

Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción



Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción

Liz Báez L.
Cynthia Villalba
Juan Pablo Nogues

Marzo, 2014

Resumen Ejecutivo

Dada la actual coyuntura socio-ambiental de las aguas del Paraguay y en particular la contaminación de los arroyos del Gran Asunción y el Lago Ypacaraí, es de suma importancia entender la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del Gran Asunción¹. Al entender esto, se pueden tomar acciones para prevenir o actuar sobre cualquier amenaza posible y manejar el acuífero de manera sustentable. Dicho conocimiento también ayudaría al desarrollo adecuado de las zonas urbanas e industriales. Además de la utilidad que brinda a la planificación urbana, el conocer la vulnerabilidad pone en evidencia los costos asociados que se deberían tener en cuenta para un posible saneamiento de las aguas. Vale recalcar que los costos asociados al saneamiento de las aguas subterráneas son mayores que los de las aguas superficiales (p.ej. un lago). Esto se debe a la realidad geológica que impide el libre acceso a las aguas subterráneas en comparación a las aguas superficiales [1].

Las aguas subterráneas del Gran Asunción almacenadas en el acuífero Patiño abastecen alrededor de 3 millones de personas [2] y actualmente, no existe mayor información detallada de los posibles contaminantes, la calidad del agua subterránea y los puntos que necesitan ser monitoreados para encontrar posibles focos de contaminación.

El propósito general de este trabajo fue estudiar la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del acuífero Patiño, basado en un análisis de datos hidrogeológicos y de urbanización de la zona como son el uso de la tierra, la densidad de pozos de ciegos y la influencia de las vías principales de transporte. A efectos de atender la planificación de emprendimientos industriales o urbanos y para manejar de manera sostenible el acuífero, se propusieron cuatro objetivos específicos:

1. Identificar las localidades en el Gran Asunción con mayor vulnerabilidad a la contaminación de sus aguas subterráneas.
2. Mapeo de vulnerabilidad y riesgo de contaminación del agua subterránea.
3. Mapeo de diferentes contaminantes con sus posibles orígenes y causas.
4. Lista de recomendaciones para instituciones públicas orientada a prevenir o sanear la contaminación del agua subterránea.

La metodología establecida se basó en modificar un modelo de vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas, denominado DRASTIC [3]. Se prosiguió a crear mapas de vulnerabilidad y riesgo usando datos hidrogeológicos existentes y valores del uso de la tierra, alcantarillado público y vías de transporte. El modelo modificado dio como resultado tres mapas de vulnerabilidad. El primer mapa es el de vulnerabilidad a la contaminación de nitratos; el segundo, es de vulnerabilidad a los coliformes fecales; y el tercero, es el resultado de la superposición de los dos mapas anteriores, denominado mapa de vulnerabilidad general.

Las áreas con mayor vulnerabilidad general mostraron un índice de vulnerabilidad entre 91 a 100 (en una escala de 0 a 100). Dichas áreas son: Asunción (Recoleta y

¹ En este informe se usa la denominación del Gran Asunción para describir la zona geológica acuífero Patiño, ya que el acuífero no tiene una frontera acorde a la frontera geopolítica.

San Roque, Santísima Trinidad, Catedral, La Encarnación), Guarambaré (solo área urbana), San Lorenzo (área central), Fernando de la Mora y Lambaré (Zona Norte).

A través de la recolección de datos para el análisis presentado, se halló el problema de la limitada información existente en la zona de estudio, lo cual impidió identificar las áreas vulnerables con mayor precisión. En este contexto, seguidamente se presenta una lista de datos y acciones necesarias para caracterizar la vulnerabilidad del acuífero en mayor detalle y poder implementar un programa de manejo sustentable.

- I. Un mapa geológico del acuífero que detalle el tipo de suelo, la litología y las propiedades hidráulicas del acuífero. Actualmente no existe un mapa geológico a una escala relativamente baja que permita diferenciar entre diferentes zonas del acuífero. Los datos que existen – basados en perfiles de pozo – no tienen la misma nomenclatura al identificar la litología y/o se contradicen al identificar los estratos geológicos.
- II. Una red de monitoreo – automatizado – que pueda recolectar y transmitir información de elevación de la napa freática y pluviometría de varios puntos del acuífero. Esta información es necesaria para entender en detalle los ciclos hidrológicos del acuífero y las zonas con mayor peligro de agotamiento de agua, la recarga potencial y artificial. Es probable que los índices de vulnerabilidad identificados en este estudio no sean siempre iguales debido a que el movimiento de las napas afecta la vulnerabilidad.
- III. Campañas continuas (o por lo menos cuatro veces al año) de recolección de muestras de agua para ser analizadas para contaminantes orgánicos, metales pesados y derivados del petróleo. Actualmente, los contaminantes analizados son reducidos: Por lo general, se analizan las concentraciones de nitratos, coliformes, y hierro; dejando sin efecto el análisis de contaminantes más nocivos como los metales pesados y los derivados del petróleo.
- IV. Es necesario crear un modelo numérico del acuífero para planificar su uso a futuro y entender los efectos que ciertas acciones podrían ejercer. Un modelo numérico podría ser usado como una herramienta de planificación y manejo sustentable.

Se puede argumentar que toda información (hidrogeológicas y de contaminantes) sirve para analizar decisiones y estrategias políticas, ambientales y económicas con respecto al acuífero Patiño. Sin mediciones las decisiones se basan en supuestos y las ineficiencias económicas son casi seguras.

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 Secretaría 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 de los años 2010 al 2012.

Tabla de Contenido

Resumen Ejecutivo.....	i
Agradecimientos	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	vii
1. Introducción.....	1
2. El área de estudio - acuífero Patiño.....	5
3. Metodología.....	6
4. Resultados y Discusión.....	23
5. Conclusiones	43
6. Referencias	46
7. Anexos	50

Lista de Figuras

Figura 1. El acuífero Patiño y las ciudades que comprende.....	6
Figura 2. Mapa resultante de la interpolación Cokriging de 47 piezómetros utilizados con los valores de NE (2007 y 2013).	10
Figura 3. Mapa de “recarga” con valores en mm.	11
Figura 4. Imagen escaneada del perfil de uno de los pozos de SENASA.	12
Figura 5. Mapa de “litología del acuífero” y 192 pozos/ piezómetros georreferenciados.	13
Figura 6. Mapa de “tipo de suelo” en el área del acuífero Patiño.	14
Figura 7. Mapa de “topografía” del terreno con valores en porcentaje.	15
Figura 8. Mapa de “conductividad hidráulica” (m/d) y la unión de pozos con pruebas de bombeos realizadas por SENASA y el Consorcio CKC-JNS (2007).	16
Figura 9. Mapa de uso de la tierra correspondiente al área del acuífero Patiño. Extraído del Mapa de Cobertura de la Tierra Paraguay (2011).	17
Figura 10. Mapa de la “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea”. Extraído del Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño (2007).	18
Figura 11. Mapa de “vías principales”. Extraído del Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño (2007).	19
Figura 12. Mapa normalizado de la distribución del Ivi DRASTIC intrínseca y los puntos de concentración de Nt.	24
Figura 13. Relación entre el índice de vulnerabilidad DRASTIC intrínseca y la concentración de Nt (con transformación logarítmica) para el área de estudio.	24
Figura 14. Mapa normalizado de la distribución del Ivi DRASTIC intrínseca y los puntos de Ct.	25
Figura 15. Relación entre el índice de vulnerabilidad DRASTIC intrínseca y Ct (con transformación logarítmica) para el área de estudio.	25
Figura 16. Distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC y las concentraciones de Nt para el área de estudio con los pesos modificados de los parámetros finales.	34
Figura 17. Relación entre los índices de vulnerabilidad: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), vulnerabilidad intrínseca DRASTIC (inicial) y la concentración Nt (transformado logarítmicamente) para el área de estudio.	34
Figura 18. Distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC y las concentraciones de Ct para el área de estudio con los pesos modificados de los parámetros finales.	37

Figura 19. Relación entre los índices de vulnerabilidad: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), vulnerabilidad intrínseca DRASTIC (inicial) y Ct (transformado logarítmicamente) para el área de estudio.	37
Figura 20. Mapa de riesgo normalizado resultante de la superposición de mapas de las calibraciones de Nt y Ct (2006).	38
Figura 21. Mapa normalizado de la distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de Nt del año 2006) y los puntos de Nt (2010).	40
Figura 22. Relación del índice de vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de Nt del año 2006) y los puntos de Nt transformados logarítmicamente (2010).	40
Figura 23. Mapa normalizado de la distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de Ct del 2006) y los puntos de Ct (2010).	41
Figura 24. Relación del índice de vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de Ct del año 2006) y los puntos de Ct transformados logarítmicamente (2010).	41
Figura 25. Gráfico de probabilidad acumulativa para Nt, Ct y Vulnerabilidad conjunta.	43

Lista de Tablas

Tabla 1. Rango y escala de calificaciones originales y modificadas para el parámetro “conductividad hidráulica”.....	9
Tabla 2. Rango y escala de calificaciones originales y modificadas para el parámetro “vías principales de transporte”.....	9
Tabla 3. Peso original (w) de ponderación de cada variable.....	19
Tabla 4. Resumen de calificaciones de los parámetros DRASTIC utilizados en el estudio.....	20
Tabla 5. Calificaciones originales y modificadas de los parámetros DRASTIC según la media de N_t	27
Tabla 6. Calificaciones originales y modificadas de los parámetros DRASTIC según la media de $\ln(Ct)$	28
Tabla 7. Calificaciones originales y modificadas con la media de N_t para el parámetro “uso de la tierra”.....	29
Tabla 8. Calificaciones originales y modificadas con la media de Ct para el parámetro “uso de la tierra”.....	30
Tabla 9. Calificaciones iniciales y modificadas con la media de N_t para el parámetro “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea”.....	30
Tabla 10. Calificaciones iniciales y modificadas con la media de Ct para el parámetro “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea”.....	30
Tabla 11. Calificaciones originales y modificadas con la media de N_t para el parámetro “vías principales”.....	31
Tabla 12. Calificaciones originales y modificadas con la media de Ct para el parámetro “vías principales”.....	31
Tabla 13. Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos L , P y VP , y el coeficiente de correlación entre los parámetros y la concentración de N_t . * $p < 0,1$ donde p es el nivel de significancia estadística.....	32
Tabla 14. Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos L y P , y el coeficiente de correlación entre los parámetros y el $\ln(Ct)$. * $p < 0,1$ donde p es el nivel de significancia estadística.....	35
Tabla 15. Ciudades con índices máximos y mínimos encontrados.....	39
Tabla 16. Cálculo de la vulnerabilidad por área y porcentaje del área que abarca cierto índice.....	42
Tabla 17. Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos los parámetros L , P y (VP) para las calibraciones con N_t y Ct	44

1. 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 habitantes² [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 [4], el acuífero corre el riesgo de contaminación constante por los vertidos sobre la capa freática de los diferentes sectores económicos. 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. Las zonas de Limpio, San Antonio, Ñemby, Ypané, Luque, San Lorenzo, Capiatá, Fernando de la Mora, Mariano Roque Alonso, entre otros municipios, dependen de agua suministrada por Juntas de Saneamiento o por aguaterías privadas o comunales. Estos entes secundarios son responsables del abastecimiento de agua del 72,4% de las viviendas del departamento central [5], y extraen caudales de agua en su mayor parte del subsuelo, que luego son distribuidos, con muy poco tratamiento sanitario, a las residencias del área. Otra cifra alarmante – y que indica la importancia del acuífero – es la del desagüe sanitario, que indica que el 93,1% de las viviendas en el área del acuífero dependen de cámaras sépticas o pozos ciegos [6] para desechar los residuos cloacales. Todos estos puntos pueden ser considerados posibles puntos de contaminación.

El agua subterránea del acuífero Patiño se utiliza en gran escala para el consumo humano, por ello, realizar un estudio de vulnerabilidad a la contaminación en la zona se constituye en una herramienta indispensable para la toma de decisiones referentes a la protección de este recurso natural.

Por definición, según Foster [7], la vulnerabilidad es una propiedad intrínseca del sistema hidrogeológico y se refiere a las características intrínsecas del acuífero y de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a una carga contaminante aplicada en la superficie. Vrba [8] hace distinción entre dos tipos de vulnerabilidad: la “intrínseca o natural” refleja propiedades que son funciones de las condiciones naturales y no considera atributos ni comportamientos de contaminantes particulares; y la “específica”, que valora la vulnerabilidad en relación a un grupo de propiedades similares. La segunda definición es la que se asemeja a la vulnerabilidad presentada en este estudio, donde se usan parámetros naturales y de origen antropogénico para derivar una vulnerabilidad del acuífero.

² Datos de Asunción, Central y Paraguari.

Para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas existen métodos de índice y superposición y métodos que emplean modelos de proceso-basados en la simulación y modelos estadísticos [9]. Uno de los métodos 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) [3]. Este modelo ha sido utilizado en Estados Unidos [10-12], y también fue adoptado en Europa [13-16], Asia [17-19] y Australia [20], y en países de la región como Brasil [21], Argentina [22], Uruguay [23], Colombia [24], México [25], entre otros.

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 posibilidad de que un acuífero se contamine dadas sus características intrínsecas/naturales, y no puede correlacionarse a predicciones acerca de su contaminación actual – este último aspecto se determina por otro tipo de evaluaciones. Para considerar la vulnerabilidad específica de un área determinada de estudio, es necesario contar con mediciones de carga de contaminantes en pozos de la región durante un período determinado [18].

Los trabajos realizados sobre la evaluación de la vulnerabilidad aplicando el modelo DRASTIC han estudiado en su mayoría el índice de vulnerabilidad propuesto por Aller et al. [3]. Éste aplica una ecuación lineal que involucra a siete parámetros hidrogeológicos: profundidad del agua subterránea, recarga, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, impacto de la zona vadosa y la conductividad hidráulica. Otros estudios, sin embargo han propuesto varias modificaciones para evaluar la vulnerabilidad específica, introduciendo la carga de contaminantes y adicionando nuevos parámetros a la ecuación propuesta por Aller et al. [3].

Dixon, en el año 2005 [10], incorporó la aplicación del “uso de pesticidas” y la “estructura del suelo”, desarrollando tres modelos diferentes: sensibilidad del índice DRASTIC basado en lógica difusa³; un índice de vulnerabilidad con relación a las aguas subterráneas y lógica difusa; y la sensibilidad del modelo basado en lógica difusa y la información estructural del suelo. Estos modelos se compararon con el índice DRASTIC, donde se obtuvieron mejores resultados cuando se confrontaron con los datos de campo.

Rupert, en el año 1999 [12], mejoró el modelo DRASTIC mediante la calibración del sistema de valoración por puntos medidos de “nitrito más nitrato como nitrógeno” ($NO_2 + NO_3 - N$) y adicionando el parámetro “uso de la tierra”.

Panagopoulos et al., en el año 2005 [16], incorporaron el uso de técnicas estadísticas y geoestadísticas para la revisión de los pesos y las calificaciones de los rangos de todos los parámetros DRASTIC. El criterio utilizado para las calibraciones fue el

³ Se denomina lógica difusa a los mecanismos de inferencia basados en reglas que emplean términos lingüísticos representados por conjuntos difusos. Dado un conjunto de reglas que relacionan una serie de variables y dado un conjunto de valores iniciales (en general expresados como conjuntos difusos) de algunas de estas variables, el objetivo de estos mecanismos de inferencia es deducir el valor (expresado en forma de un conjunto difuso) del resto de variables.

coeficiente de correlación de cada parámetro con las concentraciones de “nitratos”, donde además de suprimir algunos parámetros de la ecuación DRASTIC, se agregó un parámetro adicional el “uso de la tierra”. Las modificaciones propuestas mejoraron considerablemente el coeficiente de correlación entre el riesgo a la contaminación del agua subterránea y las concentraciones de “nitratos”, incrementando en un 33% su valor en relación al método original.

Otras modificaciones de DRASTIC fueron realizadas en la región; específicamente en Brasil en el año 2006, Nobre et al. [21] adoptaron la metodología de lógica difusa para evaluar el índice potencial de la fuente contaminante (fuentes difusas y puntuales). Realizaron una modelación numérica para la delimitación de zonas de captura, utilizando Modflow⁴ y Modpath⁵, para evaluar los riesgos de contaminación de aguas subterráneas e identificar las áreas que deben ser priorizadas para el monitoreo y la restricción en el uso de aguas subterráneas. Adicionaron los parámetros como “recarga artificial”, “uso de la tierra” y “cobertura vegetal”, y correlacionaron el índice obtenido con la concentración de “nitratos” y “cloruros”, que tuvo una correlación positiva con el índice de vulnerabilidad específica.

Reynoso et al., en el año 2005 [22], presentaron un trabajo donde estudiaron la vulnerabilidad del norte de la Provincia de Buenos Aires. El objetivo fue evaluar la vulnerabilidad general a la contaminación utilizando el método DRASTIC con la información disponible, y se analizó la contribución relativa de cada uno de los parámetros que constituyen el índice sin realizar otras modificaciones a la metodología.

Xavier et al., en el año 2004 [23], presentaron un estudio de la ciudad de Paysandú, donde evaluaron la vulnerabilidad de un acuífero poroso comparando los métodos GOD [7] y DRASTIC [3], sin realizar modificación, para visualizar las regiones más sensibles. Concluyeron que resulta más eficaz la utilización del sistema DRASTIC en estudios con mayor detalle y con disponibilidad de información precisa.

Vergara et al., en el año 2009 [24], elaboraron la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Morroa en Colombia. La evaluación de la vulnerabilidad intrínseca sumada a la vulnerabilidad específica – mediante “plaguicidas” – arrojó como resultado una correlación superior a la vulnerabilidad intrínseca.

En Paraguay, estudios anteriores han mencionado el peligro a la contaminación del agua subterránea del acuífero Patiño. Específicamente en el 2007, el proyecto “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - acuífero Patiño” [26] indicó que las actividades humanas favorecen la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. El estudio identificó diferentes tipos de contaminaciones: por actividades domésticas, agrícolas, ganaderas, industriales, por pozos mal construidos y/o abandonados, por sistemas de vertido de aguas residuales, por pozos de inyección, por vertido de basuras, entre otros.

⁴ Modflow es un modelador de flujo por diferencias finitas, el cual consiste de un código fuente que resuelve mediante interacciones la ecuación de flujo del agua subterránea. Se usa en hidrogeología para simular el flujo subterráneo de cualquier acuífero.

⁵ Modpath es un post procesador que simula tridimensionalmente la trayectoria de partículas de un modelo estacionario o transiente de MODFLOW.

Pero hasta el momento no se ha hecho un análisis detallado y exhaustivo sobre los riesgos de contaminación del agua subterránea en Paraguay, sólo estudios anteriores que fueron hechos a pequeña escala o con un análisis muy básico de la vulnerabilidad a la contaminación. Entre ellos cabe mencionar el proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” (FEHS) [27], realizado en el año 2001, donde se estudió el acuífero Patiño a través de una Zona Piloto ubicada al sudeste de Asunción, que abarcó una extensión aproximada de 45 km² (entre la cuenca de los arroyos Mbocayaty y Ñemby) donde se determinó la vulnerabilidad en dicha área usando los métodos GOD [7] y DRASTIC [3]. Por otra parte, el trabajo de grado denominado “Estudio de la Contaminación del acuífero Patiño” [28], realizado en el año 2006, presentó un panorama de la situación del acuífero mediante la determinación cuantitativa de las áreas con presencia de agua salada, concentración de nitratos, nitritos y coliformes. Por último, el “Estudio de la Vulnerabilidad Ambiental de los Acuíferos en las Áreas Urbanas de San Juan Bautista e Itauguá” [29], realizado en el año 2011, presentó trabajos de campo consistentes en el análisis de geofísica de superficie, relevamiento de informaciones de pozos someros y profundos, y la toma de análisis de muestras de agua (contenido de nitratos, nitritos, coliformes totales y coliformes fecales) para determinar la vulnerabilidad en el área de Itauguá. Los estudios mencionados fueron realizados en áreas puntuales, sin abarcar la totalidad del acuífero Patiño, por lo que aún no se cuenta con un estudio de vulnerabilidad que lo cubra en toda su extensión. En este contexto, los resultados obtenidos en el presente estudio se convierten en un buen punto de partida para la realización de trabajos de investigación, encaminados a la protección de esta prioritaria fuente de agua.

En este proyecto se realizó la evaluación de la vulnerabilidad y el 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. Primeramente, se calculó el índice de vulnerabilidad intrínseca DRASTIC con los parámetros hidrogeológicos correspondientes al área de estudio, obteniendo como resultado un mapa de vulnerabilidad intrínseca inicial.

Luego para la calibración de la vulnerabilidad intrínseca se incluyeron las cargas contaminantes de las concentraciones de “nitrógeno total” aplicando la propuesta de Panagopoulos et. al [16] y de “coliformes totales”. La calibración con diferentes contaminantes se utilizó para demostrar que existe un mapa de riesgo por tipo de contaminantes – uno para la carga de nitratos y otra para la carga de coliformes. Las mediciones de los contaminantes utilizadas para la calibración del modelo provienen de la tesis de grado denominada, “Estudio de la Contaminación del acuífero Patiño” [28] en el año 2006.

El aporte del presente estudio fue la incorporación de más datos antropogénicos para el cálculo de vulnerabilidad intrínseca de los que se usaron para en el modelo DRASTIC propuesto por Panagopoulos et. al [16]. Las modificaciones realizadas al método DRASTIC incluyen: a) La eliminación del parámetro “impacto de la zona vadosa” de la ecuación inicial, debido a que el Patiño es un acuífero libre, de poca profundidad con relación a la superficie del suelo, y de muy poca heterogeneidad

geológica [4]. b) La reclasificación de las calificaciones asignadas a la “conductividad hidráulica” utilizando un nuevo rango de calificaciones para agregar heterogeneidad a la clasificación de la “conductividad hidráulica”. c) La adición de los valores de “recarga artificial” a los valores de “recarga natural” basado en lo propuesto por Nobre et al. [21]. d) Modificación de la propuesta de calibración de Panagopoulos et. al [16] a través de la inclusión de dos parámetros de contaminación nitratos y coliformes. e) La inclusión de tres parámetros antropogénicos como el “uso de la tierra”, “densidad de viviendas con pozos ciegos” y las “vías principales de transporte”.

En este estudio se presentan los mapas de vulnerabilidad como mapas normalizados con valores del índice en una escala del 0 al 100, donde las zonas más vulnerables de contaminación son aquellas con los valores más altos (cercanos a 100). Esto es diferente a la escala usual del DRASTIC que va de 23 a 226.

Para la validación del método propuesto se compararon los mapas calibrados de vulnerabilidad con concentraciones de “nitrógeno total” y “coliformes totales” del año 2010. Específicamente, se utilizaron los valores de los últimos años correspondientes a los mismos contaminantes, realizados por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) en el monitoreo de piezómetros realizados en el año 2010, con el fin de comprobar que el método propuesto arroje una buena correlación con datos posteriores.

Como resultado final, se calcula el mapa de vulnerabilidad general que es una superposición de los mapas individuales de vulnerabilidad calibrados con “nitrógeno total” y “coliformes totales”.

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.

2. El área de estudio - acuífero Patiño

El acuífero Patiño está localizado en la Región Oriental del Paraguay, es un acuífero libre de 1173 km² de extensión [27], 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 msnm⁶, 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) [26], 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

⁶ msnm: metros sobre el nivel del mar

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.

Para el presente estudio se denomina a toda el área geográfica que abarca el acuífero Patiño como el Gran Asunción, debido a la alta urbanización e industrialización de la zona aledaña a la capital del país⁷ que se centra alrededor de la capital. Muchas de las ciudades alejadas de Asunción son consideradas “ciudades dormitorio”. En la Figura 1 se visualizan las ciudades que comprenden el área de estudio.

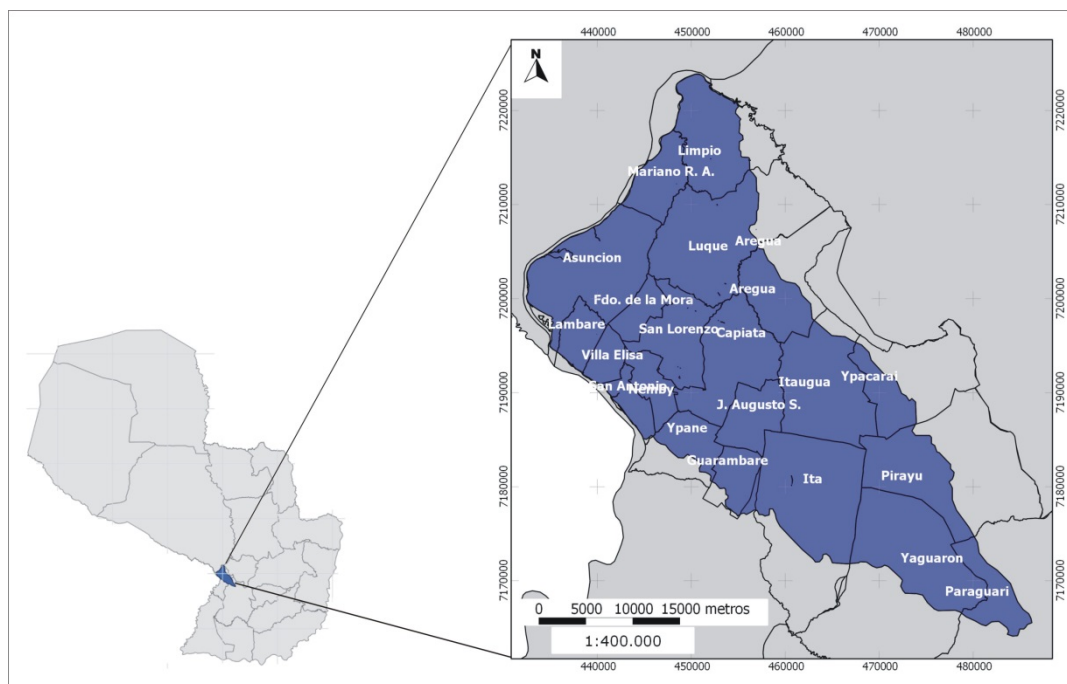


Figura 1. El acuífero Patiño y las ciudades que comprende.

3. Metodología

En este estudio se utilizó el modelo DRASTIC [3] para determinar el riesgo de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea. DRASTIC fue elaborado por la US EPA (United States Environmental Protection Agency) en 1986, para ofrecer un sistema estandarizado para la evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea [21] usando solamente datos hidrogeológicos. DRASTIC es el acrónimo en inglés de un índice 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

⁷ Vale aclarar que en este Informe la definición geográfica es más extensa a lo que comúnmente se denomina el Gran Asunción.

ponderado que se ha determinado, basándose en el juicio de los autores de este método, empleando la siguiente ecuación lineal:

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

donde Iv 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.

El método ha sido ampliamente utilizado para evaluar la contaminación potencial de las aguas subterráneas en diferentes regiones, ya que la protección de la calidad del agua subterránea es un problema importante, presente en gran parte de la población del mundo, en donde se han aplicado tanto el modelo inicial propuesto por Aller et al. [3] y diversas mejoras a la metodología [10, 12, 13, 16, 17, 19-21, 25].

De igual manera, el método DRASTIC ha sido criticado en que algunas ocasiones [10, 12, 13, 16, 17, 19-21, 25] bajo la idea que ciertos parámetros pueden ser suprimidos y otros pueden ser agregados, ya que a veces no se encuentra correlación entre los parámetros de DRASTIC y la contaminación, o porque no existe el detalle espacial de la información necesaria [11, 31], y porque la clasificación de ciertos parámetros se basa en criterios cualitativos y no cuantitativos [32]. Por último, DRASTIC es un modelo que solo considera parámetros estáticos y no incorpora información dinámica como por ejemplo: capacidad de absorción, transformación, tiempo de viaje y dilución [33-35].

A pesar de estas críticas, muchas otras ventajas del método han sido reconocidas: su bajo costo de aplicación y que puede emplearse en regiones extensas debido a que los datos requeridos son relativamente pocos y fáciles de recoger [3]. La selección de varios parámetros y su interrelación también disminuyen la probabilidad de pasar por alto algunos parámetros importantes, restringiendo el efecto de un error incidental en el cálculo [34]. DRASTIC da resultados relativamente precisos para regiones extensas con una estructura geológica compleja, a pesar de la ausencia de mediciones de parámetros específicos que requieren métodos más especializados [35, 36]. Por último, como se ha demostrado en varias ocasiones, DRASTIC es fácil de modificar y adaptar a diferentes escenarios u objetivos [10, 12, 13, 16, 19, 25].

En el presente estudio, fue utilizada la estructura base del modelo DRASTIC [3], pero se incluyeron algunas modificaciones para capturar el efecto antropogénico y reducir el efecto de información homogénea que hiciste sobre el acuífero Patiño. Entre las modificaciones realizadas se incluyen:

- La eliminación del parámetro (I_r) "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 [4] 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 modificada de DRASTIC para calcular el índice de vulnerabilidad inicial:

$$Ivi = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (C_r \cdot C_w) \quad (2)$$

donde I_{vi} es el índice de vulnerabilidad inicial, las letras mayúsculas representan a cada parámetro (D) “profundidad del agua subterránea”, (R) “recarga”, (A) “litología del acuífero”, (S) “tipo de suelo”, (T) “topografía” y (C) “conductividad hidráulica del acuífero”, mientras que los subíndices “ r ” y “ w ” se refieren a su calificación y peso respectivo.

- Reclasificación de las calificaciones asignadas a la “conductividad hidráulica” (ver Tabla 1), utilizando un nuevo rango de calificaciones. La reclasificación fue hecha debido a que los valores de “conductividad hidráulica” en el área de estudio se encuentran entre 0,03 a 3,8 m/d [37], y estos valores están incluidos dentro de un solo rango en el modelo DRASTIC. La reclasificación de la escala fue hecha con la intención de agregar heterogeneidad a la clasificación de la “conductividad hidráulica”.
- Normalización del valor de vulnerabilidad intrínseca para ajustar los valores del índice en una escala del 0 al 100, donde las zonas más vulnerables de contaminación son aquellas con valores cercanos a 100. Utilizando la ecuación:

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

donde DI es el índice DRASTIC calculado usando los valores de clasificación, D_{min} es el menor valor DRASTIC, D_{max} es el mayor valor DRASTIC.

- Calibración del índice de vulnerabilidad inicial DRASTIC para determinar la vulnerabilidad específica, incluyendo las cargas contaminantes de las concentraciones de “nitrógeno total” y de “coliformes totales” aplicando la propuesta de Panagopoulos et. al [16].
- Adición de nuevos parámetros antropogénicos: el “uso de la tierra”, representado por “ L ” por su sigla en inglés de “land use”, que fue aplicado siguiendo la metodología propuesta por Panagopoulos et al. [16]; la “recarga artificial” incluyendo al mapa de “recarga” de precipitaciones propuesto por Nobre et al. [21]; 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 (Nt y Ct).

$$I_{ve} = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (C_r \cdot C_w) \dots \\ + (L_r \cdot L_w) + (P_r \cdot P_w) + (PV_r \cdot PV_w) \quad (4)$$

donde I_{ve} es el índice de vulnerabilidad específica, 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”.

Las modificaciones hechas a la metodología DRASTIC [3] fueron propuestas para mejorar la correlación entre los resultados del modelo y datos de campo que están disponibles. Los contaminantes medidos son “nitrógeno total” y “coliformes totales” [28].

Tabla 1. Rango y escala de calificaciones originales y modificadas para el parámetro “conductividad hidráulica”.

Rango (m/d)	Valoración original	Rango modificado (m/d)	Valoración modificada
0,04074 – 4,074	1	0,04 - 0,45	1
4,074 – 12,222	2	0,45 - 0,9	2
12,222 – 28,518	4	0,9 - 1,35	3
28,518 – 40,74	6	1,35 - 1,8	4
40,74 – 81,48	8	1,8 - 2,25	5
81,48+	10	2,25 - 2,7	6
		2,7 - 3,15	7
		3,15 - 3,6	8
		3,6 - 4,07	9
		4,07 +	10

Tabla 2. Rango y escala de calificaciones originales y modificadas para el parámetro “vías principales de transporte”.

Rango (m) [#]	Valoración inicial
1000+	0
901 - 1000	1
801 - 900	2
701 - 800	3
601 - 700	4
501 - 600	5
401 - 500	6
301 - 400	7
201 - 300	8
101 - 200	9
1 - 100	10

Rango hace alusión a la distancia desde el eje central de una “vía principal”

Los valores utilizados para calcular el índice de vulnerabilidad inicial DRASTIC corresponden a datos existentes sobre la hidrogeología de la región realizada por estudios anteriores [26-28]. A continuación, se describen los diferentes datos utilizados para obtener el índice de vulnerabilidad del acuífero.

La “profundidad del agua subterránea” (D) (Figura 2) se determinó utilizando los valores de niveles estáticos (NE) de 35 piezómetros realizados por el Consorcio CKC-JNS para el proyecto “Estudio de políticas y manejo ambiental de aguas subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción” (acuífero Patiño), correspondientes al año 2007. Específicamente, se interpolaron los valores del 2007 usando el método de Co-Kriging⁸ con otras mediciones de profundidad de la napa freática realizadas en el año 2013 (36 valores de NE). Con esta técnica se obtuvieron nuevos valores partiendo del conocimiento de un conjunto de datos (de los años 2007 y 2013), y se estimaron las profundidades de la napa freática para todo el acuífero, los valores interpolados se encuentran entre 0,8 y 31 metros.

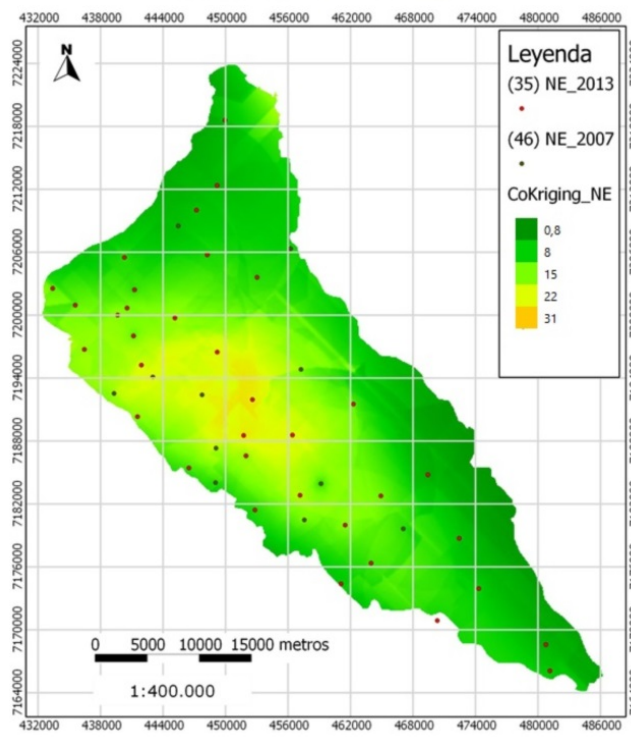


Figura 2. Mapa resultante de la interpolación Cokriging de 46 piezómetros utilizados con los valores de NE (2007 y 2013).

La “recarga” (R) (Figura 3) se realizó combinando la “recarga de precipitaciones” con la “recarga artificial” y el “uso de la tierra”. Los datos de la precipitación fueron descargados de la base de datos del Climate Research Unit (CRU) [38, 39] que contiene una serie de datos globales sobre estaciones de pluviometría que se han ido compilando y actualizando mes a mes, obtenidos a partir de la interpolación entre las estaciones. Los valores utilizados para la precipitación natural fueron de las estaciones de pluviometría de Asunción y otras correspondientes al área del acuífero Patiño, recogidos durante un periodo de 39 años (1970 – 2009). Se calculó el

⁸ La interpolación cokriging es utilizada para obtener estimaciones de la propiedad de interés cuando se dispone de observaciones de otras variables relacionadas con la variable en estudio.

promedio de precipitaciones para el área de estudio, Noroeste: 1344 mm, Noreste: 1383 mm, Sureste: 1439 mm y se estableció una “recarga natural” del 9% sobre las precipitaciones, basado en lo propuesto en el “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana” [40].

Otra fuente de “recarga” en las zonas urbanas son las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua y alcantarillado – denominado “recarga artificial”. Se consideró el mapa de “recarga” mediante la combinación del mapa de “precipitación” con el “mapa uso de la tierra” [21] usando la ecuación simple:

$$R = X\%P + R_A \quad (5)$$

donde R es la “recarga” (mm/año), X es el porcentaje de recarga de la precipitación ($X = 9\%$ en este estudio), P es la precipitación (mm/año), y R_A es la “recarga artificial”. Este último dato se calculó como el excedente de la distribución y la facturación de agua potable en el año 2011 [41] por ESSAP. Este cálculo distribuido por las zonas urbanas del área de estudio dio una recarga $R_A = 66$ mm/año. Los valores de “recarga” final del mapa son presentados en la Figura 3 y se encuentran entre 121 y 197 mm.

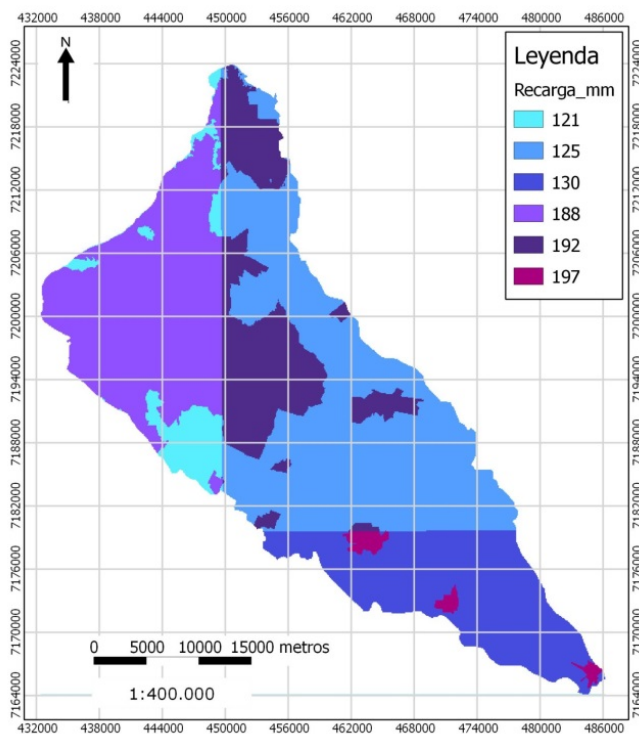


Figura 3. Mapa de “recarga” con valores en mm.

Para la “litología del acuífero” (A) se obtuvieron informaciones de imágenes escaneadas de los perfiles de pozos con que cuenta el SENASA (Figura 4) y de los perfiles de piezómetros construidos por el Consorcio CKC-JNS para el proyecto “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana” (2007) [42]. La metodología DRASTIC [3] clasifica diez tipos de

acuíferos, mientras que los encontrados en los 192 perfiles de pozos correspondientes al acuífero Patiño no coincidían con el nombre exacto de la metodología, razón por la que se optó por comparar y generalizar principalmente en “arenisca” y “arena” (ver Tabla A1 del anexo). Las calificaciones para arenas y areniscas (8 y 9 respectivamente) fueron asignadas según las calificaciones máximas especificadas por el método DRASTIC [3]. El mapa de la “litología del acuífero” se observa en la Figura 5, totalizando 192 perfiles de pozos/piezómetros georreferenciados, cada uno con sus respectivas características.

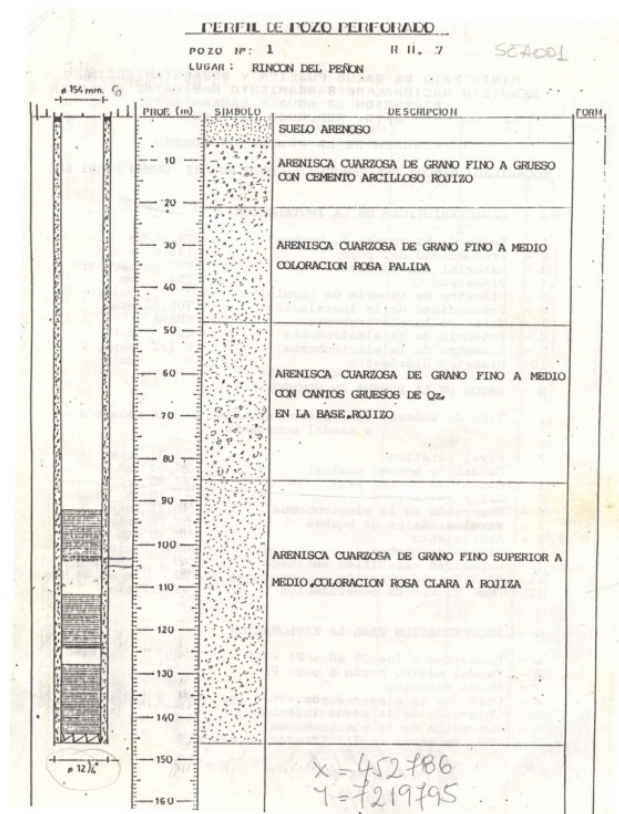


Figura 4. Imagen escaneada del perfil de uno de los pozos de SENASA.

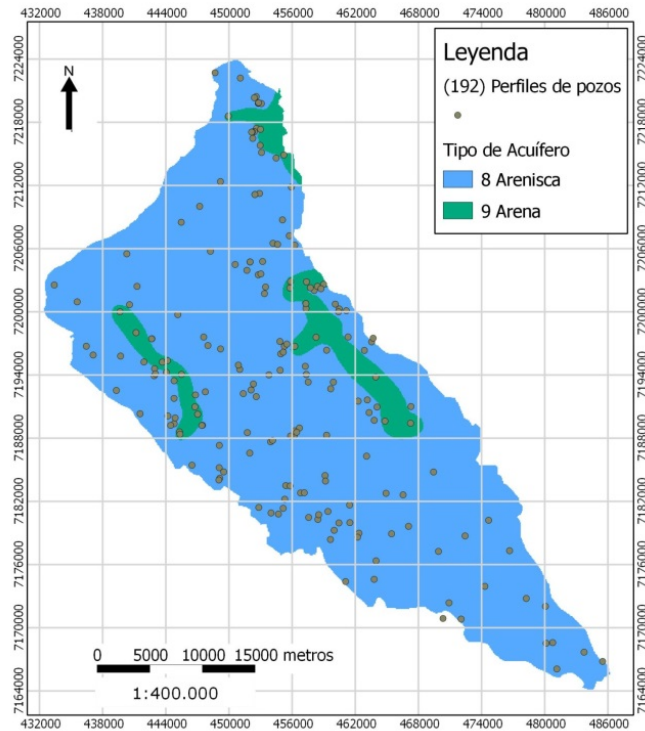


Figura 5. Mapa de “litología del acuífero” y 192 pozos/ piezómetros georreferenciados.

El “tipo de suelo” (*S*) se calculó tomando como referencia el “Mapa de reconocimiento de suelos de la Región Oriental del Paraguay”, elaborado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Banco Mundial, en el año 1995 [43]. En la Figura 6 se observa el mapa de “tipo de suelo”, donde la litología predominante es la francosa fina y en menores zonas se encuentran la arcillosa fina y arena.

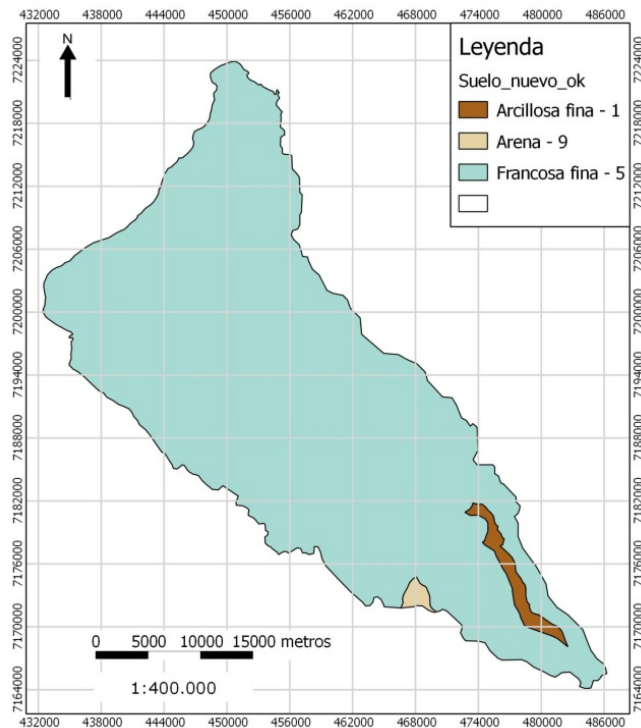


Figura 6. Mapa de “tipo de suelo” en el área del acuífero Patiño.

La “topografía o pendiente del terreno” (T) (Figura 7) se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM), descargado en formato ráster⁹ para el área de estudio de la página web del Centro de Investigación Internacional (CGIAR-CSI) [44]. El CGIAR-CSI permite descargar un Modelo Digital de Elevación SRTM con resolución espacial de 90 metros aproximadamente, en formato GeoTiff y sistema de coordenadas geográficas WGS84. A partir del DEM se calculó el valor de la pendiente con la herramienta “análisis del terreno” del software QGIS. La Figura 7 muestra la inclinación del terreno, calculando la elevación dividido por el avance, multiplicado por 100%. Se observa una “topografía suave” en general, salvo en la zona de la cordillera de los Altos, y en los cauces de los arroyos y humedales que tienen una depresión del terreno.

⁹ El formato ráster es un tipo de capa de información espacial que divide el espacio en un conjunto regular de celdas, cada una de estas celdas contiene un número que puede ser el identificador de un objeto (si se trata de una capa que contiene objetos) o del valor de una variable (si la capa contiene esta variable).

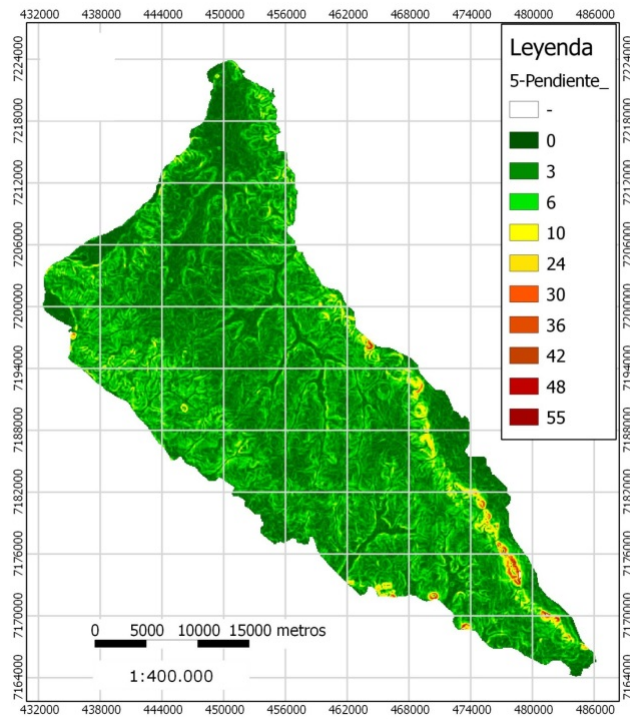


Figura 7. Mapa de “topografía” del terreno con valores en porcentaje.

Los datos de “conductividad hidráulica” (C) fueron obtenidos del proyecto “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana” (2007) [37], donde se recopiló información de ensayos de bombeos con que contaba el SENASA, en una tabla con 51 resultados de los análisis y valores correspondientes a la “conductividad hidráulica”. Además, del mismo informe se obtuvieron otros 10 resultados de pruebas realizadas en el 2007 por el mismo proyecto. Totalizando 61 valores de “conductividad hidráulica” georreferenciados. Se aplicó el método de interpolación “cokriging” para realizar el mapa (Figura 8), obteniendo valores entre 0,1 y 3,2 m/d, donde los más altos se encuentran entre las zonas de Areguá e Itauguá.

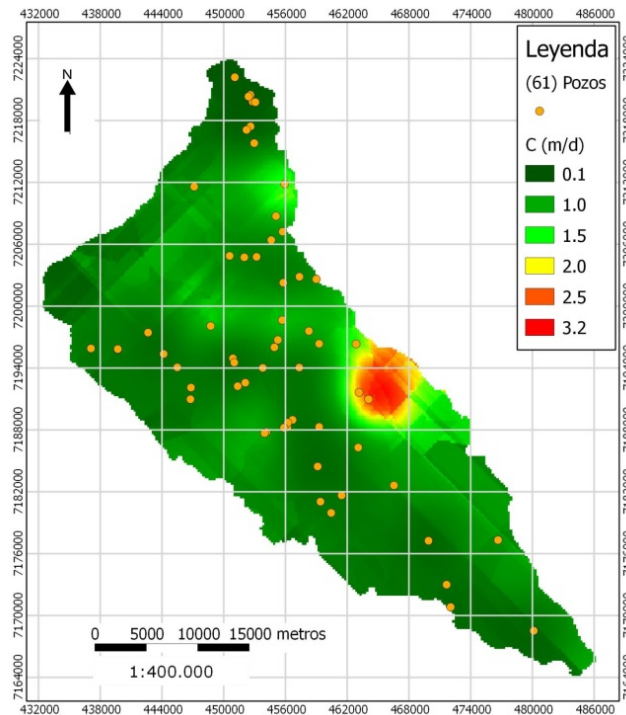


Figura 8. Mapa de “conductividad hidráulica” (m/d) y la unión de pozos con pruebas de bombes realizadas por SENASA y el Consorcio CKC-JNS (2007).

Los datos de “uso de la tierra” (*L*) fueron obtenidos del mapa de cobertura de la tierra Paraguay, elaborado por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA) y la Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI) en el año 2013 [45]. El mapa de “uso de la tierra” (Figura 9) muestra las áreas urbanas, los bosques, cuerpos de agua, área de reforestación, sabana inundable y la tierra cultivada en el área que abarca el acuífero Patiño.

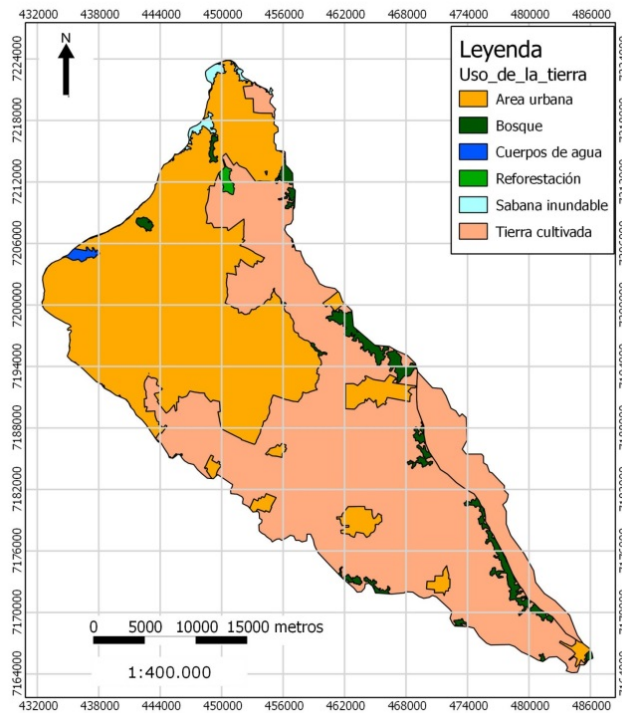


Figura 9. Mapa de uso de la tierra correspondiente al área del acuífero Patiño. Extraído del Mapa de Cobertura de la Tierra Paraguay (2011).

Los datos de “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea” (P) se obtuvieron de los mapas temáticos incluidos en la base de datos del proyecto “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana” [46]. La densidad de pozos (Figura 10) hace referencia a la cantidad de residencias que no cuentan con una conexión de alcantarillado de aguas residuales. Estos valores son claores indicadores de posibles puntos de contaminación. Sobre el acuífero Patiño, se encuentran valores de 0 a 15 viviendas por hectáreas con pozo ciego. Las mayores densidades corresponden a: Ypané, Fernando de la Mora, Lambaré, San Lorenzo, Guarambaré, Villa Elisa, Ñemby, Limpio, Yaguarón, Pirayú y Luque.

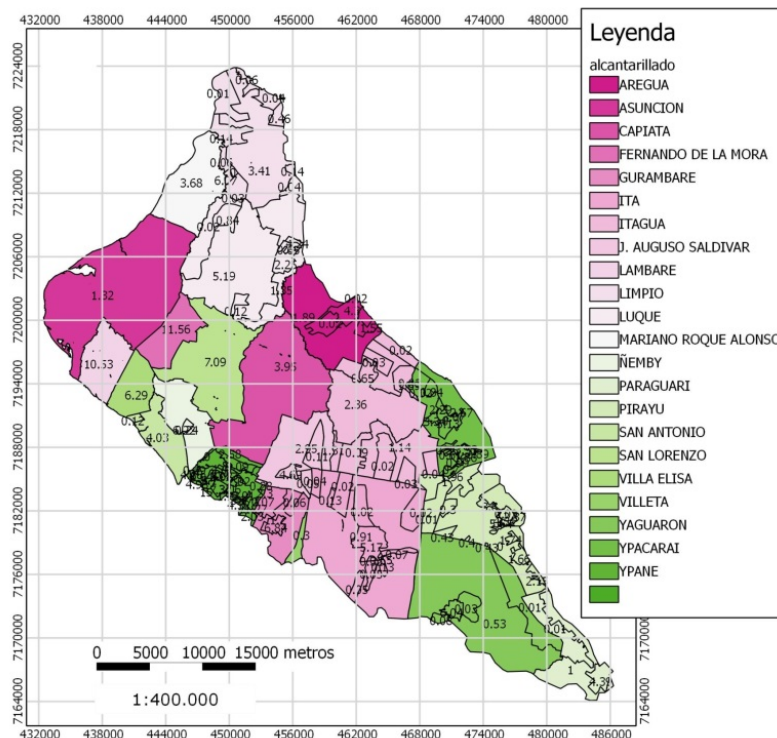


Figura 10. Mapa de la “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea”. Extraído del Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño (2007).

Las “vías principales” (VP) se utilizaron considerando las vías terrestres (rutas pavimentadas principales) que se encuentran en el área del acuífero Patiño. Se obtuvieron de los mapas temáticos incluidos en la base de datos del proyecto “Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana” (2007) [46] (Figura 11). Las vías principales fueron tomadas como un indicador de puntos que puedan ser focos de contaminación (industrias, estaciones de servicio, procesamiento de químicos, vertederos, etc.).

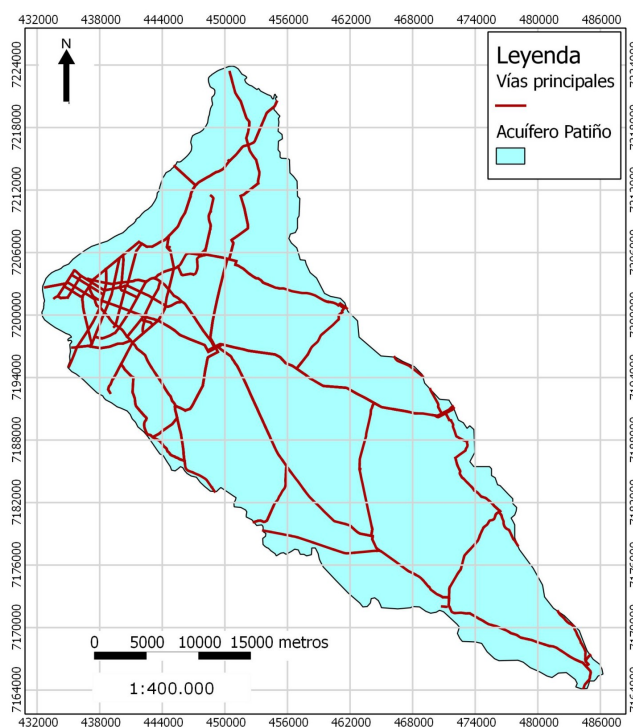


Figura 11. Mapa de “vías principales”. Extraído del Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño (2007).

Para determinar la vulnerabilidad intrínseca inicial del acuífero Patiño fueron utilizados los parámetros “profundidad del agua subterránea”, “recarga”, “litología del acuífero”, “tipo de suelo”, “topografía” y “conductividad hidráulica”, aplicando la ecuación (2). Los pesos (w) ponderados son los consignados en la Tabla 3.

Tabla 3. Peso original (w) de ponderación de cada variable.

Variables	D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	C_w
Peso ponderado	5	4	3	2	1	3

Reemplazando los valores correspondientes, la ecuación (2) se transforma en:

$$Ivi = (5 \cdot D_r) + (4 \cdot R_r) + (3 \cdot A_r) + (2 \cdot S_r) + (1 \cdot T_r) + (3 \cdot C_r) \quad (6)$$

donde Ivi es el índice de vulnerabilidad inicial, las letras mayúsculas representan a cada parámetro (D) “profundidad del agua subterránea”, (R) “recarga”, (A) “litología del acuífero”, (S) “tipo de suelo”, (T) “topografía” y (C) “conductividad hidráulica del acuífero”, el subíndice “ r ” es la calificación.

Las calificaciones ponderadas toman valores de 1 a 10, son utilizadas para reclasificar la variación de las propiedades de cada uno de los parámetros utilizados. En la Tabla 4 se presentan las calificaciones correspondientes para cada uno de los parámetros,

siguiendo la metodología propuesta por Aller et al. [3], con la modificación de la escala de calificaciones para el parámetro “conductividad hidráulica” propuesto en el presente estudio.

Tabla 4. Resumen de calificaciones de los parámetros DRASTIC utilizados en el estudio.

(D) Profundidad del agua subterránea		(R) Recarga		(A) Litología del acuífero	
Rango (m)	Calificación original	Rango (pulgadas)	Calificación original	Tipo de Acuífero	Calificación original
0 – 1,524	10	0 – 2	1	Arenisca	8
1,524 – 4,572	9	2 – 4	3	Arena	9
4,572 – 9,144	7	4 – 7	6		
9,144 – 15,24	5	7 – 10	8		
15,24 – 22,86	3	10+	9		
22,86 – 30,48	2				
30,48+	1				

(S) Tipo de suelo		(T) Topografía		(C) Conductividad hidráulica	
Tipo de Suelo	Calificación original	Rango (porcentaje)	Calificación original	Rango (m/d)	Calificación nueva
Arcilla fina	1	0 – 2	10	0,04 - 0,45	1
Franco fino	5	2 – 6	9	0,45 - 0,9	2
Arena	9	6 – 12	5	0,9 - 1,35	3
		12 – 18	3	1,35 - 1,8	4
		18+	1	1,8 - 2,25	5
				2,25 - 2,7	6
				2,7 - 3,15	7
				3,15 - 3,6	8
				3,6 - 4,07	9
				4,07 +	10

Utilizando los valores mencionados para cada parámetro y una vez obtenido el índice de vulnerabilidad inicial (*Ivi*) DRASTIC, se propuso una metodología para calibrar el modelo. La misma consiste en introducir la carga de contaminantes y evaluar la vulnerabilidad específica con la concentración de a) “nitrógeno total”, en 71 puntos de medición (expresado como *Nt* mg/L) y b) “coliformes totales”, en 37 puntos de

medición (expresado como Ct UFC/100ml¹⁰). Ambos indicadores de contaminación se obtuvieron de la tesis de grado “Estudio de la Contaminación del acuífero Patiño” (año: 2006) [28].

Como referencia se menciona que el “nitrógeno total” (Nt) es la suma del “nitrógeno” encontrado en el “nitrato” ($N-NO_3$) y el “nitrógeno” encontrado en el “nitrito” ($N-NO_2$):

$$Nt = (N - NO_3) + (N - NO_2) \quad (7)$$

Con el objetivo de mejorar la predicción del índice de vulnerabilidad inicial (Ivi) en zonas puntuales con mayor impacto ambiental, y obtener una correlación más elevada entre el Ivi y los contaminantes, se aplicó una metodología de calibración, presentada por Panagopoulos et al. [16], que consta de los siguientes pasos:

- Revisión y modificación necesaria de la escala de calificación de cada parámetro (“ r ” en la ecuación (2)).
- Revisión y modificación necesaria de los pesos de los parámetros (“ w ” en la ecuación (2)).
- Eliminación de parámetros DRASTIC y adición de nuevos parámetros como “uso de la tierra”, “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea” y “vías principales”.

Esta metodología fue aplicada a cada contaminante (Nt y Ct) de manera independiente.

Las modificaciones se realizaron utilizando un coeficiente de correlación para adaptar el DRASTIC inicial a las condiciones del área de estudio, comparando el valor de cada punto de muestreo de los contaminantes Nt y Ct con el valor calculado de Ivi . Dicha correlación se expresó por el coeficiente de correlación de Spearman (ρ o ρ_h), utilizado para evaluar la intensidad de la asociación entre el Ivi y la medición de los contaminantes. El test de Spearman es una prueba no paramétrica utilizada cuando los datos no tienen una distribución semejante a la de la curva normal, condición que se cumple para los datos del área de estudio (ver Figura A1.a y Figura A2.a del anexo). Además, se aplicó una transformación logarítmica en las concentraciones de Nt y Ct para contrastar valores atípicos, fallas de normalidad y mejorar la correlación de los datos (ver Figura A1.b y Figura A2.b del anexo).

La revisión de la escala de calificación se realizó teniendo en cuenta la media de los valores de Nt y Ct en cada parámetro. Se reasignó la mayor calificación (10) al rango con mayor valor de la media del contaminante encontrado y, sucesivamente así, se reasignaron las demás calificaciones (ver Panagopoulos et al. [16] para mayor detalle). Además, se aplicó el test de Wilcoxon a los parámetros con valores cuantitativos (D, R, T y C), con el fin de comparar la media de dos rangos vecinos y determinar si existen diferencias entre ellas. El test de Wilcoxon se utilizó para comparar dos rangos o clases de un mismo parámetro (establecidos en la Tabla 4 de calificaciones) y determinar si existen o no diferencias entre sus medias. Si la significancia estadística, p , es menor que 0,05 indica que las muestras son diferente en un 95 % o mayor al

¹⁰ Unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros.

nivel de confianza por lo que se mantienen los rangos. En el caso contrario se combinaban los rangos y se les asigna una misma calificación.

Posteriormente, se adicionaron a la ecuación (2) los parámetros “uso de la tierra” (L) (ver Figura 9), “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea” (P) (ver Figura 10) y “vías principales” (VP) (ver Figura 11) con el fin de expresar la posible carga de contaminantes debido a estas fuerzas antropogénicas.

Los tipos de “uso de la tierra” producen una gran carga contaminante, como cultivos o zonas urbanas, que son ubicados en zonas de bajo relieve (llanuras costeras, llanuras fluviales, etc.) donde la pendiente de la superficie y la profundidad de las aguas subterráneas son relativamente pequeñas [16]. La calificación para cada categoría de (L) original fue derivada de la literatura [21].

Por su parte, la “densidad de viviendas con pozos ciegos” puede ser considerada como una de las fuentes principales de contaminación del acuífero, ya que solo el 4,8 % de las viviendas del área cuentan con red de alcantarillado [6]. La importancia de este nuevo parámetro radica en que los pozos ciegos causan la contaminación biológica de las aguas subterráneas por el contacto con aguas residuales domésticas sin tratar. Éstas podrían contener materia orgánica, que a su vez podrían filtrarse, desde los pozos ciegos o por perforaciones mal construidas, hasta la napa freática.

La adición del parámetro “vías principales” (VP) también es considerada como otra fuente de contaminación [47], asociado a la escorrentía de las aguas pluviales que es transportada desde las rutas con productos químicos (metales pesados). Además, las “vías principales” influyen en la localización de fuentes contaminantes como viviendas, fábricas, estaciones de servicios, zonas comerciales, etc. situados en las cercanías de las rutas. En este estudio se consideró un área de influencia (buffer) alrededor de las “vías principales” de 1000 metros. La selección de esta área se debió a que se encontró una mayor correlación entre el buffer de 1000 metros con los puntos de Nt . Para determinar el área de influencia se realizaron pruebas con buffers de 500, 750, 1250 y 1500 metros donde se constató que la mayor correlación con los puntos de Nt ocurre con un valor de 1000 m.

Los rangos y calificaciones para (P) y (VP) son una propuesta del presente estudio, establecidos luego de analizar la frecuencia, los valores extremos (de las densidades) y mediante la comprobación del test de Wilcoxon (ver Figura A4 del anexo). El peso ponderado asignado a los parámetros (L), (P) y (VP) fue el más alto posible (5), debido a que se ve reforzado por la alta correlación entre los parámetros y la concentración de Nt y Ct .

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 (Spearman ρ y Kendall τ) de cada parámetro con la concentración de Nt y Ct .

Además de las calibraciones mencionadas, se realizó un mapa de “vulnerabilidad conjunta” y una “validación” de los resultados con valores de Nt y Ct hechos en el 2010, por la Dirección General de Saneamiento Ambiental (DIGESA), sobre el acuífero Patiño. El mapa de vulnerabilidad conjunta es el resultado de la superposición de los

mapas calibrados con concentración de Nt y Ct . El mismo fue realizado para predecir la vulnerabilidad específica y el riesgo de contaminación del acuífero Patiño, identificando zonas puntuales con mayores índices de vulnerabilidad. La validación consistió en comparar:

- El Mapa de Vulnerabilidad de Nt calibrado con valores del año 2006 con los valores de Nt medidos en el año 2010.
- El Mapa de Vulnerabilidad de Ct calibrado con valores del año 2006 con los valores de Ct medidos en el año 2010.

4. Resultados y Discusión

Aplicando la metodología indicada se presentan los resultados del Ivi (Vulnerabilidad Inicial) y de las calibraciones realizadas posteriormente. Se incluyen, además, los gráficos de dispersión correspondiente a cada mapa con el índice de vulnerabilidad específica y los contaminantes, indicando el coeficiente de correlación de cada mapa. Aplicando la ecuación (2) para el cálculo de la vulnerabilidad inicial se presentan los siguientes mapas del área de estudio, visualizando además los puntos con los valores de contaminantes “nitrógeno total” (mg/L) y “coliformes totales” (UFC/100ml) analizados en el año 2006 [28].

En la Figura 12 y la Figura 14 se muestran el índice de vulnerabilidad inicial DRASTIC y los puntos de los pozos de donde se tenían muestras de la concentración de “nitrógeno total” y “coliformes totales” (año: 2006) [28]. En ambas figuras se aprecia claramente que la zona de Itauguá cuenta con los valores más altos de vulnerabilidad, lo cual se explica por las condiciones de hidrogeológicas: baja profundidad de la napa freática, alto nivel de “recarga”, pendientes bajas, influencia de mayores valores de “conductividad hidráulica” y la “litología del acuífero” (arena). Otras zonas con valores altos de vulnerabilidad son Ypacaraí, Paraguari y Mariano Roque Alonso.

En las zonas con menor índice de vulnerabilidad (San Antonio, Ñemby, San Lorenzo, Capiatá, Ypané, J. Augusto Saldívar, Guarambaré e Itá) la profundidad de la napa freática es mayor, de acuerdo a los datos reportados por el Consorcio CKC-JNS (años: 2007 y 2013), y presentan valores bajos de “conductividad hidráulica”.

Al comparar el índice DRASTIC con las mediciones de los contaminantes (Nt y Ct) mediante el coeficiente de correlación, se estudia el valor estadístico “p” que indica la significancia estadística de dicha correlación. Cuanto menor sea el valor “p” (0) más significativo será el resultado de la relación, mientras “p” sea menor a 0,05 ($p < 0,05$) se puede concluir que la relación es estadísticamente relevante. La correlación del índice DRASTIC con Nt (Figura 13) no es estadísticamente significativa debido a que $p=0,547$, y el coeficiente de correlación rho es casi nulo, del orden de 0,073. Esto indica que los índices iniciales de DRASTIC hacen una mala aproximación de la realidad con la aplicación de Nt . La relación del índice DRASTIC con Ct (Figura 15) tiene una significancia estadística de $p=0,03$ y el coeficiente de correlación de rho es del orden de 0,357, lo cual arroja una mejor correlación pero sigue siendo baja.

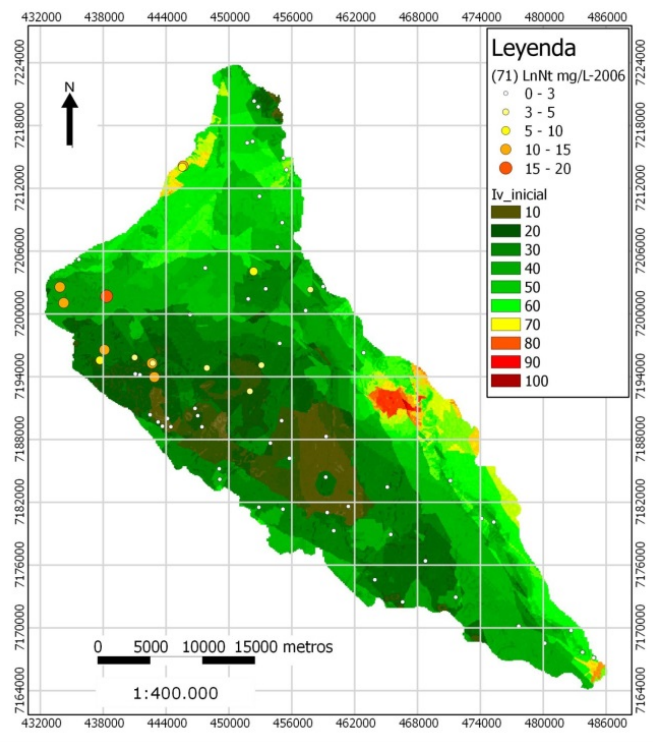


Figura 12. Mapa normalizado de la distribución del *Ivi* DRASTIC intrínseca y los puntos de concentración de *Nt*.

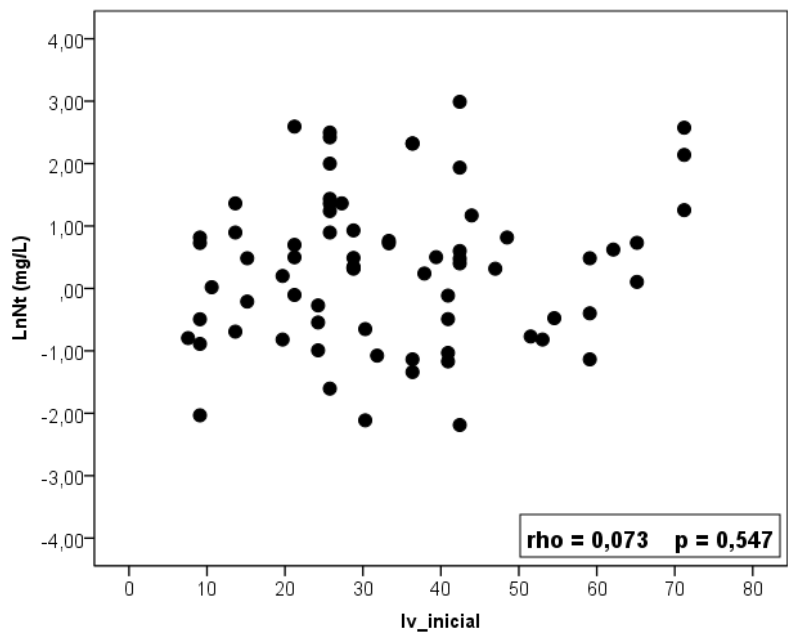


Figura 13. Relación entre el índice de vulnerabilidad DRASTIC intrínseca y la concentración de *Nt* (con transformación logarítmica) para el área de estudio.

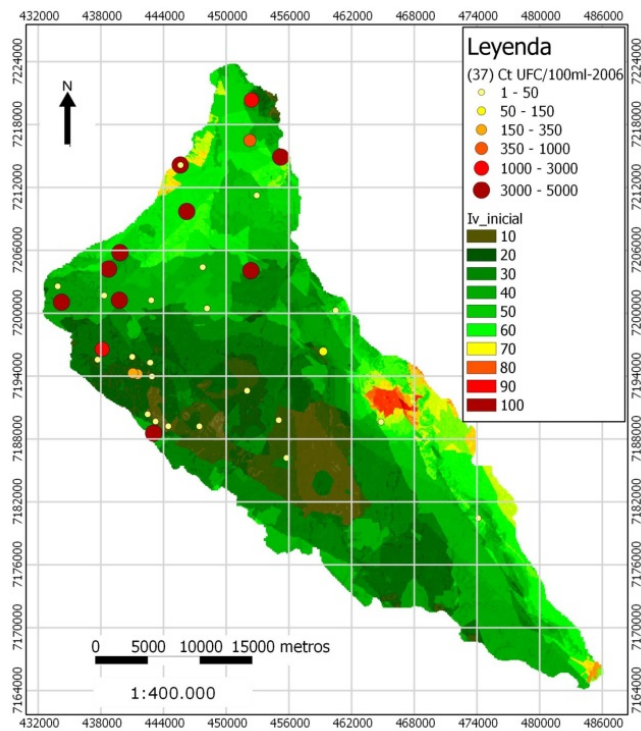


Figura 14. Mapa normalizado de la distribución del *Ivi* DRASTIC intrínseca y los puntos de *Ct*.

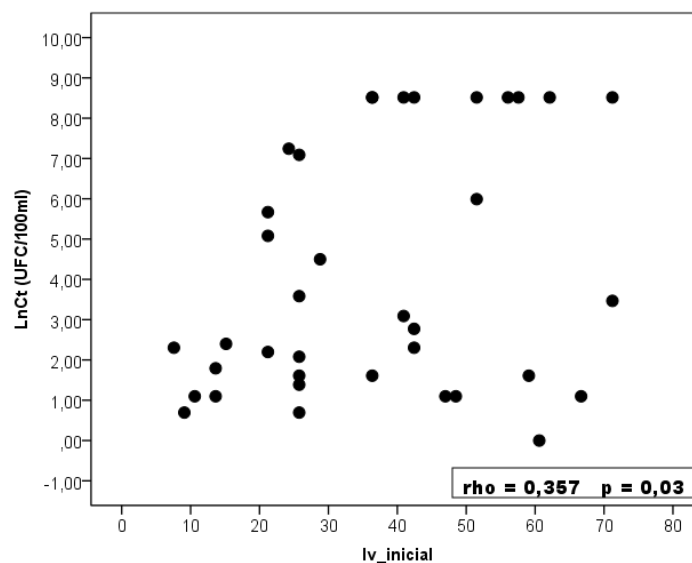


Figura 15. Relación entre el índice de vulnerabilidad DRASTIC intrínseca y *Ct* (con transformación logarítmica) para el área de estudio.

Para mejorar estas correlaciones se hicieron las calibraciones necesarias a partir de los mapas de *Ivi*, utilizando los puntos de *Nt* y *Ct* con cada parámetro. Las tablas de calificaciones originales y modificadas se muestran a continuación para todos los parámetros utilizados en este estudio.

Las “calificaciones modificadas” fueron asignadas de acuerdo a la media del contaminante, el símbolo “-” indica la ausencia del rango en el mapa (del parámetro), por lo que no es necesario asignarle ninguna calificación. En los parámetros (*L*), (*P*) y (*VP*) se asignaron “calificaciones modificadas” con valor 0 (cero) porque para ese rango presente en el mapa no se contaba con puntos de contaminante o porque correspondía a un rango con valor 0, como en el caso del parámetro *P*.

Al análisis de las calificaciones modificadas acompañan los diagramas de caja de todos los parámetros DRASTIC y el test de Wilcoxon, que se ilustran en la Figura A3 y la Figura A6 del anexo para la distribución de *Nt* y *Ct* respectivamente.

Tabla 5. Calificaciones originales y modificadas de los parámetros DRASTIC según la media de *Nt*.

(D) Profundidad del agua subterránea				(R) Recarga			
Rango (m)	Calif. Original	Media Nt (mg/L)	Calif. Modificada	Rango (pulgadas)	Calif. Original	Media Nt (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 Nt (mg/L)	Calif. Modificada	Tipo de Suelo	Calif. Original	Media Nt (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 (porcentaje)	Calif. Original	Media Nt (mg/L)	Calif. Modificada	Rango (m/d)	Calif. Nueva	Media Nt (mg/L)	Calif. Modificada
0 – 2	10	2,558	9	0,04074 - 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				

Tabla 6. Calificaciones originales y modificadas de los parámetros DRASTIC según la media de $\ln(Ct)$.

(D) Profundidad del agua subterránea					(R) Recarga			
Rango (m)	Calif. Original	Calif. test Wilcox	Media LnCt (UFC/100ml)	Calif. Modificada	Rango (pulgadas)	Calif. Original	Media LnCt (UFC/100ml)	Calif. Modificada
0 - 1,524	10	10	-	-	0 - 2	1	-	-
1,524 - 4,572	9	9	5,077	9	2 - 4	3	-	-
4,572 - 9,144	7	9	5,077	9	4 - 7	6	2,314	7
9,144 - 15,24	5	5	5,153	10	7 - 10	8	4,747	10
15,24 - 22,86	3	3	2,642	5	10+	9	-	-
22,86 - 30,48	2	2	1,792	3				
30,48+	1	-	-	-				

(A) Litología del Acuífero				(S) Tipo de Suelo			
Tipo de acuífero	Calif. Original	Media LnCt (UFC/100ml)	Calif. Modificada	Tipo de Suelo	Calif. Original	Media LnCt (UFC/100ml)	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. Original	Calif. test Wilcox	Media LnCt (UFC/100ml)	Calif. Modificada	Rango (%)	Calif. Original	Media LnCt (UFC/100ml)	Calif. Modificada
0,04074 - 0,45	1	1	4,42	10	0 - 2	10	4,036	9
0,45 - 0,9	2	2	4,01	9	2 - 6	9	4,174	10
0,9 - 2,25	3	2	4,01	9	6 - 12	5	2,303	5
2,25 - 3,6	6	6	1,10	6	12 - 18	3	-	-
					18+	1	-	-

En la Tabla 5 y la Tabla 6 se muestran las calificaciones modificadas de los parámetros DRASTIC según las medias de las concentraciones de Nt y Ct respectivamente. Dichas medias no siguen necesariamente el mismo orden

ascendente o descendente con la distribución natural de los parámetros. Las “calificaciones modificadas” máximas (10) se asignaron a la mayor media, sin importar el orden o ubicación dentro de la escala y de esta manera lograr una mayor correlación entre el índice y el contaminante.

En la Tabla 5 se visualizan altas concentraciones de “nitratos” a mayores profundidades, 22,86 – 30,48 metros, y también en bajas profundidades., 1,524 – 4,572 metros. Los valores de concentración de “nitratos” en las arenas y franco fino tienen un rango alto.

En la Tabla 6 altas concentraciones de “coliformes totales” en menores profundidades, 1,524 – 15,24 metros. Los valores de concentración de “coliformes totales” en las areniscas y franco fino tienen un rango alto.

En las Tablas 7 a la 12 se muestran las calificaciones modificadas de los parámetros (*L*), (*P*) y (*VP*) debido a la calibración según las medias de las concentraciones de *Nt* y *Ct*. Las áreas urbanas cuentan con mayor concentración de *Nt* y *Ct*, en baja “densidad de viviendas con pozos ciegos” se encontraron mayor concentración de *Nt*, sin embargo los *Ct* se encontraron en la mayor “densidad de viviendas con pozos ciegos”.

Tabla 7. Calificaciones originales y modificadas con la media de *Nt* para el parámetro “uso de la tierra”.

Uso de la tierra	Calif. Original	Media <i>Nt</i> (mg/L)	Calif. modificada
Área urbana	8	4,65	10
Bosque	1	0,78	2
Cuerpos de agua	3	0,36	1
Reforestación	1	0	0
Sabana inundable	1	0	0
Tierra cultivada	4	1,25	3

Tabla 8. Calificaciones originales y modificadas con la media de *Ct* para el parámetro “uso de la tierra”.

Uso de la tierra	Calif. original	Media InCt (mg/L)	Calif. modificada
Área urbana	8	4,7	10
Bosque	1	1,6	3
Cuerpos de agua	3	0	0
Reforestación	1	0	0
Sabana inundable	1	0	0
Tierra cultivada	4	2,4	9

Tabla 9. Calificaciones iniciales y modificadas con la media de *Nt* para el parámetro “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea”.

Densidad	Calificación inicial	Media Nt (mg/L)	Calificación modificada
0 - 0,001	0	0,671	0
0,001 - 1	4	0,773	1
1 - 2	6	5,82	10
2 - 4	7	2,635	4
4 - 5	8	1,625	2
5 - 7	9	3,131	5
7+	10	4,68	8

Tabla 10. Calificaciones iniciales y modificadas con la media de *Ct* para el parámetro “densidad de viviendas con pozos ciegos por hectárea”.

Densidad	Calificación inicial	Media Ct (UFC/100ml)	Calificación modificada
0	0	1,61	0
0,01 - 1	2	0	2
1 - 2	5	5,24	9
2 - 3	6	2,40	5
3 - 4	7	5,64	10
4 - 5	9	2,45	6
5+	10	3,36	8

Tabla 11. Calificaciones originales y modificadas con la media de Nt para el parámetro “vías principales”.

Rango (m)	Valoración inicial	Media Nt (mg/L)	Valoración 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 12. Calificaciones originales y modificadas con la media de Ct para el parámetro “vías principales”.

Rango (m)	Valoración inicial	Media $\ln Ct$ (UFC/100ml)	Valoración 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

Siguiendo con las calibraciones, se modificó la ecuación inicial (2) DRASTIC para calcular la vulnerabilidad específica, aplicando las calificaciones modificadas, utilizando nuevos valores de los pesos ponderados, eliminando y adicionando parámetros a la ecuación inicial (2); correlacionando siempre con las concentraciones de Nt y Ct .

Para la modificación de los pesos ponderados de los parámetros hidrogeológicos DRASTIC y antropogénicos adicionados (L , P y VP), se calculó la correlación entre los parámetros y las concentraciones de Nt y Ct . Para ello, se utilizaron las calificaciones asignadas y no se consideró el área de distribución natural de los parámetros.

El resultado de la calibración con la concentración de Nt arrojó la ecuación siguiente:

$$Ive = (2 \cdot R_r) + (1 \cdot T_r) + (1 \cdot C_r) + (3 \cdot L_r) + (5 \cdot P_r) + (4 \cdot VP_r) \quad (8)$$

donde *Ive* es el índice de vulnerabilidad específica – haciendo alusión a la inclusión de parámetros antropogénicos. Se eliminaron los parámetros con significancia estadística mayor a 0,1 ($p > 0,1$)¹¹ y se mantuvieron los demás ($p < 0,1$). La Tabla 13 muestra los valores de los coeficientes de correlación y la revisión de los pesos ponderados, donde se hace evidente que los parámetros “profundidad del agua subterránea”, “litología del acuífero” y “tipo de suelo” no son estadísticamente importantes, razón por la que fueron excluidos. El mayor peso ponderado modificado se atribuyó al parámetro “densidad de viviendas con pozos ciegos”, mientras que el “uso de la tierra”, “vías principales”, la “recarga”, “topografía” y “conductividad hidráulica” disminuyeron con respecto a los valores iniciales. Después del parámetro “densidad de pozos ciegos” el mayor aporte al índice de vulnerabilidad es el de “vías principales”, seguido por “uso de la tierra”, “recarga”, y “topografía” y “conductividad hidráulica” como últimos.

Tabla 13. Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos L, P y VP, y el coeficiente de correlación entre los parámetros y la concentración de *Nt*. * $p < 0,1$ donde *p* es el nivel de significancia estadística.

Parámetros DRASTIC	Peso inicial	Coficiente Spearman rho	Coficiente Kendall tau	Peso modificado
Profundidad del agua subterránea	5	0,153	0,112	0
Recarga	4	0,341 *	0,281 *	2
Litología del Acuífero	3	0,125	0,103	0
Tipo de Suelo	2	0,058	0,048	0
Topografía	1	0,205 *	0,159 *	1
Conductividad hidráulica	3	0,206 *	0,164 *	1
Uso de la tierra	5	0,355 *	0,294 *	3
Densidad de pozos ciegos	5	0,41 *	0,306 *	5
Vías principales	5	0,358 *	0,269 *	4

El descubrimiento de una correlación insignificante entre la “concentración de nitrógeno total” y los parámetros: “profundidad del agua subterránea”, “tipo de suelo” y “litología del acuífero”; revela que los valores considerados naturales o intrínsecos del acuífero son los que menos aportan al índice. Esto puede tener dos causales: Una puede ser que la cantidad de datos disponibles, crea una homogeneidad espacial que no permite variabilidad en las variables. Debido a esta homogeneidad los datos que describen estas variables no aportan al índice substancialmente. Esta explicación puede satisfacer en el caso del “tipo de suelo” y “litología del acuífero” pero no el caso de “profundidad del agua subterránea”, donde si hay una cantidad razonable de datos (35 puntos). Otra razón – aunque difícil de justificar con los datos disponibles – es que en realidad la capa superficial del suelo no influye en la concentración de “nitrógeno total” de las aguas subterráneas en el área de estudio. Esta misma conclusión fue

¹¹ En términos estadísticos: si $p > 0,1$, no existe correlación.

reportada por otros investigadores [16, 36, 48] y se atribuye a la ausencia y reducción de reacciones en el suelo de la zona, debido al exceso de oxígeno.

La explicación estadística del porqué la “profundidad del agua subterránea” resulto en tener una correlación insignificante, es porque se encontraron valores altos y bajos de “nitrógeno total” en todo tipo de profundidades. Esto demuestra que, a pesar de la profundidad de los acuíferos, éstos no se encuentran aislados en su totalidad, manifestando que siempre existe alguna manera de transmisión de contaminantes. Esto concuerda con los estudios de vulnerabilidad realizados [49, 50], en los que se plantea la posibilidad de que sustancias nocivas para el agua subterránea lleguen hacia éstas en alguna forma – especialmente si la carga de contaminantes es constante y a largo plazo, como se puede presumir que lo es sobre el acuífero Patiño.

La adición de los nuevos parámetros: “densidad de viviendas con pozos ciegos”, “vías principales” y “uso de la tierra”, presentaron las correlaciones más altas con la concentración de “nitrógeno total”. Estos parámetros determinan la vulnerabilidad específica y están muy ligados a las zonas urbanas, además en estas zonas se encontraron los valores más altos de Nt medidos. La oportunidad de infiltración del agua, y con ella los contaminantes, es alta, debido a la pendiente suave, salvo en la cordillera de los Altos, lo que presentó una correlación significativa con la concentración de “nitrógeno total”. Además, las fluctuaciones de la “conductividad hidráulica”, con los nuevos rangos y clasificaciones utilizados, influyeron en la concentración de “nitrógeno total” en las aguas subterráneas.

El resultado de las calibraciones con la concentración de Nt se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 16, 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.

Tras la adición de los nuevos parámetros, la revisión de los pesos ponderados y la aplicación de la ecuación (8); la correlación entre la vulnerabilidad y los valores de concentración de “nitrógeno total” aumentó aún más, resultando el coeficiente de correlación $\rho = 0,522$ (Figura 17).

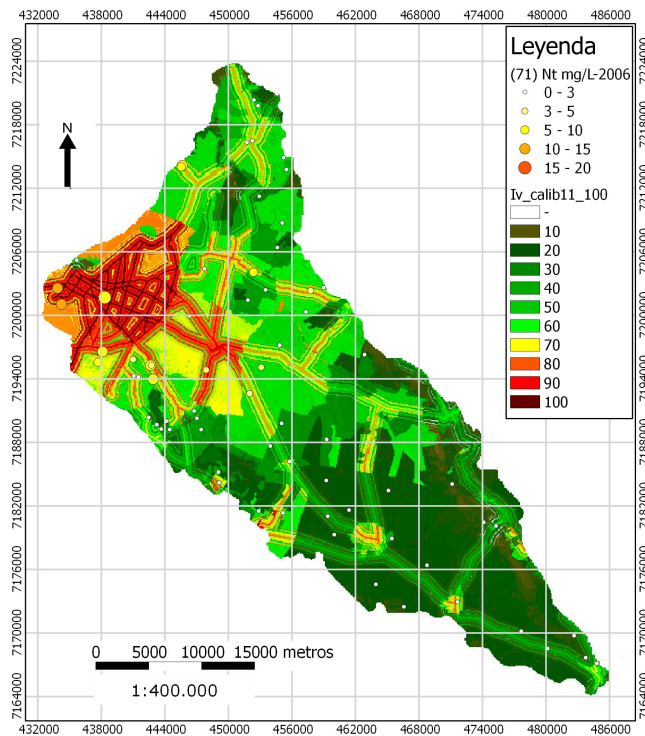


Figura 16. Distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC y las concentraciones de Nt para el área de estudio con los pesos modificados de los parámetros finales.

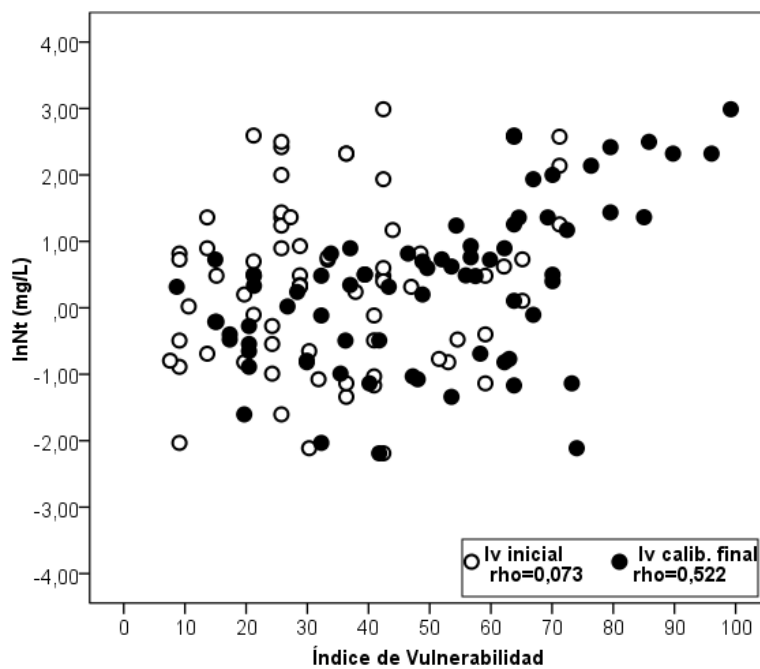


Figura 17. Relación entre los índices de vulnerabilidad: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), vulnerabilidad intrínseca DRASTIC (inicial) y la concentración Nt (transformado logarítmicamente) para el área de estudio.

El resultado de la calibración con la concentración de Ct arroja la siguiente ecuación:

$$Ive = (2 \cdot D_r) + (3 \cdot R_r) + (1 \cdot C_r) + (3 \cdot L_r) + (4 \cdot P_r) + (5 \cdot VP_r) \quad (9)$$

donde Ive es el índice de vulnerabilidad específica. Se mantuvieron los parámetros cuyos coeficientes presentaron una significancia estadística al nivel de $p < 0,1$ (diferente al caso anterior, esto representa un nivel de confianza del 90 % en los coeficientes de correlación). La Tabla 14 muestra los valores de los coeficientes de correlación y la revisión de los pesos ponderados, donde los parámetros "litología del acuífero", "tipo de suelo" y "pendiente" no son estadísticamente importantes y fueron excluidos. El mayor peso ponderado modificado se atribuyó al parámetro "vías principales", mientras que el "uso de la tierra", "densidad de viviendas con pozos ciegos", "recarga", "profundidad del agua subterránea" y "conductividad hidráulica" disminuyeron con respecto a los iniciales.

Tabla 14. Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos L y P , y el coeficiente de correlación entre los parámetros y el $\ln(Ct)$. * $p < 0,1$ donde p es el nivel de significancia estadística.

Parámetros DRASTIC	Peso inicial	Coefficiente Spearman rho	Coefficiente Kendall tau	Peso modificado
Profundidad del agua subterránea	5	0,373 *	0,286 *	2
Recarga	4	0,385 *	0,329 *	3
Litología del Acuífero	3	0,049	0,042	0
Tipo de Suelo	2	0	0	0
Topografía	1	0,021	0,019	0
Conductividad hidráulica	3	0,114 *	0,268 *	1
Uso de la tierra	5	0,386 *	0,321 *	3
Densidad de pozos ciegos	5	0,417 *	0,325 *	4
Vías principales	5	0,605 *	0,479 *	5

El análisis de la correlación entre la concentración de "coliformes totales" y los parámetros "litología del acuífero", "tipo de suelo" y "topografía" hace concluir que la capa superficial del suelo y la "litología del acuífero" no influyen en la concentración de "coliformes totales" de las aguas subterráneas en el área de estudio, tal como en la calibración con Nt .

En este caso, la "profundidad del agua subterránea" sí resultó tener una correlación significativa, ya que en varios puntos se presentaron valores altos de "coliformes totales" a menores profundidades y viceversa. Esto físicamente puede deberse a que la mayoría de los puntos de contaminación son pozos ciegos que están a diferentes distancias de la napa freática.

La adición de los parámetros “vías principales” y “densidad de viviendas con pozos ciegos” presentaron las correlaciones más altas con la concentración de “coliformes totales”. Dichos parámetros están muy relacionados con el contaminante, ya que a mayor densidad de zonas pobladas y pozos ciegos, mayores valores de Ct fueron encontrados.

El “uso de la tierra” también muestra una correlación significativa, resultando los valores más altos de concentración de Ct en las zonas urbanas. Para este caso la “recarga” permite la infiltración tanto de agua como de otras sustancias, siendo las zonas con mayor “recarga” las que presentan índices altos. Estas zonas son las densamente pobladas por que en estas áreas se incluyó el excedente de las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua y alcantarillado (la “recarga artificial”). También las fluctuaciones de la “conductividad hidráulica”, con los nuevos rangos y clasificaciones utilizados, influyeron en la concentración de “coliformes totales” en las aguas subterráneas. La conductividad hidráulica obviamente influye en el tiempo de transporte de contaminantes.

El resultado de las calibraciones con la concentración de Ct se visualiza en el mapa normalizado de la Figura 18, donde el aumento del índice de vulnerabilidad 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.

Tras la adición de los nuevos parámetros, la revisión de los pesos ponderados y la aplicación de la ecuación (9); la correlación entre la vulnerabilidad y el Ct aumentó aún más, resultando el coeficiente de correlación $\rho = 0,7$ (Figura 19).

Al realizar las calibraciones aplicando las ecuaciones modificadas, el coeficiente de correlación entre el índice de vulnerabilidad específica DRASTIC y el contaminante mejoro en un 100% (de 0,35 a 0,7), como se visualiza en la Figura 17 y la Figura 19.

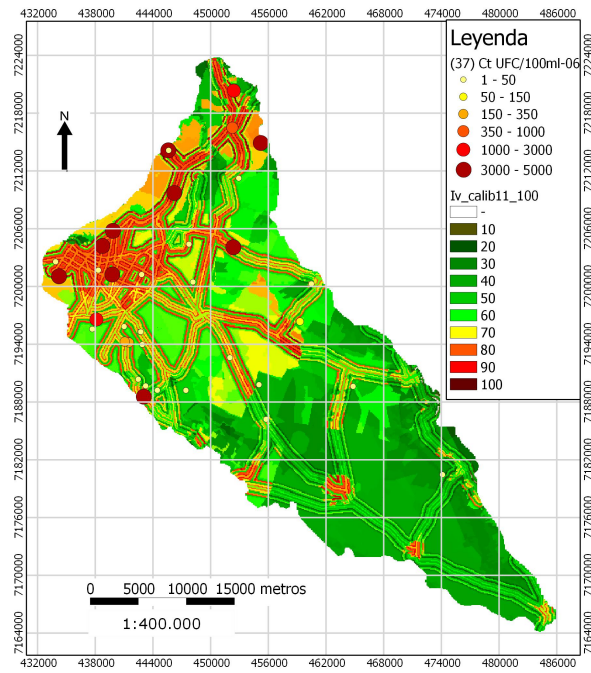


Figura 18. Distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC y las concentraciones de C_t para el área de estudio con los pesos modificados de los parámetros finales.

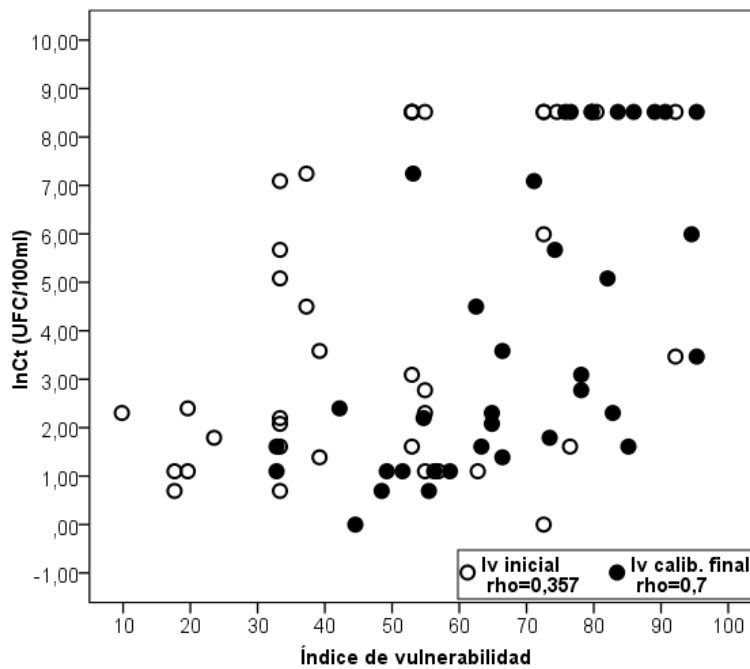


Figura 19. Relación entre los índices de vulnerabilidad: específica DRASTIC (con calibraciones realizadas), vulnerabilidad intrínseca DRASTIC (inicial) y C_t (transformado logarítmicamente) para el área de estudio.

Para entender la vulnerabilidad específica conjunta, aplicable a cualquier tipo de contaminante se decidió hacer la superposición de los dos mapas calibrados. El mapa

de vulnerabilidad conjunta, se presenta normalizado en la Figura 20. 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.

En la Tabla 15 se indican las 5 ciudades con índices máximos y las 5 ciudades con índices mínimos de vulnerabilidad y riesgo a la contaminación encontrados. La ciudad de Asunción es la que presenta los índices más altos, esto se debe a: a) La cantidad de “vías principales de transporte” ubicados en la ciudad influyeron en este resultado (parámetro con mayor correlación con los contaminantes y por lo tanto con el máximo peso ponderado en la ecuación) ya que corresponde a la zona urbana más densamente poblada. b) La napa freática es alta (debido a la cercanía del río Paraguay) y aunque tiene una baja incidencia de pozos ciegos, las mediciones con medidas de contaminantes más altos se encuentran aquí. Indicación de los años de urbanización que se tiene en Asunción.

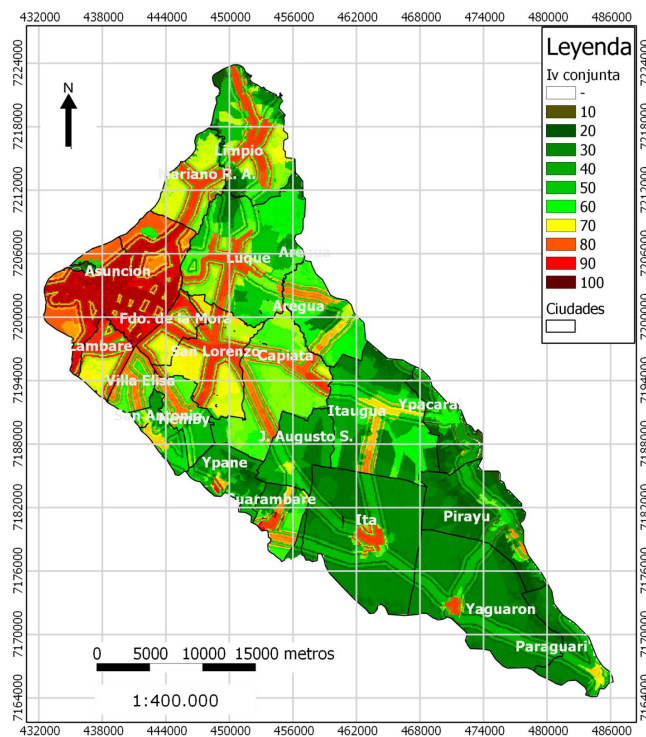


Figura 20. Mapa de riesgo normalizado resultante de la superposición de mapas de las calibraciones de Nt y Ct (2006).

Tabla 15. Ciudades con índices máximos y mínimos encontrados.

#	Índice máx.	Ciudades con índices máximos encontrados
1	100 - 91	Asunción (Recoleta y San Roque, Santísima Trinidad, Catedral, La Encarnación)
2	100 - 93	Guarambaré (solo área urbana)
3	91	San Lorenzo (área central)
4	91	Fernando de la Mora
5	91	Lambaré (zona norte)

#	Índice mín.	Ciudades con índices mínimos encontrados
1	0 - 10	Pirayú
2	10	Ypacaraí
3	13	Paraguarí
4	16	Yaguarón
5	20	J. Augusto Saldívar

La validación de los resultados se realizó 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 DIGESA.

En la Figura 21 se muestran los mapas normalizados de distribución de la vulnerabilidad específica calibrado con la concentración de Nt del año 2006 y los 24 puntos de Nt del año 2010. De igual manera en la Figura 23 se muestra el mapa de vulnerabilidad específica con la calibración de Ct del año 2006 y los 21 puntos de Ct del año 2010. Los dos gráficos presentan una buena correlación que valida la calibración e indica el uso adecuado de la nueva ecuación del DRASTIC.

La correlación entre el mapa de vulnerabilidad y la concentración de Nt del año 2010 tiene una correlación mayor a la que se obtuvo con los datos del 2006. El coeficiente de correlación es de $\rho = 0,634$ (Figura 22), valida la calibración hecha y justifica en cierta forma la adición de ciertos valores. En comparación, la correlación entre el mapa de vulnerabilidad – calibrado con la concentración de Ct del 2006 – y la concentración de Ct del año 2010, tiene $\rho = 0,467$ (Figura 24). Es una relación menor pero aun positiva.

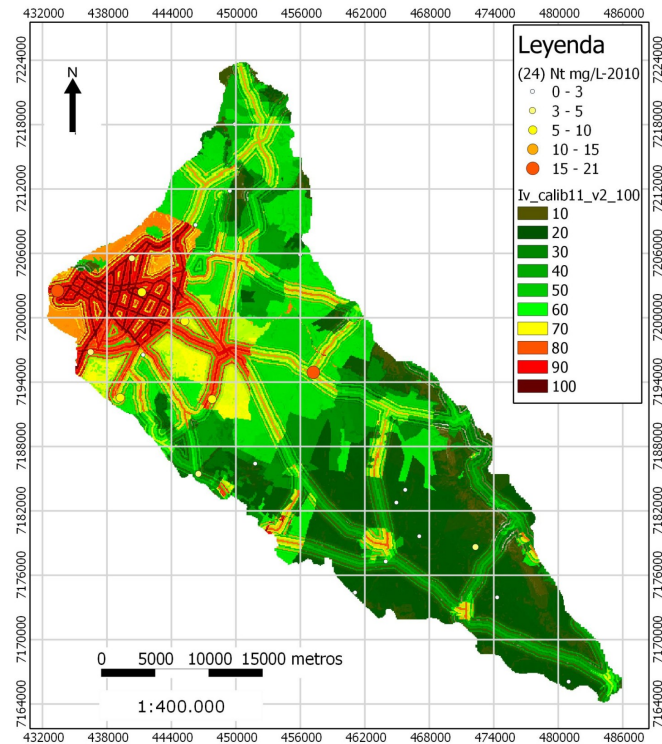


Figura 21. Mapa normalizado de la distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de *Nt* del año 2006) y los puntos de *Nt* (2010).

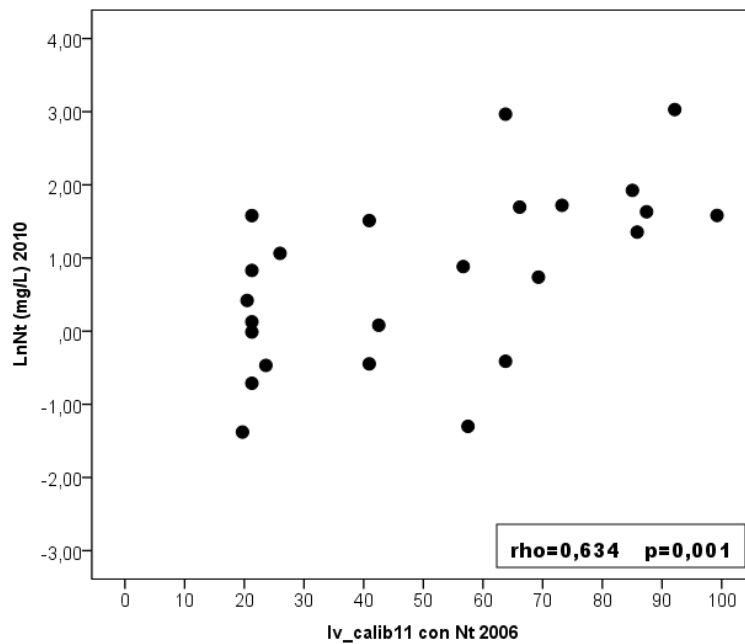


Figura 22. Relación del índice de vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de *Nt* del año 2006) con la concentración de *Nt* del año 2006 y los puntos de *Nt* transformados logarítmicamente (2010).

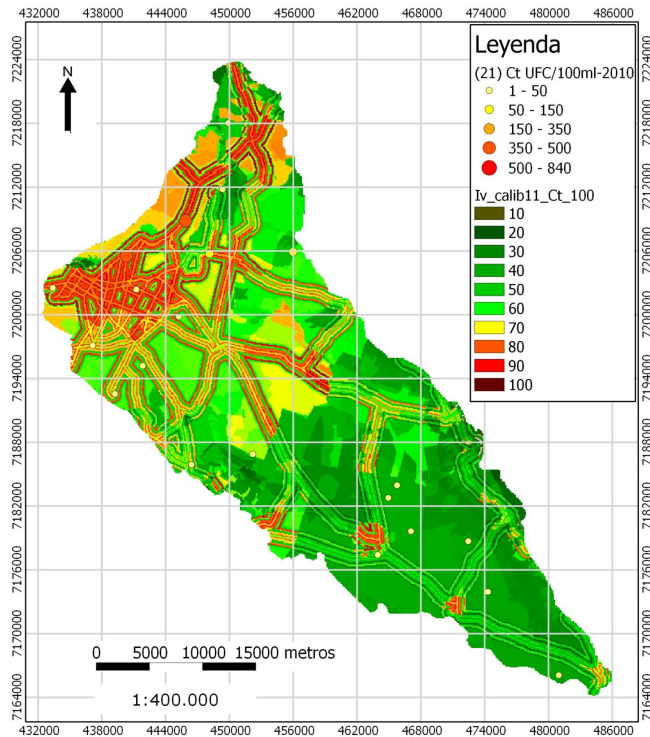


Figura 23. Mapa normalizado de la distribución de la vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de C_t del 2006) y los puntos de C_t (2010)

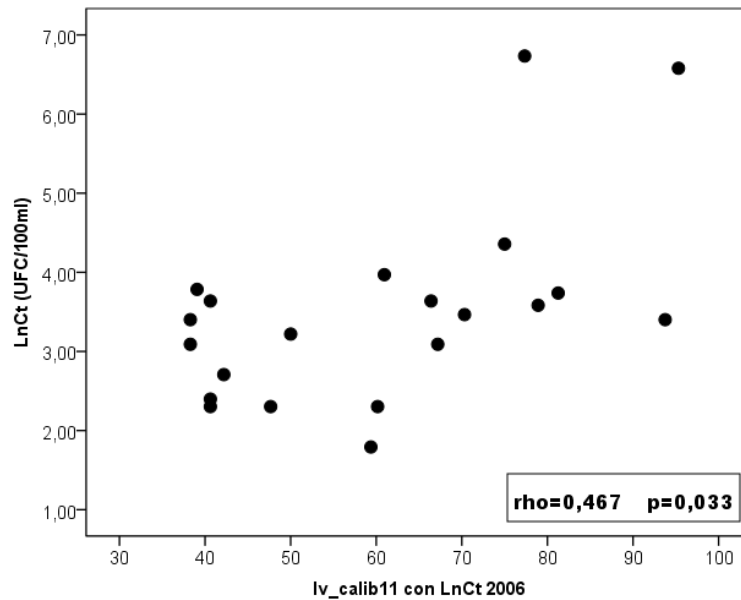


Figura 24. Relación del índice de vulnerabilidad específica DRASTIC (calibrado con la concentración de C_t del año 2006) y los puntos de C_t transformados logarítmicamente (2010).

Para entender en detalles la vulnerabilidad completa del acuífero, se presenta el análisis de las áreas según los índices de vulnerabilidad correspondientes a los mapas de vulnerabilidad conjunta y por contaminantes (*Nt* y *Ct*).

En la Tabla 16 podemos ver poca diferencia de áreas entre los índices de vulnerabilidad de los mapas de *Nt* y *Ct*, los valores de la vulnerabilidad se encuentran distribuidos uniformemente pero no así las áreas específicas (Tabla 16 y las Figuras 16 y 18). Como se pueden ver en las Figuras 16 y 18 las áreas más vulnerables se encuentran alrededor de las ciudades y las vías principales. Los índices de vulnerabilidad general más predominantes en el área de estudio están entre 60-69 y 39-30, con valores del 17%. En el mapa de nitratos las áreas más predominantes son aquellas con valores de 20-29 (baja vulnerabilidad) y 50-59 (vulnerabilidad media). Para los mapas de coliformes se encontró que los números más comunes eran los de vulnerabilidad entre 50-59, con 17% 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 25 donde se presenta la probabilidad acumulativa.

Tabla 16. Cálculo de la vulnerabilidad por área y porcentaje del área que abarca cierto índice.

Índice de vulnerabilidad	Vulnerabilidad conjunta		Nt		Ct	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
100 - 90	71	6	55	5	43	4
89 - 80	115	10	64	5	89	8
79 - 70	110	9	102	9	177	15
69 - 60	200	17	119	10	180	15
59 - 50	127	11	204	17	199	17
49 - 40	130	11	90	8	203	17
39 - 30	200	17	148	13	221	19
29 - 20	186	16	236	20	46	4
19 - 10	27	2	139	12	8	1
9 - 0	2	0	11	1	1	0

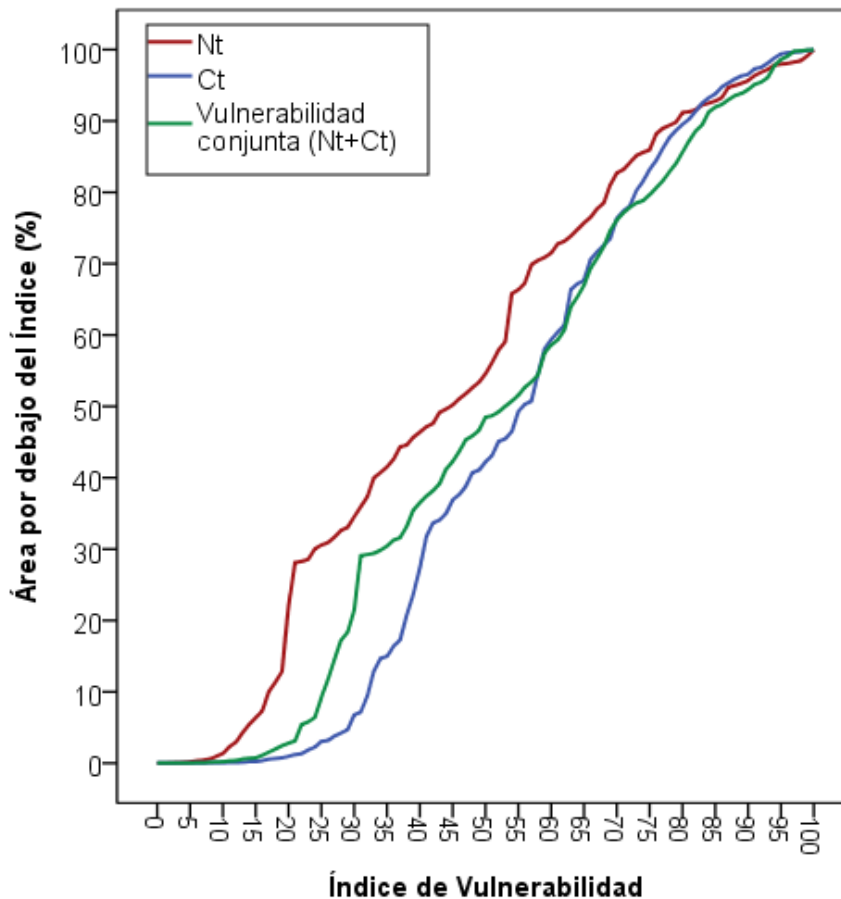


Figura 25. Gráfico de probabilidad acumulativa para *Nt*, *Ct* y Vulnerabilidad conjunta.

5. Conclusiones

Se ha demostrado que el mapa de vulnerabilidad intrínseca inicial DRASTIC – sin calibraciones – tiene una baja correlación con los contaminantes medidos en el área de estudio. La correlación del índice de vulnerabilidad inicial con la concentración de “nitrógeno total” fue de un $\rho=0,073^{12}$, mientras que la correlación entre el índice de vulnerabilidad inicial con la concentración de “coliformes totales” fue de $\rho=0,357$. Esta baja correlación entre los resultados del modelo y los datos de campo, también fue reportada por otros autores [12, 33, 35]. La baja relación indica que en ciertas ocasiones el uso de un modelo como DRASTIC puede llevar a las conclusiones erróneas o identificar zonas que no necesariamente son vulnerables – especialmente cuando los valores hidrogeológicos no son acertados o no cubren en suficiente detalle la zona de estudio.

Dado los escasos datos hidrogeológicos y la baja correlación entre el DRASTIC original y los contaminantes medidos en este estudio, se propuso agregar otras

¹² “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.

informaciones – como “uso de la tierra”, “densidad de pozos ciego” y “vías principales” – y luego calibrarlos usando las mediciones de los contaminantes que se tenían disponible. Al incluir esta información y calibrar los valores de DRASTIC, se logró aumentar la correlación entre el índice de vulnerabilidad específica y los contaminantes de un $\rho=0,073$ a un $\rho=0,522$, en el caso de nitrógeno total; mientras que la correlación entre el índice de vulnerabilidad y los coliformes fecales aumento de un $\rho=0,357$ a un $\rho=0,7$. Para validar esta calibración se compararon los valores calibrados con datos del 2010. El resultado de la validación con los dos tipos de contaminantes fueron de un $\rho=0,6$ para los Nitratos y de 0,4 para los coliformes totales. Esta correlación valida la metodología propuesta e indica que la calibración fue robusta.

Basado en resultados específicos de dos contaminantes (nitratos y coliformes) se creó un mapa de vulnerabilidad conjunta para presentar las zonas con más riesgo. Este mapa (Figura 20) indica que las zonas con mas 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 ya que esta zona es considerada la zona principal de recarga del acuífero [40]. Pero aun así cabe recalcar que esta baja vulnerabilidad 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. Esta baja vulnerabilidad también se debe a la baja urbanización de la zona y seria interesante estudiar la opción de dejar estas áreas de recarga como áreas protegidas en el futuro.

Un aspecto interesante de este estudio fue el analisis de sensibilidad que se realizo mediante la revisión de las calificaciones y pesos ponderados de cada parámetro del modelo DRASTIC. Esta calibracion permitio determinar los parámetros de mayor importancia para el acuífero según la correlación con el contaminante. En la Tabla 17 se comparan los pesos ponderados iniciales y finales de cada parámetro. Las calificaciones finales fueron obtenidas luego de realizar las calibraciones correspondientes con mediciones de contaminantes. Los parámetros eliminados de la ecuación – que no presentaron una significancia estadística con los contaminantes Nt y Ct – se indican con el valor 0 (cero). En la Tabla 17 se ve que los principales parámetros para la determinación de la vulnerabilidad son los antropogénicos, es decir “Uso de la Tierra” (L_w), “Densidad de Pozos Ciegos” (P_w) y “Vías principales” (VP_w).

Tabla 17. Pesos originales y modificados de los parámetros DRASTIC, incluidos los parámetros (L) (P) y (VP) para las calibraciones con Nt y Ct .

	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 Nt (mg/L)	0	2	0	0	1	-	1	3	5	4	
Peso ponderado final calibración con $ln(Ct)$ (UFC/100ml)	2	3	0	0	0	-	1	3	4	5	

Los resultados obtenidos demuestran que hay zonas que presentan un grado moderado o alto de contaminación, independientemente a la profundidad en la que se encuentra el acuífero. El análisis de las áreas con vulnerabilidad nos da el resultado que el 42% del acuífero tiene una mediana a alta vulnerabilidad (60 a 100). Esto no es un porcentaje menor y cuidado se debería tomar al respecto.

Cabe recalcar que es probable que la vulnerabilidad de una zona pueda variar temporalmente, ya que algunos parámetros son dinámicos como la “profundidad del agua subterránea”, la “recarga”, “profundidad de la napa”, “densidad de viviendas” y “vías principales”. Este análisis quedaría para futuro.

Los resultados de este proyecto se pueden convertir en una base para la gestión sustentable, así como una importante herramienta para el ordenamiento territorial y un buen punto de partida para la realización de trabajos de investigación encaminados a la protección de esta prioritaria fuente de agua para la zona. Los mapas presentados pueden ser utilizados para crear políticas de monitoreo y alerta temprana del acuífero, crear conciencia social del peligro de contaminación y promover la recolección de datos de contaminantes.

6. Referencias

1. Freeze, R.A. and J.A. Cherry, *Groundwater*. 1979: Prentice Hall.
2. Compendio Estadístico 2012, Dirección General de Estadística Encuestas y Censos (DGEEC). 2012.
3. 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.
4. 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.
5. *Actualización del Análisis Sectoral de Agua Potable y Saneamiento de Paraguay*, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC). 2010.
6. *Encuesta Permanente de Hogares*, Dirección General de Estadística Encuestas y Censos (DGEEC). 2012.
7. Foster, S.S.D. and R. Hirata, *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, 1988.
8. Vrba, J., *Vulnerabilidad, protección y gestión de la calidad de las aguas subterráneas*, en *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: Un problema pendiente*. 1998, AIHGE: Valencia.
9. Lindström, R., *Groundwater Vulnerability Assessment Using Process-Based Models*, in *Vetenskap Och Konst, KTH, Architecture and the Built Environment*. 2005: Stockholm, Sweden. p. 36.
10. Dixon, B., *Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool*. Applied Geography 25 2005: p. 327 – 347.
11. 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.
12. 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. 1999.
13. Lobo Ferreira, J.P. and M.M. Oliveira, *DRASTIC Groundwater vulnerability mapping of Portugal in Groundwater: An Endangered Resource*, en *27th Congress of the International Association for Hydraulic Research*. 1997: San Francisco, USA. p. 132-137.
14. 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*, en *Jornadas sobre la contaminación de aguas subterráneas: un problema pendiente*. 1998. p. 413-420.
15. 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.
16. 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.

17. Sharadghah, S., *Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en Jordania. Aplicación del modelo DRASTIC*, en *Trabajo de Investigación*. 2001: Universidad Politécnica de Valencia.
18. 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.
19. Neshat, A., et al., *Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran*. *Environmental Earth Sciences*, 2013.
20. Piscopo, G., *Groundwater vulnerability map explanatory notes-MacIntyre Catchment*, in *NSW Department of Land and water Conservation*. 2001. p. 13.
21. 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.
22. 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*, en *RIA*. 2005: INTA, Argentina. p. 85-99.
23. 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.
24. 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
25. Ramos Leal, J.A., C. Noyola Medrano, and F.O. Tapia Silva, *Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin*. *Environ Earth Sci*, 2010. 61: p. 1309 – 1320.
26. 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.
27. *Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA (FEHS) - Estudio del Acuífero Patiño*, Instituto Holandés de Geociencias Aplicadas T.N.O., Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA). 2001.
28. Cardozo López, S. y C. Crosa Rivarola, *Estudio de la Contaminación del Acuífero Patiño, Trabajo Final de Grado*, en *Facultad de Ingeniería, Ingeniería Civil*. 2006, Universidad Nacional de Asunción.
29. 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)*, Banco Interamericano de Desarrollo (BID). 2011.
30. van der Gun, J.A.M., *Informe técnico 2.1: Sinopsis del estudio*, en *Estudio del Acuífero Patiño FEHS*. 2001.
31. Vrba, J. and A. Zaporozec, *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Association of Hydrogeologists. International contributions to hydrogeology, 1994. 16.

32. Garrett, P., et al., *Are ground water vulnerability classification systems workable?*, in *National Ground Water Association Columbus Proceedings of the FOCUS Conference on Eastern Regional Ground-Water Issues*. 1989. p. 329 – 343.
33. Baker, D.B., *Groundwater quality assessment through cooperative private well testing: an Ohio example*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990. 45: p. 230 - 235.
34. Rosen, L., *A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions*. *Ground Water* 1994. 32: p. 278 – 285.
35. Kalinski, R.J., et al., *Correlation Between DRASTIC Vulnerabilities and Incidents of VOC Contamination of Municipal Wells in Nebraska*. *Ground Water*, 1994. 32 (1): p. 31 - 34.
36. McLay, C.D.A., et al., *Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches*. *Environ Pollut* 2001. 115: p. 191–204.
37. Wehrle Martínez, A. y 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
38. Harris, I., et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 base de datos: 2012. Accedido el 24/03/2013; *International Journal of Climatology*. Disponible en: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrq/>.
39. *Climatic Research Unit, CRU*. Accedido el: 12/03/2013; University of East Anglia. Disponible en: <http://www.cru.uea.ac.uk/>.
40. Monte Domecq, R. and J. Báez Benítez, *Informe técnico 2.11: Balance Hídrico del Acuífero Patiño.*, en *Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño*. 2007.
41. *Compendio Estadístico Ambiental del Paraguay - Año 2011*, Dirección General de Estadística Encuestas y Censos (DGEEC). 2012.
42. Wehrle Martínez and D. Andrés y Lopez, *Informe técnico 2.6: Perforación de Pozos Piezométricos*, en *Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño*. 2007.
43. López Gorostiaga, O., et al., *Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra. Estudio de Reconocimiento de Suelos, Capacidad de Uso de la Tierra y Propuesta de Ordenamiento Territorial Preliminar de la Región Oriental del Paraguay*, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Subsecretaría de Estado de Recursos Naturales y Medio Ambiente y Banco Mundial. 1995: Asunción, Paraguay.
44. Consortium for Spatial Information, (CGIAR-CSI). *SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1*. Última actualización 19/08/2008. Accedido el 13/03/2013; Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/>.
45. *Cobertura de la Tierra Paraguay 2011*, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestry and Forest Products Research Institute (Japón). 2013: San Lorenzo – Paraguay.
46. Wehrle Martínez, A., *Informe técnico 2.9: Inventario de Fuentes Potenciales de Contaminación*, en *Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Acuífero Patiño*. 2007.
47. Forman, R.T.T. and L.E. Alexander, *Roads and Their Major Ecological Effects*. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998. 29: p. 207-231+C2.

48. Lambrakis, N., A. Antonakos, and G.P. Panagopoulos, *The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research*. Water Research, 2004. 38: p. 1862 – 1872.
49. Mazari Hiriart, M. *Impactos Ambientales: Acuiferos*. 2005. Accedido el 04/12/2013; Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/35/impactos.html>
50. Mazari, M., et al., *Environmental Assessment, Groundwater vulnerability assessment for organic compounds: Fuzzy multicriteria approach for Mexico City*. Environmental Management, 2006. 37 (3): p. 410 - 421.

7. Anexos

En esta sección se presentan los gráficos de probabilidad normal y con transformación logarítmica, para contrastar la normalidad los datos de las concentraciones de “nitrógeno total” y “coliformes totales” (Figura 1 y Figura 2).

El test de Wilcoxon, indicado en los diagramas de cajas, son utilizados para verificar si las clases o rangos son estadísticamente iguales ($p > 0.005$) o diferentes ($p < 0.005$). Se realizó el test en los parámetros cuantitativos utilizados para el cálculo del índice de vulnerabilidad inicial y las calibraciones con Nt y Ct (Figura 3 a Figura 6).

Por último, se presenta la tabla de comparación de las diferentes “litologías de acuíferos” encontrados en los perfiles de pozos y los indicados por la metodología DRASTIC [3]. La metodología clasifica diez tipos de acuíferos, mientras que los encontrados en los perfiles de pozos (192 tipos) correspondientes al acuífero Patiño difieren con el nombre exacto de la metodología.

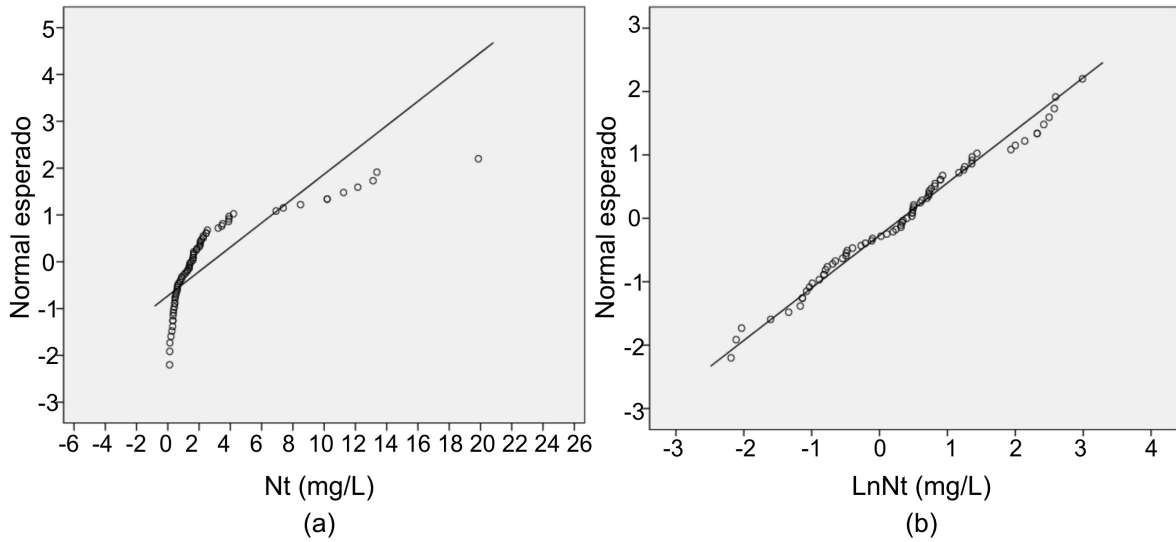


Figura A1. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de “nitrógeno total” en las muestras de agua subterránea antes (a) y (b) después de la transformación logarítmica.

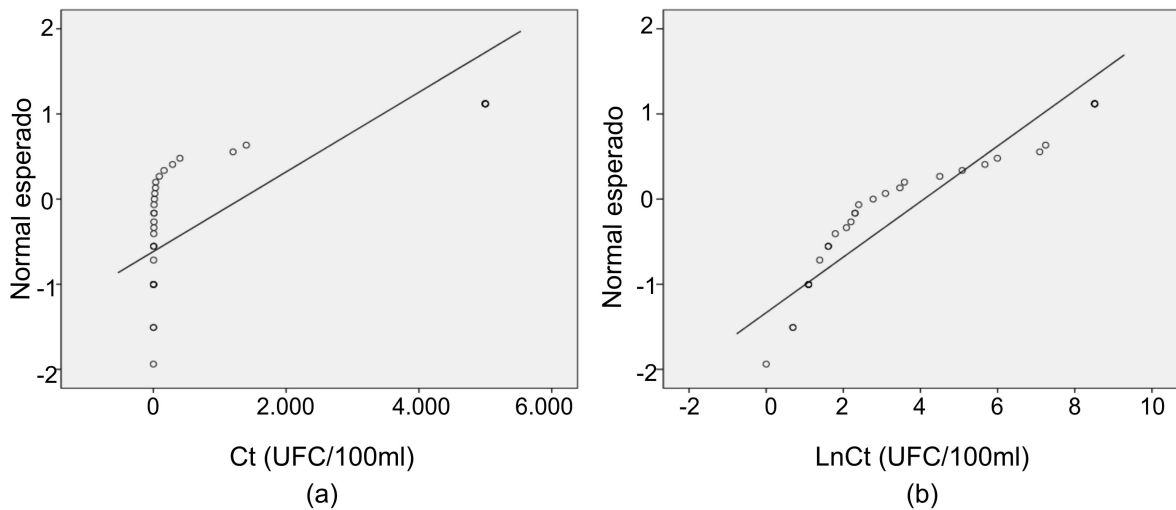


Figura A2. Gráfico de probabilidad normal de “coliformes totales” en las muestras de agua subterránea antes (a) y (b) después de la transformación logarítmica.

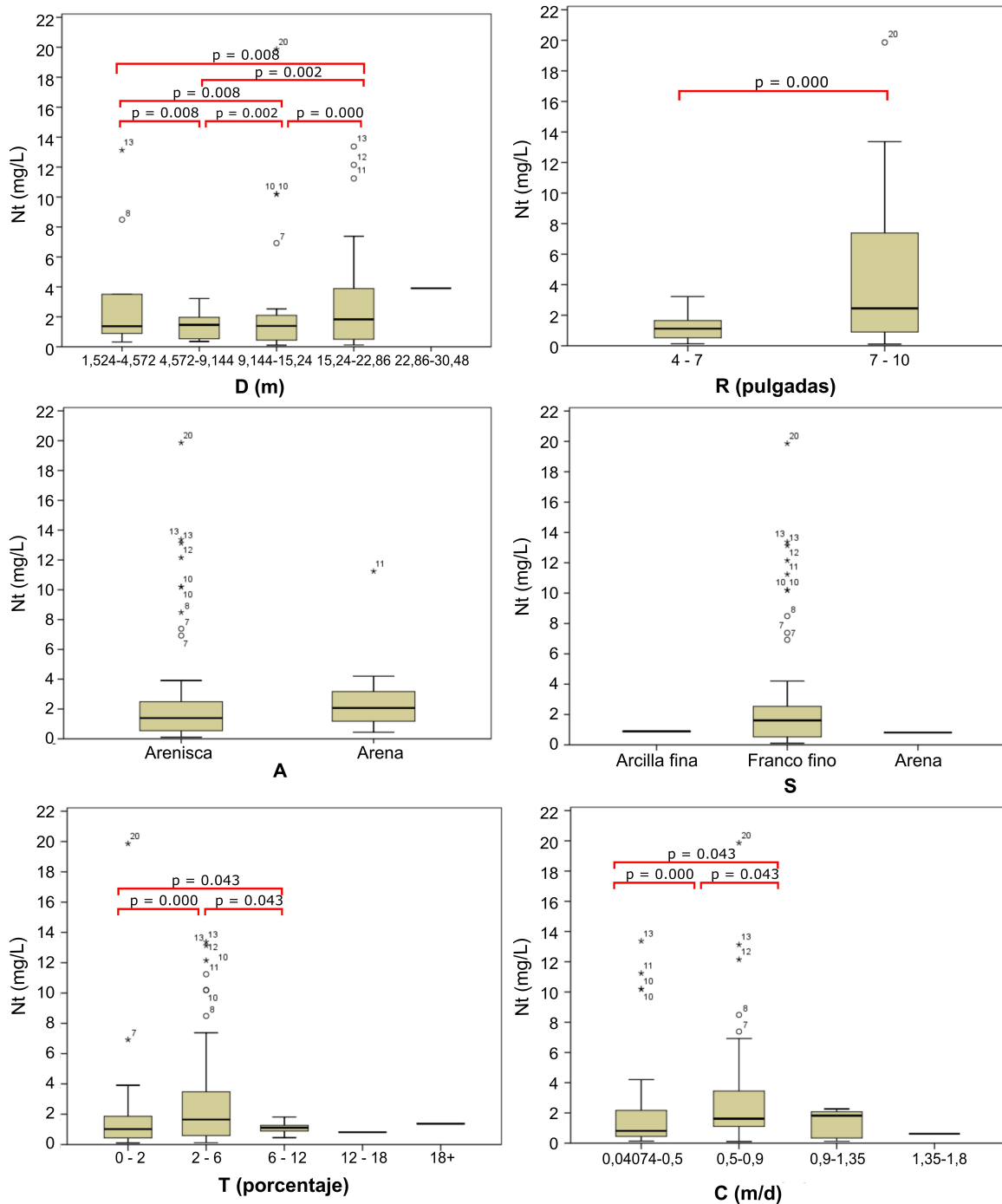


Figura A3. Los diagramas de caja muestran la distribución de la concentración de *Nt* en las aguas subterráneas, se muestra también el resultado del test de Wilcoxon indicando las clases estadísticamente diferentes para todos los parámetros DRASTIC.

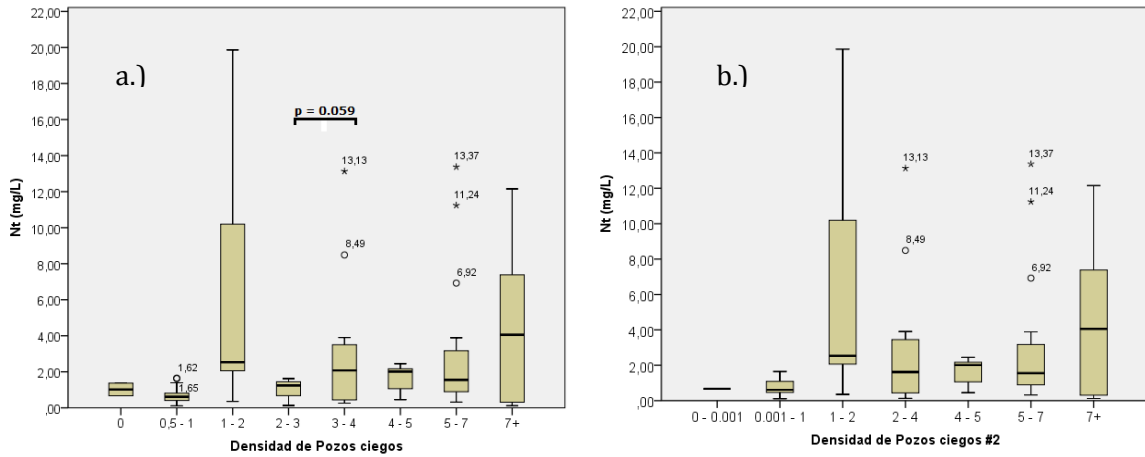


Figura A4. Diagrama de caja y test de Wilcoxon de la “densidad de viviendas con pozos ciegos” con *Nt*. (a) Primera clasificación. Se muestra el resultado del test de Wilcoxon con $p > 0.05$, donde se combinaron los rangos 2 a 4 y se asignó la calificación de 7. (b) Segunda clasificación. Se realizó el test de Wilcoxon con la nueva clasificación, donde los rangos no fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$).

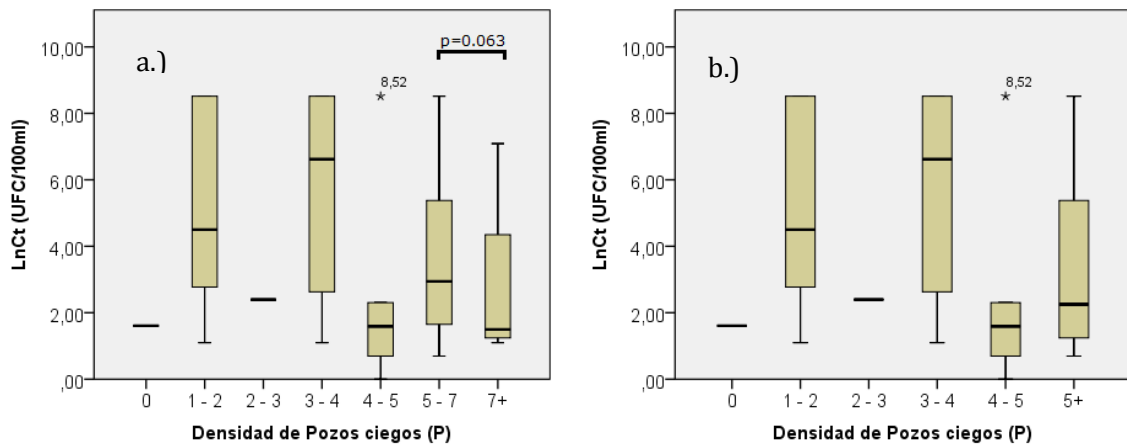


Figura A5. Diagrama de caja y test de Wilcoxon de la “densidad de viviendas con pozos ciegos” con $\ln(Ct)$. (a) Primera clasificación. Se muestra el resultado del test de Wilcoxon con $p > 0.05$, donde se combinaron los rangos 5 a 7 y se asignó la calificación de 10. (b) Segunda clasificación. Se realizó el test de Wilcoxon con la nueva clasificación, donde los rangos no fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$).

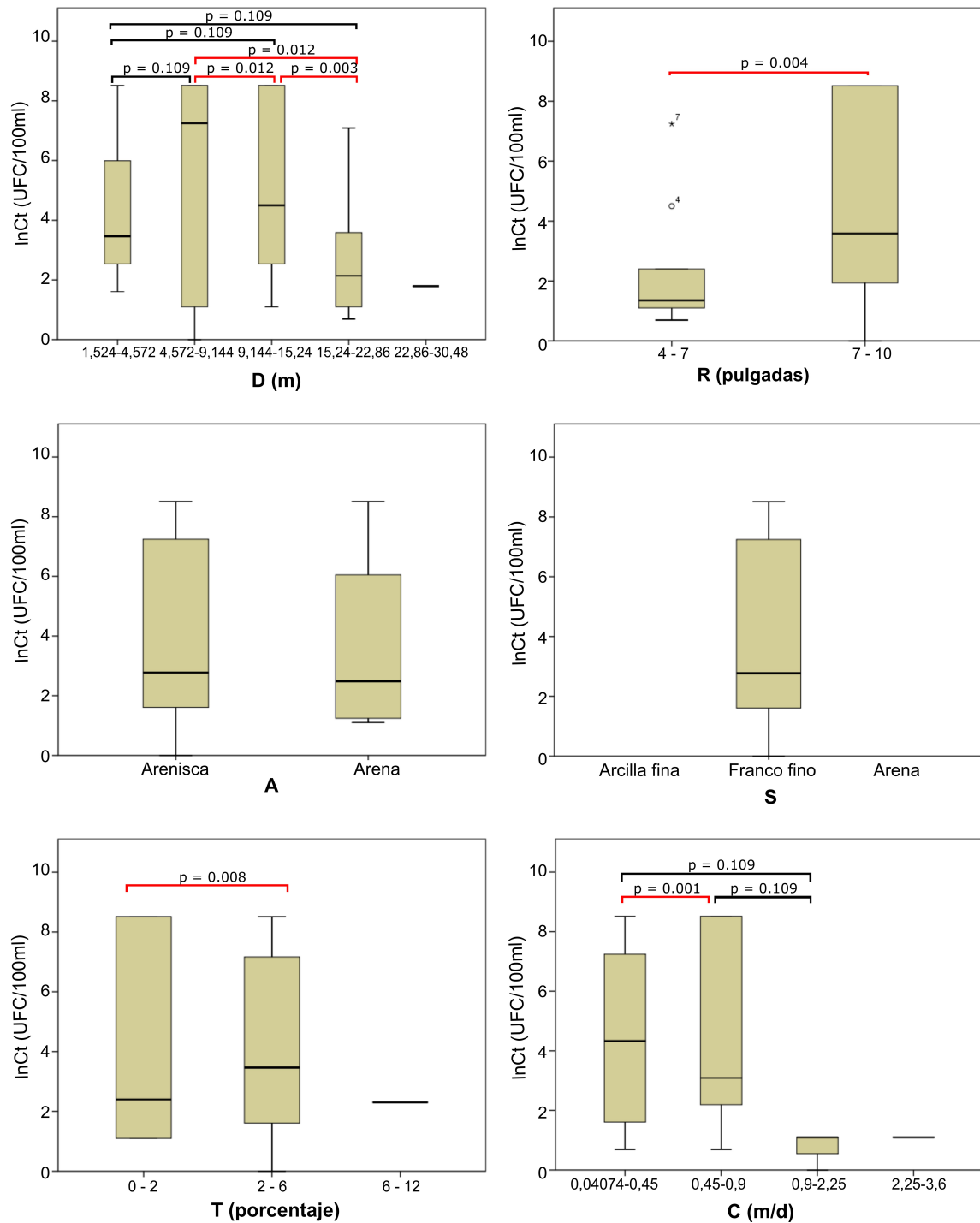


Figura A6. Los diagramas de caja muestran la distribución de los “coliformes totales” en las aguas subterráneas, se muestra también el resultado del test de Wilcoxon indicando las clases estadísticamente diferentes para todos los parámetros DRATIC.

Tabla A1. Comparación de las diferentes “litologías de acuíferos” encontrados en los perfiles de pozos y los indicados por la metodología.

#	Litologías de Acuíferos en perfiles de pozos (escaneados)	Calif. máx.	#	Litologías de Acuíferos según metodología DRASTIC	Calif. mín-máx	Calif. típica
1	Arcilla Arenosa	8	1	Limo/Arcilla	1-3	2
2	Arcilla Arenosa, Arena	8	2	Esquistos, pizarras / Lutita	3-5	4
3	Arcilloso	2	3	Metamórfica / ígnea	2-5	3
4	Arena	9	4	Caliza	4-9	6
5	Arena Arcillosa, Arenisca	8	5	Arenisca	4-9	6
6	Arena Cuarzosa	9	6	Alternancia de Calizas, Areniscas y Esquistos / Secuencia de arenisca, caliza y lutita	5-9	6
7	Arena Cuarzosa, Conglomerado	9	7	Arena y Grava con contenido de limo y arcilla	5-9	6
8	Arena fina, Arcillosa, Camada Arcillosa, Arenisca	8	8	Arena y Grava	4-9	8
9	Arena muy arcillosa, Arena de Granos	2	9	Basalto	2-10	9
10	Arena no consolidada, Arenisca Cuarzosa, Conglomerado	8	10	Caliza kárstica	9-10	10
11	Arena, Arena cuarzosa, Arenisca	8				
12	Arena, Arenisca	8				
13	Arena, Arenisca, Meta Arenisca	8				
14	Arena, Conglomerado, Arenisca	8				
15	Arenisca	8				
16	Arenisca cuarzosa	8				
17	Arenisca Cuarzosa, Arcilla	8				
18	Arenisca cuarzosa, Arcilla, Cantos Rodados	8				
19	Arenisca cuarzosa, Arenisca arcillosa	8				
20	Arenisca cuarzosa, Cuarcita dura	8				
21	Arenisca, Arcilla	8				
22	Arenisca, Arenisca Arcillosa	8				
23	Arenisca, Basalto Alterado	8				
24	Arenisca, Camada arcillosa	8				
25	Arenisca, Camada arcillosa, Cantos rodados	9				
26	Arenisca, Canto rodado	9				
27	Arenisca, Conglomerado	9				
28	Arenisca, Fisura	9				
29	Arenisca, Gravilla	8				
30	Arenisca, Lutita	8				
31	Arenisca, Material arcilloso	8				
32	Basalto	10				
33	Diabasa	8				
34	Intercalaciones Areniscas con lentes arcillosos	8				