

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo Feliciano. Entre Ríos. Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542  
ISSN: 0366-0176

# Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo Feliciano. Entre Ríos. Argentina

E. L. Díaz, E. C. Romero, N. G. Boschetti y O. C. Duarte

Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta Provincial N° 11 Km 10. (3101) Oro Verde. Provincia de Entre Ríos. República Argentina.

ediaz@fca.uner.edu.ar; cromero@fca.uner.edu.ar; gboschet@fca.uner.edu.ar; oduarte@fca.uner.edu.ar

## RESUMEN

El área de estudio comprende la cuenca del Arroyo Feliciano, la que se ve sometida al uso de sus recursos hídricos cada vez más acentuado provocado por el aumento de la agriculturización y en general al cambio del uso del suelo. La cuenca de 8.199,4 km<sup>2</sup>, se encuentra ante un cambio repentino en el uso del suelo pasando de una ganadería extensiva y bajo monte natural, a un uso arrocero – sojero. Tiene una población urbana de aproximadamente 11.600 habitantes y un escaso número de pobladores rurales. Se desconoce si existen contaminaciones producidas por la actividad agrícola. Se ha planteado como objetivo estimar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos destinados a suministrar agua para consumo humano a las localidades en el interior de la cuenca, abastecimiento para riego y abrevado de animales, fundamentalmente ganado bovino. Para ello se han aplicado dos métodos que internacionalmente son considerados como estándares y buscan establecer la capacidad de atenuación de contaminantes por eliminación, retardación y dilución, para cargas impuestas en la superficie, DRASTIC y GOD. Los resultados obtenidos indican que las áreas de mayor vulnerabilidad a la contaminación se limitan a las cercanías de los cauces menores y el curso principal del Arroyo Feliciano, donde la profundidad al acuífero es mínima. En el resto de la cuenca el efecto de protección que brinda el espesor de los limos y arcillas de la Formación Hernandarias actúa como una protección al mismo.

Palabras clave: acuíferos, contaminación, DRASTIC, GOD, vulnerabilidad

## ***Groundwater vulnerability in the Arroyo Feliciano basin. Entre Rios. Argentina***

### ABSTRACT

*The study area includes the basin of the Feliciano stream (Arroyo Feliciano) which increasing water resources are affected by the agriculturalization rise and the change of soil usage. The 8.199,4 km<sup>2</sup> basin is undergoing a sudden change in the soil usage that goes from an extensive cattle production to intensive rice – soybean usage. It has an urban population of approximately 11,600 inhabitants and there are a low number of rural settlers. It is unknown if there is pollution produced by agricultural activity. The objective of this paper is to estimate the pollution vulnerability of the aquifers used for supplying water for human consumption to the towns within the basin; irrigation and watered of animals, fundamentally cattle. There are two internationally standard-considered methods that have been used, known as DRASTIC and GOD, in order to establish the capacity of attenuation of pollutants for elimination, delay and dilution, for agrochemical and fertilizers set in the surface. The outcomes of the application of both methodologies indicate that there is high vulnerability to pollution areas which are in the surroundings of the minor riverbeds and the main course of the Feliciano stream, where the depth to the aquifers is minimal. In the rest of the basin the effect that offers the thickness of the silts and clay of the Hernandarias formation, operates protecting the aquifer.*

*Key words: aquifers, DRASTIC, GOD, pollution, vulnerability*

### **Introducción**

El área de estudio comprende la cuenca del arroyo Feliciano, la segunda cuenca en superficie del interior provincial de Entre Ríos, la que se ve sometida al uso cada vez más acentuado de sus recursos hídricos provocado por el aumento de la agriculturización y en general al cambio del uso del suelo (Figura 1).

La cuenca del Arroyo Feliciano de 8.199,4 km<sup>2</sup>, afectada por una intensa agriculturización, se encuentra ante un cambio repentino en el uso del suelo

pasando de una ganadería extensiva y bajo monte natural, a un uso arrocero – sojero. De esta manera, el cultivo de arroz incrementa el uso del recurso hídrico con destino a riego, saliendo la cuenca de un reposo debido a la actividad ganadera y al escaso uso por parte de la población rural y urbana.

La cuenca tiene una población urbana de aproximadamente 11.600 habitantes y un escaso número de pobladores rurales. Se desconoce si existen contaminaciones producidas por la actividad agrícola.

La vulnerabilidad de los acuíferos frente a la con-

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

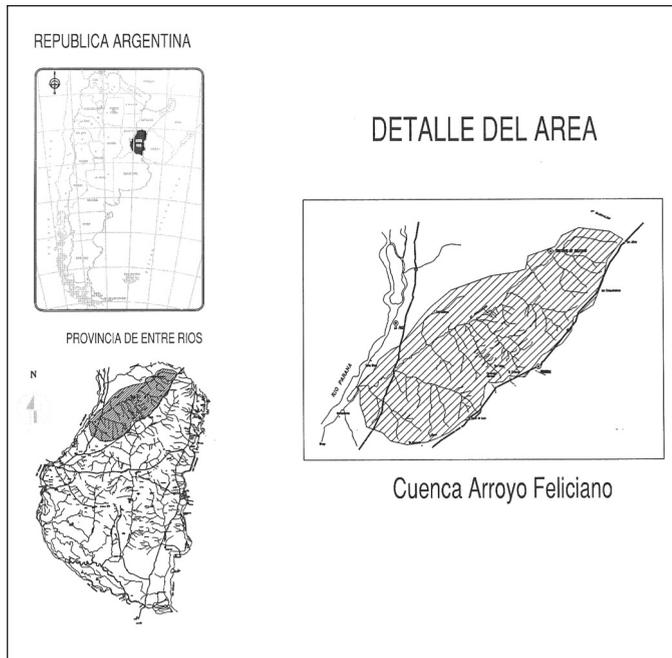


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Arroyo Feliciano  
Figure 1. Location of the Arroyo Feliciano basin

taminación es una propiedad intrínseca del medio natural (suelo, clima y acuífero) que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo (Foster, 1987). Es una propiedad relativa, no medible y adimensional y su evaluación se realiza admitiendo que es un proceso dinámico, pues depende de los impactos antrópicos (agricultura, industrias, efluentes, entre otros) y que puede modificarse en función de una adecuada gestión de los recursos hídricos a nivel de cuenca y del ordenamiento territorial.

Surge entonces que el concepto de la vulnerabilidad es intrínseca al medio natural y específica en lo que se refiere a los factores externos como el clima y las propiedades de los contaminantes.

El grado de vulnerabilidad puede expresarse mediante un índice. Los índices más utilizados son GOD y DRASTIC, que consideran las características físicas propias del marco natural hidrogeológico que afectan a la potencial contaminación del agua subterránea.

Si se establece como hipótesis de partida que el riesgo de los acuíferos frente a un determinado contaminante es equivalente a la vulnerabilidad de los mismos, estos índices se podrán utilizar para evaluar el riesgo, en este caso riesgo y vulnerabilidad están estrechamente relacionados.

## Objetivos

Se ha planteado como objetivo estimar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos Ituzaingó y Salto Chico, destinados a suministrar agua para consumo humano, abastecimiento para riego y abrevado de animales, en la cuenca del Arroyo Feliciano.

## Metodología

A los efectos de determinar la vulnerabilidad de un sistema acuífero, se han desarrollado numerosas técnicas, siendo aplicados los métodos que internacionalmente son considerados como estándares y buscan establecer la capacidad de atenuación de contaminantes por eliminación, retardación y dilución, para cargas impuestas en la superficie, DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) y GOD (Foster, 1987).

## Sistema de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son una alternativa en la gestión de datos de distintas fuentes, diversas escalas geográficas y soportes ya que permiten integrar fácilmente imágenes, bases de datos relacionales y aplicaciones de software, algunos de ellos, poseen potentes algoritmos de análisis espacial, temporal, estadístico y lógico permitiendo presentar los resultados en forma de mapas temáticos. Tienen la capacidad de procesar imágenes obtenidas de sensores remotos que proveen datos actualizados de las regiones geográficas para un diagnóstico de los recursos naturales. Pueden incluirse en estos sistemas los modelos de simulación, que posibilitan evaluar las alternativas de manejo de los recursos, logrando una visión objetiva de las ventajas y desventajas de cada una de ellas expresadas en valores económicos o en grados de degradación de los mismos.

## Relevamiento de Suelos

La información disponible en las Cartas de Suelos, en formato papel, de los Departamentos La Paz, Feliciano, Federal y Federación, generada por el Plan Mapa de Suelos INTA-Gobierno de Entre Ríos, se digitalizó mediante escáner y se georeferenció, convirtiéndose luego a formato vectorial, para obtener los polígonos correspondientes a cada una de las unidades taxonómicas reconocidas, lo que permitió conocer su distribución y estimar la superficie que ocupan en la cuenca.

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

### **Método DRASTIC**

El mismo fue desarrollado por Aller *et al.* (1987) por la EPA de los Estados Unidos para la evaluación de la contaminación potencial llamado "Índice DRASTIC". El acrónimo DRASTIC proviene de las siglas en inglés de D profundidad (Depth to water table), R recarga (Recharge), A medio del acuífero (Aquifer media), S suelo (Soil media), T topografía (Topography), I zona vadosa (Impact vadose zone) y C conductividad hidráulica (Conductivity).

Estas son propiedades del acuífero que se ingresan dentro de un Sistema de Información Geográfica (para este caso ArcView), en el cual cada una representa una cubierta. El método asume que el contaminante tiene la misma movilidad en el medio que el agua, que se introduce por la superficie del terreno y se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego). Luego se clasifica cada una según los pesos y tasas que nos indica el Índice DRASTIC, de esta manera se obtiene de cada una de estas propiedades dos cubiertas, que serán combinadas según la ecuación:

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

Los subíndices r representan rangos y los subíndices w representan pesos, por lo que  $D_r$  y  $D_w$  son dos variables dentro del SIG obtenidas a partir de la cubierta de la profundidad de agua del acuífero (D), correspondiendo dos variables para cada propiedad del acuífero. Son en total siete capas que se forman dentro del SIG donde cada una representa una clasificación de las propiedades anteriormente mencionadas.

A partir de las tablas que especifican los rangos y los pesos para cada capa del SIG se determina la combinación de los mismos. Finalmente el Índice se calcula dentro de las capas del SIG, asignándole el rango y el peso a cada una, como resultado se obtiene un valor numérico generado de la ecuación del Índice DRASTIC. El método considera vulnerabilidad muy baja si el valor está entre 23 y 88, baja si el valor se halla entre 89 y 120, moderada entre 121 y 160, alta entre 161 y 180, y extrema si es mayor a 181.

### **Método GOD**

El método de GOD fue desarrollado por Foster *et al.* (1987), y trata de ser simple y sistemático. Éste se considera el primer paso para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades y determina

la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante.

El método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes. La metodología utiliza la clasificación de tres parámetros del sistema natural que son: a) Ocurrencia del agua subterránea (Groundwater occurrence), b) Substrato litológico (Overall aquifer class) y c) Distancia al agua subterránea (Depth). La vulnerabilidad se calcula como el producto de dichos factores:

$$\text{VULNERABILIDAD} = G \cdot O \cdot D$$

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, cuanto mayor es el valor, más desfavorable es la condición. Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores. Es de destacar que el método solo toma en cuenta la posible atenuación antes de alcanzar la zona saturada, sin tomar en cuenta la dilución y dispersión en el acuífero. Finalmente el Índice se calcula dentro de las capas del SIG, asignándole el rango y el peso a cada una, como resultado se obtiene un valor numérico generado de la ecuación del índice GOD. Se considera vulnerabilidad muy baja si el valor es menor a 0.1, baja si está entre 0.1 y 0.3, moderada si está entre 0.3 y 0.5, alta si está entre 0.5 y 0.7 y extrema si es mayor a 0.7.

## **Resultados**

### **Suelos de la cuenca**

En la cuenca del Arroyo Feliciano se han reconocido suelos correspondientes a cinco ordenes según la clasificación Soil Taxonomy: Vertisol (30.7%), Alfisol (34%), Molisol (21.3%), Inceptisol (13.5%) y Entisol (0.5%). Los suelos Vertisoles y Alfisoles están desarrollados sobre limos arcillosos de origen lacustre - palustre, de la Formación Hernandarias y los Molisoles sobre limos calcáreos y loess retransportado de la Formación Tezanos Pintos, mezclados con limos calcáreos de la Formación Hernandarias (Plan Mapa de Suelos de la provincia de Entre Ríos, 1993). En el área hay un predominio de suelos con características vérticas: Peludertes (30.7%), Ocracualfes vérticos (22%), y Argiudoles vérticos (12%), producidas por tipo de arcilla que poseen, que es del grupo de la esmectita, de relación 2:1 (montmorillonita). Son suelos de gran

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

capacidad de absorción de agua, por lo que presentan mucha variación de volumen entre su estado en húmedo y seco (expansión-contracción). Los suelos del Orden Alfisol, son imperfectamente drenados y se ubican en áreas altas planas a muy suavemente onduladas, por lo que generalmente después de las lluvias quedan con exceso de agua sobre la superficie. Tienen un epipedón somero, con 20-27 % de arcilla, con una estructura generalmente masiva, de consistencia dura en seco y muy plástica en mojado, con subsuelo muy denso, con 40 a 50 % de arcilla y estructura prismática, con muy baja permeabilidad y una elevada densidad.

Otro de los suelos abundantes en la cuenca son los Vertisoles que tienen un porcentaje de arcilla superior al 30 % desde la superficie, con dominio de arcillas motmorilloníticas por lo que son muy duros y ásperos en seco, friables en húmedo y plásticos y adhesivos en mojado. Se encuentran en las pendientes de la divisoria de aguas entre el arroyo Estacas y el Feliciano en el Departamento La Paz y hacia el sur de la cuenca, en las pendientes hacia el arroyo Don Gonzalo y el arroyo Estacas. Tienen limitaciones para la producción agrícola relacionadas a su drenaje deficiente, a la alta cantidad de arcilla expansiva, la baja macroporosidad, y a la baja disponibilidad de fósforo para los cultivos. Los mejores suelos para el uso agrícola son los Molisoles que se ubican en un paisaje suavemente ondulado con pendientes entre 2 % y 6 %. Tienen horizonte superficial mólico de color oscuro, bien provisto de materia orgánica (2 a 4 %) de buena calidad, 70 % o más de saturación en bases y muy buena provisión de nutrientes. Le sigue un horizonte B<sub>2</sub> textural de menor permeabilidad. El aumento de arcilla montmorillonítica en su composición influye negativamente sobre las características de este horizonte, dándole una consistencia fuerte y una muy baja capacidad de infiltración.

En el valle fluvial del arroyo Feliciano y sus afluentes, con un paisaje de albardones y esteros, se encuentran suelos del Orden Inceptisol que son el resultado de procesos de evolución incipientes, formados por capas de textura franco-arcillo-limosa, gleizados a partir de los 40-50 cm. de profundidad y con una capa freática fluctuante cerca de la superficie. También en el valle del arroyo Feliciano, se encuentran suelos aluviales caracterizados por perfiles heterogéneos compuestos por capas de textura variable (muy limosa a arcillosa según la dinámica de deposición fluvial), sin evolución genética, por lo que corresponden al Orden de suelo Entisol. Son pobres a muy pobremente drenados y por lo general gleizados entre los 50 y 100 cm de profundidad.

La información digitalizada fue incorporada como

una capa al SIG elaborado por Duarte *et al.* (2008), que incluye además el modelo digital del terreno.

### **Hidrogeología del área**

La Figura 2 presenta un perfil geológico regional elaborado por Tujchneider y Fili (1988), parcialmente modificado para representar los primeros 100 metros de la columna, en los tramos de interés hidrogeológico regional y cuyos acuíferos son utilizados con fines consuntivos (agua potable, riego y abrevado de animales). Los límites de ambos sistemas acuíferos fueron incorporados como una capa al SIG.

### **Formación Hernandarias (Pleistoceno)**

Según Reig (1957), forma la parte superior del Grupo Punta Gorda en el noroeste de la provincia. Se extiende desde el Río Paraná hasta el Gualaguay, y desde el límite con Corrientes hasta la latitud de Paraná. En la barranca del Paraná aflora generalmente con un espesor de 4 a 8 metros. Esta unidad esta constituida fundamentalmente por arcillas y limos arcillosos rojizos, verdes grisáceos y castaños en estratos gruesos y muy gruesos.

Sus sedimentos son de origen palustre o lacustre, con un alto contenido de arcillas expansivas, sobre todo montmorillonita (75 a 90 %) e illita (25 a 10 %). y aflora en gran parte del territorio de la provincia, cubriendo discordantemente a formaciones de distinta edad.

En el área de estudio solo falta totalmente en los valles de los arroyos donde la erosión en cárcava ha sobrepasado la cota 40. En las perforaciones realizadas en el perímetro de la cuenca, los espesores observados varían normalmente entre 20 y 30 metros, a excepción del tramo comprendido entre El Cimarrón y Alcaraz, donde se produce un incremento importante a expensas de la Formación Ituzaingó, con un máximo en Sauce de Luna de 48 metros.

El perfil típico esta compuesto por una parte basal de arcillas predominantemente grises, algo arenosas, con concreciones calcáreas; una parte intermedia de arcillas marrones con abundante yeso, que llega a constituir yacimientos explotables. Finalmente, en los últimos 5 a 10 metros superiores, la secuencia es mas limo-arcillosa, el carbonato de calcio forma grava, concreciones y agregados pulverulentos manchados por oxido de manganeso.

Según Iriondo (1980), se trata de sedimentos lacustres y palustres desarrollados en clima seco. El enriquecimiento de yeso en la base, indica una cuen-

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

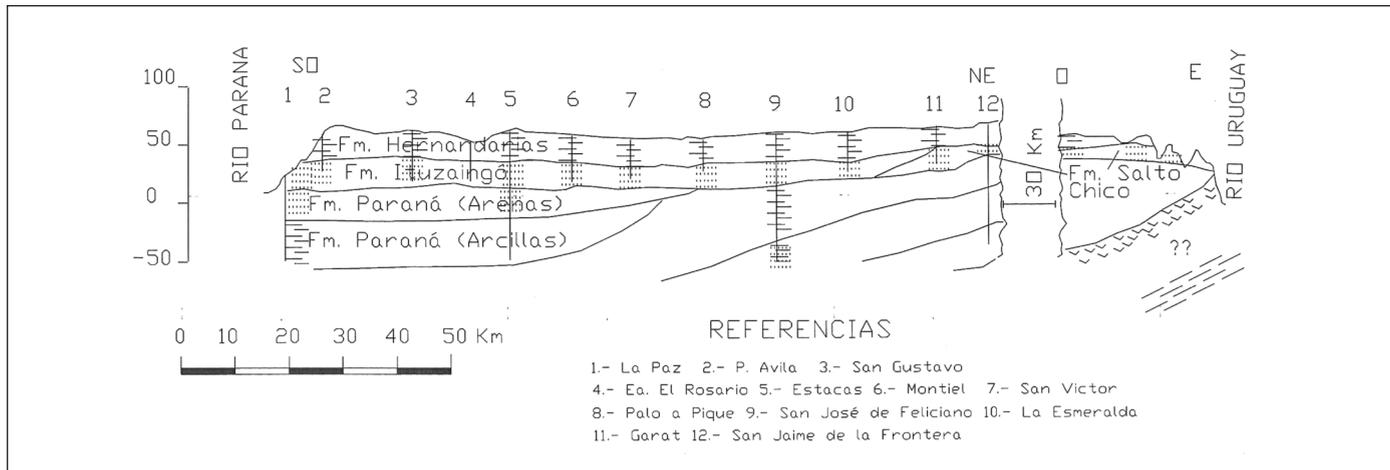


Figura 2. Perfil Geológico Regional. Parcialmente modificado de Tujchneider y Fili (1988)  
 Figure 2. Regional Geological Profile. Partially modified from Tujchneider y Fili (1988)

ca cerrada con pequeñas depresiones, donde se producía la precipitación del mismo. En cercanías de la localidad de Hernandarias existen explotaciones de yeso e industrias donde es procesado.

Los sedimentos ricos en esmectitas de la Formación Hernandarias, que cubren gran parte de la superficie de Entre Ríos, han originado los suelos Vertisoles (De Petre y Stephan, 1987)

#### *Formación Ituzaingó (Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior)*

Es de origen fluvial y está constituida predominantemente por arenas finas y medianas de color amarillo ocre y limos grises. Su composición mineralógica es fundamentalmente cuarzosa con cantidades menores de feldespatos, micas, magnetita y otros máficos (Iriondo y Rodríguez, 1973). Presenta diversos grados de compactación, desde totalmente sueltas hasta muy duras debido a la cementación con hidróxidos de hierro y sílice.

Aflora en extensos tramos de las barrancas de la margen izquierda del Río Paraná, desde Ituzaingó, en Corrientes hasta Paraná, Entre Ríos y se encuentra en el subsuelo de la mitad occidental de ambas provincias.

En el área de estudio, durante las grandes bajantes del Río Paraná, puede observarse en algunos lugares el contacto entre las formaciones Paraná e Ituzaingó, mediante discordancia erosiva; entre Pueblo Brugo y La Paz este contacto se encuentra a cotas variables entre 7 y 15. Por lo general la secuencia comienza con un nivel basal de rodados de arcilla, lentes de grava,

capas fusiformes de arcilla pardo verdosa con restos de flora, planchones de arenisca y troncos silicificados; la estratificación es entrecruzada. Siguen hacia arriba arenas medianas y finas, limpias, con estratificación horizontal e intercalaciones mantiformes, de pocos centímetros de espesor, de arcillas grises. En la parte cuspidal de la secuencia se hace predominantemente pelítica, con arena muy fina y arcilla en capas intercaladas de espesor milimétrico.

El techo de la formación aflora o se encuentra a pocos metros de la superficie por debajo de cota 40. Su espesor es bastante regular, variando entre 20 y 30 metros desde La Esmeralda hasta Piloto Ávila, pero se reduce notablemente y la cota de su techo es más variable en la divisoria sudeste. Esta unidad se constituye en la principal fuente de abastecimiento de agua con características físico-químicas que la hacen apta para consumo humano y, por los caudales que eroga, también para riego complementario.

#### *Formación Salto Chico (Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior)*

Esta formación fue depositada por el río Uruguay y sus afluentes, Rimoldi (1962) y Gentili y Rimoldi (1979). Está integrada por depósitos fluviales de composición heterogénea donde predominan arenas de granulometría variada con tonalidades rojizas y amarillentas. La secuencia comienza con una base de arcillas blanquecinas y gris verdosas continuando hacia arriba en forma alternante con niveles de arena, grava, conglomerados y arcilla (Iriondo, 1980; Iriondo y Santi (2000). Son característicos de esta formación,

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

la presencia de gruesos conglomerados conformados por cantos rodados, cementados por hierro y manganeso.

El espesor de Salto Chico es muy variable, observándose un marcado incremento hacia el sur, con un registro máximo de 70 metros. La presencia de esta formación en el área de estudio se conoce por perforaciones y se encuentra restringida al extremo nor-oriental; en opinión de los autores, el límite occidental cruza a la cabecera de la cuenca de norte a sur, pasando aproximadamente a la altura de las estaciones Garat y La Calandria. En San Jaime de la Frontera, el techo de la Formación se encuentra aproximadamente a cota -55 y va descendiendo hacia el oeste y sur. El espesor registrado en el área es de pocos metros: 6 en San Jaime y 10,5 en Los Conquistadores, únicas perforaciones que la han sobrepasado; en ambos casos se trata de arenas superpuestas a varias decenas de metros de arcilla roja.

### Elaboración del SIG

En ambos métodos se trabajó en la proyección cartográfica Gauss Krugger faja 5 WGS84. Con datos provenientes de estudios realizados por la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos en contrato con el Consejo Federal de Inversiones - Etapa III se elaboró un modelo digital correspondiente a la piezometría en el área de la cuenca y la capa raster para el SIG. Se utilizaron datos producidos por el proyecto SRTM de la misión STS-99 de NASA en Febrero de 2000, y entregados a la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Para elaborar el Modelo Digital de Terreno y obtener otra capa raster necesaria para los objetivos propuestos. Mediante algebra de imágenes se restó la primera capa a la segunda y se obtuvo la capa raster de profundidad del nivel piezométrico. Luego de este paso en común se reclasificó la capa obtenida y se asignaron valores a los intervalos de profundidad a los acuíferos Ituzaingó y Salto Chico, de acuerdo a cada uno de los métodos utilizados.

### Método DRASTIC

Asignando los valores ponderados según Aller *et al.* (1987), se obtuvo la capa de profundidad del nivel piezométrico, correspondiente a la capa D, luego se elaboró la capa R, correspondiente a la variable Recarga; con los límites inferidos por Tujchneider y Fili (1988), se realizó la capa A, representativa de la variable acuífero, y finalmente la capa S, para la variable suelos, se confeccionó a partir de datos del

Plan Mapa de Suelos Convenio INTA Prov. Entre Ríos. La capa T, correspondiente al relieve, se obtuvo a partir del Modelo Digital de Elevación realizado con datos de NASA, y National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), la capa I se realizó según los valores de Tabla 1 y la capa C se construyó con la misma información de límites usada para la capa A. A partir de los datos de profundidad del nivel piezométrico, recarga, características de los acuíferos involucrada, suelo, relieve, zona no saturada y la conductividad hidráulica de los acuíferos se asignaron los valores, según las tablas elaboradas en Aller *et al.* (1987), que se presentan en la Tabla 1.

Finalmente se sumaron las capas raster obtenidas anteriormente y se obtuvo el mapa de Vulnerabilidad General. En la Figura 3, se presenta el mapa de Vulnerabilidad del Acuífero determinado mediante el método DRASTIC, en el se puede observar que las condiciones de alta vulnerabilidad se producen en la parte alta del cauce del curso principal y algunos afluentes, así como en el valle de inundación de los mismos, y también en la parte baja del curso principal y su afluente A° Alcaraz, los que representan un 4 % de la superficie total. Un 10% de la cuenca tiene moderada vulnerabilidad observada en el curso medio y en la mayoría de los afluentes; un 17 % corresponde a baja vulnerabilidad (área ocupada por Formación Salto Chico y suelos aluviales) y el resto de la superficie de la cuenca manifiesta muy baja vulnerabilidad (69%).

Parámetro	Componente	Valor	Ponderador	Resultado
D.- Profundidad	Cota -Profundidad	1 a 10	5	5 a 50
	Fm. Hernandarias	1	4	4
R.- Recarga	Suelos Aluviales	3	4	12
	Lecho del Arroyo	6	4	24
A.- Acuífero	Fm. Salto Chico	8	3	24
	Fm. Ituzaingó	6	3	18
S.- Suelos	Fm. Hernandarias	7	2	14
	Suelos Aluviales	9	2	18
	Lecho del Arroyo	10	2	20
T.- Relieve	Pendiente 0 a 2%	10	1	10
	Pendiente 2 a 6%	9	1	9
I.- Zona no saturada	Fm. Hernandarias	1	5	5
	Suelos Aluviales	6	5	30
C.- Conductividad	Lecho de Arroyo	8	5	40
	Fm. Salto Chico	4	3	12
	Fm. Ituzaingó	2	3	6

Tabla 1. Asignación de los parámetros del Método DRASTIC  
Table 1. DRASTIC method parameter assignment

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

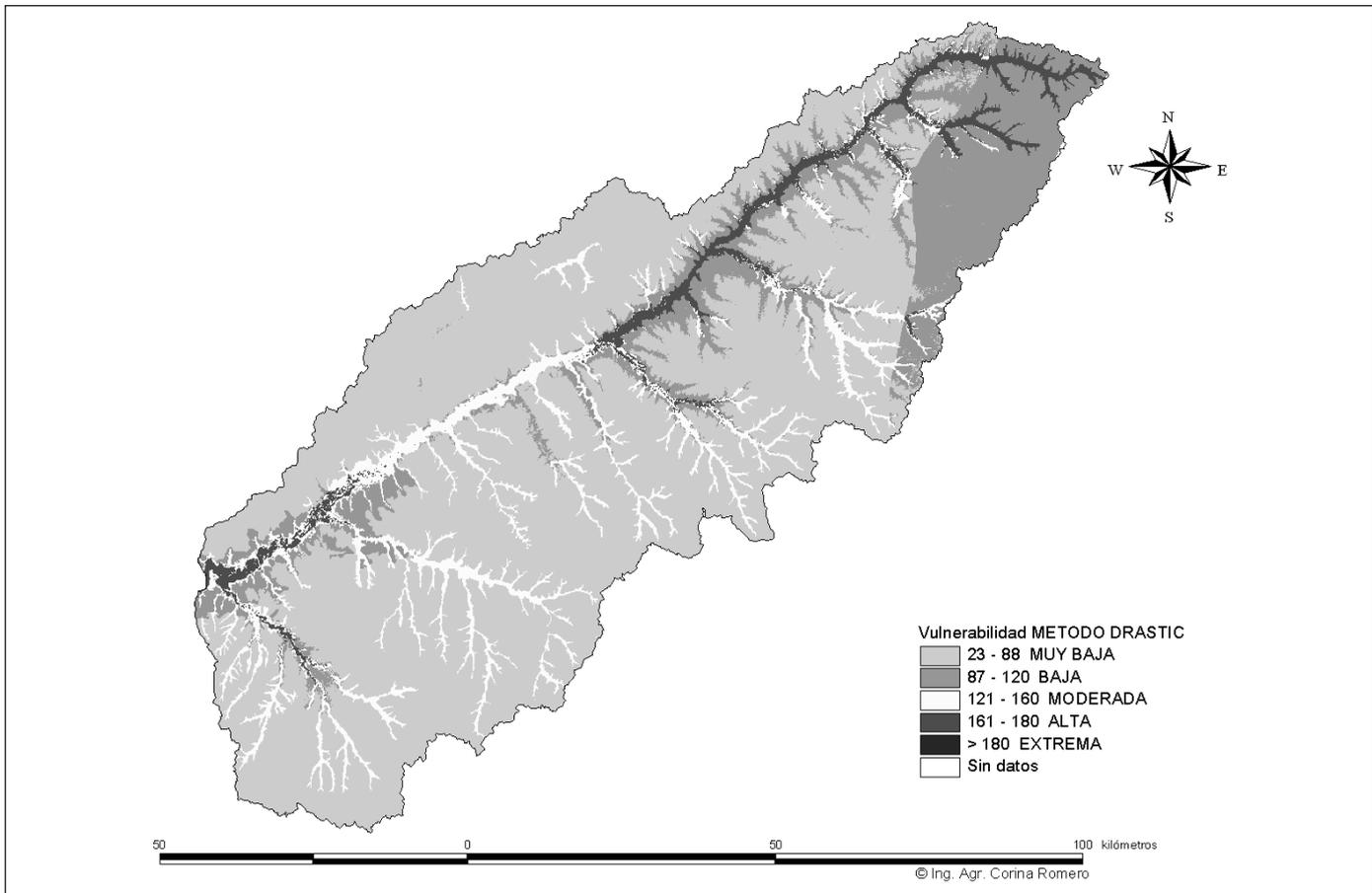


Figura 3. Vulnerabilidad del Acuífero. Método DRASTIC  
 Figure 3. Acuífer Vulnerability. DRASTIC method

**Método GOD**

Por reclasificación de la capa raster de profundidad del nivel piezométrico con valores del método GOD se obtuvo la capa D, también en formato raster se elaboró un mapa de tipo de acuífero asignándole valores del método GOD, para obtener la capa G y por último, con información de las Cartas de Suelos realizadas por el Plan Mapa de Suelos Convenio INTA Provincia de Entre Ríos, se confeccionó la capa correspondiente al tipo de acuífero, con los valores del método GOD.

A partir de los datos de profundidad del nivel piezométrico, características de ambos acuíferos Ituzaingó y Salto Chico, y de la zona no saturada se asignaron los valores, de acuerdo a las tablas elaboradas por Foster *et al.* (1987), los que se presentan en la Tabla 2.

Se multiplicaron las 3 capas raster necesarias para la aplicación del método GOD y se obtuvo el Mapa de

Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero en el Área del la Cuenca del A° Feliciano (Figura 4); en él se

Parámetro	Componente	Valor
G.- Tipo de Acuífero	Fm. Salto Chico	0,4
	Fm. Ituzaingó	0,4
	Lecho del Arroyo	1,0
O.- Sustrato	Fm. Hernandarias	0,6
	Suelos Aluviales	0,6
	Lecho del Arroyo	0,8
D.- Profundidad	Cota -Profundidad	0,5 a 0,9

Tabla 2. Asignación de los parámetros y pesos para el Método GOD  
 Table 2. GOD method parameter asignation

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

puede observar que las condiciones de extrema vulnerabilidad se producen en la zona del cauce del curso principal y sus afluentes, así como en el valle de inundación de los mismos, lo que representa un 7 % de la superficie total. Por otra parte, la mayor superficie de la cuenca se encuentra con un muy bajo riesgo de vulnerabilidad (93%).

### Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos mediante ambas metodologías, se puede concluir, que para una etapa de reconocimiento previo, y disponiendo de información a escala regional la aplicación del método GOD presenta menos requerimientos con lo que se alcanza una primera estimación de las condiciones del sistema evaluado.

Para investigaciones de mayor grado de detalle y contando con mayor densidad de información distri-

buida en la cuenca, usando la herramienta SIG, el sistema DRASTIC permite una mejor estimación del riesgo de vulnerabilidad de un acuífero.

Los resultados de la aplicación de ambas metodologías indican que las áreas de mayor vulnerabilidad a la contaminación se limitan a las cercanías de los cauces menores y el curso principal del Arroyo Feliciano, donde la profundidad al acuífero es mínima, mientras que en el resto de la cuenca, el efecto de protección que ejerce el espesor de los limos y arcillas de la Formación Hernandarias, disminuye el grado de vulnerabilidad de los acuíferos.

### Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Entre Ríos y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de la Nación que financiaron el Proyecto PICT-O N° 30778 "Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la

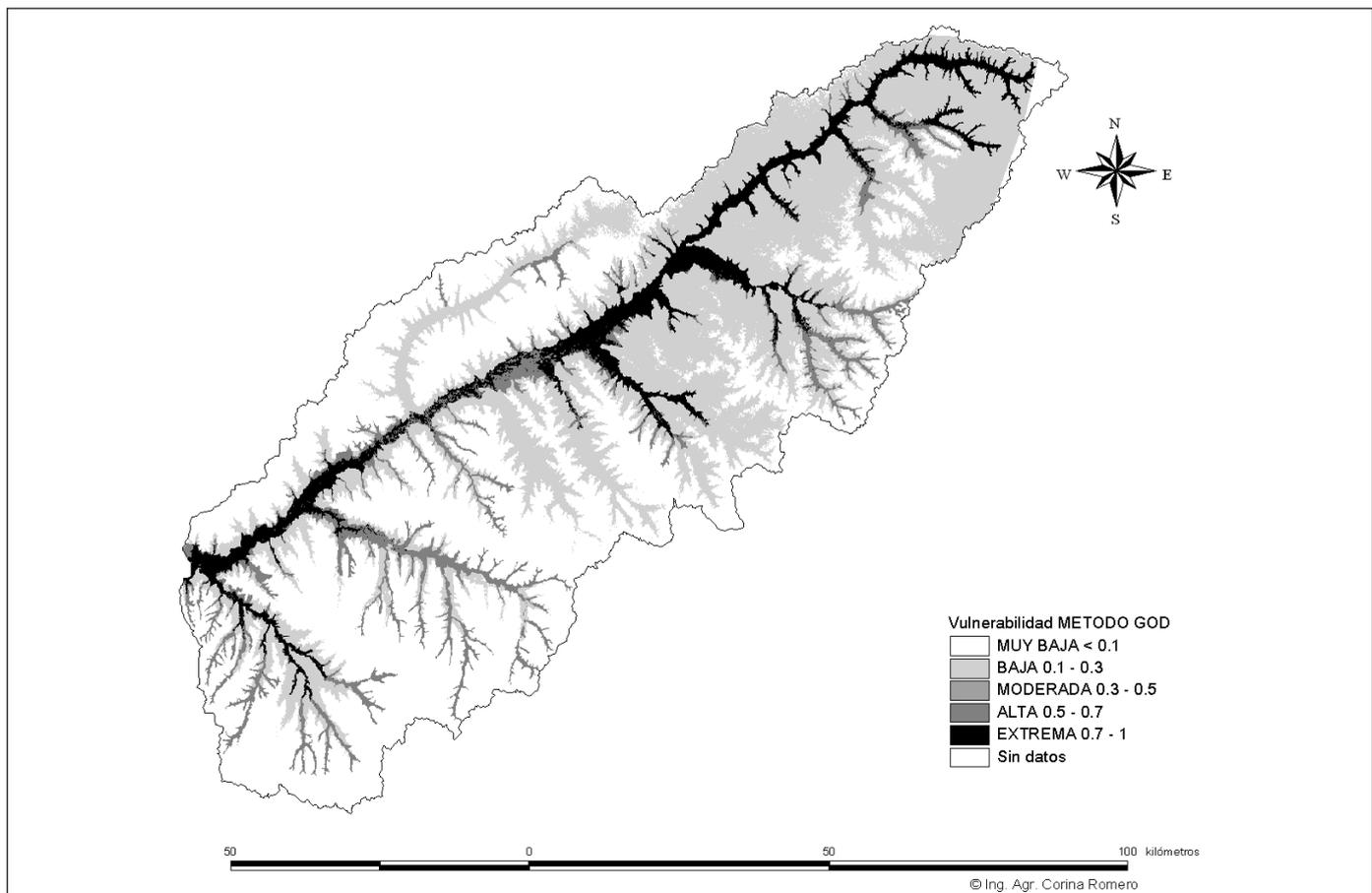


Fig. 4. Mapa de Vulnerabilidad del Acuífero. Método GOD  
Fig. 4. Aquifer Vulnerability. GOD method

Díaz, E. L. *et al.*, 2009. Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 533-542

Cuenca del Arroyo Feliciano. Entre Ríos" en el marco del cual se llevaron adelante las investigaciones.

## Referencias

- Aller, L., Lerh, J., Petty, R. and Hackett, G. 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. Environmental Protection Agency (EPA); Report EPA-600/2-87-0305; Oklahoma, United States of America.
- De Petre, A.A. y Stephan, S. 1987. *Características Pedológicas y Agronómicas de los suelos Vertisoles de Entre Ríos – Argentina*. Institut Für Bodenkunde Der Universitat Bown (R.F.A.) – Facultad de Ciencias Agropecuarias – UNER (R.A.). Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Santa Fe (R.A.), 1 – 13.
- Duarte, O., Díaz, E., Romero, E., Chajud, A. y Paz González A. 2008. Utilización de Herramientas de Teledetección y Sistema de Información Geográfica para la gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos. *Workshop Internacional de Aplicaciones de SIG en Hidrología*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL. Santa Fe. 8 y 9 de Octubre de 2008.
- Foster, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to pollutants. *TNO Committee on Hydrological Research Information* n°38, Ed. W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegenigh, The Hague, 69-86.
- Gentili, C.A. y Rimoldi, H.V. 1979. Mesopotamia. *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 185-223.
- Iriondo, M.H. 1980. El Cuaternario en Entre Ríos. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral* 11, 125-141.
- Iriondo, M.H. y Santi, M. 2000. La Formación Salto Chico en el subsuelo de Entre Ríos. *II Congreso Latinoamericano de Sedimentología* (AAS). Resúmenes. 1 página. Mar del Plata.
- Iriondo, M.H. y Rodríguez, E.D. 1973. Algunas características sedimentológicas de la Formación Ituzaingó entre La Paz y Brugo (Entre Ríos). *Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino*. Buenos Aires. I, 317-331.
- Plan Mapa de Suelos de la provincia de Entre Ríos 1993. Carta de suelos de la República Argentina, Departamento Federal, Provincia de Entre Ríos. Convenio INTA - Gobierno de Entre Ríos. *Serie Relevamiento de Recursos Naturales* 11. ISSN-0325-9099.
- Reig, O.A. 1957. Sobre la posición sistemática de "Zygolestes" con una reconsideración de la edad y correlación del "Mesopotamiense". *Holmbergia* 5, 12-13.
- Rimoldi, H. 1962. Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande. Estudio geológico-geotectónico para la presa de compensación proyectada en el Paso Hervidero (provincia de Entre Ríos). *1as. Jornadas Geológicas Argentinas*. Buenos Aires. Actas 2, 287-310.
- Tujchneider, O.C. y Fili, M. 1988. Geohidrología de la Cuenca del Arroyo Feliciano. Provincia de Entre Ríos - Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Buenos Aires. Tomo XLIII. 2, 163-174.

Recibido: mayo 2009

Revisado: agosto 2009

Aceptado: agosto 2009

Publicado: diciembre 2009

