica son fundamentales para alcanzar el desarrollo sostenible.

Las alternativas clasificadas como de muy alta prioridad (El Paraíso de la Peregrina y Santa Paula) son aquellas que requerirán una intervención en un horizonte temporal de corto plazo, mientras que las clases de baja y muy baja prioridad (La Gloria de la Peregrina 1, El Coyunco y Colinas Verdes) deben ser monitoreadas para evitar su cambio a una peor situación.

¿QUÉ RESULTADOS SE OBTUVIERON?

En cuanto a los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto, cuatro de las ocho alternativas se ubicaron en las categorías de prioridad muy alta a alta para la implementación de estrategias de protección de las aguas subterráneas (Figura 2). Las alternativas en las categorías de prioridad muy alta a alta fueron: El Paraíso (3), Santa Paula (1), La Gloria de la Peregrina 2 (5) y Sierra de Los Padres (7). La alternativa Colina de Los Padres (6) obtuvo la categoría moderada, mientras que La Gloria de la Peregrina 1 (4), Colinas Verdes (2), El Coyunco (8) obtuvieron las categorías baja y muy baja. Los puntajes de prioridad en este modelo variaron de 0.070 a 0.161 (muy baja a muy alta, respectivamente).

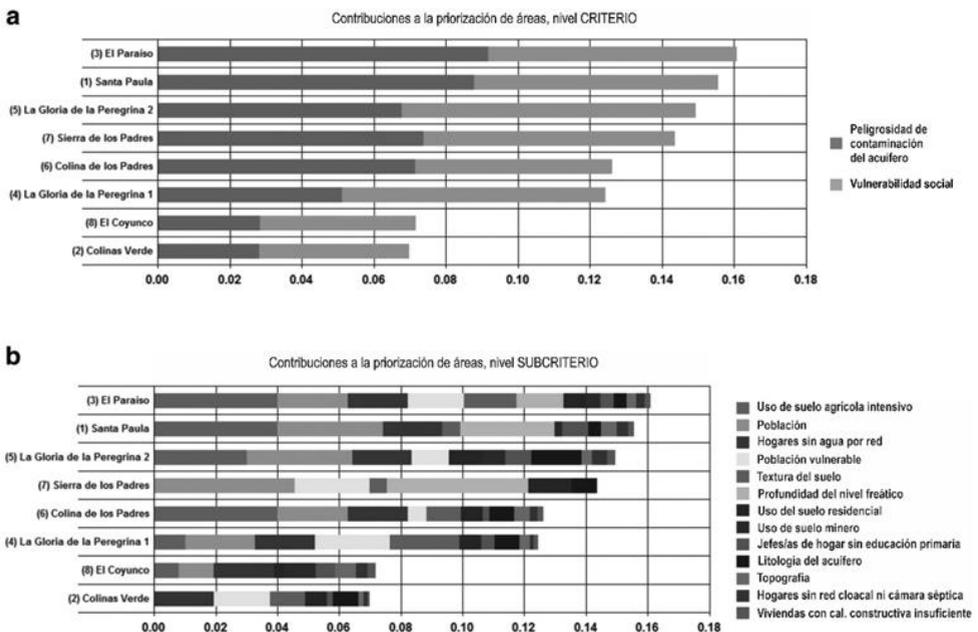
Con respecto a la contribución de cada criterio a los resultados, la prioridad muy alta está determinada por el criterio de peligrosidad de contaminación del acuífero. Para estas alternativas (El Paraíso de la Peregrina y Santa Paula), se recomienda aumentar el control en cuanto a la aplicación de agroquímicos, así como promover la conversión del modelo tradicional de producción hacia las buenas prácticas agrícolas y la implementación de cargos por contaminación. Por otro lado, para la prioridad alta la contribución de ambos criterios es muy similar.

En tal sentido, se propone, además, fortalecer las capacidades de la población y las herramientas de comunicación entre la sociedad civil y los organismos de gestión del agua. En el caso de Sierra de Los Padres, se recomienda fomentar la autoconstrucción de sistemas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias, como zanjas drenantes o lechos filtrantes. Con respecto a la prioridad moderada (Colina de Los Padres), la principal contribución está dada por el peligro de contaminación del acuífero. Por lo tanto, se recomienda implementar los mismos instrumentos a aplicar en la alta prioridad, pero considerando un horizonte temporal a largo plazo. Por último, el criterio de vulnerabilidad social predomina en las categorías de baja y muy baja prioridad (La Gloria de la Peregrina 1, El Coyunco y Colinas Verdes), por lo que se recomienda fortalecer las capacidades de respuesta de la población.

Los subcriterios que determinaron las prioridades muy alta y alta fueron: el *uso del suelo agrícola* (que varía entre 27 y 69%), seguido de la *población* (735 a 1672 habitantes) y la *profundidad del nivel freático* (menor o igual a 10 m). Esto es esperable, si se tiene en cuenta que estos subcriterios recibieron las ponderaciones más altas en el modelo multicriterio, y que se consideran aspectos críticos en la evaluación del riesgo de contaminación de acuíferos. Con respecto al subcriterio *población*, cuanto mayor es el número de habitantes permanentes en dicha área, mayor es la probabilidad de que ocurra un peligro de contaminación. La clasificación como muy prioritaria de la alternativa Sierra

de Los Padres (7) se explica por este hecho, a pesar de ser la única alternativa con agua por red. En cuanto a la prioridad moderada (alternativa 6), *uso de suelo agrícola* (68%) y en menor medida *población* (724 habitantes) fueron los subcriterios que determinaron esta clasificación. Por último, los subcriterios que definieron las prioridades bajas a muy bajas fueron: *población vulnerable* y *hogares sin agua por red*, seguidos por la *población total* y la *textura del suelo*. La contribución de los criterios y subcriterios para priorizar alternativas se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Contribuciones de los criterios y subcriterios para priorizar alternativas.



Fuente: Elaboración propia.

¿CÓMO SE OBTUVIERON LOS RESULTADOS?

El modelo de decisión multicriterio se desarrolló mediante el uso del programa Criterium Decision Plus 4.0 Beta (CDP) y comprendió criterios y subcriterios relevantes para la gestión del agua subterránea. Este programa utiliza una metodología de toma de decisiones propuesta por Thomas L. Saaty en los años setenta: el Proceso de Jerarquía Analítica (*Analytical Hierarchy Process*, AHP). Esta es una herramienta eficaz para estructurar un problema de decisión y ayuda a identificar y ponderar los criterios de selección, analizar los datos recopilados para los criterios y evaluar alternativas de solución. Dicha técnica construye una jerarquía de criterios de decisión y, a través de la comparación por pares de criterios, se produce un peso relativo para cada criterio de decisión. Cada comparación es una pregunta de dos partes que determina qué criterio es más importante y cuánto más importante, utilizando una escala relacional numérica.

El modelo propuesto evaluó el riesgo de contaminación de acuíferos a escala local y se estructuró en dos criterios principales: la peligrosidad de contaminación del acuífero (compuesto por la vulnerabilidad del acuífero y la carga contaminante potencial) y la vulnerabilidad social de la población expuesta. Los radios censales del área serrana del PGP fueron definidos como las unidades de análisis y, en este caso, constituyeron las alternativas (Figura 1). Se identificaron ocho alternativas: Santa Paula (1); Colinas Verdes (2); El Paraíso de la Peregrina (3); La Gloria de la Peregrina 1 (4); La Gloria de la Peregrina 2 (5); Colina de Los Padres (6); Sierra de Los Padres (7); El Coyunco (8).

Los criterios principales fueron desagregados en subcriterios. Por un lado, la peligrosidad de contaminación del acuífero consistió en el análisis del medio físico-natural e incluyó las características del acuífero, la topografía y el tipo de suelo; y también de los usos del suelo vinculados a la carga contaminante potencial basada en el método POSH (*Pollutant Origin and Hydraulic Surchage*; Foster and Hirata 2003). En cuanto a la vulnerabilidad intrínseca del

acuífero, se incluyeron los siguientes indicadores: porcentaje del radio con nivel freático menor a 10 m; porcentaje del radio con suelo no consolidado (limos y limos-arenosos); porcentaje del radio con suelo franco y porcentaje del radio con pendiente menor a 2°. Mientras que para analizar la carga contaminante potencial se tuvieron en cuenta los siguientes indicadores: porcentaje del radio con uso del suelo agrícola intensivo; porcentaje del radio con uso del suelo residencial y porcentaje del radio con uso del suelo minero.

Por otro lado, la evaluación de la vulnerabilidad social incluyó indicadores socioeconómicos, que proporcionaron datos sobre población, educación, pobreza, vivienda y servicios, los cuales permiten caracterizar la población expuesta a la potencial contaminación y su capacidad de adaptación. Los indicadores incluidos fueron los siguientes: número total de habitantes; porcentaje de hogares sin agua por red; porcentaje de personas de 0-4 años y de 65 años o más; porcentaje de jefes/as de hogar que no asiste o asistió a la escuela primaria; porcentaje de hogares sin red cloacal ni cámara séptica; porcentaje de viviendas con calidad constructiva insuficiente. Las Tablas 1 y 2 muestran los indicadores seleccionados para cada subcriterio, así como sus definiciones y las fuentes de información consultadas.

En el diseño del modelo participaron profesionales de las ciencias sociales y naturales, con amplia experiencia en el área de estudio y en contacto directo con los principales actores sociales. Siguiendo la metodología de Saaty, cada experto juzgó la importancia relativa de un criterio frente a cada uno de los demás, mediante el uso de una escala relacional numérica. La Tabla 3 muestra las ponderaciones de los criterios y subcriterios basados en el juicio mencionado anteriormente. Cada subcriterio del modelo se evaluó considerando la peor condición relacionada con el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, por ejemplo, para el subcriterio de profundidad del nivel freático, se consideraron valores inferiores a 10 m.

Tabla 1. Indicadores que componen el criterio peligrosidad de contaminación del acuífero.

Subcriterio	Indicador	Descripción	Fuente
Uso del suelo agrícola intensivo	Porcentaje (%) del radio con uso del suelo agrícola intensivo	Se trata de cultivos desarrollados en pequeñas parcelas (especialmente dedicadas a la producción de hortalizas, frutillas, kiwis y plantas ornamentales). Coincide con el cinturón hortícola de la ciudad de Mar del Plata, el segundo más importante del país en cuanto a su tamaño. La aplicación de estiércol y el riego se utilizan para mantener la alta productividad, lo que conduce a problemas de contaminación en el agua subterránea.	Imágenes satelitales, Google Earth PRO v. 7.1.2.2041 (2017) y salidas de campo.
Uso del suelo residencial	Porcentaje (%) del radio con uso del suelo residencial	Incluye viviendas, comercios y establecimientos de alojamiento turístico. Considerando la falta de red cloacal en toda la zona, cuanto mayor sea el área con uso de suelo residencial, mayor será la cantidad de aguas residuales generadas.	
Uso del suelo minero	Porcentaje (%) del radio con uso del suelo minero	Incluye actividades de extracción de suelo para la fabricación de ladrillos, proveedores de la industria de la construcción. El impacto de esta actividad en la economía local no es muy relevante con respecto a otras actividades primarias. Sin embargo, los efectos sobre los recursos naturales son apreciables. Particularmente, esta extracción de suelo disminuye la espesor de la zona no saturada, la principal barrera natural para que los contaminantes no lleguen al agua subterránea.	
Profundidad del nivel freático	Porcentaje (%) del radio con nivel freático menor a 10 m	Se evalúa el espesor de la zona no saturada, es decir, la distancia que el agua debe infiltrar y que puede ir acompañada de cargas contaminantes, al acuífero. Un mayor espesor proporciona una mayor probabilidad de atenuación y un mayor recorrido de los contaminantes potenciales hasta llegar al acuífero.	Salidas de campo para estudios hidrogeológicos (Romanelli <i>et al.</i> , 2014).
Litología del acuífero	Porcentaje (%) del radio con suelo no consolidado, limos y limos-arenosos	Representa las características del acuífero, particularmente la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir agua y contaminantes potenciales.	Auge (2004).
Textura del suelo	Porcentaje (%) del radio con suelo franco	La textura del suelo tiene un impacto significativo en la cantidad de infiltración en el suelo y, por lo tanto, en la capacidad de un contaminante para moverse verticalmente hacia la zona no saturada. Los suelos altamente permeables (texturas de suelo franco arenoso a franco) tienen más capacidad de infiltración debido a la alta porosidad y permeabilidad del tipo de suelo.	Base de datos geoespacial de Argentina (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 2008).
Topografía	Porcentaje (%) del radio con pendiente menor a 2°	Determina la pendiente de la superficie topográfica. Es un indicador crítico con un control directo de la escorrentía y, por tanto, de la infiltración/recarga del acuífero y del transporte de potenciales contaminantes por escorrentía superficial.	Modelo Digital de Elevaciones (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Indicadores que componen el criterio vulnerabilidad social.

Subcriterio	Indicador	Descripción	Fuente
Población	Número total de habitantes	Un mayor número de habitantes supone un mayor riesgo de contaminación del agua dada la existencia de más individuos expuestos.	Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, [INDEC], 2012)
Hogares sin agua por red	Porcentaje (%) de hogares sin agua por red	Incluye diferentes formas de abastecimiento de agua: perforación con bomba a motor; perforación con bomba manual; pozo; agua de lluvia, río, canal, arroyo o acequia.	
Población vulnerable	Porcentaje (%) de personas de 0-4 años y de más de 65 años	Incluye niños/as de 0 a 4 años y adultos mayores (65 años o más), que también son considerados como medida precautoria. Los altos niveles de nitrato en el agua potable son de especial preocupación para los bebés, pueden causar el "síndrome del bebé azul" y la exposición prolongada podría aumentar los riesgos de ciertos cánceres y defectos de nacimiento.	
Jefes/as de hogar sin educación primaria	Porcentaje (%) de jefes/as de hogar que no asiste o asistió a la escuela primaria	El nivel educativo de los/as jefes/as de hogar es considerado, dado que una persona con menor nivel educativo, y también las personas que están a su cargo, se encuentran en mayor riesgo debido a su ignorancia, falta de habilidades e información para enfrentar problemas de contaminación del agua.	
Hogares sin red cloacal ni cámara séptica	Porcentaje (%) de hogares sin red cloacal ni cámara séptica	Este indicador considera aquellos hogares que no utilizan instalaciones de saneamiento mejoradas (una red de desagües cloacales); es decir, los desagües se eliminan de forma segura <i>in situ</i> o se transportan y tratan fuera del sitio (sólo a pozo ciego, hoyo o excavación en la tierra, etc.).	
Viviendas con calidad constructiva insuficiente	Porcentaje (%) de viviendas con calidad constructiva insuficiente	Este indicador ese refiere a las viviendas sin materiales resistentes, sólidos, ni aislación adecuada (techo de chapa o fibrocemento). A su vez, no disponen de cañerías dentro de las viviendas o inodoro con descarga de agua.	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Valores de ponderación para los criterios y subcriterios.

Criterio		Peso	Subcriterio	Peso
Peligrosidad de contaminación del acuífero	Vulnerabilidad del acuífero	0,25	Profundidad del nivel freático	0,092
			Litología del acuífero	0,074
			Tipo de suelo	0,057
			Topografía	0,028
	Carga contaminante potencial	0,25	Uso de suelo agrícola intensivo	0,168
			Uso del suelo residencial	0,056
			Uso de suelo minero	0,025
Vulnerabilidad social	0,50	Población	0,193	
		Hogares sin agua por red	0,135	
		Población vulnerable	0,103	
		Jefes/as de hogar sin educación primaria	0,037	
		Hogares sin red cloacal ni cámara séptica	0,020	
		Viviendas con calidad constructiva insuficiente	0,011	

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de entrada al modelo se tomaron de diferentes mapas temáticos en el caso de la peligrosidad de contaminación del acuífero, publicados en Lima *et al.* (2019), y de datos obtenidos del Censo 2010 para la vulnerabilidad social (INDEC, 2013).

Los resultados para cada uno de los indicadores y para el modelo se representaron espacialmente en mapas elaborados en ArcGis 9.2 (Lima *et al.*, 2019). Toda la información espacial se proyectó en el sistema de coordenadas Gauss Krüger, Zona 6 de Argentina (Campo Inchauspe Datum). La configuración espacial para cada indicador se obtuvo a partir de la clasificación por cortes naturales de Jenks (en inglés, *natural breaks*). Este método se basa en las agrupaciones naturales inherentes a los datos. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos donde hay diferencias considerables entre los valores de los datos, maximizando las diferencias entre clases. En este caso, cada clase se asoció con un tipo de escala verbal de cinco categorías (trivial, poco

importante, importante, muy importante y crítica). Este es un tipo de escala verbal definido por el modelo, que varía de trivial (mejor) a crítico (peor). Las puntuaciones de decisión del modelo para cada alternativa se utilizaron para elaborar el mapa de prioridades en cuanto al riesgo de contaminación de acuíferos (Figura 2).

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos en el análisis multicriterio, se propusieron una serie de instrumentos de Gestión Integrada de Recursos Hídricos propuestos por la Global Water Partnership (GWP, 2017) con el fin de contribuir a la planificación territorial de esta interfase urbano-rural.

REFLEXIONES METODOLÓGICAS

Esta metodología de evaluación del riesgo de contaminación de acuíferos ofrece una alternativa a bajo costo y se puede utilizar para evaluar transformaciones a lo largo del tiempo, causados por cambios en el uso del suelo vinculados a las fuentes de contaminación o en el nivel freático debido a diferentes escenarios de explotación del acuífero. Asimismo, este procedimiento puede ser aplicado en otros territorios con diferentes condiciones naturales y socioeconómicas, para abordar los problemas de gestión del agua subterránea, que inciden en la sustentabilidad del territorio.

Una de las principales ventajas del modelo propuesto es la de conocer los aportes de los criterios y subcriterios para priorizar alternativas. Esto es un beneficio a la hora de evaluar el riesgo de contaminación del acuífero, ya que permite identificar qué aspecto (criterios naturales o socioeconómicos) domina en el resultado final. Como consecuencia, este hecho ayuda a los tomadores de decisiones a enfocarse en qué subcriterio se debe evaluar y monitorear, y también qué instrumento de gestión se debe aplicar.

Por otra parte, una de las principales limitaciones de este análisis multicriterio es la gran cantidad de datos necesarios en cada paso del procedimiento para registrar con precisión los requerimientos de los tomadores de decisión, así como la subjetividad en la asignación de pesos involucrados en el modelo.

Otro aspecto a considerar es el manejo de la información y las unidades territoriales de análisis a utilizar. Esta metodología incluye datos obtenidos de diferentes fuentes (trabajo de campo, imágenes satelitales, organismos públicos de estadística), los cuales pueden ser analizados espacial y temporalmente. Sin embargo, la información sobre diversos aspectos ambientales (datos sociales, económicos y naturales) se recopila originalmente con diferentes objetivos, a diferentes escalas, en diferentes marcos de tiempo y con diferentes supuestos sobre la naturaleza de los fenómenos. Esto crea dificultades técnicas para integrar dichos datos y también con respecto a la selección de la unidad de análisis adecuada al objetivo del estudio.

En este sentido, las unidades espaciales definidas para los datos físico-naturales casi siempre están diseñadas para ser internamente homogéneas hasta cierto punto (por ejemplo, unidades de suelo, tipos de cobertura del suelo), mientras que las unidades socioeconómicas son casi siempre el producto de algún proceso político-administrativo. En Argentina, los datos censales publicados por INDEC utilizan los radios como unidad mínima de análisis, lo cual implica una dificultad particularmente en espacios periurbanos, cuyas dinámicas son muy marcadas en cuanto al crecimiento poblacional y la consolidación de las áreas residenciales. Es decir, algunos de los radios presentan población dispersa o incluyen varias localidades por lo que pueden aparecer algunos inconvenientes durante la interpretación de los datos. Mientras que, en Sierra de Los Padres y Colinas Verdes, la población se concentra en toda la unidad de análisis; en el resto de las alternativas se encuentran asentamientos dispersos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baccaro, K., Degorgue, M., Lucca, M., Picone, L., Zamuner, E., y Andreoli, Y. (2006). Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola de Mar del Plata. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(3): 95-110.
- Bedmar, F., Gianelli, V., Angelini, H., y Viglianchino, 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.
- Cardona, O.D. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. *International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice*. Wageningen: Disaster Studies of Wageningen University and Research Centre.
- De Gerónimo, E., Aparicio, V.C., Bárbaro, S., Portocarrero, R., Jaime, S. & Costa, J.L. (2014). Presence of pesticides in surface water from four sub-basins in Argentina. *Chemosphere*, 107: 423-431.
- Della Spina, L. (2016). Evaluation decision support models: highest and best use choice. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 223: 936-943.
- Fernández Lozano, J. (2012). *La Producción de Hortalizas en Argentina (Caracterización del sector y zonas de producción)*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Corporación del Mercado Central de Buenos Aires.
- Ferretti, V., y Montibeller, G. (2016). Key challenges and metachoice in designing and applying multi-criteria spatial decision support systems. *Decision Support Systems*, 84: 41-52.
- Foster, S., Hirata, R., Gomez, D., D'Elia, M., y Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies*. Washington, DC: The World Bank.
- Global Water Partnership (GWP). (2017). Integrated water resources management (IWRM) Toolbox. Disponible en: https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/about_iwrm_toolbox/.
- Karimipour, F., Delavar, M. R. & Kinaie, M. (2005). Water quality management using GIS data mining. *Journal of Environmental informatics*, 5(2): 61-71.
- Lima, M.L., Romanelli, A., Calderon, G. & Massone, H.E. (2019). Multi-criteria decision model for assessing groundwater pollution risk in the urban-rural interface of Mar del Plata City (Argentina). *Environmental monitoring and assessment*, 191, 347.

-
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) (2012). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Censo del Bicentenario*. Procesado con CEPAL/CELADE Redatam +SP.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7): 703-726.
- Massone, H.E. (2013). El concepto de riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Un análisis de sus perspectivas y alcances. *Temas actuales de la hidrología subterránea*, 271-281.
- Romanelli, A. (2012). *Evaluación ambiental de lagunas pampásica del sudeste bonaerense. Diagnóstico y perspectivas de gestión sustentable*. (Tesis del Doctorado en Ciencias Biológicas). Mar del Plata: FCEyN, UNMDP.
- Zeng, Y. & Trauth, K. M. (2005). Internet-based fuzzy multicriteria decision support system for planning integrated solid waste management. *Journal of Environmental Informatics*, 6(1): 1-15.
- Zhang, H. & Huang, G. H. (2011). Assessment of non-point source pollution using a spatial multicriteria analysis approach. *Ecological Modelling*, 222(2): 313-321.

