

EL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO PATIÑO: ÁREA DEL GRAN ASUNCIÓN



Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción

Liz Báez L.
Cynthia Villalba
Juan Pablo Nogues

Junio, 2014

Resumen Ejecutivo

Se presenta el trabajo en curso, realizado para el análisis en detalle del riesgo de contaminación del Gran Asunción, aplicando la metodología realizada en el estudio anterior “Mapeo de vulnerabilidad y riesgo de contaminación del agua subterránea del Gran Asunción” [1].

El propósito general de este trabajo es calificar el riesgo de contaminación y específicamente como se debería crear un sistema de monitoreo.

Los resultados generales identifican que las áreas con mayor riesgo se encuentran en el Gran Asunción. También se identificó que los parámetros más influyentes en la categorización del riesgo son la profundidad a la napa freática, la recarga, el uso de la tierra, densidad de pozos ciegos y las vías principales.

Palabras Claves: Acuífero Patiño, aguas subterráneas, DRASTIC, riesgo de contaminación.

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado en parte por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del proyecto INV 20 “Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción”, bajo la Convocatoria CTS; y en parte por la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción. Este estudio fue abalado, desde un inicio, por la Secretaria de Emergencia Nacional (SEN).

Los autores quisieran agradecer al Ing. Andres Wehrle de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción, al Dr. Félix Carvallo y al Dr. Félix Villar de la Universidad Católica de Nuestra Señora de la Asunción, por ofrecer valiosa información y conocimiento para el desarrollo del estudio. Los autores también quisieran agradecer a la Dra. Larissa Rejalaga de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción por ofrecer datos de “Uso de la Tierra” de la zona de estudio.

También se agradece a la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) por compartir las mediciones de Coliformes totales y, Nitratos y Nitritos de los años 2010 al 2012.

Tabla de Contenido

Resumen Ejecutivo	i
Agradecimientos	i
Lista de Figuras	2
Lista de Tablas	3
1. Introducción	4
2. Riesgo de contaminación del acuífero Patiño en el área del Gran Asunción.....	5
2.1. Análisis	6
2.2. Conclusiones preliminares	15
3. Trabajos Futuros.....	16
3.1. Justificación Teórica	16
3.2. Propuesta Metodológica	18
4. Referencias	18

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribución del riesgo específico DRASTIC para el acuífero Patiño en el Área Metropolitana y las concentraciones de Nt con los pesos modificados de los parámetros finales.	7
Figura 2 - Relación entre los índices de riesgo: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), riesgo inicial DRASTIC y la concentración de Nt (transformado logarítmicamente) para el acuífero Patiño en el área del Gran Asunción.....	7
Figura 3 - Distribución del riesgo específico DRASTIC para el acuífero Patiño en el área del Gran Asunción y las concentraciones de Ct con los pesos modificados de los parámetros finales.....	8
Figura 4 - Relación entre los índices de riesgo: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), riesgo inicial DRASTIC y la concentración de Ct (transformado logarítmicamente) para el acuífero Patiño en el área del Gran Asunción.....	9
Figura 5 - Mapa de riesgo normalizado resultante de la superposición de mapas de las calibraciones de Nt y Ct (2006).....	10
Figura 6 - Relación del índice de riesgo específico DRASTIC (recalibrado con la concentración de Nt del año 2006) y los puntos de Nt transformados logarítmicamente (2010).....	11
Figura 7 - Relación del índice de riesgo específico DRASTIC (recalibrado con la concentración de Ct del año 2006) y los puntos de Ct transformados logarítmicamente (2010).....	12
Figura 8 - Gráfico de probabilidad acumulativa para Nt, Ct y riesgo general.....	13
Figura 9 - Relación del índice de riesgo DRASTIC resultante de la calibración inicial con Nt - recortando al Área Metropolitana del primer análisis del acuífero Patiño - con el índice de riesgo DRASTIC resultante de la recalibración con Nt del Área Metropolitana del trabajo en curso.....	14
Figura 10 - Relación del índice de riesgo DRASTIC resultante de la calibración inicial con Ct - recortando al Área Metropolitana del primer análisis del acuífero Patiño - con el índice de riesgo DRASTIC resultante de la recalibración con Ct del Área Metropolitana del trabajo en curso.....	15

Lista de Tablas

Tabla 1 - Barrios con índices de riesgo de contaminación máximos y mínimos encontrados.....	10
Tabla 2 - Cálculo de la riesgo por área y porcentaje del área que abarca cierto índice.....	12
Tabla 3 - Cálculo del riesgo por área y porcentaje del área que abarca cierto índice en la calibración inicial - recortando al Área Metropolitana -.	14
Tabla 4 - Comparación entre la calibración inicial y la recalibración para el Gran Asunción.....	15
Tabla 5 - Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos los parámetros <i>LP</i> y (<i>VP</i>) en las recalibraciones para el Área Metropolitana con <i>Nt</i> y <i>Ct</i>	16

1. Introducción

Las aguas subterráneas del acuífero Patiño constituyen un recurso muy importante en su zona de influencia. De este acuífero se abastecen de alguna forma u otra, 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 Paraguairí, con más de 2.976.400 habitantes [2]. Además de esta realidad demográfica, el acuífero abastece de agua a una gran parte del sector comercial, industrial y agropecuario de la zona. Dada su ubicación geográfica y sus condiciones geológicas [3], el acuífero corre el riesgo de contaminación constante por los vertidos sobre la napa freática de los diferentes sectores económicos e industriales. Aparte de los desechos/vertidos de los sectores económicos/industriales, 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. El agua subterránea del acuífero Patiño se utiliza en gran escala para el consumo humano, por ello, realizar un estudio de riesgo de contaminación en la zona se constituye en una herramienta indispensable para la toma de decisiones referentes a la protección de este recurso natural.

La importancia de salvaguardar un acuífero tiene una importancia socio-económica y financiera que lo pone en contexto. Por ejemplo; un estudio publicado el año 2001 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) [4] sobre los costos de proyectos para la limpieza de focos de contaminación de agua subterránea, señala que en promedio estas operaciones tienen un costo de capital total de US\$ 4.900.000. El costo anual por cada 3,7 m³ aguas tratadas es de US\$ 120.000.

Uno de los métodos más empleados para estimar el riesgo de 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) [5]. Este método ha sido utilizado en Estados Unidos [6-8], y también fue adoptado en Europa [9-12], Asia [13-15] y Australia [16] y en países de la región como Brasil [17], Argentina [18], Uruguay [19] y Colombia [20], entre otros.

En Paraguay, estudios anteriores han mencionado el peligro de contaminación del agua subterránea [21-24] del acuífero Patiño pero hasta el momento no se ha hecho un análisis detallado y exhaustivo sobre las localidades con más riesgo de contaminación y que tipo de contaminación pueden sufrir. En este contexto, el resultado de este trabajo pretende ser un punto de partida para el monitoreo del acuífero Patiño, y para la realización de trabajos de investigación, planificación y gerenciamiento encaminados a la protección de esta prioritaria fuente de agua.

A efectos de atender la planificación de emprendimientos industriales o urbanos e identificar puntos que necesitan ser monitoreados se propusieron cinco objetivos específicos:

1. Identificar los puntos con mayor riesgo de contaminación sobre el acuífero Patiño y mapear el riesgo de contaminación a una resolución de 1:400.000.
2. Crear diferentes mapas de riesgo por tipo de contaminantes.

3. Identificar los parámetros más influyentes en la determinación del riesgo de contaminación.
4. Crear una lista de recomendaciones para instituciones públicas, orientada a prevenir o sanear la contaminación del agua subterránea.
5. Proponer una metodología para el diseño un sistema de monitoreo continuo que maximice el uso de información.

En la presente monografía se expone como primera parte los resultados del proyecto titulado “Mapeo de vulnerabilidad y riesgo de contaminación del agua subterránea del Gran Asunción” [1], donde se estudió el riesgo de contaminación en todo el área del acuífero Patiño, usando datos existentes sobre la hidrogeología de la región y desarrollando una metodología para modificar el modelo DRASTIC [5]. El modelo DRASTIC fue modificado primeramente para incorporar la influencia antropogénica y luego fue modificado nuevamente a través de una calibración estadística propuesta por Panagopoulos et. al [11]. El análisis estadístico sirvió para calibrar el índice de riesgo y encontrar correlaciones positivas entre los índices de riesgo y las mediciones de contaminantes. La calibración usó dos diferentes tipos de contaminantes, “nitrógeno” y “coliformes” medidos en el análisis de calidad de agua del año 2006 [21] para demostrar que existe un mapa de riesgo por tipo de contaminante. Por último se definió el riesgo general como la superposición de los dos mapas calibrados de “nitrógenos” y “coliformes”.

En la segunda parte se presenta un trabajo actualmente en curso. Esta segunda parte se concentra en la determinación del riesgo de contaminación un área más pequeña del acuífero Patiño, el área del Gran Asunción debido a que las áreas con mayores índices de riesgo se encontraron en las ciudades de Asunción y sus alrededores. El trabajo en curso estudia principalmente el efecto de la recalibración – utilizando la misma metodología que en la primera parte – en un área de estudio más pequeña. Básicamente, se comparan los mapas resultantes de la primera parte de este estudio con un mapa resultante de la recalibración del índice. La diferencia está que en la segunda parte se calibran los mapas de riesgo usando solo las concentraciones de “nitrógeno” y “coliformes” situados sobre el Gran Asunción.

Por último, en la tercera parte de esta monografía se presentan una metodología para el diseño de un sistema de monitoreo como uno de los pilares principales de un plan de acción para el manejo sostenible del acuífero Patiño.

2. Riesgo de contaminación del acuífero Patiño en el área del Gran Asunción

A continuación se pretende dar continuidad al estudio realizado en la primera parte. El trabajo consiste en un estudio del riesgo de contaminación y el efecto de calibración en un área más pequeña del acuífero Patiño. Básicamente se usa la misma metodología propuesta en la primera parte para comparar dos mapas: Uno creado a través del recorte del mapa propuesto en la primera parte y otro confeccionado a

través de la recalibración usando solo los datos de contaminantes en el área nueva de estudio.

El área de estudio para esta parte fue el Gran Asunción (567 km² aproximadamente sobre el acuífero Patiño) debido a que las áreas con mayores índices de riesgo se encuentran en esta zona. Se compararon los mapas resultantes de la calibración de la primera parte - recortando el área del Gran Asunción - con el mapa resultante de una recalibración aplicando la misma metodología pero esta vez utilizando datos de las concentraciones de “nitrógeno total” (41 puntos de *Nt*) y “coliformes totales” (31 puntos de *Ct*) situados sobre el Área Metropolitana.

Nuevamente se prosiguió a crear tres mapas de riesgo de contaminación usando datos utilizados en los trabajos realizados anteriormente de los parámetros hidrogeológicos existentes y valores del “uso de la tierra”, “densidad de pozos ciegos” y “vías principales de transporte”. El primer mapa es el de riesgo a la contaminación por nitrógeno; el segundo, es de riesgo a la contaminación por coliformes; y el tercero, es el resultado de la superposición de los dos mapas anteriores, denominado mapa de riesgo general. Los datos de contaminantes usados para la calibración corresponden al estudio realizado en el año 2006 [21].

2.1. Análisis

El resultado de las recalibración con la concentración de *Nt* se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 1, donde el aumento del índice de riesgo es notable en casi todo el área de Asunción. Los índices más altos, con valores mayores a 80 en el mapa normalizado, se encuentran en: Barrios más poblados de Asunción y en lugares cercanos a las vías principales ya que la densidad de viviendas e industrias están situados en dichos lugares.

Tras la adición de los nuevos parámetros, la revisión de los pesos ponderados, la ecuación resultante es la siguiente:

$$Ire = (4 \cdot D_r) + (5 \cdot R_r) + (4 \cdot L_r) + (1 \cdot P_r) + (5 \cdot VP_r) \quad (1)$$

donde *Ire* es el índice de riesgo específico. Se mantuvieron los parámetros cuyos coeficientes presentaron una significancia estadística al nivel de $p < 0,1$.

El mayor aporte al índice de riesgo es el de “vías principales”, la “recarga”, “profundidad del acuífero” y el “uso de la tierra” con pesos ponderados altos (cinco y cuatro) teniendo en cuenta la concentración del contaminante (*Nt*).

Tras la recalibración realizada y la aplicación de la ecuación (1), la correlación entre el índice de riesgo recalibrado y los valores de concentración de “nitrógeno total” presentó un coeficiente de correlación alto, $\rho = 0,632$ (Figura 2). Antes de la recalibración el coeficiente de correlación era casi nula, entre el índice inicial y los valores de concentración de *Nt* de $\rho = 0,076$.

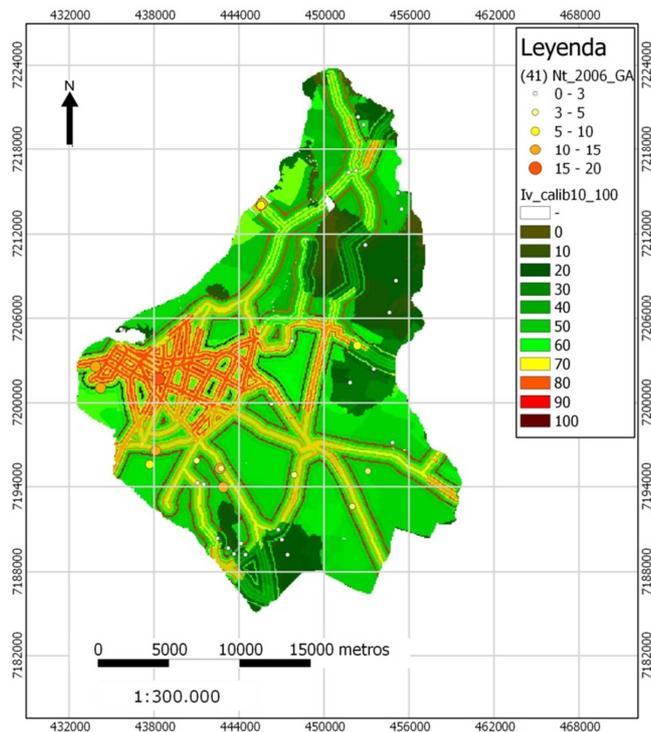


Figura 1 - Distribución del riesgo específico DRASTIC para el acuífero Patiño en el Área Metropolitana y las concentraciones de Nt con los pesos modificados de los parámetros finales.

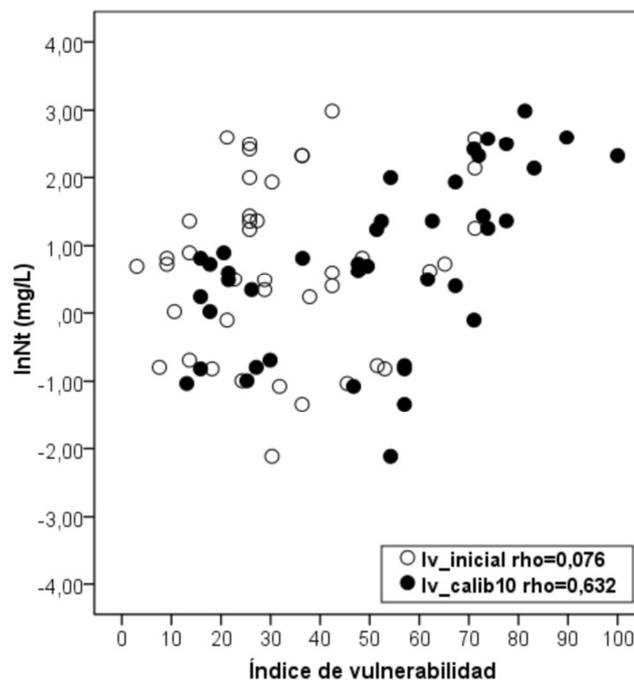


Figura 2 - Relación entre los índices de riesgo: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), riesgo inicial DRASTIC y la concentración de Nt (transformado logarítmicamente) para el acuífero Patiño en el área del Gran Asunción.

El resultado de la recalibración con la concentración de Ct se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 3, donde el aumento del índice de riesgo es notable en gran

parte de Asunción y extendiéndose a Mariano R. Alonso y Limpio. Los índices más altos, con valores mayores a 90 en el mapa normalizado (Figura 3). Ciudades como Luque y Capiatá, también presentaron un índice mayor a 80.

Tras la adición de los nuevos parámetros, la revisión de los pesos ponderados, la ecuación resultante es la siguiente:

$$Ire = (5 \cdot D_r) + (4 \cdot R_r) + (3 \cdot L_r) + (2 \cdot P_r) + (5 \cdot VP_r) \quad (2)$$

donde *Ire* es el índice de riesgo específico. Se mantuvieron los parámetros cuyos coeficientes presentaron una significancia estadística al nivel de $p < 0,1$.

El mayor aporte al índice de riesgo es el de “vías principales”, “profundidad del acuífero”, la “recarga”, con pesos ponderados altos (cinco y cuatro) teniendo en cuenta la concentración del contaminante (*Ct*).

Tras la recalibración realizada y la aplicación de la ecuación (2), la correlación entre el riesgo y los valores de concentración de “coliformes totales” presentó una correlación alta, $\rho = 0,75$ (Figura 4), la correlación inicial fue $\rho = 0,493$.

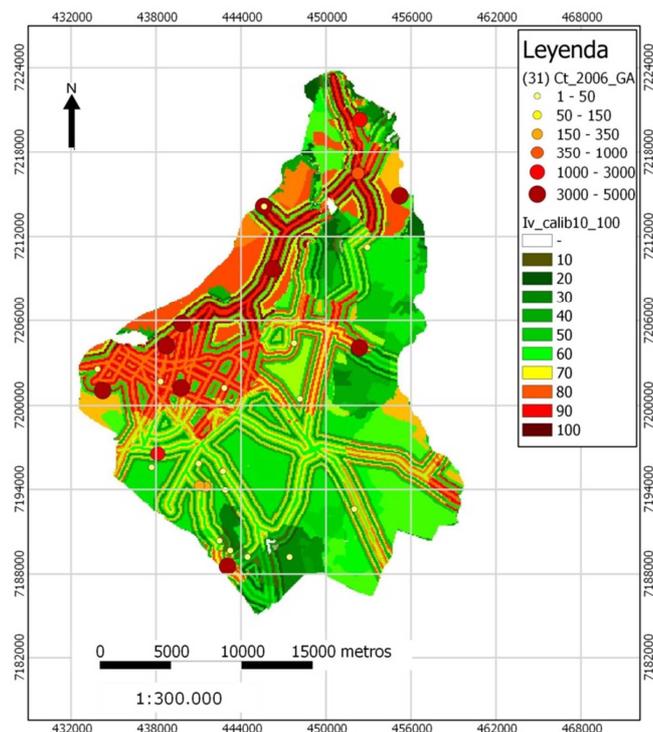


Figura 3 - Distribución del riesgo específico DRASTIC para el acuífero Patiño en el área del Gran Asunción y las concentraciones de Ct con los pesos modificados de los parámetros finales.

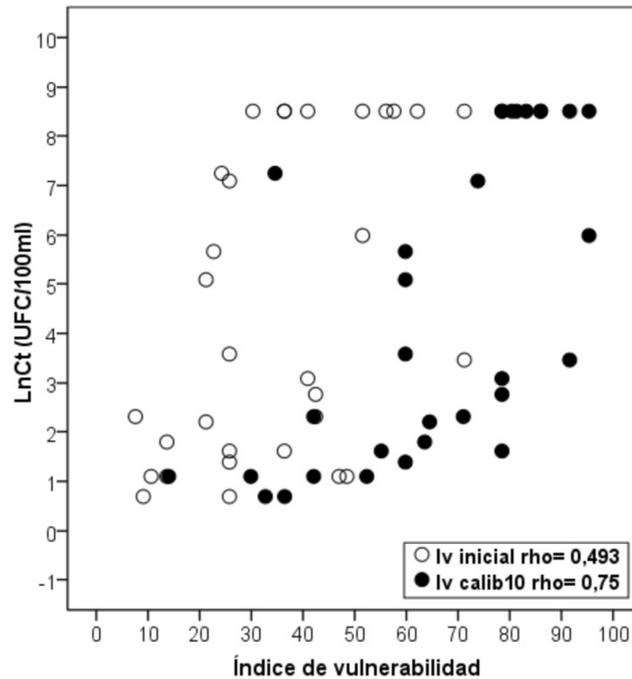


Figura 4 - Relación entre los índices de riesgo: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), riesgo inicial DRASTIC y la concentración de Ct (transformado logarítmicamente) para el acuífero Patiño en el área del Gran Asunción.

En el mapa de riesgo general (Figura 5) – superposición de los dos mapas calibrados con Nt y Ct . Los valores de índices más altos se presentan en las siguientes zonas que abarcan el acuífero Patiño dentro del Área Metropolitana:

- Valores máximos iguales a 100: Identificados en las ciudades de Asunción, Mariano R. Alonso y Limpio.
- Valores mayores a 80: En las ciudades de Fernando de la Mora, San Lorenzo y Capiatá se visualizan mayor cantidad de área con este índice. Mientras que en Lambaré, Villa Elisa, Ñemby, San Antonio y Luque, también se visualizan índices mayores a 80 pero en áreas muy reducidas.

Una lista con los barrios con índices de riesgos máximos y mínimos se pueden ver en la Tabla 1.

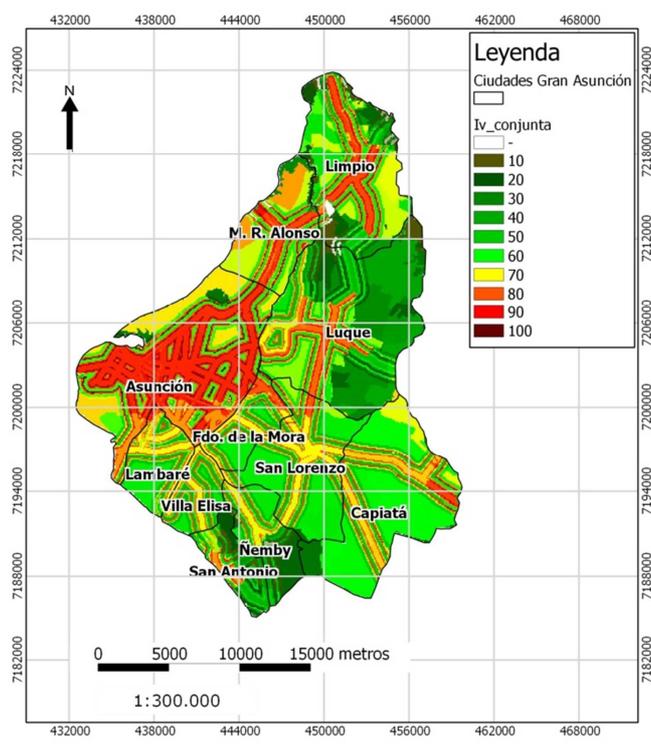


Figura 5 - Mapa de riesgo normalizado resultante de la superposición de mapas de las calibraciones de Nt y Ct (2006).

Tabla 1 - Barrios con índices de riesgo de contaminación máximos y mínimos encontrados.

Índice máx.	Barrios con índices máximos encontrados	Ciudad
100 - 90	Ricardo Brugada, San Felipe, Jara, Virgen del Huerto, Mcal. Francisco S. López, Ciudad Nueva, Gral. Bernardino Caballero, Pinoza, San Vicente, Obrero, Sajonia, Mburicaó, Recoleta, Bella Vista, Virgen de la Asunción, Santo Domingo, Manorá, Villa Morra, Hipódromo, San Pablo, San Cristobal, Herrera, San Jorge, Madame Lynch, Mbocayaty, Botánico, Loma Pyta, Itay.	Asunción
100 - 90	Corumba-Cué, Central, Arecaya, Concordia, Kaaguy-Kupe.	M. Roque Alonso
100 - 90	Santa Lucía, San Antonio, San José, Cicomar, San Pedro, San Salvador, San Juan, Isla Aranda, Mbajue, 8 de Diciembre, San Francisco B, Salado-I, San Ramón II, Piquete Kué.	Limpio
100 - 90	Cuarto Barrio, Jhugua de Seda, Laurelty, Tercer Barrio, Jaguareté Kora.	Luque
100 - 90	Karumbé Kúa, Laurelty.	Capiatá

Índice mín.	Barrios con índices mínimos encontrados	Ciudad
0 - 10	San Francisco Centro, Las Mercedes, San Roque, Acosta Ñu.	San Antonio
0 - 10	Caaguazú	Ñemby
0 - 10	Ykua Karanday, Rincón del Peñón.	Luque
0 - 10	Isla Aveiro, Piquete Kué.	Limpio

La validación de los resultados de la recalibración en el Área Metropolitana se realizó mediante comparaciones entre los mapas recalibrados por contaminantes (2006) y valores de los últimos años correspondientes al monitoreo de piezómetros realizados en el año 2010 por DIGESA.

La correlación entre el mapa de riesgo recalibrado y la concentración de 14 valores de *Nt* del año 2010 en el Área Metropolitana tiene un coeficiente de correlación de $\rho=0,682$ (Figura 6). Mientras que la correlación entre el mapa de riesgo recalibrado y la concentración de 13 valores de *Ct* del año 2010 en el Área Metropolitana tiene un coeficiente de correlación de $\rho=0,682$ (Figura 7). Ambas validaciones resultaron con iguales valores de ρ y se encuentran en el mismo orden que la recalibración realizado con los valores de contaminantes del año 2006, lo que valida la recalibración e indica el uso adecuado de la nueva ecuación del DRASTIC utilizada.

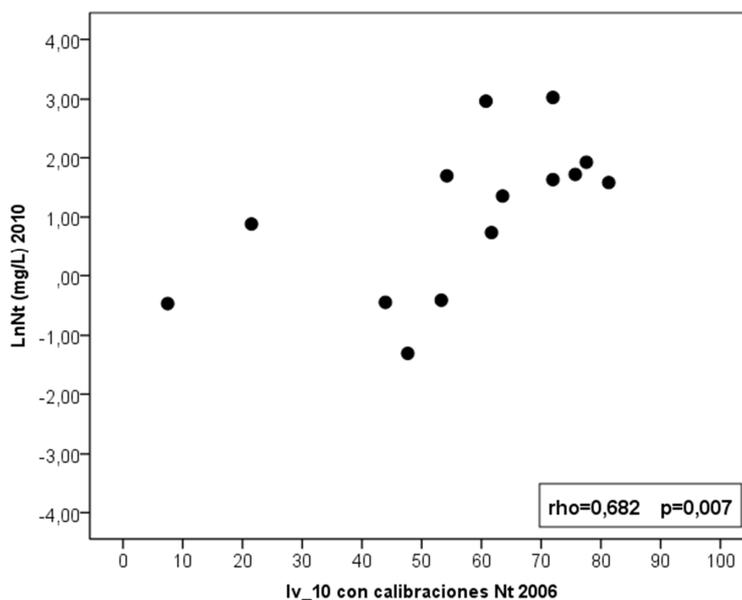


Figura 6 - Relación del índice de riesgo específico DRASTIC (recalibrado con la concentración de *Nt* del año 2006) y los puntos de *Nt* transformados logarítmicamente (2010)

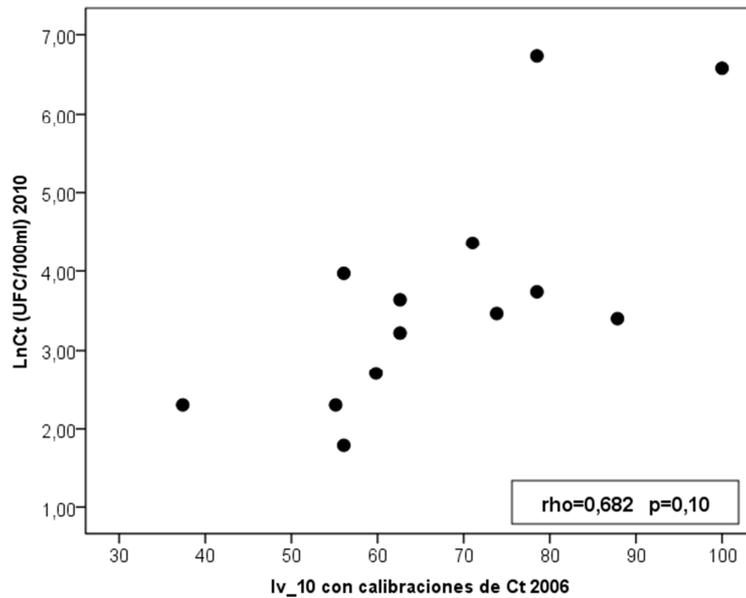


Figura 7 - Relación del índice de riesgo específico DRASTIC (recalibrado con la concentración de Ct del año 2006) y los puntos de Ct transformados logarítmicamente (2010).

Para entender en detalles el riesgo completo de contaminación del acuífero en el Área Metropolitana, se incluyó un análisis de las áreas según los índices de riesgos correspondientes a los mapas de riesgo general y por contaminantes (*Nt* y *Ct*).

En la Tabla 2 podemos ver poca diferencia de áreas entre los índices de riesgo de los mapas de *Nt* y *Ct*, los valores de riesgo de contaminación se encuentran distribuidos uniformemente pero no así las áreas específicas (Tabla 2). Como se pueden ver en las Figuras 26 y 28 las áreas con mayor riesgo se encuentran alrededor de las ciudades y las vías principales. Los índices de riesgo general más predominantes en el área de estudio están entre 60-69, con valores del 22%. En el mapa de nitrógeno las áreas más predominantes son aquellas con valores de 50-59 (riesgo medio). Para los mapas de coliformes se encontró que los números más comunes eran los de riesgo entre 60-69, con 24% del área del acuífero. Pero por lo general, se puede decir que la distribución de los índices siguen una forma gaussiana como se puede inferir de la Figura 8 donde se presenta la probabilidad acumulativa.

Tabla 2 - Cálculo de la riesgo por área y porcentaje del área que abarca cierto índice.

Índice de riesgo	Riesgo general		Nt		Ct	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
100 - 90	28	5	16	3	38	7
89 - 80	86	15	39	7	77	14
79 - 70	86	15	68	12	90	16
69 - 60	123	22	80	14	134	24
59 - 50	90	16	186	33	91	16
49 - 40	58	10	68	12	68	12
39 - 30	46	8	15	3	47	8

29 - 20	34	6	50	9	15	3
19 - 10	13	2	36	6	4	1
9 - 0	2	0	8	1	3	0

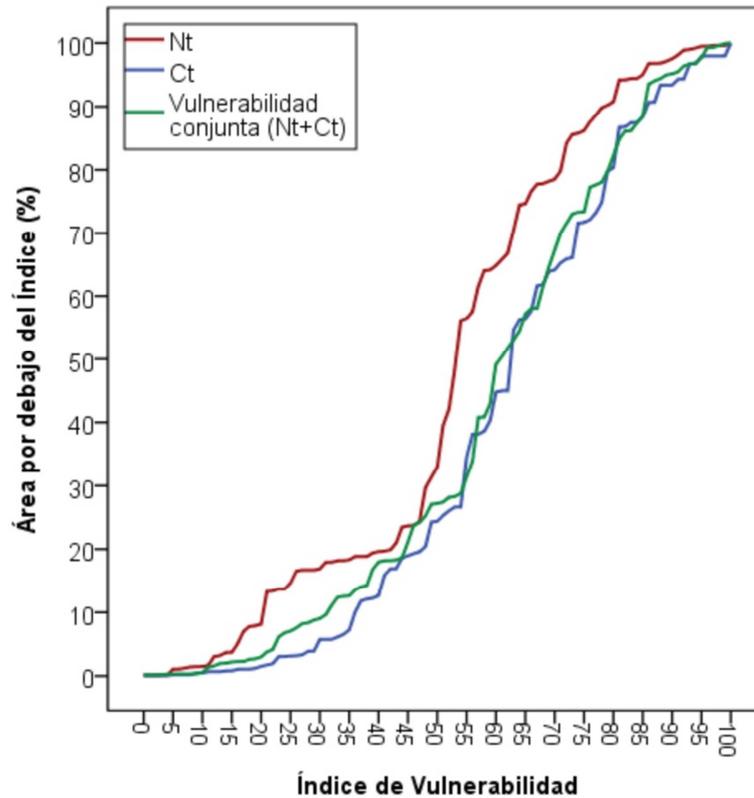


Figura 8 - Gráfico de probabilidad acumulativa para Nt, Ct y riesgo general.

El siguiente análisis consiste en comparar los mapas resultantes de la calibración inicial - recortando al Área Metropolitana del primer análisis del acuífero Patiño - con el mapa resultante de la recalibración del Área Metropolitana del trabajo en curso. En la Tabla 3 se comparan las correlaciones obtenidas entre cada uno de los mapas con los contaminantes.

El resultado de esta comparación indica un mapa de riesgo general del Área Metropolitana - extraído del inicial - que 73% del área tiene un índice mayor a 60 (Tabla 3). En comparación, el mapa recalibrado muestra que en el Área Metropolitana solo 57% del área tiene un índice mayor a 60 (Tabla 2). Esto se debe a que se usaron menos valores para calibrar el segundo mapa, y esto causa que haya un rango menor que debe ser distribuido ente 0 a 100. Esto es una deficiencia del concepto de normalización de la escala de riesgo - se fuerza a que hallan valores en el rango de 0 a 100.

Tabla 3 - Cálculo del riesgo por área y porcentaje del área que abarca cierto índice en la calibración inicial - recortando al Área Metropolitana -.

Índice de riesgo	Riesgo general		Nt		Ct	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
100 - 90	70	12	54	10	40	7
89 - 80	104	18	61	11	78	14
79 - 70	81	14	84	15	153	27
69 - 60	165	29	96	17	131	23
59 - 50	67	12	142	25	107	19
49 - 40	49	9	50	9	37	6
39 - 30	15	3	46	8	17	3
29 - 20	12	2	18	3	5	1
19 - 10	4	1	14	2	1	0
9 - 0	0	0	2	0	0	0

En la comparación entre el riesgo DRASTIC resultante de la calibración inicial con *Nt* - recortando al Área Metropolitana del primer análisis del acuífero Patiño - con el índice de riesgo DRASTIC resultante de la recalibración con *Nt* del Área Metropolitana del trabajo en curso, se obtuvo un coeficiente de correlación de $\rho=0,84$ (Figura 9). Mientras que para la relación del índice de riesgo DRASTIC con *Ct* se obtuvo una correlación de $\rho=0,89$ (Figura 10). Ambos resultados de los riesgos según el tipo de contaminante tienen una alta relación, lo que indica que hay muy poca diferencia entre los resultados obtenidos en los mapas por contaminantes.

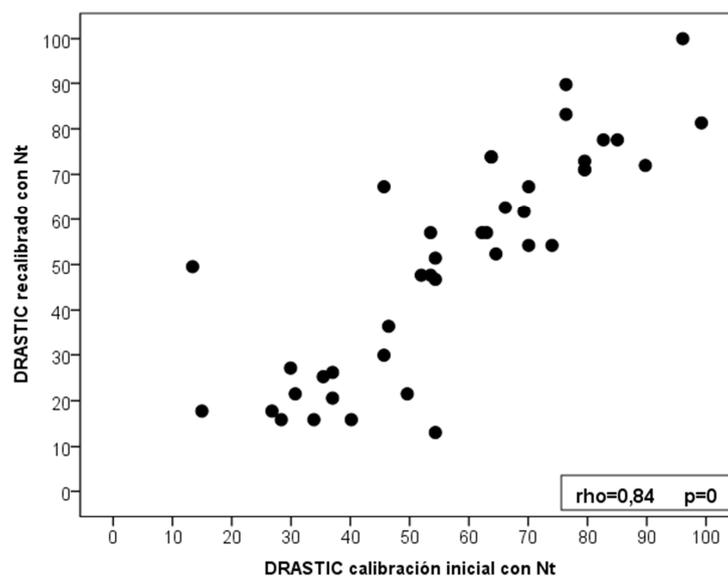


Figura 9 - Relación del índice de riesgo DRASTIC resultante de la calibración inicial con *Nt* - recortando al Área Metropolitana del primer análisis del acuífero Patiño - con el índice de riesgo DRASTIC resultante de la recalibración con *Nt* del Área Metropolitana del trabajo en curso.

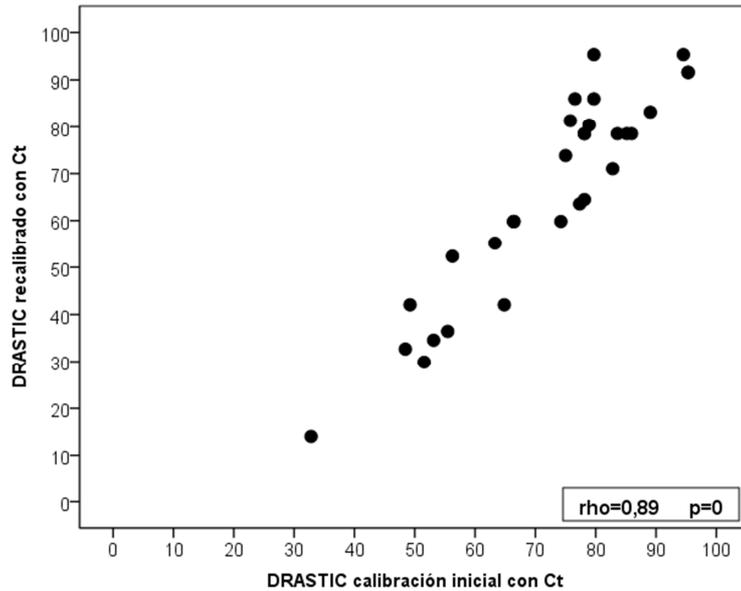


Figura 10 - Relación del índice de riesgo DRASTIC resultante de la calibración inicial con Ct - recortando al Área Metropolitana del primer análisis del acuífero Patiño - con el índice de riesgo DRASTIC resultante de la recalibración con Ct del Área Metropolitana del trabajo en curso.

2.2. Conclusiones preliminares

Se demostró que el mapa de riesgo de contaminación recalibrado a un área más pequeña dentro del acuífero Patiño aumenta la correlación entre el índice de riesgo y las concentraciones de Nt y Ct . En la Tabla 4 se compara los coeficientes de correlación entre los mapas resultantes de la calibración inicial - recortando al Gran Asunción del primer análisis del acuífero Patiño - con el mapa resultante de la recalibración del Gran Asunción.

Tabla 4 - Comparación entre la calibración inicial y la recalibración para el Gran Asunción.

	Calibración inicial recortada	Recalibración Gran Asunción
Correlación con Nt (ρ)	0,522	0,632
Correlación con Ct (ρ)	0,7	0,75

Esta recalibración permitió determinar los parámetros de mayor importancia para el acuífero en el Área Metropolitana, según la correlación con el contaminante. En la Tabla 5 se comparan los pesos ponderados iniciales y finales de cada parámetro.

Tabla 5 - Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos los parámetros (*L*) (*P*) y (*VP*) en las recalibraciones para el Área Metropolitana con *Nt* y *Ct*.

	Parámetros									
	<i>D_w</i>	<i>R_w</i>	<i>A_w</i>	<i>S_w</i>	<i>T_w</i>	<i>I_w</i>	<i>C_w</i>	<i>L_w</i>	<i>P_w</i>	<i>VP_w</i>
Peso ponderado inicial	5	4	3	2	1	-	3	-	-	-
Peso ponderado final calibración con <i>Nt</i> (mg/L)	4	5	-	-	-	-	-	4	1	5
Peso ponderado final calibración con <i>ln(Ct)</i> (UFC/100ml)	5	4	-	-	-	-	-	3	2	5

El mapa de riesgo general del Área Metropolitana - recortado del primer trabajo realizado – muestra que el 73% del área tiene un índice mayor a 60. En comparación, el mapa recalibrado muestra que en el Área Metropolitana solo 57% del área tiene un índice mayor a 60. Esto se debe a que se usaron menos valores para calibrar el segundo mapa, y esto causa que haya un rango menor que debe ser distribuido ente 0 a 100. Esto es una deficiencia del concepto de normalización de la escala de riesgo - se fuerza a que hallan valores en el rango de 0 a 100.

3. Trabajos Futuros

Basados en las recomendaciones de la primera parte y los resultados preliminares de la segunda parte, se presenta una propuesta de metodología para poder diseñar un sistema de monitoreo continuo del acuífero Patiño dentro del área del Gran Asunción.

La metodología propone primeramente recolectar y analizar datos de calidad de agua. Es decir, se pretende extender el análisis de medición a más de dos contaminantes. Una vez que se tengan las mediciones se propone usar la combinación de un análisis geoestadístico, modelos computacionales de fenómenos de transporte y métodos heurístico como son los algoritmos genéticos para optimizar una red de monitoreo basado en la maximización y minimización de varios objetivos. Este sistema de monitoreo es identificado como uno de los pilares principales para el manejo sostenible del acuífero.

3.1. Justificación Teórica

En la primera parte de esta monografía se encontró que el 42% del acuífero Patiño tiene una mediana a alta vulnerabilidad a contaminación. Del área total del acuífero Patiño, 427 km² están categorizados como áreas urbanas [25] y el estudio mencionado demostró que 88% de estas áreas tienen un mediano a alto riesgo de contaminación. También se demostró que hay una alta correlación espacial entre diferentes tipos de contaminación. Es decir que, al existir un contaminante existe una alta probabilidad de encontrar otros contaminantes. Durante el estudio no se

analizaron muestras de agua, sino se usaron datos ya existentes, quedando abierto algunos aspectos sobre la situación actual del acuífero Patiño.

Por otra parte los problemas más importantes que aquejan a las aguas subterráneas de economías en desarrollo, a nivel mundial, fueron identificadas por Foster y Chilton [26] como: (1) Agotamiento del almacenamiento del acuífero. Esto ya fue afirmado, sobre el acuífero Patiño, por Monte Domecq y Baez en el 2007 cuando realizaron un balance hídrico del acuífero [27]; (ii) La salinización del agua subterránea derivada de perturbaciones hidráulicas. El mismo Foster en el 2002 ya menciona como un posible problema la intrusión de aguas saladas del lado del Chaco – por la sobre explotación del acuífero en cercanías del río Paraguay [28]; y (iii) La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación causada por el uso del suelo y las prácticas de descarga de efluentes relacionados con el desarrollo urbano. Este punto aún no ha sido estudiado en detalle aunque en la primera parte identificamos las posibles áreas con más riesgo de contaminación.

Para responder el tercer punto y avanzar hacia un manejo sostenible del acuífero se debe crear un sistema de monitoreo continuo de calidad de agua y un modelo computacional que ayude a pronosticar diferentes escenarios de contaminación. Un simple sistema de monitoreo puede ser diseñado usando muestras de calidad de agua y un análisis de las correlaciones entre diferentes contaminantes en el espacio. El uso de muestras de agua para el diseño de una red de monitoreo ya fue demostrado por Reed et al. [29] cuando usaron valores históricos de calidad de agua en una base área de los EEUU, sumado a un modelo computacional del transporte de contaminantes y el uso algoritmos genéticos, para optimizar la red de monitoreo de tal forma de reducir el costo de toma de muestras en un 60%.

Lo que no es una ciencia cierta son los mecanismos para detectar los contaminantes y focos de contaminación antes que estos causen algún daño significativo a nivel regional (p. Ej. todo un acuífero), principalmente debido a la alta incertidumbre que existe sobre posible focos de contaminación [30]. El caso es casi siempre que focos de contaminación de aguas subterráneas son descubiertos y luego se diseña un sistema de monitoreo, una vez que esto ya se hayan manifestado de forma negativa sobre la ciudadanía. Lo que entonces queda a investigar es como crear un sistema suficientemente robusto que pueda detectar un foco de contaminación antes que este cause mayores problemas. Lo que se ha hecho anteriormente [29, 30] es desarrollar un sistema de monitoreo continuo usando un modelo computacional que puedan lidiar con incertidumbre. Por ejemplo, Meyer et al. [30] diseñaron un sistema de monitoreo tratando de optimizar 3 objetivos principales; uno de ellos siendo la minimización del área de contaminación. Crearon un análisis estocástico de posibles eventos de contaminación y luego crearon una red de monitoreo que minimizaba la probabilidad de no detección.

Además vale agregar que los avances tecnológicos en cuanto a la comunicación y sensores nos permiten pensar en un sistema de monitoreo continuo, remoto y sin intervención humana del acuífero Patiño. Dicho sistema permitiría conocer la situación en tiempo real del acuífero y llevar los registros de su evolución. Lo cual permitirá realizar innumerables estudios e investigaciones, además de mejorar las estadísticas. Esto permitirá la temprana detección de variaciones de calidad del acuífero, permitiendo proporcionar una respuesta rápida a las mismas. Existen varios trabajos [31-33] donde los autores exponen experiencias y resultados obtenidos con los sistemas de monitoreo remoto en tiempo real.

3.2. Propuesta Metodológica

Para el diseño de un sistema de monitoreo primeramente se usarían los puntos identificados en la segunda parte de esta monografía, en conjunción con entrevistas a referentes de que manejen la hidrogeología y posibles focos de contaminación, para tomar muestras aleatorias de varios contaminantes – idealmente una sería tipos de contaminantes (metales pesados, material orgánico y bacteriológico, derivados del petróleo, entre otros). Como primer resultado, luego de identificar la concentración de los varios contaminantes en diferentes zonas, se hará un análisis geoestadístico para entender las correlaciones en espacio de los contaminantes. Esencialmente, responder si existen focos de contaminación de ciertos contaminantes y cuán grande son estos focos.

Luego se pueden usar los parámetros de calidad de agua para calibrar un modelo hidrogeológico del acuífero usando la plataforma VMOD [34] que incorpora el transporte dinámico de contaminantes y el movimiento de agua, sea por recarga, extracción para consumo humano o fuga como flujo base de arroyos y ríos. Esta calibración podrá identificar los posibles puntos y orígenes de la contaminación y hacia dónde se dirige. El modelo computacional puede ser usado en combinación con el algoritmos genéticos para optimizar varios objetivos. La metodología a ser implementada sería similar a la de Reed y Minsker [35] donde usaron un algoritmo genético como el NSGA-II [36] para optimizar 4 objetivos: (1) Minimizar los costos de muestreo (p. ej. veces que deben quitar muestras), (2) Maximizar la exactitud de los mapas interpolados de contaminación, (3) Maximizar la precisión relativa de las estimaciones de masa de contaminantes basado en el análisis geoestadístico, y (4) Reducir al mínimo la incertidumbre de estimación de la contaminación.

4. Referencias

1. Báez, L., C. Villalba, and J.P. Nogues, *Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción*. 2014: Proyecto del CONACyT INV 20 - Facultad Politécnica Universidad Nacional de Asunción. p. 55.
2. Dirección General de Estadística Encuestas y Censos, D.G.E.E.C., *Compendio Estadístico*. 2012.
3. 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.
4. EPA, U.S.E.P., *Cost Analyses for Selected Groundwater Cleanup Projects: Pump and Treat Systems and Permeable Reactive Barriers*. 2001.
5. Aller, L., et al., *DRASTIC: A standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings*, in *National Water Well Association/Benett and Williams Inc*. 1987: Ohio.
6. Dixon, B., *Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool*. Applied Geography 25 2005: p. 327 – 347.
7. Merchant, J.W., *GIS-Based groundwater pollution hazard assessment: A critical review of the DRASTIC model*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1994. **60 (9)**: p. 1117 - 1127.

8. Rupert, M.G., *Improvements to the DRASTIC ground-water vulnerability mapping method*, in *National Water-Quality Assessment Program-NAWQA*, U.S.G.S. U.S. Dept. of the interior, Editor. 1999.
9. Lobo Ferreira, J.P. and M.M. Oliveira, *DRASTIC Groundwater vulnerability mapping of Portugal in Groundwater: An Endangered Resource*, in *27th Congress of the International Association for Hydraulic Research*. 1997: San Francisco, USA. p. 132-137.
10. Martínez, M., P. Delgado, and V. Fabregat, *Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal*, in *Jornadas sobre la contaminación de aguas subterráneas: un problema pendiente*. 1998. p. 413-420.
11. 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.
12. Secunda, S., M.L. Collin, and A.J. Melloul, *Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region*. *J. Environ Managept*, 1998. **54**: p. 39 – 57.
13. Neshat, A., et al., *Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran*. *Environmental Earth Sciences*, 2013.
14. Sharadghah, S., *Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en Jordania. Aplicación del modelo DRASTIC*, in *Trabajo de Investigación*. 2001: Universidad Politécnica de Valencia.
15. Thirumalaivasan, D., M. Karmegam, and K. Venugopal, *AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS*. *Environmental Modelling & Software* 2003. **18**: p. 645-656.
16. Piscopo, G., *Groundwater vulnerability map explanatory notes-MacIntyre Catchment*, in *NSW Department of Land and water Conservation*. 2001. p. 13.
17. Nobre, R.C.M., et al., *Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool*. *Journal of Contaminant Hyrology* 2007. **94**: p. 277 – 292.
18. Reynoso, L., et al., *Vulnerabilidad del Acuífero Pampeano a la contaminación en el norte de la Provincia de Buenos Aires. Aplicación de la metodología DRASTIC*, in *RIA*. 2005: INTA, Argentina. p. 85-99.
19. Xavier, J.M., et al., *Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Mercedes en el área metropolitana de la ciudad de Paysandú – Comparación de los métodos GOD y DRASTIC*. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 2004. **4**: p. 35 - 45.
20. Vergara Flórez, V., G. Gutiérrez Ribon, and H. Flórez Ramos, *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Morroa a contaminación por plaguicidas aplicando la metodología DRASTIC*. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 2009. **26**
21. 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.

22. Carvallo Vargas, F.A., *Estudio de la Vulnerabilidad Ambiental de los Acuíferos en las Áreas Urbanas de San Juan Bautista e Itauguá*, in *Programa de Saneamiento y Agua Potable para el Chaco y Ciudades Intermedias de la Región Oriental del Paraguay (PR-L1060 y PR-G1011). Cooperación Técnica de Apoyo a la preparación del Programa de Saneamiento y Agua Potable para el Chaco y Ciudades Intermedias de la Región Oriental del Paraguay (PR-T1106)*, B.I.d.D. (BID), Editor. 2011.
23. 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.
24. van der Gun, J.A.M., *Informe técnico 2.1: Sinopsis del estudio*, in *Estudio del Acuífero Patiño FEHS*. 2001.
25. *Cobertura de la Tierra Paraguay 2011*, F.d.C.A.F.-U.y.F.a.F.P.R.I. (FFPRI), Editor. 2013: San Lorenzo – Paraguay.
26. Foster, S.S.D. and P.J. Chilton, *Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation*. . Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Science, 2003. **358**(1440): p. 1957–1972.
27. 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.
28. Foster, S. and H. Garduño, *Paraguay: El Uso de Agua Subterránea en Gran Asunción – Problemas Actuales y Regulación Propuesta*, B. Mundial, Editor. 2002.
29. Reed, P., B. Minsker, and A.J. Valocchi, *Cost-effective long-term groundwater monitoring design using a genetic algorithm and global mass interpolation*. Water Resources Research, 2000. **36**(12): p. 3731-3741.
30. Meyer, P.D., A.J. Valocchi, and J.W. Eheart, *Monitoring network design to provide initial detection of groundwater contamination*. Water Resources Research, 1994. **30**(9): p. 2647-2659.
31. Howard B Glasgow, et al., *Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies*. . Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004. **300**(1-2).
32. Jha, M.K., *Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints*. Water Resources Management, 2012. **21**(2).
33. Timothy Mark Sivavec, et al., *Method and system to remotely monitor groundwater treatment*. , U.S. Patent No. 6, 828., Editor. 2002, US 6491828 B1.
34. Schlumberger, *Visual Modflow Flex*. 2013.
35. Reed, P. and B. Minsker, *Striking the Balance: Long-Term Groundwater Monitoring Design for Conflicting Objectives*. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004. **130**(2): p. 140-149.
36. Deb, K., et al., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. *Evolutionary Computation*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002. **6**(2): p. 182 - 197.