

DOI: 10.24850/j-tyca-16-2-8

Artículos

Contaminación de acuíferos y eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales en centros urbanos de Itapúa, Paraguay

Aquifer contamination and efficiency of wastewater treatment plants in urban centers of Itapúa, Paraguay

Alicia Raquel Eisenkölbl¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9082-7973>

Rafaela Laino Guanes², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3045-5108>

Christian Vogt Penzkofer³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6683-4417>

Antonio Benítez Cañiza⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5591-7375>

¹Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Itapúa, Paraguay, aaisenkobl1@gmail.com

²Centro de Investigación del Chaco Americano, Paraguay, rafilaino@gmail.com

³Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, cvogt@hotmail.de

⁴Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Paraguay, antoniobenitez25@gmail.com



Autora para correspondencia: Alicia Raquel Eisenkölbl,
aeisenkolbl1@gmail.com

Resumen

La investigación analiza la calidad del agua subterránea y la eficacia del funcionamiento de dos plantas de tratamiento de efluentes domiciliarios en dos centros urbanos de Paraguay, así como la presencia de metales pesados en lodos residuales de ambas plantas de tratamiento. Para analizar la calidad del agua subterránea se recabaron datos de 59 muestreos de agua de 17 pozos profundos obtenidos en un periodo de 10 años entre el 2006 y el 2016. Para la evaluación del funcionamiento de las plantas de tratamiento se determinó la calidad de los efluentes luego del proceso de depuración. En los lodos generados en ambas plantas se analizó la presencia de metales pesados (Pb, Cr total, Cd y Hg). Los resultados obtenidos fueron contrastados con legislaciones nacionales e internacionales vigentes. Los datos cuantitativos fueron procesados estadísticamente mediante análisis de varianza y contraste de medias (Test de Duncan) con margen de error 5 %. Los principales resultados indican contaminación microbiológica del agua subterránea (acuífero Guaraní). Sin embargo, los parámetros físico-químicos analizados estaban dentro de los rangos establecidos por las normativas vigentes. Se identificó una inadecuada gestión en la planta de tratamiento de aguas residuales en uno de los centros urbanos (Hohenau). Se detectó presencia de Pb, Cr y Hg, a pesar de que las concentraciones se mantuvieron dentro de los rangos permisibles. Para salvaguardar la salud pública y el

ambiente, tanto a nivel local como regional, es imperativo aplicar plenamente el marco legal y la implementación de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.

Palabras Clave: recursos hídricos, calidad de agua, planta de tratamiento de aguas residuales domiciliarias, gobernabilidad del agua, sustentabilidad de recursos hídricos.

Abstract

The research analyzes groundwater quality and the efficiency of the operation of household effluent treatment plants in two urban centers in Paraguay, as well as the presence of heavy metals in waste sludge from both treatment plants. To analyze groundwater quality, data was collected from 59 water samples from 17 deep wells obtained over a 10-year period between 2006 and 2016. The quality of the effluents was determined after the purification process. The sludge generated in both plants was analyzed for the presence of heavy metals (Pb, total Cr, Cd and Hg). The results obtained were compared with current national and international legislation. Quantitative data was statistically processed by analysis of variance and contrast of means (Duncan's test) with a 5 % margin of error. The main results indicate microbiological contamination of groundwater (Guarani aquifer); however, the physical-chemical parameters analyzed were within the ranges established by current regulations. Inadequate management of the wastewater treatment plant in one of the urban centers (Hohenau) was identified. The presence of Pb, Cr and Hg was detected, even though the concentrations remained within the permissible ranges. To safeguard public health and the environment,

both locally and regionally, it is imperative to fully enforce the legal framework and the implementation of Integrated Water Resources Management.

Keywords: water resources, water quality, household wastewater treatment plant, sustainability of water resources.

Recibido: 13/09/2022

Aceptado: 12/01/2024

Publicado online: 19/01/2024

Introducción

Los acuíferos son fuentes de aguas subterráneas esenciales para la vida y el funcionamiento de los ecosistemas, aportan agua a los ríos, lagos, manglares y pantanos, son indispensables para la sobrevivencia de los bosques en regiones de clima seco o tropical, en muchas partes del mundo abastecen a las ciudades y a los campos, por lo tanto, además sirven de insumo para diversas actividades económicas (Hirata, Vieira, Susko, Villar & Marcellini, 2019).

El acuífero Guaraní es el tercer reservorio más grande de aguas continentales subterráneas del mundo. Se extiende por partes del subsuelo de Paraguay, Argentina, Brasil y Uruguay, con una superficie total de 1.084.063 km², se encuentra enteramente en la cuenca del Río de la Plata. El agua que se infiltra en esta cuenca genera la mayor recarga

de este acuífero (García & Faggioli, 2018; Zarrilli, 2018). Además del acuífero Guaraní y otros acuíferos importantes (Patiño e Yrendá), el Paraguay también se caracteriza por una compleja red hídrica, que define la importancia estratégica que constituye para el desarrollo del Paraguay la gestión integrada de los recursos hídricos transfronterizos (CIC, 2004).

A pesar de la riqueza hídrica que posee el Paraguay, tanto superficial como subterránea, el acceso a servicios básicos no es equitativo en el país. Además, en las áreas urbanas no se cumplen con los estándares de saneamiento requeridos. Por ejemplo, ante la falta del servicio de alcantarillado y saneamiento, gran parte de las aguas domiciliarias y de efluentes industriales se vierten directamente en las calles o en los cursos hídricos, generando consecuencias ambientales adversas (MOPC, 2018). Otro problema recurrente en la gestión del recurso hídrico en el país es la falta de información y actualización sobre la calidad del agua, tanto superficial como subterránea. Además de ello, tampoco existe información (o es muy escasa) sobre la calidad del agua de los efluentes domiciliarios que son vertidos a los cauces hídricos.

Por estas razones en este trabajo se presentan datos de calidad del agua desde su origen (acuífero) hasta su depuración luego ser utilizada y sometida al proceso de tratamiento de aguas residuales. Se analizan parámetros microbiológicos y físico-químicos del agua en dos centros urbanos con el propósito de generar información que aporte al conocimiento de la calidad y del manejo de los recursos hídricos del Paraguay. Los objetivos de este estudio fueron analizar la calidad del agua subterránea de los pozos que abastecen a dos centros urbanos de Itapúa, medir la eficiencia del funcionamiento de las plantas de tratamiento de

aguas residuales de ambas ciudades e identificar la presencia de metales pesados en lodos residuales de ambas plantas.

Área de Estudio

El estudio se realizó en dos microcuencas que forman parte de la gran cuenca del río Paraná. Ambas microcuencas están ubicadas en el departamento de Itapúa, Paraguay: la microcuenca del arroyo Abbeg que drena sus aguas al Arroyo Itakaguaré y la microcuenca de un arroyo sin nombre que drena sus aguas al Arroyo Capiíbary (Figura 1).

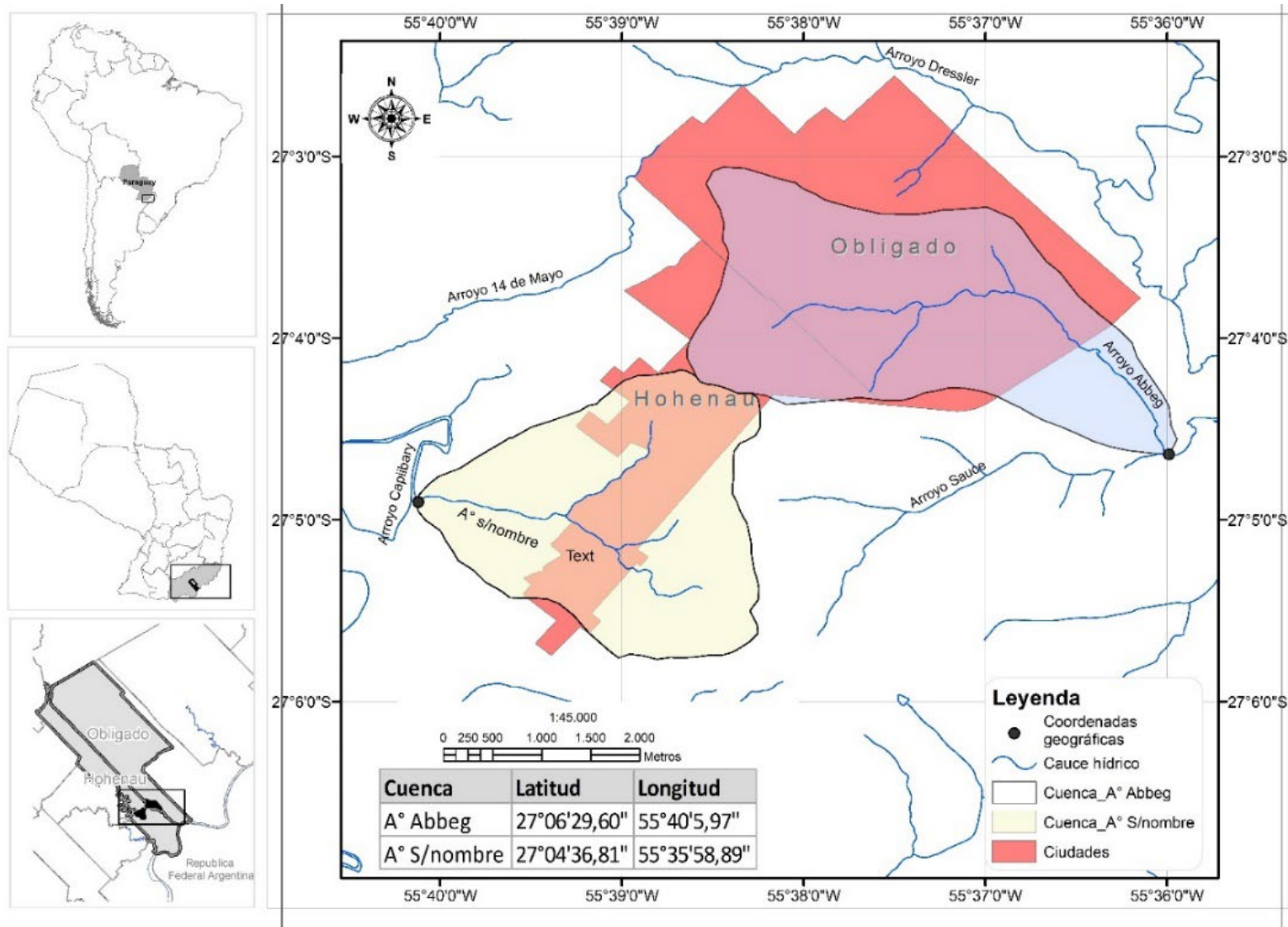


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en Paraguay y a nivel distrital. Microcuencas ubicadas en el departamento de Itapúa (distritos de Hohenau y Obligado) y sus coordenadas geográficas.

En la microcuenca del arroyo Abbeg se localiza gran parte del centro urbano de Obligado (Figura 2), por lo tanto, en adelante será denominada

microcuenca O. La misma tiene una superficie de 741 ha y su cauce principal tiene una longitud de 4850 m. Sobre la microcuenca del arroyo sin nombre se ubica el centro urbano de Hohenau (Figura 3), por lo tanto, será denominada microcuenca H. La misma cuenta con una superficie de 598 ha y la longitud de su cauce es de 3217 m.

La zona de estudio se caracteriza por su elevada riqueza hídrica, la misma se encuentra asentada sobre el acuífero Guaraní, está conformada por rocas sedimentarias de areniscas que almacenan grandes volúmenes de agua en los espacios porosos que presentan (PAS-PY, 2012). En el área de estudio se encuentran predominantemente dos tipos de suelos, Ultisol 10 en las partes altas y medias de las cuencas, y en menor proporción Ultisol 2 en las partes bajas de ambas cuencas. El Ultisol 10 se da sobre roca basáltica (Formación B) y en menor extensión sobre areniscas (Formación A), pero siempre en lomadas con buen drenaje superficial. Las clases de suelo se clasifican como II, III y V, con predominio de clase III: pendientes del 8 al 15 %, profundidad efectiva del suelo 75-100 cm, drenaje y permeabilidad rápida (Gorostiaga *et al.*, 1995).

Materiales y Métodos

Calidad del agua subterránea

Para evaluar la calidad del agua se utilizaron los resultados de los análisis laboratoriales de 11 pozos profundos. Estos datos fueron suministrados por propietarios privados (PP) y por las Juntas de Saneamiento (JS) que son las entidades encargadas de proveer agua a las comunidades. Los parámetros analizados fueron: a) microbiológico: coliformes totales; b) físico: pH; c) químicos: alcalinidad, aluminio, amonio, calcio, cloruros, cobre, dureza total, fosforo, hierro, magnesio, nitrato, potasio, sodio y sulfatos. Los resultados se compararon con los umbrales establecidos en las normativas ambientales relacionadas con la calidad del agua para el consumo humano de la OMS (OMS, 2011) y las Normas Oficiales Paraguayas ERSSAN (ERSSAN, 2000) para determinar si se presenta o no deterioro en la calidad del agua. Una vez que se identificaron los parámetros de calidad de agua afectados (contaminación), se relacionaron estos datos con las precipitaciones y con la formación geológica para identificar las posibles causas.

Los análisis de agua fueron realizados entre el 2006 y 2016, a excepción de los años 2007 y 2011, en los cuales no se encontró información disponible. Los datos del año 2013 fueron descartados por la baja confiabilidad que presentaron debido a que mostraron el mismo valor en todos los puntos de muestreo. En total, se analizaron 59 muestras, de las cuales 6 fueron descartadas de los análisis microbiológicos por contar con un solo dato. Las muestras no fueron similares en cantidad de tomas

por año. Las características de construcción y formación geológica de los pozos se describen en la Tabla 1). Los pozos fueron codificados para un mejor manejo de los datos y el cálculo estadístico de los mismos. De los 17 pozos ubicados en la zona de estudio, 11 pozos corresponden a la Microcuenca O y 6 pozos a la Microcuenca H (Tabla 1, Figura 2 y 3).

Tabla 1. Información de los pozos profundos del área de estudio, año de construcción, fuente de la información, profundidad, cota, formación geológica y cantidad de muestras de agua y año de toma de la muestra.

Código	Año de construcción	Fuente de la información	Profundidad (m)	Cota msnm	Formación geológica	Cantidad de muestras (año)
1OC	2002	PP	140	174	basalto/arenisca	1 (2010)
2OC	1994	PP	235	163	basalto/arenisca	1 (2010)
3OB	2002	PP	171	165	basalto	1 (2010)
4OB	2007	PP	102	149	basalto	1 (2010)
5OB	2004	PP	105	163	basalto	1 (2010)
6OB	1995	PP	105	190	basalto	1 (2010)
7OB	1979	JS	60	165	basalto	4 (2006-2008-2009-2014)
8OA	1990	JS	203	203	arenisca	6 (2008-2010-2012-2013)
9OA	1996	JS	141	197	arenisca	2 (2008-2009)

Código	Año de construcción	Fuente de la información	Profundidad (m)	Cota msnm	Formación geológica	Cantidad de muestras (año)
10OA	1999	JS	150	148	arenisca	7 (2006-2008-2009-2012-2013-2014-2016)
11OA	2002	JS	160	186	arenisca	3 (2006-2008-2009)
12HB	1984	JS	71	164	basalto	5 (2006-2013-2015-2016)
13HB	1991	JS	167	186	basalto	6 (2006-2013-2015)
14HB	2000	JS	146	194	basalto	6 (2006-2013-2014-2015)
15HB	2001	JS	205	173	basalto	3 (2014-2015-2016)
16HB	2004	JS	75	160	basalto	6 (2006-2014-2015-2016)
17HB	2013	JS	180	184	basalto	5 (2014)

O: Microcuenca O (distrito de Obligado)

H: Microcuenca H (distrito de Hohenau)

A: Areniscas

B: Basalto

C: Combinado (basalto sobre areniscas)

JS: Junta de Saneamiento

PP: Pozos Privados.

La nomenclatura para la identificación de cada pozo incluye un número, seguido de la letra correspondiente a la microcuenca y las letras A-B-C representan el material de origen (arenisca, basalto y combinado, respectivamente).

En la Figura 2, se puede apreciar la ubicación de los 11 pozos junto con la planta de tratamiento de aguas residuales de Obligado, la cual está designada con la etiqueta WT2.

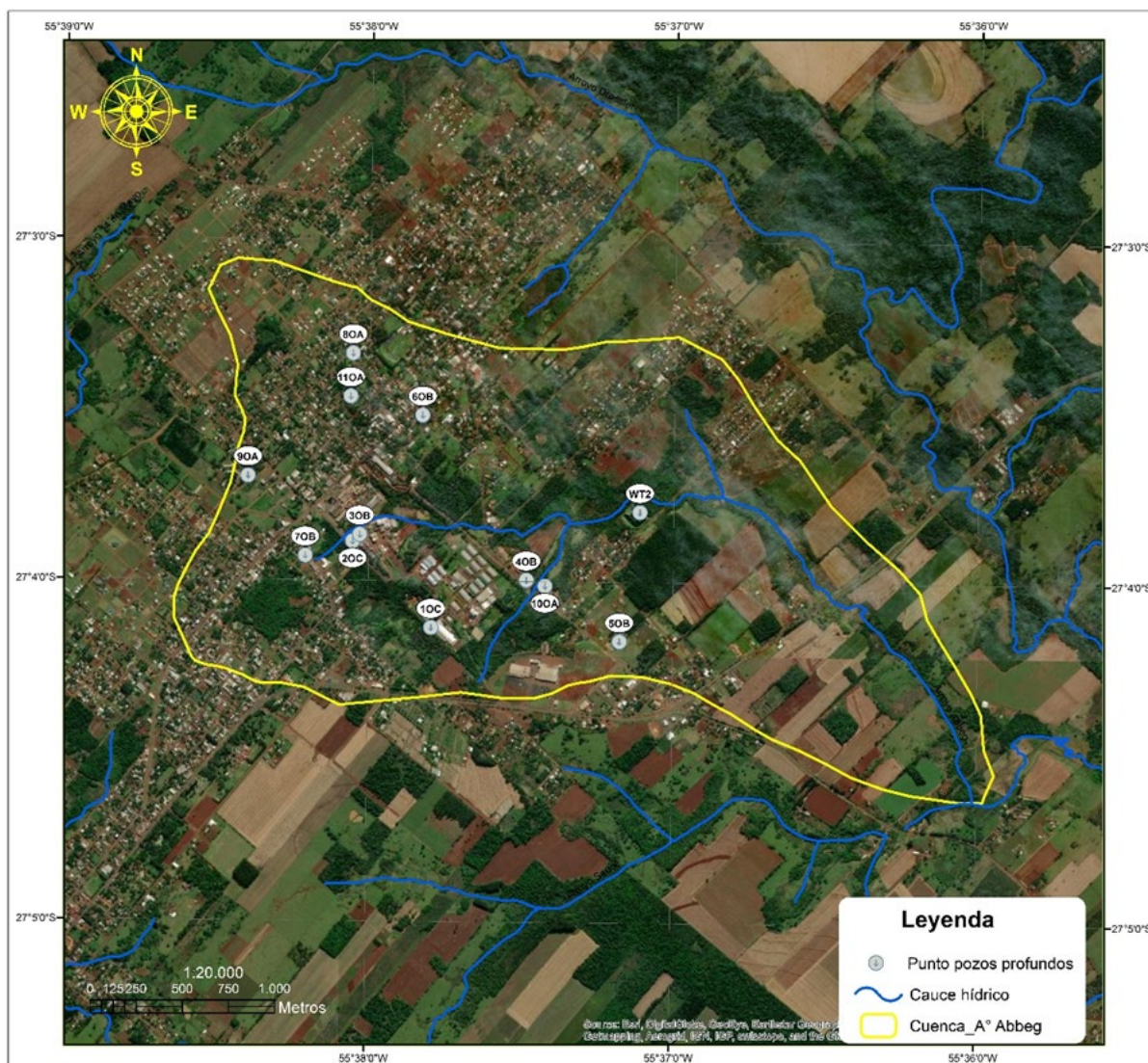


Figura 2. Ubicación de los 11 pozos profundos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Obligado (WT2) ubicados en la Microcuenca O.

En la Figura 3 se observa la ubicación de los 6 pozos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Hohenau que se identifica con la nomenclatura WT1.

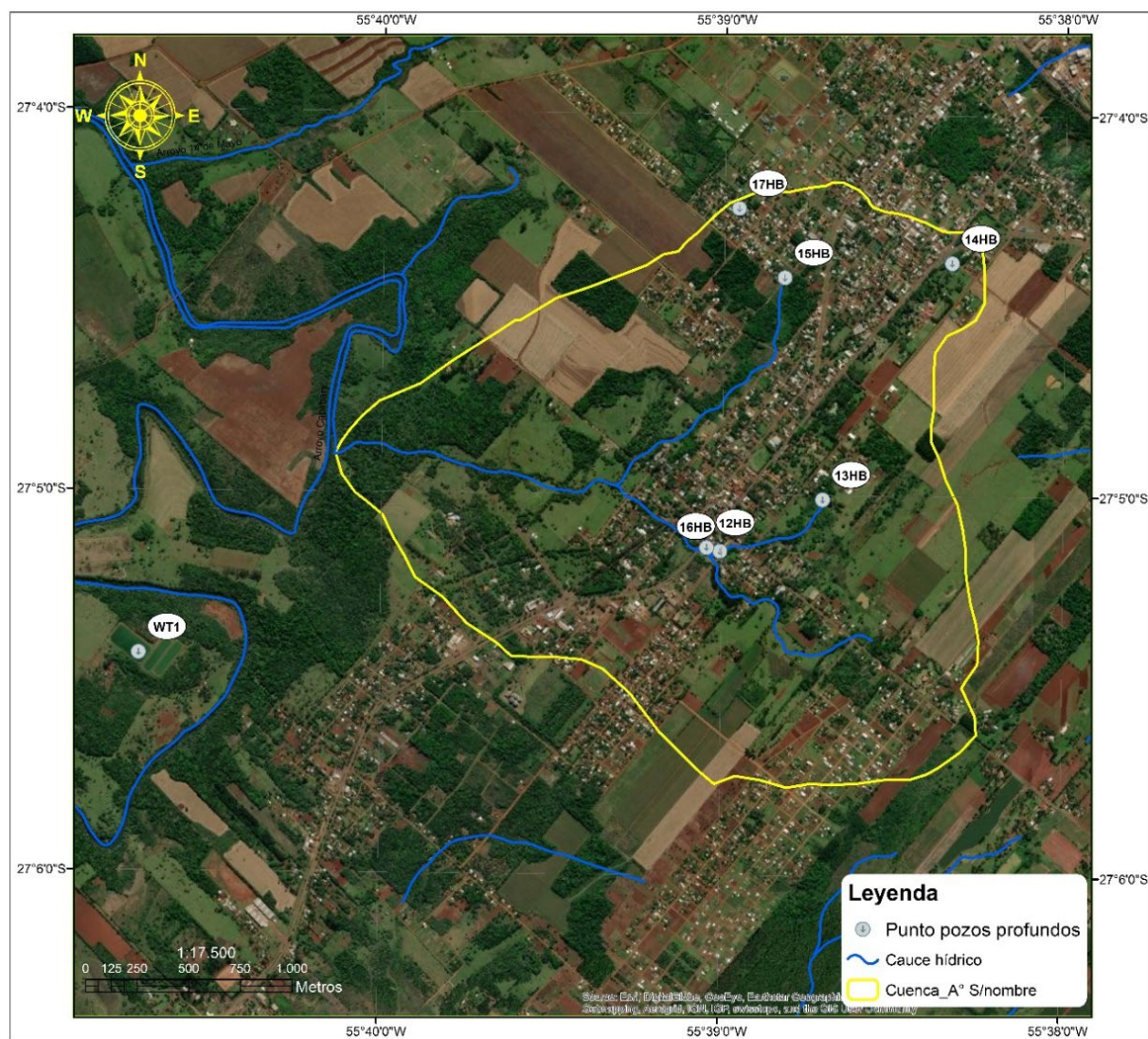


Figura 3. Ubicación de los 6 pozos profundos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Hohenau (WT1) ubicados en la Microcuenca H.

Análisis Estadístico

Se utilizó el análisis de varianza y contraste de medias para la identificación de diferencias significativas entre las variables, se aplicó la prueba de Duncan al 5 % de significancia. Para los análisis se utilizó el programa estadístico Infostat Versión 2017 (Di Rienzo *et al.*, 2017). Para el análisis de parámetros se han descartado pozos con un solo dato debido a que genera una dispersión estadística muy marcada.

Eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias (PTAR)

A continuación, se describen las características de las PTAR ubicadas en el área de estudio:

1. PTAR Hohenau consta de: 3 piletas aerobias y un espejo de agua de 3,2 ha. Abarca 2.063 usuarios y está proyectada para 10.829. Funciona desde el año 2006. Para una mejor presentación de resultados se codificaron los puntos muestreo: siendo el primer punto (P1) la entrada, pasando por los 3 puntos (piletas) intermedios (P2, P3 y P4) y el último punto (P5) la salida del agua.
2. PTAR Obligado consta de: desarenador, sistema RAFA combinado con 2 piletas facultativas, un espejo de agua de 0.61 ha. c) Abarca 2.291 usuarios y está proyectada para 10.000. Funciona desde el año 2013. Para una mejor presentación de resultados se codificaron los puntos

de muestreo: el primer punto (P1) la entrada y el último punto (P5) la salida del agua, pasando sistema RAFA (P2) combinado con 2 piletas facultativas (P3 y P4).

Con respecto a los datos utilizados, para la PTAR de Hohenau se utilizaron datos del año 2010, y para la de Obligado datos de los años 2014, 2015 y 2016. Para este estudio se tomaron nuevas muestras en ambas PTAR según INTN (2001), en dos épocas del año 2017, una en marzo (otoño) y otra en septiembre (primavera). Los resultados de estos análisis fueron comparados con los umbrales establecidos en la Ley 1614/2000 y en la Resolución 222/2002 que establece el padrón de calidad de las aguas en Paraguay.

Metales Pesados

Para cada muestra se tomó 1 kg de lodo en cada PTAR, posteriormente fueron remitidas a la Universidad Nacional de Misiones (UNAM), Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (FCEQYN), Programa Efluentes Industriales y Urbanos. Los metales analizados fueron Cr total, Cd, Pb y Hg. Para el análisis del Cr total, Cd y Pb, se utilizó el método de Espectrometría de Absorción Atómica con aspiración de llama según EPA600/R-94/111 Método 200.2 con Espectrofotómetro de AA Analyst 700, utilizando los protocolos de la UNAM-FCEQYN. Para el caso del Hg se utilizó la Espectrometría de Absorción atómica de marca AA Perkin Elmer, con inyección en flujo con generación de vapor frío, la muestra fue preparada según EPA600/R-94/FIAS/MHS utilizando los protocolos de la UNAM-FCEQYN. Los resultados fueron contrastados con las normas de

México (NOM-004 SEMARNAT, 2002), de Estados Unidos (USEPA 503, 1995) y de la Comunidad Europea (CEC, 1986), debido a que Paraguay no cuenta con normativa para metales pesados en lodos.

Resultados

Calidad del Agua Subterránea

Parámetros microbiológicos

Las aguas subterráneas presentaron contaminación microbiológica, específicamente por presencia de coliformes totales. Sin embargo, todos los valores de los parámetros físico-químicos se encontraron dentro de los límites establecidos en la normativa nacional de la Ley N° 1614/2000 (ERSSAN, 2000) y en la norma de calidad de agua de la OMS (2011). Las concentraciones de coliformes totales detectadas variaron entre 10 UFC/100ml en los pozos de Hohenau y llegaron a alcanzar hasta 326 UFC/100ml en los pozos de Obligado (Figura 4).

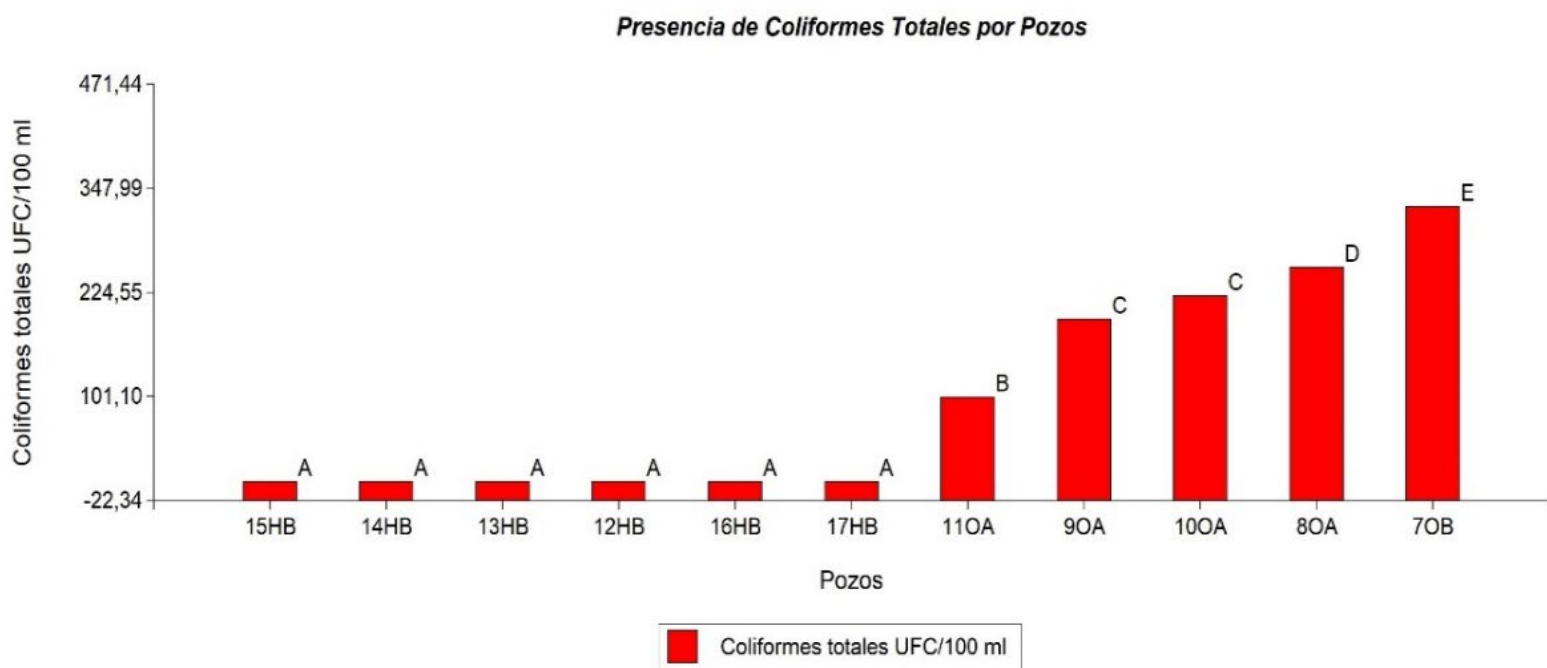


Figura 4. Presencia de coliformes totales en aguas de pozos distribuidos en el área de estudio. Medias que no comparten una letra (A, B, C, D o E) son significativamente diferentes.

Los resultados indican que los pozos ubicados sobre la formación geológica Misiones (arenisca) son más susceptibles a la contaminación por coliformes totales. La infiltración más rápida en la arenisca hace que los pozos sean más vulnerables. Los pozos ubicados sobre el basalto tienen menor presencia de coliformes totales debido a la estructura menos porosa de esta formación geológica (Figura 5).

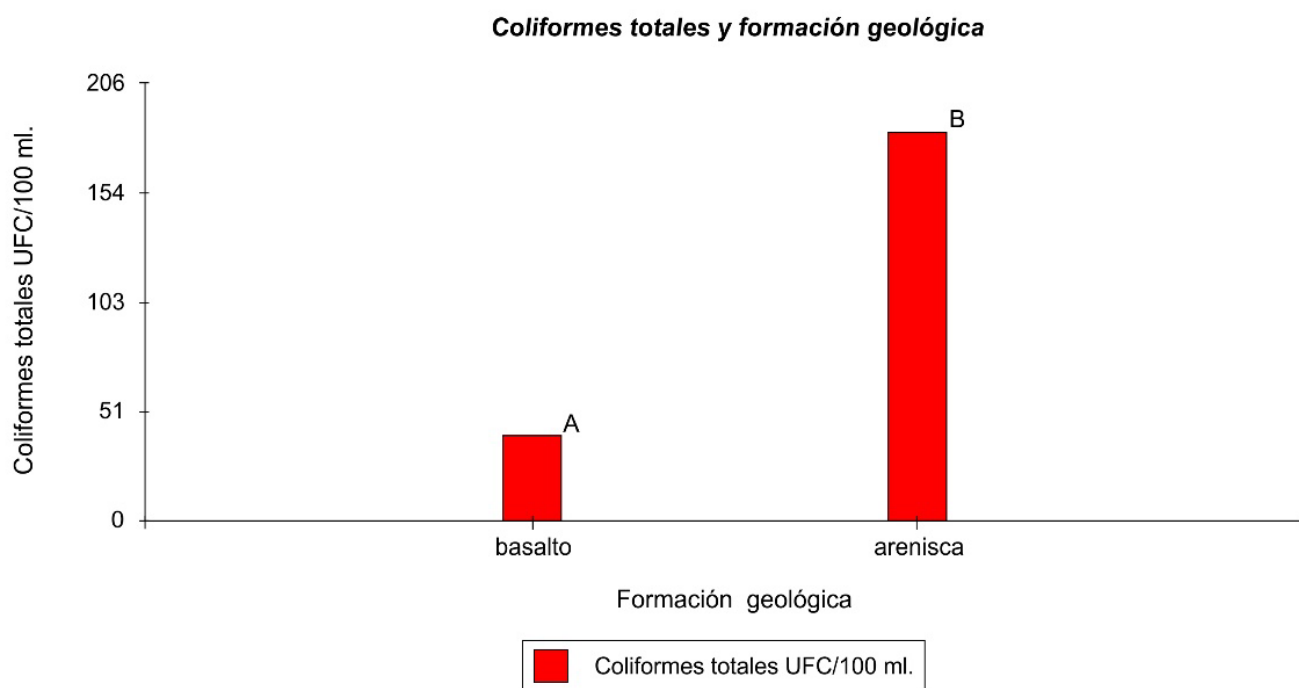


Figura 5. Presencia de coliformes totales en aguas de pozos distribuidos en el área de estudio atendiendo formación geológica. Medias que no comparten una letra (A y B) son significativamente diferentes.

La mayor presencia de coliformes totales está directamente relacionada a la formación geológica, siendo la formación Misiones (areniscas) la más afectada. Por otro lado, no se encontró relación de la presencia de estos coliformes con la precipitación.

Parámetros físico-químicos

Los resultados de los análisis físico-químicos indican que todos los valores se mantuvieron dentro de los límites establecidos tanto por la normativa nacional, Ley N° 1614/2000 (ERSSAN, 2000), como por la norma de calidad de agua de la OMS (2011). Los rangos admisibles se respetaron de acuerdo con sus límites establecidos, a saber: a) Para los parámetros físicos, el pH se mantuvo en el rango de 6,5 mg/l a 8,5 mg/l. b) En cuanto a los parámetros químicos, los valores de alcalinidad, aluminio, calcio, dureza total, potasio, amonio, cloruro, cobre, hierro, nitrato, sodio, sulfato se encontraron dentro de los límites establecidos, que son 250 mg/l, 0.2 mg/l, 100 mg/l, 400 mg/l, 12 mg/l, 0,50 mg/l, 250mg/l, 2 mg/l, 0.3 mg/l, 5mg/l, 200 mg/l, 250 mg/l respectivamente.

Eficacia de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias

Parámetro microbiológico

En la planta de tratamiento de Hohenau, los análisis del año 2010 indican una disminución de los coliformes totales luego del proceso de depuración, se mantuvo dentro de los rangos establecidos por la norma paraguaya (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de coliformes totales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau años 2010, 2017.

Año	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
2010	-----	>2419,6	>2419,6	1203.3		SR
2017 (marzo)	$2,4 \times 10^5$	930	4 300	93	2 100	SR
2017 (septiembre)	200	20	17	17	200	SR

SR: Sin Rango

P1: ENTRADA

P2: PILETA 1

P3: PILETA 2

P4: PILETA 3

P5: SALIDA

Tabla 3. Valores de coliformes fecales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau año 2017.

Año	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
2017 (marzo)	$2,4 \times 10^5$	930	4 300	93	2 100	<4 000
2017 (septiembre)	200	17	17	170	170	<4 000

SR: Sin Rango

P1: ENTRADA

P2: PILETA 1

P3: PILETA 2

P4: PILETA 3

P5: SALIDA

Así los análisis más recientes del 2017 también demuestran una disminución de coliformes (totales y fecales) luego del tratamiento, a excepción de los coliformes totales que en el final del proceso (P5) volvieron a alcanzar los mismos niveles de entrada (P1) como se observa en la Tabla 2 y 3. Tanto en marzo como en septiembre del 2017, se resalta que los valores de coliformes (totales y fecales) disminuyen durante el proceso de depuración y vuelven a aumentar a la salida del sistema al final del tratamiento. Por lo tanto, se considera que la PTAR de Hohenau no funciona correctamente. A pesar de este aumento de coliformes, los valores detectados se encuentran por debajo del máximo permisible según la Ley N° 1614/2000 (ERSSAN, 2000).

También en la Tabla 2 y 3 se observa que la presencia de coliformes (totales y fecales) es considerablemente menor en el muestreo 2 realizado en el mes de septiembre (primavera) comparando con el muestreo 1 realizado en otoño (marzo), correspondiente al año 2017.

Con respecto a la planta de tratamiento de agua de Obligado, se observa que presenta una buena eficacia en su funcionamiento, los parámetros microbiológicos disminuyen en la última pileta (final de proceso) y se encuentran por debajo del límite máximo permisible según la Ley 1614/2000 (ERSSAN, 2000) (Tabla 3).

Al igual que en la PTAR de Hohenau, en la Tabla 4 también se observa que la presencia de coliformes (totales y fecales) en la PTAR de Obligado es considerablemente menor en el mes de septiembre (primavera) comparando con marzo (otoño).

Tabla 4. Valores de coliformes fecales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado.

Año	P1	P5	Límites máximos
2014 (toma 1)	66 000	0	<4 000
2014 (toma 2)	6 600 000	100	<4 000
2015	2 640 000	0	<4 000
2016	440 000	0	<4 000
2017 (marzo)	$1,1 \times 10^6$	<3	<4 000
2017 (septiembre)	24	14	<4 000

P1: ENTRADA

P5: SALIDA

Tabla 5. Valores de coliformes totales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado.

Año	P1	P5	Límites máximos
2017 (marzo)	$1,1 \times 10^6$	<3	SR
2017 (septiembre)	170	14	SR

P1: ENTRADA

P5: SALIDA

Parámetros físico-químicos

En la planta de tratamiento Hohenau, los sólidos en suspensión y sólidos sedimentables se encontraron dentro de los rangos establecidos (entre 0 y 2ml/g) a la salida de la PTAR. Sin embargo, los valores de DQO y DBO₅ superaron el límite máximo permisible según la Ley 1614/2000 (Tabla 6). El pH siempre se mantuvo dentro de los rangos establecidos por la norma paraguaya (entre 5 y 9).

Tabla 6. Valores de datos físico-químicos detectados en el proceso de depuración de aguas residuales domiciliarias de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau.

	Parámetros	Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
Muestreo 1 (marzo, año 2017)	Sólido en suspensión	mg/l	91	70	47	73	73	80
	Sólidos sedimentables	ml/l	1	0.1	0.1	0,4	0.4	1
	DQO	mg/l O ₂	239	168	146	172	172	<150
	DBO ₅	mg/l O ₂	148	108	91	103	103	<50
	pH	pH	8.4	7	8.6	8.5	9	5-9
Muestreo 2 (septiembre, año 2017)	Sólido en suspensión	mg/l	75	55.4	47	47	44	80
	Sólidos sedimentables	ml/l	2	0.5	0	0	0	1
	DQO	mg/l O ₂	405,6	291,7	220,6	220,6	217,04	<150
	DBO ₅	mg/l O ₂	240	190	76	76	62	<50
	pH	pH	7.78	6.99	7.82	7,24	7.8	5-9

P1: ENTRADA

P2: PILETA 1

P3: PILETA 2

P4: PILETA 3

P5: SALIDA

Con respecto a los parámetros físicos, el proceso de depuración de la PTAR de Obligado no responde correctamente al tratamiento. Los valores del pH en dos ocasiones se encontraron en el rango superior del límite máximo permisible (valor 9) remarcado en la tabla, entre los años 2014 y 2016 (Tabla 7), y superando en una ocasión el máximo permisible en las normas en el muestreo realizado en el año 2017 (Tabla 7). Con relación a los parámetros químicos, solamente los sólidos en suspensión se encontraron por debajo del límite máximo permisible según la Ley 1614/2000. Mientras que los sólidos sedimentables, la DQO y la DBO₅ presentan valores que superan los máximos permisibles (Tabla 7). Por lo tanto, se evidencia que la PTAR no es eficiente en el proceso de depuración de estos parámetros.

Tabla 7. Valores de datos físico-químicos detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado, base de datos del proveedor del servicio 2014 al 2016.

Muestreo (Año 2010)												
Parámetro	Unidades	P1		P2			P3			Máximo permisible		
pH	pH	7,8		7,8			7.7			5 - 9		
Muestreo, (año 2014-2016)												
Parámetro	Unidades	P1	P5	P1	P5	P1	P5	P5	P1	P5	P5	Máximo permisible
		2014	2014	2014	2014	2015	2015	2015	2016	2016	2016	
pH	pH	6	5	6	9	7	8	6	6	9	6	5 - 9
Sólido en suspensión	mg/l	39.6	24.6	184.8	46.2	70.4	34.8	42.4	15.5	28.4	8.4	80
Sólidos sedimentables	ml/l	-----	-----	5	0.2	3	0.8	0.1	1	0.1	0.1	1
DQO	mg/l O2	114	74	371.2	128	210.5	105	100.8	95.9	133.9	39.9	<150
DBO ₅	mg/l O2	265	34.5	175.5	39.5	159	63	49.2	46.8	60	6.6	50
Muestreo 1 (marzo, año 2017)												
Parámetro fisicoquímicos	Unidades	P1		P3		P3			P4		Máximo permisible	
pH	pH	6.9		10		10,6			9.4		5 - 9	
Sólido en suspensión	mg/l	57		63		61			35		80	
Sólidos sedimentables	ml/l	2		0,4		0,1			0.1		1	
DQO	mg/l O2	224		112		36			29		<150	
DBO ₅	mg/l O2	190		66		22			20.3		50	
Muestreo 2 (septiembre, año 2017)												
Parámetro fisicoquímicos	Unidades	P1		P2		P3			P4		Máximo permisible	
pH	pH	6.9		7,73		7,78			7.6		5 - 9	
Sólido en suspensión	mg/l	57		39		23			19		80	
Sólidos sedimentables	ml/l	2		0,2		0,1			0		1	
DQO	mg/l O2	224		259,7		195,69			174.3		<150	
DBO ₅	mg/l O2	190		24		20			8		50	

P1: ENTRADA

P5: SALIDA

Metales pesados en lodos

Los valores de los metales pesados detectados no sobrepasaron los límites establecidos en las tres normas internacionales consideradas en este estudio (Tabla 8).

Tabla 8. Concentración de metales pesados detectados en lodos de las plantas de tratamiento de efluentes domiciliarias de Hohenau y Obligado, y límites permisibles según las normas mexicana, estadounidense y de la comunidad europea.

Metales mg/Kg	M1 mg/Kg	M2 mg/Kg	NOM-004- SEMARNAT-2002		USEPA 503		Comunidad Europea	
			Excelente mg/Kg	Bueno mg/Kg	LG mg/Kg	CE mg/Kg	pH<7	pH>7
Cr total	79	38,5	1200	3000	3000	1200	1000	1500
Cd	< 2	< 2	39	85	85	39	20	40
Pb	70,7	28,2	300	840	840	300	750	1200
Hg	0,08	0,05	17	57	57	17	16	25

M1: muestra planta de tratamiento de efluentes domiciliarios de Hohenau

M2: muestra planta de tratamiento de efluentes domiciliarios de Obligado

Cr total: Cromo Total

Cd: Cadmio

Pb: Plomo

Hg: Mercurio

LG: límite general

CE: calidad excelente

Se detectó la presencia de trazas de Cr total, Pb y Hg. Si bien las concentraciones encontradas no sobrepasan los límites de rangos permisibles en las normas internacionales NOM-004 -SEMARNAT-2002 (Mexicana), USEPA 503 (Estados Unidos) y CEC (norma de la Comunidad Europea), se desconoce el origen de la detección de estas trazas. No se detectó presencia de Cd según los métodos aplicados, siendo su límite de cuantificación 2,0 mg/kg y límite de detección 1,0 mg/kg.

Discusión

En este estudio se evidencia la contaminación del agua subterránea por coliformes totales en áreas de recarga del acuífero Guaraní, al igual que en otros estudios realizados en Itapúa (PAS-PY, 2012) y Cordillera (Sotomayor *et al.*, 2013). Entre las causas más comunes de la contaminación bacteriana del agua subterránea se puede citar a la construcción inadecuada de los pozos, al mantenimiento deficiente de los mismos, además de la vulnerabilidad a la contaminación intrínseca de un acuífero como la profundidad del nivel freático, la geología, etc. (Rodríguez *et al.*, 2012). De acuerdo a Larroza *et al.* (2005), la construcción inadecuada de los pozos, también se debe al sello sanitario deficiente o a la falta de tapa en los pozos cavados.

La mayor presencia de coliformes en las aguas subterráneas contenidas en la formación Misiones en comparación con la Formación Alto Paraná podría explicarse por la porosidad y la textura del material geológico. Los acuíferos de la formación Misiones están constituidos por

materiales no consolidados o aluviales, por lo tanto, existe una mayor dispersión de la corriente subterránea en el material poroso y mayor susceptibilidad a la contaminación. Otros estudios también indicaron que el área donde subaflora la arenisca Misiones es altamente susceptible a la contaminación de las aguas subterráneas en comparación a los afloramientos de basalto de la Formación Alto Paraná (Veroslavsky & Manganelli, 2018; Musálem et al., 2015; Esenköbl, 2013; SAG-Py, 2009; PSAG 2009). Sin embargo, Fariña et al. (2004) advierten que la Formación Alto Paraná igualmente tiene una alta vulnerabilidad puntual a la contaminación en las fracturas de la matriz rocosa (Arizabalo, 1991). Por otra parte PAS-PY (2012), indica que una forma directa de contaminación de las aguas subterránea se da a través de los pozos sépticos (pozos ciegos) en zonas urbanas o letrinas en zonas rurales, es así que el agua residual es vertida directamente al agua subterránea, omitiendo la capacidad de purificación del suelo. Cabe mencionar que las bacterias fecales tienen un tiempo de supervivencia máximo de aproximadamente 50 días fuera del cuerpo humano, las fuentes de contaminación tienen que estar, por tanto, en las cercanías de los pozos.

Con relación a los parámetros físicos-químicos, los resultados indican que los mismos se encuentran por debajo de los rangos permisibles según la OMS (2011) a nivel internacional y a nivel nacional según la Ley n.º 1614/2000 (ERSSAN, 2000). Estos resultados también coinciden con otros estudios a nivel nacional (PAS-PY, 2012) e internacional (Papa et al., 2017; Rodríguez et al., 2012; Pacheco et al., 2004;).

En ambas (PTAR) se constató un proceso inadecuado de depuración según los análisis laboratoriales. También a la salida de estos sistemas se

pudo percibir una disminución en el olor y color de las aguas tratadas, confirmando estos resultados a nivel cualitativo según Arroba & Ávila (2015) y Morillo *et al.* (2005). Con respecto a los parámetros químicos, a pesar de que los valores disminuyeron luego del tratamiento, la reducción no es suficiente para verter el efluente al cauce hídrico receptor según las normas. Esta situación podría deberse a ineficiencias en la operación de las PTAR, al mal diseño de las mismas y/o a la falta de monitoreos permanentes (Mercado, Cossío & Copa, 2020; Mahlnecht, 2013). A nivel internacional, en otros países reportan que la principal causa de contaminación en ríos está se debe al vertido de afluentes cloacales sin tratar, a la falta de redes recolectoras y/o fugas en las redes ya existentes (Hirata *et al.* 2019; Zimmermann, 2013).

A pesar de que los resultados de este estudio no son alarmantes en relación a las trazas de metales pesados detectadas en los lodos de ambas PTAR porque no sobrepasan los límites permisibles (OMS, 2011), la presencia de algunos metales llama la atención debido a que se desconoce su origen y pueden ser vertidos a los recursos hídricos receptores durante el proceso.

Conclusiones

El agua subterránea de los pozos que abastecen a la población de los centros urbanos de Obligado y Hohenau se encuentra contaminada por coliformes totales. Esta contaminación afecta la calidad del agua del acuífero Guaraní y está directamente relacionada con la formación

geológica, siendo más susceptible a contaminarse la formación Misiones (areniscas).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales instaladas en ambas ciudades tienen un sistema deficiente de depuración de parámetros microbiológicos y físico-químicos. Se detectó presencia de Pb, Cr total y Hg en los lodos de ambas plantas de tratamiento, sin embargo, las concentraciones no sobrepasaron los rangos permisibles a nivel internacional. A pesar de ello, estos resultados resaltan la necesidad de identificar el origen de estos metales, porque al estar presentes en los lodos, los mismos pueden ser transportados hasta los cauces hídricos y concentrarse en los lechos de los ríos. No se detectó presencia de Cd en los lodos de las plantas de tratamiento.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la Universidad Nacional de Itapúa-Escuela de Postgrado. A la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Campus de Itapúa, Facultad de Ciencias Agropecuarias. A los Directivos y funcionarios de la Junta de Saneamiento Ambiental de Obligado y la Junta de Saneamiento de Hohenau.

Referencias

- Arizabalo, R., Godínez, G. (1991). La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos. Cuadernos del Instituto de Geofísica Nro. 6. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 34 p. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316004500_La_contaminacion_del_agua_subterranea_y_su_transporte_en_medios_porosos
- Arroba, C., & Ávila, D. (2015). Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales de un campus universitario. Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás. 84 p. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9408/%C3%81vilaDavid2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CEC. (1986). Directive concerning sludge amendments. Council of the European Communities. Official Journal, June 12, L181/6.
- CIC. (2016). CIC Cuenca del Plata. Recuperado el 20 de agosto de 2017, de La Cuenca del Plata: <https://cicplata.org/es/una-cuenca-cinco-paises/>
- CIC. (2004). *Visión de los Recursos Hídricos en Paraguay*. Informe final, Asunción. Obtenido de <https://www.geologiadelparaguay.com.py/Vision-de-los-Recursos-Hidricos-en-Paraguay.pdf>

Di Rienzo, J. A., Casaneves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2017). Software estadístico InfoStat. Estadística y Biometría.

Eisenkölbl, A. (2013). Delimitación de perímetros de protección para pozos artesianos en suelos de formación Misiones. Trinidad. Itapúa. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Itapúa, Postgrado, Encarnación. Disponible en: https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/Beca15-25_Alicia_Einsenkobl.pdf

ERSSAN. (2000). Tarifario del Servicio de agua potable y Alcantarillado Sanitario Ley N ° 1 .614 / 2000 Reglamento de Calidad en la Prestación del Servicio Permisionarios. Disponible en: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/1694/ley-n-1614-general-del-marco-regulatorio-y-tarifario-del-servicio-publico-de-provision-de-agua-potable-y-alcantarillado-sanitario-para-la-republica-del-paraguay>

ESRI. (2017). ArcGIS PRO. Recuperado de Cómo funciona Dirección de flujo. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>

- Fariña, S.; Vassolo, S.; Cabral, N.; Vera, S.; Jara, S. (2004). Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica del sistema acuífero guaraní (sag) en la Región Oriental del Paraguay al sur de la latitud 25°30'. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 24 p. Disponible en: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=pLyzqZoAAAAJ&citation_for_view=pLyzqZoAAAAJ:2osOgNQ5qMEC
- García, B., & Faggioli, A. (2018). Problemática acuífera en el contexto sudamericano del siglo XXI. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 1(3), 103-110. Disponible en: <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/60>
- INTN. (2001). Organismo Nacional de Certificación y Normalización del Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología. Norma Paraguaya NP 24 001 80 agua potable especificaciones. 5ª Ed. Asunción.
- Larroza, F., Fariña, S., Baez, J., & Cabral, N. (2005). Evaluación Hidrogeológica y protección a la contaminación del agua subterránea en la Reserva de la Biosfera del Bosque Mbaracayu (RBBMb), 1-21. Disponible en: <http://www.geologiadelparaguay.com.py/Evaluaci%C3%B3n-Hidrogeol%C3%B3gica-Reserva-Mbaracay%C3%BA.pdf>

- Gorostiaga, O., González E., de Llamas, P., Molinas, A., Franco, E., García, S., Ríos, E.(1995). Geología del Paraguay. Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de la Región Oriental del Paraguay (PRUT). Proyecto de racionalización del uso de la tierra (Préstamo nro. 3445-pa). Disponible en: <http://www.geologiadelparaguay.com/Estudio-de-Reconocimiento-de-Suelos-Regi%C3%B3n-Oriental-Paraguay.pdf>
- Mahlknecht, J. (marzo de 2013). Centro del Agua para América Latina y el Caribe. Disponible en: Los recursos hídricos en América Latina: <https://www.academia.edu/RegisterToDownload/UserTaggingSurvey>
- Mercado Guzmán, Á., Cossío Grágeda, C., & Copa Mitma, M. (marzo de 2020). Eficiencia vinculada a la operación y mantenimiento de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en Cochabamba, Bolivia. 9(4). Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892020000100004&script=sci_arttext
- MOPC. (2018). Plan Nacional de Agua Potable y Saneamiento. Plan Nacional , Ministerio de Obras Publicas y Comunicación-Dirección de Agua Potable y Saneamiento, Asunción. Disponible en: <https://siaparaguay.ine.gov.py/data/archivos/3.%20Plan%20Nacional%20de%20Agua%20Potable%20y%20Saneamiento.pdf>

- Morillo, F., & Fajardo, E. (2005). Universidad Nacional de Colombia. Estudio de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3471/fernandacristinamorilloleon.2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Musálem, K., McDonald, M., Jiménez, F., & Laino, R. (2015). Groundwater Vulnerability Mapping in Two Watersheds Affected by Yacyreta Dam in Paraguay. *Tecnología y Ciencias del Agua* VI(6), 49-61. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222015000600049&script=sci_arttext&tlng=en
- OMS. (2011). Guidelines For Drinking-Water Quality - 4th. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf
- Pacheco Ávila, J., Cabrera Sansores, A., & Pérez Ceballos, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería Revista Académica*, 8(2), 165-179. Disponible en: <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/diagnostico.pdf>
- Papa, J., Castellarin, J., & Sánchez, J. (2017). La calidad del agua subterránea en el distrito Monje (Departamento San Jerónimo) Santa Fe. INTA. Disponible en: https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/1925/INTA_CRSantaFe_EEAOliveros_Papa_JC_La_calidad_del_agua_subterranea_en_el_distrito_Monje.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- PAS-PY. (2012). Agua y Agricultura Cuenca la Cuenca del Arroyo Capiibary. Informe técnico, Cooperación República del Paraguay-República Federal de Alemania, PROYECTO "MANEJO SOSTENIBLE Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN PARAGUAY" (PAS-PY), Asunción. Disponible en: <http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2018/06/Informe-Final-Capiibary.pdf>
- Plan Nacional de Desarrollo Paraguay 2030. (2014). Disponible en: Gobierno Nacional: <https://www.stp.gov.py/pnd/wp-content/uploads/2014/12/pnd2030.pdf>
- PSAG. (2009). Avances en el Conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní. Geología P&T. Informe Final Piloto Itapúa. Montevideo. Disponible en: <http://www.ceregas.org/publicaciones/proteccion-ambiental-y-desarrollo-sostenible-del-sistema-acuifero-guarani-sag/>
- Rodríguez, S., Gauna, L., Martínez, G., Acevedo, H., & Romero, C. (2012). Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua. Terra Latinoamericana 30, 111-119. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000200111
- SAG-PY. (2009). Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Informe Técnico. Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos, Secretaria del Ambiente, Paraguay; Insituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales, BGR - Alemania. Disponible en: https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Guarani/sag-py_vol1_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4

- SEAM. (2002). Resolución Nro.222/02. Por la cual se establece el padrón de calidad de las aguas en el territorio nacional. Secretaría del Ambiental, Paraguay Disponible en: http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2019/05/Resolucion_222_02-Padr%C3%B3n-de-calidad-de-las-aguas.pdf
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana (NOM004-SEMARNAT-2002). Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=736434&fecha=18/02/2002
- Sotomayor, F., Villagra, V., Cristaldo, G., Silva, L., & Ibáñez, L. (2013). Determinación de la calidad microbiológica de las aguas de pozo artesiano de distritos de los departamentos Central, Cordillera y municipio Capital. Mem. Inst. Investing. Cienc. Salud, 11(1), 5–14. Disponible en: <http://archivo.bc.una.py/index.php/RIIC/article/view/111>
- USEPA, (1995). Standard for the use and disposal of sewage sludge; 40 CFR Parts 403 and 503. United States Environmental Protection Agency. Disponible en: https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a_plain_english_guide_to_the_epa_part_503_biosolids_rule.pdf

- Veroslavsky, G. & Manganelli, A. (2018). Zonificación del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay: Una guía orientativa para su gestión y protección ambiental. *Aqua-LAC*, 10(2), 61-80. Doi: 10.29104/phi-2018-aqualac-v10-n2/06
- Zarrilli, Á. (2018). *Cuenca del Plata: ríos, planicies y sociedades en el Cono Sur. Revista de Historia Regional*, 23(1), 7-36. Doi: 10.5212/Rev.Hist.Reg.v.23i1.0001
- Zimmermann, S. (2013). Situación del Agua en América latina, Situación del agua en América Latina, Conferencia sobre Agua en Ottawa, Capítulo Argentino: Club de Roma, Canadá. 4 p.