

MAPEO DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO PATIÑO

Báez, L.^a; Villalba, C.^a; Nogues, J.P.^{a,b*}

^a Laboratorio de Computación Científica y Aplicada. Facultad Politécnica – Universidad Nacional de Asunción.

^b Facultad de Ciencias de la Ingeniería – Universidad Paraguayo Alemana.

* E-mail: noguesj@gmail.com

Palabras claves: Acuífero Patiño, aguas subterráneas, DRASTIC, contaminación.

RESUMEN

Dada la actual coyuntura socio-ambiental de las aguas del Paraguay y en particular la contaminación de los arroyos del Área Metropolitana y el Lago Ypacaraí, es de suma importancia entender el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero Patiño ya que están bajo la misma presión demográfica. En este trabajo se trazó el objetivo de crear mapas de riesgo de contaminación del acuífero Patiño para que puedan ser usados por tomadores de decisiones para crear sistemas de monitoreo, alerta temprana y desarrollo urbano.

Los resultados presentados en este estudio son basados en el análisis de datos hidrogeológicos y antropogénicos. La metodología empleada para crear los mapas de riesgo de contaminación modificó un modelo de vulnerabilidad de contaminación ya existente conocido como DRASTIC. El modelo fue modificado a través de la incorporación de parámetros antropogénicos como "Uso de la Tierra", "Densidad de Pozos Ciegos" y "Vías Principales de Transporte". El modelo de riesgo fue calibrado con valores de concentración de dos contaminantes: Nitrógeno Total (N_T) y Coliformes Totales (C_T). Debido a la calibración la correlación entre el Índice de Riesgo (calculado) y la concentración de N_T aumentó de un coeficiente de correlación (ρ) inicial de 0,073 a un ρ_{final} de 0,522; mientras que la correlación entre el Índice de Riesgo y la concentración de C_T , aumentó de un ρ_{inicial} 0,357 a un ρ_{final} de 0,7.

El análisis de las áreas de riesgo indica que el 42% del acuífero tiene un mediano a alto riesgo de contaminación. Las zonas con más riesgo de contaminación son aquellas aledañas a las vías principales y en las ciudades cercanas a Asunción. La calibración permitió determinar los parámetros de mayor importancia para el riesgo de contaminación. Los parámetros que estuvieron muy relacionados con ambos mapas de riesgo fueron la "Densidad de Pozos Ciegos", "Uso de la Tierra" y "Vías Principales"; ya que están ligados a las zonas urbanas en donde se encontraron las más altas concentraciones de N_T y C_T . La "Conductividad Hidráulica" y la "Recarga" también presentaron una alta importancia. Los parámetros de menor importancia, que no estuvieron relacionados con ambos mapas fueron "Litología del Acuífero" y "Tipo de suelo".

ABSTRACT

Given the current environmental situation of the natural resources of Paraguay and in particular the pollution of streams of the Metropolitan Area of Asuncion and the Ypacarai lake it is apposite to understand the risk of contamination of groundwater aquifer Patiño, as it under similar environmental stress. In this work we aimed at creating a contamination risk map for the Patiño that could be used by decision makers to design monitoring systems, early warning systems and urban development strategies.

The results presented in this study are based on analysis of hydrogeological and anthropogenic data. The methodology used to create the risk of contamination maps is based on modifications done to the DRASTIC model for vulnerability assessment. The model was modified by the addition of anthropogenic parameters such as "Land use", "Cesspool density" and "Major transport routes". The risk model was then calibrated with concentrations of two pollutants: Nitrogen (N_T) and Coliforms (C_T) to produce two different risk maps. The correlation between the risk index and concentration of N_T increased from an initial correlation coefficient (ρ) of 0.073 to 0.522 after calibration; while the correlation between the risk index and concentration of C_T increased from 0.357 to 0.7.

The analysis of risk areas indicates that 42% of the aquifer has a medium to high risk of contamination. The areas most at risk of contamination are those adjacent to the main roads and in the cities near Asuncion. The model calibration made possible the identification of the parameters that are most important when evaluating risk of contamination. This parameters were "Cesspool density", "Land use" and "Major transport routes"; since they are linked to urban areas where higher concentrations of N_T and C_T were found. "Hydraulic conductivity" and "Recharge" were also identified as important hydrogeological parameters. Parameters that were less important in the calibration maps were "Aquifer media" and "Soil media".

INTRODUCCIÓN

Las aguas del acuífero Patiño abastecen, de alguna forma u otra, a la zona urbana más grande y más densamente poblada del país que abarca Asunción y las demás ciudades de los departamentos Central y algunas del departamento de Paraguari, con más de 2.976.400 habitantes [1]. Además de esta realidad demográfica, el acuífero abastece de agua a una gran parte del sector comercial, industrial y agropecuario de la zona. Aparte de los desechos/vertidos de los sectores económicos, existe la carga orgánica de los desechos humanos – que es una constante – sobre el acuífero debido a que la zona tiene muy poca cobertura de desagüe cloacal.

La dependencia de la población sobre el acuífero Patiño no es nada despreciable ya que la mayoría de la población depende del acuífero para agua potable. Solo un porcentaje reducido de la población cuenta con abastecimiento de agua potable proveída por la Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay (ESSAP), concentrado básicamente en la Capital; mientras que el 72,4% de las viviendas del departamento central [2] dependen de agua suministrada por Juntas de Saneamiento o por aguaterías privadas o comunales, y extraen caudales de agua en su mayor parte del subsuelo, que luego son distribuidos, con muy poco tratamiento sanitario.

En este estudio se define riesgo de contaminación a la vulnerabilidad debido a parámetros naturales y de origen antropogénico. Para estimar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas existen métodos de índice y superposición y métodos que emplean modelos de simulación y modelos estadísticos [3]. Uno de los métodos de índice más empleados para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es el índice DRASTIC, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA en sus siglas en inglés) [4].

DRASTIC es una metodología utilizada para realizar mapas donde se visualizan las zonas más vulnerables a la contaminación de un acuífero basado en datos hidrogeológicos. El índice DRASTIC refiere a la incidencia de parámetros de un acuífero que implican una mayor chance de contamine dadas sus características naturales.

En este trabajo se realizó la evaluación del riesgo de contaminación en toda el área del acuífero Patiño. El mismo está basado en el análisis de datos existentes sobre la hidrogeología de la región, usando el índice de vulnerabilidad proporcionado por el modelo DRASTIC, el cual fue modificado para incorporar la influencia antropogénica. Esta incorporación de datos antropogénicos es lo que hace que los mapas presentados sean de riesgo y no simplemente de vulnerabilidad. En la calibración del mapa inicial DRASTIC, se incluyeron las cargas contaminantes de las concentraciones de “Nitrógeno total” (N_T) aplicando la propuesta de Panagopoulos et. al [5] y de “Coliformes totales” (C_T), para demostrar que existe un mapa de riesgo por tipo de contaminantes.

A continuación se presenta, una breve reseña del área de estudio, seguido por la metodología usada para calcular la vulnerabilidad, para finalmente presentar el análisis de los resultados. En la conclusión se identifican las zonas con mayor índice de vulnerabilidad y la zona con menor vulnerabilidad.

ÁREA DE ESTUDIO

El acuífero Patiño está localizado en la Región Oriental del Paraguay, es un acuífero libre de 1173 km² de extensión [6], entre latitudes 25°05' y 25°38' S y longitudes 57°08' y 57°41' W, situado en su extensión debajo de Asunción, las ciudades aledañas que forman parte del departamento Central y parte del departamento de Paraguari (Figura 1).

La zona tiene forma triangular y está bordeada en el noroeste y oeste por el río Paraguay. Las alturas máximas encontradas en el área van entre 200 y 300 msnm, y las partes más bajas se encuentran a un nivel alrededor de 60 msnm, en los márgenes del río Paraguay [30]. Según el “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de

Asunción - Acuífero Patiño” (2007) [7], la morfología del acuífero Patiño presenta una profundidad de 300 m, aproximadamente 65 kilómetros de largo y con una anchura aproximada máxima de 30 kilómetros. La unidad litológica principal ocupa la zona central de la cuenca y está rodeada de los lados y del fondo por una unidad de más baja conductividad.

En la Figura 1 se visualizan las ciudades que comprenden el área de estudio.

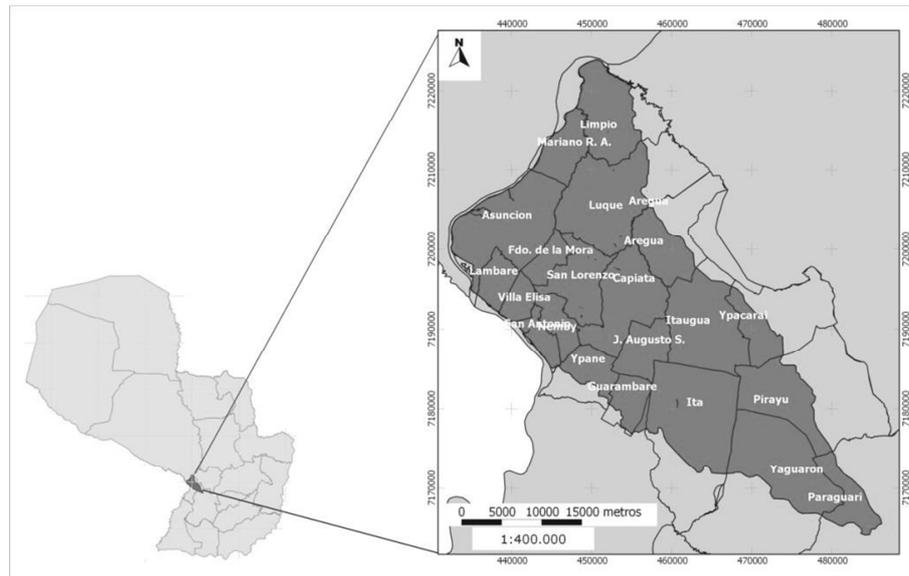


Figura 1. El acuífero Patiño y las ciudades que comprende.

METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizó el modelo DRASTIC [4] para determinar la vulnerabilidad (intrínseca) a la contaminación del agua subterránea, usando solamente datos hidrogeológicos. DRASTIC es el acrónimo en inglés de un Índice (I) que involucra siete parámetros hidrogeológicos: “profundidad del agua subterránea” (D), “recarga” (R), “litología del acuífero” (A), “tipo de suelo” (S), “topografía” (T), “impacto de la zona vadosa” (I) y “conductividad hidráulica del acuífero” (C). Los valores físicos que describen los parámetros son reemplazados por calificaciones con valores del 1 al 10. Cada parámetro es multiplicado por un peso ponderado que se ha determinado, basándose en el juicio de los autores de este método, empleando la siguiente ecuación lineal:

$$I = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot C_i \quad (1)$$

donde I es el índice de vulnerabilidad intrínseca, " P " y " C " se refieren al peso y la calificación respectiva para cada parámetro. Los siete parámetros considerados son los mencionados anteriormente.

En el presente estudio, fue utilizada la estructura base del modelo DRASTIC [4], pero se incluyeron algunas modificaciones para capturar el efecto antropogénico y reducir el efecto de información homogénea que existe sobre el acuífero Patiño. Entre las modificaciones realizadas se incluyen:

- La eliminación del parámetro (I) “impacto de la zona vadosa”, debido a que el acuífero Patiño es un acuífero libre, de poca profundidad con relación a la superficie del suelo, y de muy poca heterogeneidad geológica [8] entre estas zonas. La clasificación de la zona vadosa sería casi igual a la clasificación del acuífero mismo. Esta eliminación resulta en la siguiente ecuación:

$$I_i = (D_r \cdot 5) + (R_r \cdot 4) + (A_r \cdot 3) + (S_r \cdot 2) + (T_r \cdot 1) + (C_r \cdot 3) \quad (2)$$

donde I_i es el Índice de inicial, las letras mayúsculas representan a cada parámetro y el subíndice “ r ” se refieren a su calificación.

- Reclasificación de las calificaciones asignadas a la “conductividad hidráulica” (ver “Calif. Propuesta” para el parámetro (C) en las Tablas 1 y 2), utilizando un nuevo rango. Se propone esta calificación ya que los valores de (C) se encuentran entre 0,03 a 3,8 m/d [9], estos valores están incluidos dentro de un solo rango en el modelo DRASTIC; y la intención es agregar heterogeneidad a la clasificación de la “conductividad hidráulica”.
- Normalización del valor de Índices de riesgos. Esto es para que al agregar/eliminar parámetros existieran Índices con una misma escala ajustada del 0 al 100, ya que la escala de DRASTIC propuesta por Aller et al. 1987 [4] va de 23 a 226. Para la normalización de los mapas se utilizó la ecuación:

$$Indice\ Normalizado = \frac{(I - I_{min})}{(I_{max} - I_{min})} \cdot 100 \quad (3)$$

donde I es el Índice calculado usando los valores de clasificación, I_{min} es el menor valor del Índice, I_{max} es el mayor valor del Índice.

- Calibración del Índice inicial (I_i) DRASTIC para determinar el riesgo de contaminación, incluyendo las cargas contaminantes de las concentraciones de N_T y C_T , aplicando la propuesta de Panagopoulos et. al [5].
- Adición de nuevos parámetros antropogénicos: el “uso de la tierra”, representado por “ L ”, que fue aplicado siguiendo la metodología propuesta por Panagopoulos et al. [5]; la “recarga artificial” incluyendo al mapa de “recarga” de precipitaciones propuesto por Nobre et al. [10]; y las inclusiones de nuevos parámetros como “densidad de viviendas con pozos ciegos” (P) y “vías principales de transporte” (VP) (ver Tabla 2), como nuevos aportes del presente estudio.
- La ecuación final DRASTIC calibrada y utilizada incluye además de los parámetros hidrogeológicos, la adición de los parámetros antropogénicos. Alterando el peso ponderado mediante la calibración realizada, teniendo en cuenta el coeficiente de correlación entre cada parámetro y la media de los contaminantes (N_T y C_T).

$$I_r = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (C_r \cdot C_w) \dots \\ + (L_r \cdot L_w) + (P_r \cdot P_w) + (VP_r \cdot VP_w) \quad (4)$$

donde I_r es el Índice de riesgo, las letras mayúsculas representan a cada parámetro (D) “profundidad del agua subterránea”, (R) “recarga”, (A) “litología del acuífero”, (S) “tipo de suelo”, (T) “topografía”, (C) “conductividad hidráulica del acuífero”, (L) “uso de la tierra”, (P) “densidad de viviendas con pozos ciegos” y (VP) “vías principales de transporte”, y los subíndices r y w representan a la calificación y peso respectivamente.

La calibración consistió en introducir la carga de contaminantes y evaluar el riesgo de contaminación con la concentración de a) “Nitrógeno total”, en 71 puntos de medición (expresado como N_T mg/L) y b) “Coliformes totales”, en 37 puntos de medición (expresado como C_T UFC/100ml¹). Ambos indicadores de contaminación se obtuvieron de la tesis de grado “Estudio de la Contaminación del acuífero Patiño” (año: 2006) [11].

Con el objetivo de mejorar la predicción del I_i en zonas puntuales con mayor impacto ambiental, y obtener una correlación más elevada entre el I_i y los contaminantes, se aplicó una metodología de calibración, presentada por Panagopoulos et al. [5]. Esta metodología fue aplicada a cada

¹ Unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros.

contaminante (N_T y C_T) de manera independiente. Las modificaciones se realizaron utilizando un coeficiente de correlación de Spearman² (ρ , rho) para adaptar el I_i DRASTIC a las condiciones del área de estudio, comparando el valor de cada punto de muestreo de los contaminantes N_T y C_T con el valor calculado de I_i . Además, se aplicó una transformación logarítmica en las concentraciones de N_T y C_T para contrastar valores atípicos, fallas de normalidad y mejorar la correlación de los datos.

La revisión de la escala de calificación se realizó teniendo en cuenta la media de los valores de N_T y C_T en cada parámetro. Se reasignó la mayor calificación (10) al rango con mayor valor de la media del contaminante encontrado y, así sucesivamente, se reasignaron las demás calificaciones (ver Panagopoulos et al. [5] para mayor detalle). Posteriormente, se adicionaron a la ecuación (2) los parámetros (L) (ver Figura 2.a), (P) (ver Figura 2.b) y (VP) (ver Figura 2.c) con el fin de expresar la posible carga de contaminantes debido a estas fuerzas antropogénicas. Los rangos y calificaciones para (P) y (VP) son una propuesta del presente estudio.

El último paso de la calibración fue la revisión de los pesos ponderados (w), donde cada parámetro DRASTIC participa en la ecuación (2) junto con los parámetros antropogénicos adicionados (L), (P) y (VP), estudiando la correlación de cada parámetro con las concentraciones de N_T y C_T .

Además de las calibraciones mencionadas, se realizó un mapa de “vulnerabilidad general” del acuífero Patiño; es el resultado de la superposición de los mapas calibrados con concentración de N_T y C_T ; el mismo fue realizado para predecir el riesgo de contaminación del acuífero Patiño, identificando zonas puntuales con mayores índices de vulnerabilidad.

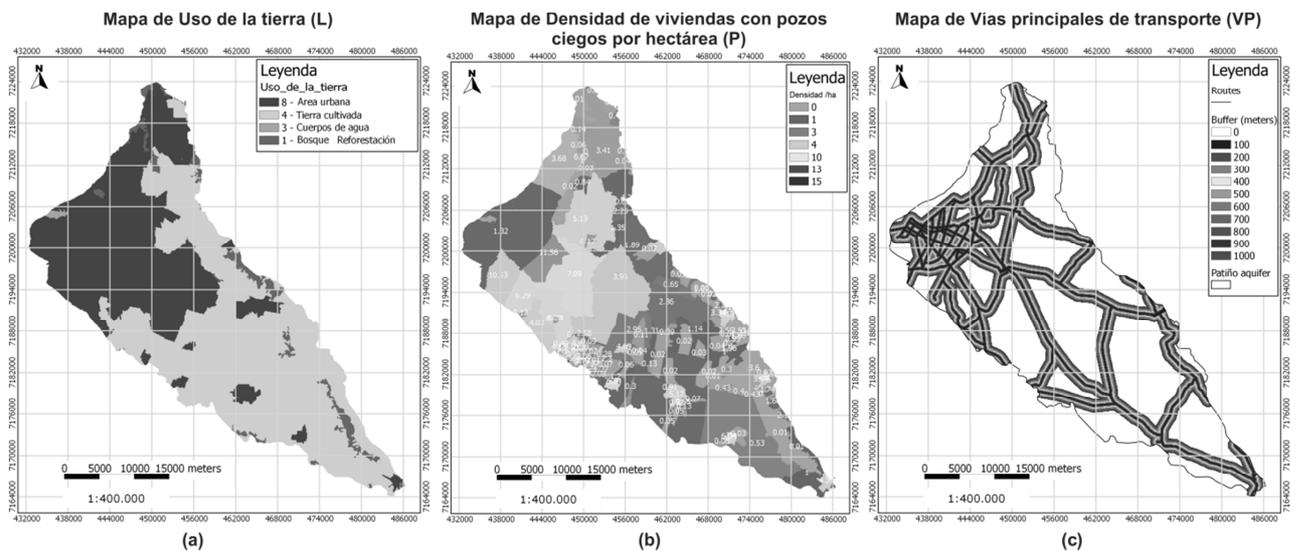


Figura 2. Mapas de los parámetros antropogénicos correspondiente al área del acuífero Patiño, utilizados para la calibración del Índice inicial DRASTIC. (a) Uso de la tierra, extraído del Mapa de Cobertura de la Tierra Paraguay (2011). (b) Densidad de viviendas con pozos ciegos /ha y (c) Vías principales de transporte, extraídos del Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño (2007).

² ρ (rho) es una medida de la correlación entre dos variables, es el resultado del coeficiente de correlación de Spearman y oscila entre -1 y +1, donde $\rho=0$ (cero) significa no correlación y $\rho=1$ (uno) significa perfecta correlación entre las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicando la metodología indicada se presentan los resultados de la calibración del I_i DRASTIC con las mediciones de los contaminantes (N_T y C_T). La correlación del Índice inicial DRASTIC con N_T (Figura 2.a) presentó un coeficiente de correlación ρ casi nulo, del orden de 0,073 lo que indica que el I_i de DRASTIC hacen una mala aproximación de la realidad con la aplicación de N_T . La correlación del I_i DRASTIC con C_T (Figura 2.b) presentó un coeficiente de correlación ρ del orden de 0,357, que es una mejor correlación en comparación a N_T pero siguió siendo baja. Para mejorar estas correlaciones se hicieron las calibraciones necesarias a partir del mapa de I_i DRASTIC, utilizando los puntos de N_T y C_T con cada parámetro.

Para calcular los mapas de riesgos por contaminación se utilizaron las “calificaciones modificadas” para todos los parámetros utilizados en este estudio y la concentración de contaminante de N_T y C_T presentadas en las Tablas 1 y 2 respectivamente. Los pesos ponderados finales se comparan en la Tabla 3, eliminando y adicionando parámetros a la ecuación inicial (2); correlacionando siempre con las concentraciones de N_T y C_T .

Tabla 1. Calificaciones originales, propuestas y modificadas de los parámetros DRASTIC según la media de N_T .

(D) Profundidad del agua subterránea				(R) Recarga			
Rango (m)	Calif. Original	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada	Rango (pulgadas)	Calif. Original	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada
0 – 1,524	10	-	-	0 – 2	1	-	-
1,524 – 4,572	9	3,456	9	2 – 4	3	-	-
4,572 – 9,144	7	1,388	3	4 – 7	6	1,202	7
9,144 – 15,24	5	2,916	7	7 – 10	8	4,647	10
15,24 – 22,86	3	3,087	8	10+	9	-	-
22,86 – 30,48	2	3,904	10				
30,48+	1	-	-				

(A) Litología del Acuífero				(S) Tipo de Suelo			
Tipo de Acuífero	Calif. Original	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada	Tipo de Suelo	Calif. Original	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada
Arenisca	8	2,769	9	Arcilla fina	1	0,891	2
Arena	9	3,066	10	Franco fino	5	2,859	10
				Arena	9	0,811	1

(T) Topografía				(C) Conductividad hidráulica			
Rango (%)	Calif. Original	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada	Rango (m/d)	Calif. Propuesta	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada
0 – 2	10	2,558	9	0,0407 - 0,45	1	2,635	9
2 – 6	9	3,144	10	0,45 - 0,9	2	3,174	10
6 – 12	5	1,109	4	0,9 - 1,35	3	1,324	7
12 – 18	3	0,811	3	1,35 - 3,6	4	0,621	6
18+	1	1,371	5				

(L) Uso de la tierra				(P) Densidad de viviendas con pozos ciegos			
Uso de la tierra	Calif. Original	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada	Densidad por ha.	Calif. Propuesta	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada
Área urbana	8	4,65	10	0 - 0,001	0	0,671	0
Bosque	1	0,78	2	0,001 - 1	4	0,773	1
Cuerpos de agua	3	0,36	1	1 - 2	6	5,82	10
Reforestación	1	0	0	2 - 4	7	2,635	4
Sabana inundable	1	0	0	4 - 5	8	1,625	2
Tierra cultivada	4	1,25	3	5 - 7	9	3,131	5
				7+	10	4,68	8

(VP) Vías principales			
Rango (m)	Calif. Propuesta	Media N_T (mg/L)	Calif. Modificada
1000+	0	1,51	3
901 - 1000	1	0,99	2

801 - 900	2	1,7	4
701 - 800	3	0,82	1
601 - 700	4	5,35	9
501 - 600	5	1,86	5
401 - 500	6	0	0
301 - 400	7	4,31	7
201 - 300	8	4,78	8
101 - 200	9	3,56	6
1 -100	10	5,01	10

Tabla 2. Calificaciones originales, propuestas y modificadas de los parámetros DRASTIC según la media de $\ln(C_T)$ (UFC/ 100ml)

(D) Profundidad del agua subterránea				(R) Recarga			
Rango (m)	Calif. Original	Media LnC _T	Calif. Modificada	Rango (pulgadas)	Calif. Original	Media LnC _T	Calif. Modificada
0 - 1,524	10	-	-	0 - 2	1	-	-
1,524 - 4,572	9	5,077	9	2 - 4	3	-	-
4,572 - 9,144	7	5,077	9	4 - 7	6	2,314	7
9,144 - 15,24	5	5,153	10	7 - 10	8	4,747	10
15,24 - 22,86	3	2,642	5	10+	9	-	-
22,86 - 30,48	2	1,792	3				
30,48+	1	-	-				
(A) Litología del Acuífero				(S) Tipo de Suelo			
Tipo de acuífero	Calif. Original	Media LnC _T	Calif. Modificada	Tipo de Suelo	Calif. Original	Media LnC _T	Calif. Modificada
Arenisca	8	4,143	10	Arcilla fina	1	-	-
Arena	9	3,646	9	Franco fino	5	4,089	10
				Arena	9	-	-
(C) Conductividad hidráulica				(T) Topografía			
Rango (m/d)	Calif. Propuesta	Media LnC _T	Calif. Modificada	Rango (%)	Calif. Original	Media LnC _T	Calif. Modificada
0,04074 - 0,45	1	4,42	10	0 - 2	10	4,036	9
0,45 - 0,9	2	4,01	9	2 - 6	9	4,174	10
0,9 - 2,25	3	4,01	9	6 - 12	5	2,303	5
2,25 - 3,6	6	1,10	6	12 - 18	3	-	-
				18+	1	-	-
(L) Uso de la tierra				(P) Densidad de viviendas con pozos ciegos			
Uso de la tierra	Calif. Original	Media LnC _T	Calif. Modificada	Densidad	Calif. Propuesta	Media LnC _T	Calif. Modificada
Área urbana	8	4,7	10	0	0	1,61	0
Bosque	1	1,6	3	0,01 - 1	2	0	2
Cuerpos de agua	3	0	0	1 - 2	5	5,24	9
Reforestación	1	0	0	2 - 3	6	2,40	5
Sabana inundable	1	0	0	3 - 4	7	5,64	10
Tierra cultivada	4	2,4	9	4 - 5	9	2,45	6
				5+	10	3,36	8
(VP) Vías principales							
Rango (m)	Calif. Propuesta	Media LnC _T	Calif. Modificada				
1000+	0	2,98	4				
901 - 1000	1	1,1	3				
801 - 900	2	0,1	1				
701 - 800	3	7,24	10				
601 - 700	4	5,36	8				
501 - 600	5	0,69	2				
401 - 500	6	0	0				
301 - 400	7	4,73	7				
201 - 300	8	4,58	6				
101 - 200	9	6,22	9				
1 -100	10	4,21	5				

Tabla 3. Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos los parámetros (L) (P) y (VP) para las calibraciones con N_T y C_T .

	Parámetros									
	D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	I_w	C_w	L_w	P_w	VP_w
Peso ponderado inicial	5	4	3	2	1	-	3	-	-	-
Peso ponderado final calibración con N_T	0	2	0	0	1	-	1	3	5	4
Peso ponderado final calibración con C_T	2	3	0	0	0	-	1	3	4	5

Tras la adición de los nuevos parámetros, la revisión de los pesos ponderados (Tabla 3); la correlación entre el Índice de riesgo y los valores de concentración de N_T aumentó aún más, resultando el coeficiente de correlación $\rho=0,522$ (Figura 3.a). El resultado de las calibraciones con la concentración de N_T se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 4.a, donde el aumento del índice de vulnerabilidad es notable en las áreas urbanas. Los índices más altos, con valores mayores a 80 en el mapa normalizado, se encuentran en las ciudades: Lambaré, Fernando de la Mora y San Lorenzo, y también en las áreas urbanas de las ciudades: Luque, Ypané, Guarambaré e Itá. Los valores máximos, iguales a 100, se identifican en la zona de la capital: Asunción.

La correlación entre el Índice de riesgo y las concentraciones de C_T aumentó aún más, resultando el coeficiente de correlación $\rho=0,7$ (Figura 3.b). El resultado de las calibraciones con la concentración de C_T se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 4.b, donde el aumento del Índice de riesgo es notable en toda el área urbana. Los índices más altos, con valores mayores a 80, se encuentran en las ciudades: Asunción, Luque, San Antonio y Capiatá; también en las áreas urbanas de las ciudades: Ypané, Guarambaré, Itá y Yaguarón. Los valores máximos, iguales a 100, se identifican al sur de la ciudad de Capiatá, Mariano Roque Alonso y Limpio.

Al realizar las calibraciones aplicando las ecuaciones modificadas, el coeficiente de correlación (ρ) entre el Índice de riesgo y el contaminante mejoró bastante, de 0,073 a 0,522 y de 0,35 a 0,7, como se visualiza en la Figura 3.

Para entender el riesgo general, aplicable a cualquier tipo de contaminante se decidió hacer la superposición de los dos mapas calibrados. Los valores de índices más altos se presentan en las áreas urbanas que abarcan el acuífero Patiño: Con valores mayores a 80 se encuentran en las ciudades: Limpio, Mariano R. Alonso, Lambaré, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Capiatá y Luque. También en las áreas urbanas de las ciudades: Ypané, Guarambaré, Itá y Yaguarón. Con valores máximos iguales a 100, gran parte del área de la capital: Asunción.

También se realizó una validación de los resultados mediante comparaciones entre los mapas calibrados por contaminantes y valores de los últimos años correspondientes al monitoreo de piezómetros realizados en el año 2010 por la Dirección General de Saneamiento Ambiental (DIGESA). La correlación entre el mapa de riesgo y la concentración de N_T del año 2010 tiene una correlación mayor a la que se obtuvo con los datos del 2006, el coeficiente de correlación es de $rho= 0,634$ que valida la calibración hecha y justifica en cierta forma la adición de ciertos valores. En comparación, la correlación entre el mapa de riesgo – calibrado con la concentración de C_T del 2006 – y la concentración de C_T del año 2010, tiene $rho= 0,467$ que es una relación menor pero aun positiva.

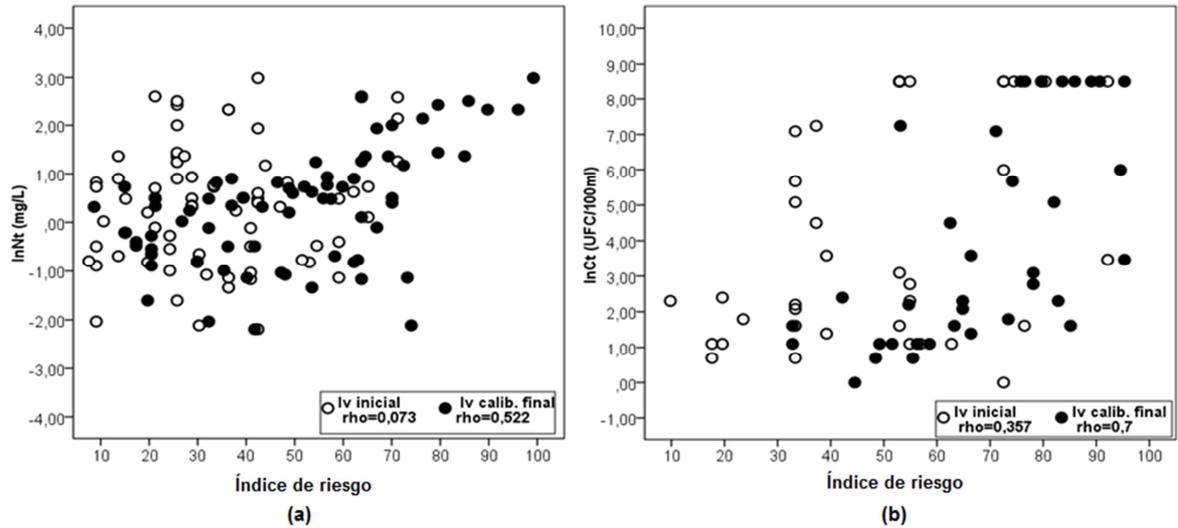
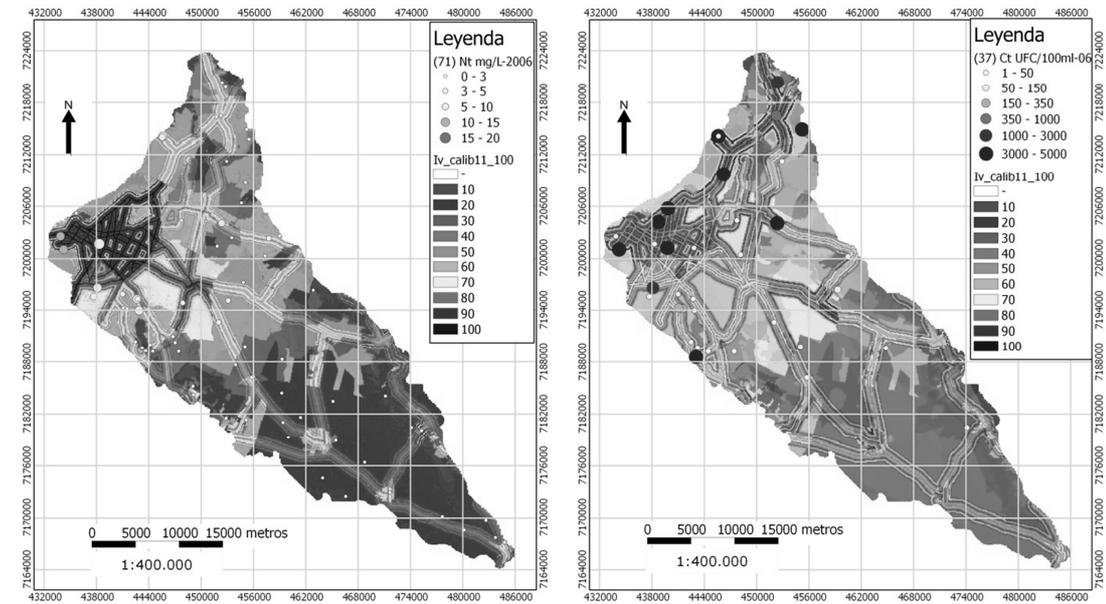


Figura 3. Relaciones entre los Índice de riesgo y las concentraciones de N_T y C_T (con trans. logarítmica).



(a) Mapa de riesgo de contaminación calibrado con N_T (b) Mapa de riesgo de contaminación calibrado con C_T

Figura 4. Mapas de riesgo de contaminación para el área de estudio.

CONCLUSIÓN

Se ha demostrado que el mapa inicial DRASTIC – sin calibraciones – tiene una baja correlación con los contaminantes medidos en el área de estudio. La correlación del I_i con la concentración de N_T ($I-N_T$) fue $\rho=0,073$; mientras que la correlación entre el $I-C_T$ fue de $\rho=0,357$. Se propuso agregar datos antropogénicos, como “uso de la tierra”, “densidad de pozos ciego” y “vías principales”, y luego calibrarlos usando las mediciones de los contaminantes que se tenían disponibles. Al incluir esta información y calibrar los valores de DRASTIC, se logró aumentar la correlación entre el $I-N_T$ a $\rho=0,522$; mientras que la correlación entre el $I-C_T$ aumento de un $\rho =0,357$ a $\rho =0,7$. La adición de parámetros antropogénicos cambia el mapa, de un mapa de vulnerabilidad a un mapa de riesgo a la contaminación ya que incluye la influencia de agentes externos a los naturales.

Basado en resultados específicos de los dos contaminantes N_T y C_T se creó un mapa de riesgo general para presentar de forma conjunta las zonas con más riesgo. Este mapa indica que las zonas con más

peligro de contaminación son aquellas aledañas a vías principales y en las ciudades cercanas a Asunción. También se identificaron las áreas menos vulnerables – relativamente – y estas se encuentran hacia el sur del acuífero y concentradas en el centro mismo del eje del acuífero. Esto es alentador en consecuencia ya que esta zona es considerada la zona principal de recarga del acuífero [12]. Pero aun así cabe recalcar que este bajo riesgo solo es con respecto a los contaminantes medidos y un análisis similar se tendría que realizar para verificar si en realidad no hay contaminación de otro tipo. El bajo riesgo de contaminación también se debe a la baja urbanización de la zona y sería interesante estudiar la opción de dejar estas áreas de recarga como áreas protegidas en el futuro.

El resultado de la calibración hecha para determinar los parámetros adecuados del modelo DRASTIC dan una visión detallada de cuáles son los parámetros más importantes a lo hora de recolectar más información. Los parámetros que estuvieron muy relacionados con ambos mapas de riesgo fueron la “Densidad de Pozos Ciegos”, “Uso de la Tierra” y “Vías Principales”; ya que están ligados a las zonas urbanas en donde se encontraron las más altas concentraciones de N_T y C_T . También estuvieron relacionados con ambos mapas la “Conductividad Hidráulica” y la “Recarga” que influye en el tiempo de transporte de contaminantes. Los parámetros de menor importancia, que no estuvieron relacionados con ambos mapas fueron “Litología del Acuífero” y “Tipo de suelo”.

Los resultados obtenidos demuestran que una gran parte del acuífero Patiño presenta un grado de riesgo moderado a alto de contaminación. El análisis de las áreas demuestra que el 42% del área del acuífero presenta mediano a alto riesgo de contaminación (60 a 100). A partir de estos resultados se pretende: Tener un punto de partida para realizar la toma de muestras en áreas de alto riesgo, crear un sistema de alerta temprana con pozos de monitoreo constante, delimitar zonas adecuadas que puedan servir para el desarrollo comercial, residencial e industrial. Los resultados expuestos deberían servir prioritariamente para impulsar políticas gubernamentales sobre la gestión sustentable del acuífero Patiño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dirección General de Estadística Encuestas y Censos, D.G.E.E.C., *Compendio Estadístico*. 2012.
2. *Actualización del Análisis Sectoral de Agua Potable y Saneamiento de Paraguay*, M.d.O.P.y.C. (M.O.P.C.), Editor. 2010.
3. Lindström, R., *Groundwater Vulnerability Assessment Using Process-Based Models*, in *Vetenskap Och Kons, KTH, Architecture and the Built Environment*. 2005: Stockholm, Sweden. p. 36.
4. Aller, L., et al., *DRASTIC: A standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings*, in *National Water Well Association/Bennett and Williams Inc*. 1987: Ohio.
5. Panagopoulos, G.P., A.K. Antonakos, and N.J. Lambrakis, *Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS*. *Hydrogeology Journal*, 2006. **14**: p. 894 – 911.
6. TNO, I.H.d.G.A. and S.N.d.S.A. SENASA, *Estudio del Acuífero Patiño*, in *Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA (FEHS)*. 2001.
7. CKC-JNS, C., *Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño*, in *Informe técnico 1.1: Resumen Ejecutivo*. 2007.
8. Figueredo, C., *Informe técnico 2.2: Geología del área del Acuífero Patiño.*, in *Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño*. 2007.
9. Wehrle Martínez, A. and K. Sekita, *Informe técnico 2.8: Ensayos de Bombeo*, in *Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño*. 2007
10. Nobre, R.C.M., et al., *Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool*. *Journal of Contaminant Hydrology* 2007. **94**: p. 277 – 292.
11. Cardozo L., S. and C. Crosa R., *Estudio de la Contaminación del Acuífero Patiño, Trabajo Final de Grado*, in *Facultad de Ingeniería, Ingeniería Civil*. 2006, Universidad Nacional de Asunción.
12. Monte Domecq, R. and J. Báez Benítez, *Informe técnico 2.11: Balance Hídrico del Acuífero Patiño.*, in *Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño*. 2007.