

# Modelo de soporte de decisión para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea en la cuenca del Arroyo Dulce

*María Lourdes Lima<sup>1,2</sup>, Asunción Romanelli<sup>1,2</sup>, Héctor Massone<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, (CONICET), Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Universidad Nacional de Mar del Plata, Funes 3350 Nivel 1, 7600, tel 2234754060, Mar del Plata, Argentina.

Mail de contacto: [mlima@mdp.edu.ar](mailto:mlima@mdp.edu.ar)

---

## RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo lógico basado en el conocimiento experto para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea. El conocimiento base fue desarrollado en el software NetWeaver y evaluado en el sistema Ecosystem Management Decision Support (EMDS). El uso de este sistema fue aplicado en la cuenca del Arroyo Dulce, la cual presenta un área de 1000 km<sup>2</sup> y abarca un total de 27 subcuencas. Los resultados obtenidos mostraron cinco subcuencas con muy alta evidencia para el peligro de contaminación del agua subterránea, coincidiendo con condiciones de baja profundidad del nivel freático, textura franco-limosa del suelo y un uso agropecuario de la tierra. La aplicación del EMDS es un ejemplo claro de cómo los sistemas de soporte de decisión pueden ser utilizados no sólo como herramientas de gestión, sino también como herramientas para comunicar claramente la temática bajo estudio.

Palabras clave: Modelo lógico, Peligro de contaminación del agua subterránea, Sistema de soporte de decisión.

---

## ABSTRACT

This paper gives an account of the design of a knowledge base as a logical framework for assessing aquifer pollution hazard. The knowledge base was developed with the NetWeaver software and evaluated in the Ecosystem Management Decision Support (EMDS) system. The use of this system is demonstrated with an example from Dulce Stream Basin (1,000 km<sup>2</sup> encompassing 27 subwatersheds). The results showed five subwatersheds with high evidence for aquifer pollution hazard, coinciding with the natural conditions of the basin due to low water table depth, loam soil texture and agricultural land use. The implementation of the EMDS is a clear example of how decision support systems can be used not only as a management tool, but also as tools to clearly communicate a specific environmental issue.

Keywords: Logic Model, Pollution hazard of groundwater, Decision support system.

---

## Introducción

Los Sistemas de Soporte a la Decisión (SSD) facilitan el proceso de toma de decisiones de una manera cualitativa basada en el conocimiento de los expertos (Sewilam et al., 2007). Una característica importante de estos sistemas es que permiten el uso y la captura de los conocimientos especializados de un amplio espectro de las ciencias naturales, y además pueden aplicarse efectivamente a una variedad de temáticas/problemáticas vinculadas a la gestión ambiental (Rizzoli y Young, 1997). Muchos investigadores han estado trabajando en el desarrollo de diversos modelos y herramientas de soporte de decisiones para hacer frente a la complejidad de la gestión de los recursos hídricos (Salewicz y Nakayama, 2004). Diversas fuentes en la literatura demuestran que se ha

avanzado considerablemente en las últimas décadas en SSD. Las áreas generales de aplicación incluyen la planificación y gestión de cuencas (Reynolds et al., 2000), la evaluación de riesgos de contaminación de las aguas subterráneas (Chowdary et al., 2005.), la evaluación del paisaje y planificación de la recuperación de ecosistemas (Reynolds y Hessburg, 2005), la gestión integrada de los humedales (Janssen et al., 2005) y el análisis del impacto de las políticas de restricción de agua (Recio et al., 2005).

Con la creciente disponibilidad de bases de datos espaciales, modelos físicos del medio, técnicas de visualización y las capacidades analíticas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los SSD pueden ser desarrollados con mayor eficacia para la planificación del paisaje.

Los objetivos de este estudio fueron diseñar un modelo lógico basado en el conocimiento experto para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea e ilustrar su aplicación en el análisis del paisaje dentro del sistema Ecosystem Management Decision Support (EMDS) (Reynolds et al. 2003). El EMDS integra el formalismo lógico basado en el conocimiento experto tal como se aplica en el sistema NetWeaver (Reynolds et al. 2003) dentro de un SIG. Se demuestra la utilidad del modelo con un ejemplo en una cuenca representativa de la llanura pampeana, la Cuenca del Arroyo Dulce.

### Área de estudio

La Cuenca del Arroyo Dulce se encuentra situada en el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires, abarcando la porción Este del Partido de Balcarce y el Sur del Partido de Mar Chiquita, con una superficie de 1000 km<sup>2</sup>. El Arroyo Dulce nace entre las sierras El Volcán y La Vigilancia, y desemboca en la laguna costera de Mar Chiquita (Fig 1). Esta región posee un gran valor de conservación, ya que la UNESCO declaró en 1996 a un sector de la laguna de Mar Chiquita, Reserva de Biosfera MAB (Man and the Biosphere), albergando flora y fauna de diferentes subambientes: planicies mareales, llanura de inundación, marismas, deltas mareales, barrera de medanos, etc (Iribarne, 2001).

El basamento hidrogeológico de la región está constituido por ortocuarcitas eopaleozoicas, sobre éste se disponen sedimentos loessoides pleistoceno-holocenos limo-arenosos y arenosos muy finos. Esta secuencia es la más importante desde el punto de vista hidrogeológico ya que constituye el acuífero principal de la región. El acuífero es definido como tipo "libre y multicapa". Las diferentes capas acuíferas se separan por niveles discontinuos de permeabilidad relativa menor, representados por niveles limoarcillosos e intercalaciones de tosca (Martínez y Massone, 1997).

La principal actividad económica en la cuenca es la agricultura (soja, maíz, girasol y papa son los principales cultivos). Debido al intenso uso agrícola que presenta la zona de Sierras de Tandilia, la erosión de sus suelos y al continuo lavado provocado por lluvias y riego, Menone et al, (2001) describieron procesos de contaminación por plaguicidas órgano-clorados y otros agroquímicos en los sedimentos de la laguna y arroyos tributarios.

## Metodología

### Delimitación de subcuencas

Se procesó la información hidrológica de la Cuenca del Arroyo Dulce a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) mediante el uso de la herramienta Arc Hydro, con el fin de obtener el modelo de datos hidrológicos superficial. Esta herramienta es una extensión del ArcGis 9.2 (ESRI, 2007), la cual fue desarrollada por el Centro de Investigación en Recursos Hídricos (CRWR) de la Universidad de Texas, en 2001. El Arc Hydro se utilizó para derivar varios conjuntos de datos que describen colectivamente los patrones de drenaje de la cuenca. Se realizó un análisis raster para obtener los mapas de dirección y acumulación de flujos, la red de drenaje, la segmentación de canales y la definición de las zonas de captación (subcuencas). Como resultado, se obtuvieron 27 subcuencas para el área de estudio (Fig. 1).

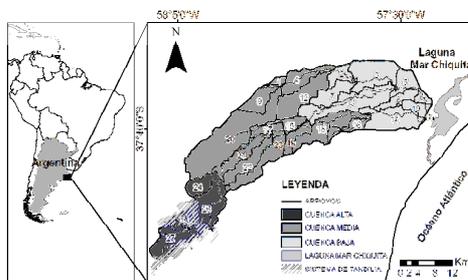


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

### Sistema de soporte de decisión espacial

El conocimiento experto se llevó a cabo mediante el software NetWeaver para su procesamiento lógico. El modelo lógico NetWeaver se integró en el EMDS, el cual es un sistema de apoyo a las decisiones que opera dentro del ArcGis (Reynolds et al. 2003). Los mapas resultados en el EMDS fueron clasificados utilizando el algoritmo de "natural breaks". Este algoritmo identifica los puntos de ruptura entre las clases utilizando una fórmula estadística llamada optimización de Jenks (Jenks y Caspall 1971; Jenks 1977); básicamente reduce al mínimo la suma de la varianza dentro de cada clase (Murray y Shy 2000).

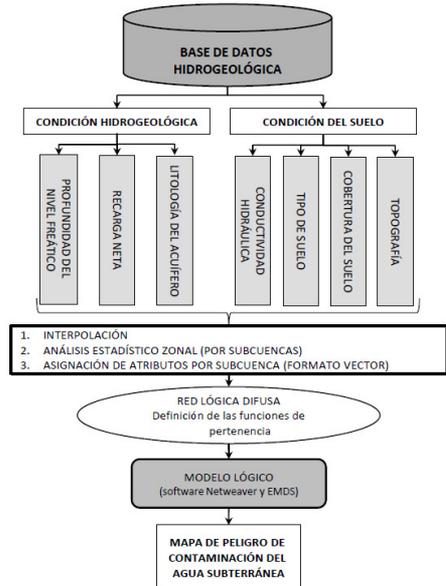
El marco metodológico para la evaluación propuesta se ilustra en la Fig. 2. El modelo lógico diseñado para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea se centra en dos tópicos principales: condición hidrogeológica y condición del suelo (Tabla

1). Cada t3pico principal se compone de t3picos secundarios. El modelo l3gico muestra el estado de cada subcuenca evaluada con respecto a su posible contribuci3n en el peligro de contaminaci3n al agua subterr3nea, basado principalmente en los par3metros de los m3todos DRASTIC (Aller et al. 1987) y GOD (Foster 1987). Los t3picos secundarios son los siguientes: profundidad del nivel fre3tico, recarga neta y litolog3a del acuífero para la condici3n hidrogeol3gica, y tipo de suelo, topograf3a, conductividad hidr3ulica y cobertura del suelo para la condici3n del suelo. La estructura l3gica completa es una red l3gica difusa. La evaluaci3n depende de los dos t3picos principales, cada uno de ellos contribuye incrementando la evaluaci3n del peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea, como se indica con el operador l3gico *uni3n*. Por otra parte, debido a que el operador *uni3n* especifica como premisa contribuir progresivamente al predicado principal, una baja fuerza de evidencia de un t3pico puede ser compensado por una fuerte evidencia de los dem3s. Del mismo modo, cada uno de los t3picos principales tiene su propia especificaci3n l3gica que incluye una serie de t3picos secundarios o locales. Un valor de -1 resulta si todos los par3metros tienen la peor condici3n posible. Un valor de 1 se alcanza cuando todos los par3metros tienen la mejor condici3n posible. Los resultados del modelo l3gico se expresan en t3rminos de fuerza de evidencia en apoyo al predicado general: "El peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea es bajo", y los predicados subordinados dentro de este predicado principal (Tabla 1).

**Tabla 1.** Esquema l3gico para la evaluaci3n del peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea. Se estableci3 que todos los predicados toman la forma nula, por ejemplo, una baja

T3pico principal	T3pico primario	T3pico secundario	Predicado (se indica en la forma nula)
Peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea ( <i>uni3n</i> )			El peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea es bajo.
	1. Condici3n hidrogeol3gica ( <i>uni3n</i> )		La condici3n hidrogeol3gica no contribuye al peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea.
		1.a. Profundidad del nivel fre3tico	La profundidad del nivel fre3tico esperada es alta.
		1.b. Recarga neta	La recarga neta es baja.
		1.c. Litolog3a del acuífero	La litolog3a del acuífero no contribuye al peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea.
	2. Condici3n del suelo ( <i>uni3n</i> )		La condici3n del suelo no contribuye al peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea.
		2.a. Tipo de suelo	La textura del suelo no contribuye al peligro de contaminaci3n del subterr3nea.
		2.b. Conductividad hidr3ulica	La conductividad hidr3ulica esperada es baja.
		2.c. Cobertura del suelo	La cobertura del suelo no contribuye al peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea.
		2.d. Topograf3a	La topograf3a no contribuye al peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea.

fuerza de evidencia basada en la evaluaci3n subyacente implica que el predicado de bajo peligro de contaminaci3n del agua subterr3nea tiene poco apoyo. La funci3n de pertenencia proporciona una expresi3n matem3tica explícita para probar un grado de observaci3n de afinidad por el concepto representado por el subconjunto difuso (Tabla 2). Los valores de pertenencia difusa en el NetWeaver muestran un rango de -1 (totalmente falso, o ninguna evidencia) a 1 (totalmente verdadero o evidencia total).



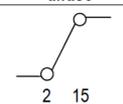
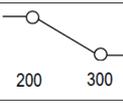
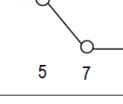
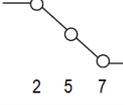
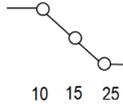
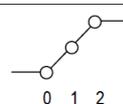
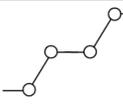
**Figura 2.** Marco metodol3gico para el modelo l3gico propuesto.

Los datos espaciales utilizados en este trabajo provienen de estudios previos de la regi3n (Auge 2004. Massone et al 2005; Lima et al 2011). Los diferentes mapas tem3ticos necesarios para la evaluaci3n del peligro de

contaminación del agua subterránea se prepararon utilizando el software ArcGis 9.2. Los datos de entrada para esta evaluación fueron combinados en una evaluación cuantitativa de cada parámetro. Para cada subcuenca, mediante un análisis estadístico zonal, se determinó el promedio de cada parámetro que contribuye a la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea

Posteriormente, se realizó una transformación de cada mapa a formato vectorial (como entidades poligonales) utilizando el módulo de análisis espacial de ArcGIS. Se utilizó una resolución espacial de 100 m × 100 m.

**Tabla 2.** Definición de los datos evaluados por tópicos, fuente de datos, condiciones de referencia para cada dato y argumento difuso.

Tópicos	Definición	Fuente de datos	Condiciones de referencia		Argumento difuso
			Totalmente verdadero (1)	Totalmente falso (-1)	
Profundidad del nivel freático (m)	Evalúa el espesor de la zona no saturada, es decir, la distancia que debe recorrer el agua para alcanzar el acuífero.	Trabajos previos (Lima et al., 2011)	> 15	< 2	
Recarga neta (mm)	Este parámetro evalúa la cantidad de agua que entra en el acuífero, el principal vehículo de transporte de los contaminantes.	Balance hídrico de la zona de estudio.	< 200	> 300	
Litología del acuífero <sup>a</sup>	Representa las características del acuífero, particularmente la capacidad del medio poroso y / o fracturado para transmitir los contaminantes.	Antecedentes geológicos (Massone, 2005)	5	7	
Tipo de suelo <sup>b</sup>	Este parámetro estima la capacidad de los suelos para retardar el movimiento de los contaminantes, incluyendo la parte superior de la zona no saturada.	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Mapa de suelos INTA (1989)	2	7	
Conductividad Hidráulica (m/día)	Determina la cantidad de agua que fluye a través del acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección.	Estudios previos sobre parámetros hidráulicos en los sedimentos pampeanos (Auge, 2004)	< 10	> 25	
Cobertura del suelo <sup>c</sup>	Determina la carga potencial de contaminación del acuífero, a través de las actividades agrícolas de la zona.	Información previa de cobertura del suelo (Zelaya et al. 2009, Lima et al. 2011)	2	0	
Topografía <sup>(c)</sup>	Determina la pendiente de la superficie topográfica. Es un factor relevante en la recarga del acuífero, en el drenaje y en el transporte de los contaminantes por escorrentía superficial.	Modelo digital del terreno y cartografía del Instituto Nacional de Geografía Argentina (IGN)	> 8	< 0.1	

<sup>a</sup> La litología del acuífero es una variable cualitativa. Se representa como una variable cuantitativa siendo: 5 (acuíferos no consolidados arena y arcilla) y 7 (acuíferos no consolidados arena y grava). <sup>b</sup> El tipo de suelo es una variable cualitativa. Se representa como una variable cuantitativa siendo: 2 (textura de suelo arcillosa), 5 (textura de suelo franca) y 7 (textura de suelo arenosa). <sup>c</sup> La cobertura de suelo es una variable cualitativa. Se representa como una variable cuantitativa siendo: 2 (pastizal natural), 1 (pastura) y 0 (cultivos).

Toda la información GIS se proyectó en el sistema Gauss Krüger, zona 6, Argentina (Campo Inchauspe Datum). Se utilizaron las subcuenca de la Cuenca del Arroyo Dulce como unidades de análisis.

## Resultados

### Evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea

A fin de aclarar la interpretación de la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea, las etiquetas de la leyenda en cada mapa parcial y final han sido revertidas, por ejemplo muy bajo apoyo al bajo peligro de contaminación del agua subterránea = muy alto peligro de contaminación del agua subterránea, mientras que muy alto apoyo al bajo peligro

de contaminación del agua subterránea = muy bajo peligro de contaminación del agua subterránea. El mapa resultado ha sido clasificado con el algoritmo de "natural breaks" que acentúa las diferencias de las puntuaciones entre subcuencas. Las clases de evidencia en la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea se definen de la siguiente manera: muy alta (< -0.18), alta (-0.16 a -0.10), moderada (-0.10 a -0.06), baja (-0.06 a -0.002) y muy baja (-0,002 a 0,28).

#### *Tópico del modelo: Peligro de contaminación del agua subterránea*

Hubo diferencias pronunciadas entre las subcuencas de la zona de estudio (Fig. 3). En general, la contribución al peligro de contaminación del agua subterránea fue moderada a muy alta en la cuenca media y baja, aunque se presentaron algunas subcuencas con baja evidencia al predicado principal. Por el contrario, la cuenca alta presentó moderada a muy baja contribución en el peligro de contaminación del agua subterránea. Las condiciones de peligro de contaminación del agua subterránea en la cuenca media y baja se debieron principalmente a las inadecuadas condiciones del suelo. La Fig. 4 muestra los mapas parciales de todo el proceso de evaluación, visualizando esta figura es posible observar las diversas contribuciones al peligro de contaminación del agua subterránea. Un resumen de los resultados parciales se describe a continuación.

#### *Condición hidrogeológica*

A lo largo de la cuenca alta, la evaluación de la condición hidrogeológica mostró alta a muy alta contribución en el peligro de contaminación del agua subterránea. La evaluación de esta condición en las subcuencas de la porción media presentó moderada a baja contribución. En contraste, los resultados en la cuenca baja evidenciaron un gran número de subcuencas con baja a muy baja contribución al peligro de contaminación del agua subterránea en la condición hidrogeológica.

Considerando los tópicos secundarios de la condición hidrogeológica, en gran parte de la cuenca alta, la evaluación de la recarga neta y la litología del acuífero mostraron alta a muy alta evidencia a la contribución del peligro de contaminación del agua subterránea. La profundidad del nivel freático

en este sector tuvo muy baja a baja contribución debido a su elevado espesor de la zona no saturada. Las subcuencas de la cuenca media y baja mostraron condiciones que favorecen el bajo peligro de contaminación del agua subterránea por las contribuciones de la litología del acuífero y de la recarga neta. En general, en las subcuencas de la parte media y baja de la zona de estudio, la evaluación sugirió que la profundidad del nivel freático contribuiría al peligro de contaminación del agua subterránea ya que la zona no saturada presenta un delgado espesor.

#### *Condición del suelo*

Las subcuencas en la cuenca alta mostraron condiciones favorables al predicado de la condición de suelo. Por otro lado, los resultados en las porciones media y baja fueron mixtos con un considerable número de subcuencas que mostraron moderada a muy alta evidencia en la contribución al peligro de contaminación del agua subterránea. La mayoría de las subcuencas en la cuenca media y baja evidenciaron alta y muy alta contribución al peligro de contaminación del agua subterránea.

En relación a la cobertura del suelo, la parte superior de la cuenca presentó alta contribución al peligro de contaminación del agua subterránea ya que las actividades agrícolas predominan en este sector. Sin embargo, una subcuenca mostró muy baja evidencia para la contribución del peligro de contaminación del agua subterránea, esto se debe a que el área coincide con el sistema de sierras. La evaluación en otras porciones de la cuenca evidenció que las características de la cobertura del suelo no contribuyen al peligro de contaminación del acuífero debido al predominio de las actividades ganaderas. Las características apropiadas del suelo en la parte superior de la cuenca, principalmente textura franco arcillosa, mostraron bajo peligro de contaminación del agua subterránea. La cuenca media tuvo moderada a alta evidencia en la contribución del peligro de contaminación del agua subterránea debido a que la textura del suelo franco a franco arenosa domina el área. Esta zona también contiene pequeñas subcuencas con baja a muy baja contribución al peligro de contaminación del agua subterránea. La presencia de tierras bajas inundables y texturas del suelo franco a franco arcillosa es la explicación de este comportamiento

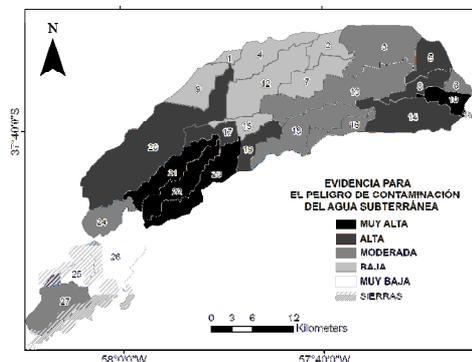
particular. Por último, la cuenca baja mostró alta contribución al peligro de contaminación del agua subterránea ya que el suelo en la zona presenta textura arenosa.

## Conclusiones

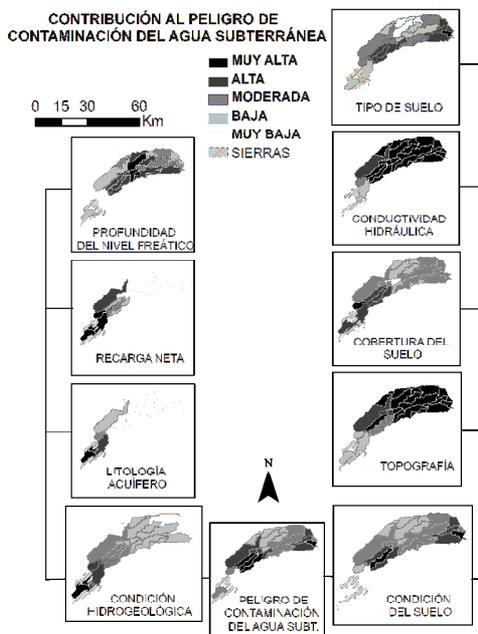
El marco metodológico aplicado permite a los tomadores de decisiones rankear el estado de cada subcuenca evaluada con respecto al peligro de contaminación del agua subterránea. El mapa resultado (Fig. 3) permitió identificar cinco subcuencas con muy alta evidencia para el peligro de contaminación del agua subterránea. Puede apreciarse que las subcuencas 21, 22 y 23 presentaron muy alta contribución al peligro de contaminación debido a la baja profundidad del nivel freático (2.86–3.14 m), a la textura del suelo franca a franca limosa y a la actividad agropecuaria que predomina en el sector.

La principal ventaja del EMDS es que los resultados no son respuestas de caja negra. El conocimiento base desarrollado en el NetWeaver proporciona una interfaz gráfica que permite a los usuarios rastrear fácilmente y entender la derivación de las conclusiones. La principal limitación de la aplicación de la metodología propuesta es su incapacidad para llevar a cabo la evaluación sin un valor promedio de entrada por cada subcuenca (por un análisis estadístico zonal). En el modelo este procedimiento genera un valor medio para cada subcuenca que puede conducir a subestimar o sobreestimar las contribuciones de los tópicos evaluados. El modelo lógico representado es uno de los tantos modelos posibles, este diseño actual puede ser adaptado fácilmente, los tópicos primarios y secundarios pueden ser modificados, eliminando o añadiendo nueva información.

Los sistemas de soporte de decisión tal como el EMDS juegan un papel importante en la planificación y gestión de los recursos naturales. Las decisiones relacionadas a la temática de la gestión del agua son complejas y requieren a menudo cierto grado de reflexión, por lo tanto los modelos de lógica difusa son adecuados para representar las complejidades inherentes a la problemática del agua, permitiendo a los tomadores de decisiones conocer el problema a partir del conocimiento experto. La aplicación del EMDS es un ejemplo claro de cómo los sistemas de soporte de decisión pueden ser utilizados no sólo como herramientas de gestión, sino también como herramientas para comunicar claramente la temática bajo estudio.



**Figura 3.** Evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea en la Cuenca del Arroyo Dulce.



**Figura 4.** Evaluaciones de los productos parciales que conducen a la evaluación final del peligro de contaminación del agua subterránea en la Cuenca del Arroyo Dulce.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Téc. Químico G. V. Bernava por la realización de los análisis químicos, al Téc. Hidrógrafo A. Ferrante por su colaboración en los muestreos y a Keith M. Reynolds (USDA Forest Service) por el software brindado. Esta investigación se llevó a cabo con la financiación de la Universidad Nacional de Mar del Plata dentro de proyecto "Análisis de los sistemas hídricos en el sudeste bonaerense a través de la interacción modelo conceptual-modelo numérico" (15/E462).

## Referencias

- Aller, L.T., Bennett, H. J. R., Lehr, R., Petty, J. y Hackett, G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using geo-hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency Report. EPA600/2-EP87/036.
- Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos: Conceptos y Métodos. E book: 1-38. RedIRIS. Red Académica y Científica de España en Internet. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.html>. Accessed 10 March 2007.
- Chowdary, V.M., Rao, N.H. y Sarma, P.B.S. 2005. Decision support framework for assessment of non-point-source pollution of groundwater in large irrigation projects. *Agricultural Water Management*, 75 (3): 194-225.
- ESRI (Environment System Research Institute). 2007 <http://www.esri.com>. Accessed 10 May 2007.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG (eds) Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Committee on Hydrological Research, The Hague, pp 69-86.
- Iribarne, O. 2001. Reserva de Biosfera Mar Chiquita: Características físicas, biológicas y ecológicas. Editorial Martín, Argentina. 320 pp
- Janssen, R., Goosen, H., Verhoeven, M.L., Verhoeven, J.T.A., Omtzigt, A.Q.A. y Maltby, E. 2005. Decision support for integrated wetland management. *Environmental Modelling & Software* 20: 215-229.
- Jenks, G. 1977. Optimal data classification for choropleth maps. Department of Geography occasional paper no. 2, University of Kansas, Lawrence, Kansas.
- Jenks, G. y Caspall, F. 1971. Error on choropleth maps: definition, measurement, and reduction. *Ann Assoc Am Geogr* 61(2):217-244.
- Lima, M.L. Zelaya, K. y Massone, H. 2011. Groundwater Vulnerability Assessment Combining the Drastic and Dyna-Clue Model in the Argentine Pampas. *Environmental Management* 47 (5): 828-839.
- Martínez, D.E., Massone H. 1997 Problemática de acuíferos con recarga en áreas suburbanas. Aspectos de la contaminación en el acuífero de Mar del Plata. Agua: Uso y Manejo Sustentable. Seminario Internacional. Asociación de Universidades. Grupo Montevideo. Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Massone, H., Tomas, M. y Farenga, M. 2005. Una aproximación geológica a la planificación de usos del territorio utilizando técnicas SIG. Balcarce (Argentina) como estudio de caso. XVI Congreso Geológico Argentino, Actas V. La Plata, Argentina. ISBN 987-595-001-9
- Menone M., Aizpun J., Moreno V. 2001. Contaminación Actual de la Laguna Costera Mar Chiquita. Reserva de Biosfera Mar Chiquita: Características físicas, biológicas y ecológicas. Editorial Martín, Argentina. Pp 53 - 64.
- Murray, A. y Shyy, T. 2000. Integrating attribute and space characteristics in choropleth display and spatial data mining. *Int J Geogr Inform Sci*, 14(7):649-667.
- Recio, B., Ibáñez, J., Rubio, F. y Criado, J. A. 2005. A decision support system for analysing the impact of water restriction policies. *Decision Support Systems*, 39 (3): 385-402.
- Reynolds, K.M., Jensen, M., Andreasen, J. y Goodman, I., 2000. Knowledge-based assessment of watershed condition. *Computers and Electronics in Agriculture* 27: 315-333.
- Reynolds, K.M., Rodriguez, S. y Bevans, K. 2003. The Ecosystem Management Decision Support System Version 3.0. USDA Forest Service Jefferson Way.
- Reynolds, K.M. y Hessburg, P. F. 2005. Decision support for integrated landscape evaluation and restoration planning. *Forest Ecology and Management* 20 (7): 263-278.
- Rizzoli, A.E., Young, W.Y. (1997). Delivering environmental decision support systems: Software tools and techniques, *Environmental Modelling and Software*, vol. 12, no. 23, pp. 237-249.
- Salewicz, K. A. y Nakayama, M. 2004. Development of a web-based decision support system (DSS) for managing large

international rivers. *Global Environmental Change*, (14): 25-37.

Sewilam, H., Bartussek, S. y Nacken, H. 2007. Rule-based Decision Support System for the Morphological Rehabilitation of Watercourses, *Water Resources Management*, 21 (12):2037-2047.