

Determinación de los niveles de salinidad del Acuífero Patiño

Determination of the salinity levels of the Patiño Aquifer

Moisés Alejandro Gadea Villalba*

*Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Geología. Email: moi7moses@yahoo.com.

Resumen: Como resultado de un muestreo sistemático, procurando cubrir extensiva y equitativamente el área de exposición del Grupo Asunción en su margen oriental, se ha verificado la existencia de aguas dulces pertenecientes al Acuífero Patiño asertivamente potables para consumo humano como predominio. Así mismo, se han reconocido pozos con aguas subterráneas saladas, con características físico-químicas propios de acuíferos chaqueños en la Región Oriental, en el banco San Miguel de Asunción y en el sector NW ribereño de la ciudad de Limpio. Determinando valores de conductividades eléctricas y de pH intermedios que caracterizan ambos acuíferos en una estrecha faja con dirección ENE-WSW, se considera como geografía de interdigitación subterránea entre ambos acuíferos y consecuente salinización de las aguas del Acuífero Patiño.

Palabras Clave: *Acuífero Patiño, Salinidad, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, pH.*

Summary: As a result of systematic sampling, trying to cover extensively and equally the exposure area of Asunción Group at its eastern margin, it has been verified the presence of fresh water which belongs to Patiño Aquifer potable for human consume as predominant. Likewise, it has been recognized wells with subterranean brackish water, with physicochemical characteristics of chaqueños aquifers in Region Oriental, on San Miguel bank in Asunción and on the NW riverside sector in the city of Limpio. Determining middle values of electric conductivities and pH which characterizes both aquifers on a thin belt with direction ENE-WSW, it is considered as geography of interdigitation between both aquifers and consequent salinization of Patiño Aquifer.

Key words: *Patiño aquifer, salinity, electric conductivity, dissolved solids, pH.*

Introducción

La República del Paraguay se localiza entre los paralelos 19°S ; 28°S, y los meridianos 54°W ; 63°W, limitado en el Este y Noreste por Brasil; al Sur y Suroeste por Argentina; al Norte y Noroeste por Bolivia (Mapa Físico del Paraguay, 2012). Cubre una superficie de 407.000 Km² y geográficamente dividido en dos regiones por el río Paraguay, cuyas características climáticas, topográficas, geológicas, geomorfológicas y ecoambientales presentan diferencias notables. Dichas regiones se las conocen como: Occidental (Chaco) y Oriental, cuyas superficies representan aproximadamente el 60 y 40% (Eckel *et al.*, 1959).

Poblacionalmente del valor cercano a 7.000.000 de habitantes, en la Región Oriental se concentra casi en un 95%. El Chaco Paraguayo, debido a sus condiciones climáticas (altas temperaturas), accesos y escasez de agua potable, hacen que difícilmente resulte atractivo el establecimiento de

nuevos polos de desarrollo y se encuentre en su mayor parte inhabitado.

El país en conjunto, se destaca por ser en su mayor porción limitado naturalmente por cursos hídricos importantes, como ser los ríos Paraná, Paraguay, Pilcomayo y Apa, cabría asignarle el apelativo de mesopotámico. Superficialmente surcado por numerosos ríos, arroyos y afluentes de menor caudal; así mismo con presencia de lagos, lagunas y extensos humedales, que, sumados los acuíferos de los cuales el usufructo es mayormente activo. Cabe destacar que el Paraguay es favorecido por su potencial hídrico.

Paraguay, siendo un país mediterráneo se encuentra situado en el centro de subcontinente Sudamericano entre las coordenadas geográficas decimales de latitudes -19° y -27.5°; y longitudes de -54.5 ° y -63°. Se encuentra rodeado por Bolivia al Norte y Noroeste; por Brasil al Noreste y Este; por Argentina al Sur y Suroeste (Figura 1).

Recibido: 26/07/2019 Aceptado: 28/08/2019



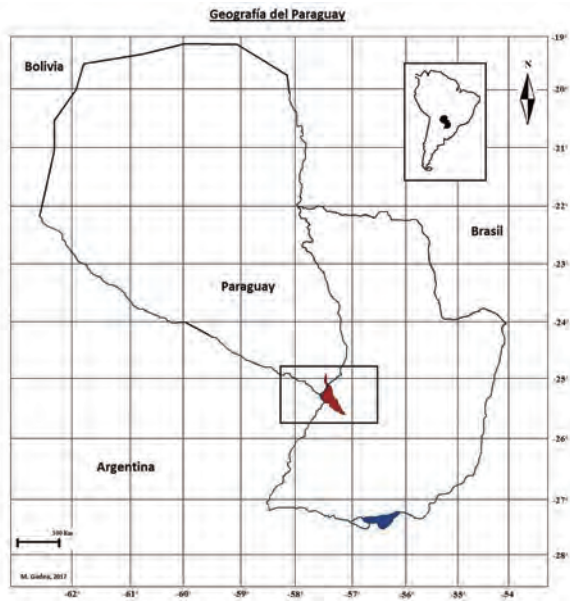


Figura 1. Ubicación del acuífero Patiño en Paraguay.

El Acuífero Patiño, cuya exposición total aproximada alcanza un valor cercano a los 1196 Km², se encuentra comprendido por dos zonas bien definidas correspondientes al Grupo Asunción que son seccionadas por el río Paraguay (Gómez Duarte, 1991).

El Grupo Asunción Oriental, cuya área de extensión mide aproximadamente 1.109 Km² (~93%), y el Grupo Asunción Occidental, de menor exposición, cercano a 87 Km² (~7%), desapareciendo bajo los sedimentos cuaternarios chaqueños en todas direcciones a excepción del Sur (Figura 2).

En la Región Occidental el Grupo Asunción ocupa una pequeña faja de forma espigada en el Sur del Departamento de Presidente Hayes desde el río Paraguay en la zona de Remansito y Villa Hayes hasta la localidad de Benjamín Aceval.

El Grupo Asunción Oriental presenta una morfología bastante similar a la de un triángulo rectángulo (Figura 3), cuyo segmento de mayor extensión une las localidades de Limpio en el departamento Central y la ciudad de Paraguarí, capital del homónimo departamento. En dicha línea imaginaria se encuentran los municipios de Luque, Areguá, Itauguá y parte de algún distrito de

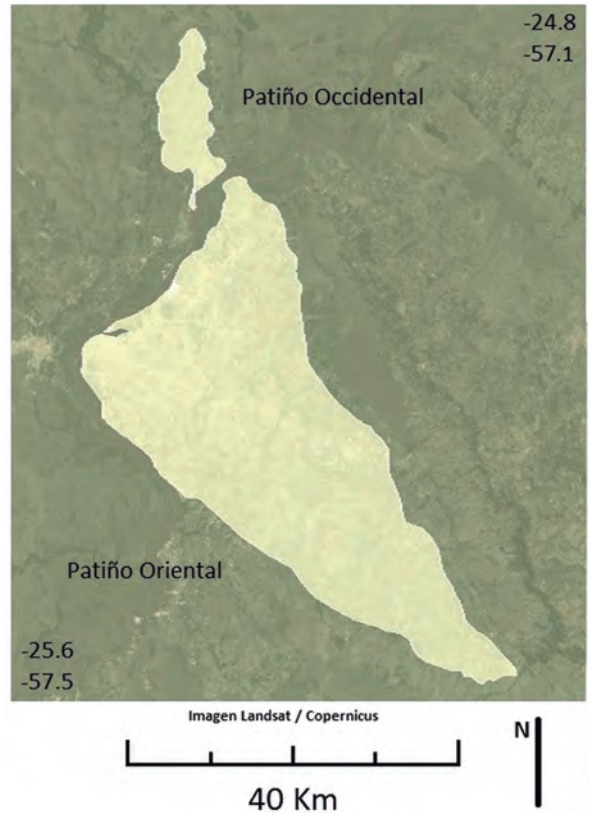


Figura 2. Extensión del acuífero Patiño.

Ypacaraí, pertenecientes al departamento Central; y cierto distrito occidental de Pirayú, que corresponde al departamento de Paraguarí.

El segmento occidental de dicho triángulo, une la ciudad de Paraguarí con el barrio Tacumbú de la ciudad de Asunción, atravesando previamente las localidades de Yaguarón, Itá, Guarambaré, Ypané, Villeta, Ñemby, San Antonio, Villa Elisa y Lambaré; todos ellos del departamento Central a excepción de Yaguarón, cuyo municipio corresponde al departamento de Paraguarí (Figura 4).

Los vértices que constituyen el segmento de la divisoria norte del triángulo se sitúa en el barrio Tacumbú de Asunción y la ciudad de Limpio. Sobre dicho segmento se encuentran numerosos barrios asuncenos, como ser Tablada Nueva, Trinidad, Puerto Botánico, Viñas Cué, Zeballos Cué y Loma Pytá, hasta los asomos del municipio de Mariano Roque Alonso y finalmente Limpio.

Como es verificable en el mapa, una totalidad

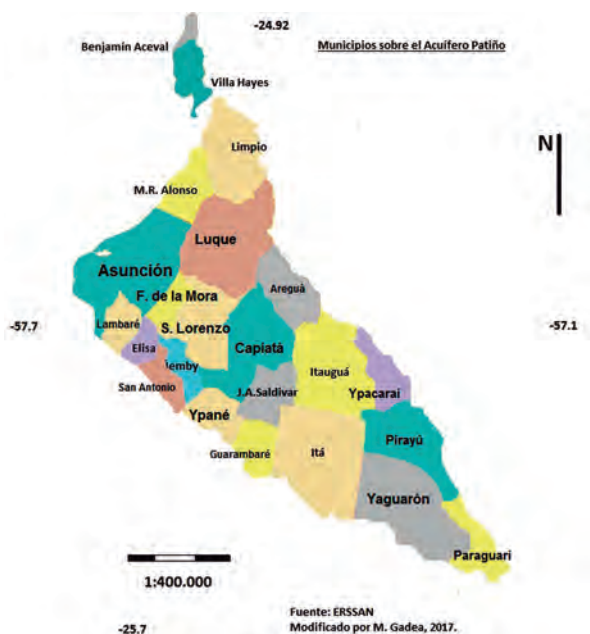


Figura 3. Distribución del acuífero Patiño respecto a municipios (Fuente: Modificado ERSSAN 2000).

de 23 municipios son coincidentes, algunos de ellos totalmente y otros de modo parcial, con las exposiciones del Grupo Asunción - el contenedor - del Acuífero Patiño. Dichos municipios pertenecen a tres departamentos, dos de los cuales se encuentran en la Región Oriental y uno de ellos en la Región Occidental.

En la Región Oriental coincide la unidad geológica con la porción Norte del departamento Central y en el sector Noroeste del departamento de Paraguari. Patiño Occidental se encuentra al Sur del departamento de Presidente Hayes.

Geología del Acuífero Patiño

Las aguas del Acuífero Patiño, están contenidas en rocas sedimentarias de edad Cretácica, formadas durante el relleno del graben de Asunción y expuestas por eventos tectónicos posteriores.

La fosa fue rellenada con materiales de variada textura; el rápido hundimiento de la estructura, sumado al reducido espacio existente para la deposición de los sedimentos y a la distancia corta de transporte, factores condicionados por una paleomorfología abrupta, dieron como

resultado la conformación de fanglomerados, ubicados principalmente en la margen oriental de la estructura, con un gran contenido de bloques y fragmentos de rocas ígneas alteradas de edad mesozoica, suprayaciendo a estos, areniscas poco consolidadas, friables, con escasa matriz, o en su defecto, matriz arcillosa, en ciertos lugares, por efecto de intrusiones ígneas locales, se observa alta silicificación, quedando las unidades geológicas, expuestas como cerros testigos, como el caso de los cerros, Ñanduá, Yaguarón y otros (MOPC-BGR, a1998).

Los primeros en caracterizar estos sedimentos, Harrington (1950), Eckel *et al.* (1959) y otros, por su parecido, lo relacionaron con la Formación Misiones (continente del acuífero Guaraní), siendo Spinzi (1983), quien denomina conglomerado Patiño a la secuencia fanglomerádica aflorante en las cercanías del cerro Patiño (MOPC-BGR, 1998). Sin embargo, el Proyecto PAR 83/005 (1986), denominó Formación Patiño a la totalidad del relleno de la fosa del área de Asunción, Gómez (1991), y separa a las unidades geológicas del relleno en tres Formaciones: Patiño, Cerro Perú e Ita Pytã Punta, conformando el Grupo Asunción.

Según DeGraff. y Orué, (1984), el rift de Asunción evoluciona durante el Ciclo Tectónico Sudatlántico (Cretácico Superior 100 a 60 m.a.),

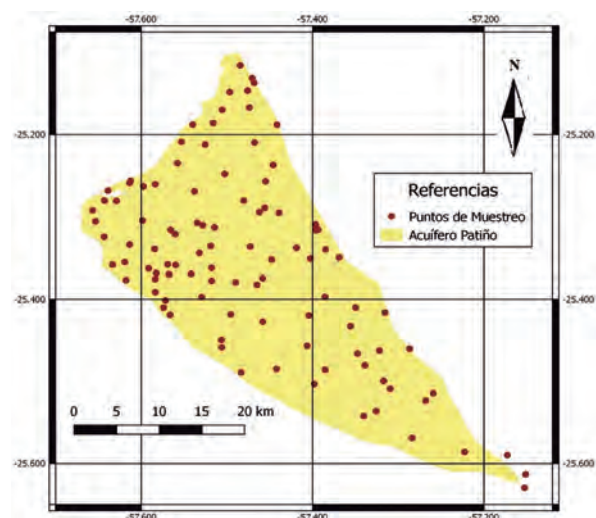


Figura 4. Lugares de muestreo.

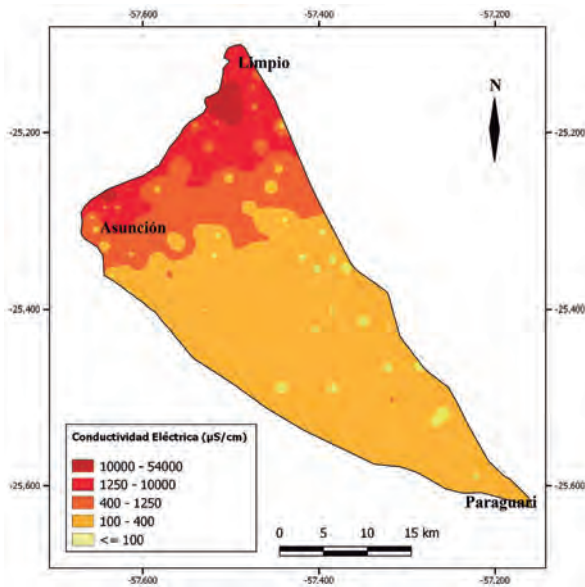


Figura 5. Mapa de conductividad eléctrica en el Acuífero Patiño.

y vuelve a reactivarse durante el Ciclo Tectónico Andino (Terciario Temprano 65 a 23 m.a.) (Figura 5), donde adquiere su morfología actual. Entre los ciclos mencionados se produce el relleno de la fosa tectónica con sedimentos de los bordes de la misma (MOPC-BGR, 1998).

Wiens *et al.* (1993) identifican tres ciclos de deposición gradacional para la fosa tectónica originada durante la apertura del rift de Asunción (Jurásico tardío – Eoceno) el ciclo inferior, caracterizado por conglomerados y fanglomerados de sedimentación caótica, el ciclo medio de sedimentación con aporte de material magmático alcalino de edad cretácico, y por último, un ciclo superior, constituido por areniscas heterogéneas, denominaron al conjunto como Formación Palacios.

De acuerdo al mismo autor, el ambiente de deposición de estos sedimentos corresponde, en los bordes abruptos, a abanicos aluviales. A medida que se alejan del mismo, ríos torrentosos y luego amplios ríos entrelazados al alcanzar la planicie; el depósito de sedimentos, al ir perdiendo energía, es grano decreciente desde fanglomerados de bloques, conglomerados hasta areniscas puras.

Calidad del Agua

Con respecto a las características hidroquímicas de las aguas del acuífero, el proyecto PAR 83/005 (1986) señala que las mismas son, por lo general, de buena calidad, excepto las áreas de las ciudades de Limpio, Mariano Roque Alonso y alrededores de Asunción, en estas el tipo de agua presente corresponde a la categoría Sulfato Clorurada Sódica, lo cual indica la presencia de aguas bastantes mineralizadas.

Por su parte SENASA-TNO (2001), basado en el análisis de más de 100 muestras de agua, señala que, las mismas tienen grado bajo de mineralización, con excepción de las aguas presentes en una faja de 2 a 8 km a lo largo del río Paraguay, donde en profundidad se ha comprobado o se asume la presencia de agua salobre o salada.

Las principales características físicas de las aguas del acuífero Patiño son: temperatura, en promedio de 25°C, el pH indica condiciones ligeramente ácidas. Con respecto a la conductividad eléctrica, esta es muy variada pero, en la mayoría de los casos - 75 % de las muestras - son muy bajas, indicando contenido de sólidos disueltos mínimos. Sin embargo, algunas muestras registraron valores altos de conductividad eléctrica, especialmente aquellas tomadas en los puntos cercanos al río Paraguay, con respecto a la turbidez esta, por lo general, es muy baja aunque se han registrado algunas con valores altos de turbidez (SENASA – TNO, 2001).

Existe gran variedad de tipos de agua, predominando el tipo Bicarbonatadas en las aguas con bajo contenido de sólidos disueltos, mientras que, el tipo Cloruradas Sódicas, lo hacen en las muy mineralizadas. El nitrógeno se presenta en forma de nitratos y amoníaco, de todas las muestras analizadas, solo tres contenían nitratos en cantidades que podían indicar contaminación ligera (SENASA – TNO, 2001).

Materiales y métodos

Determinación del tipo de agua por su total de sólidos disueltos

Durante el muestreo fueron colectadas aguas preferentemente subterráneas, excluyendo los cursos

hídricos o acumulaciones superficiales en forma de lagunas o esteros. Las aguas medidas necesariamente han de ser crudas, evitando la alteración de la misma por tratamientos para consumo humano, como ser la cloración.

El Acuífero Patiño Occidental o, como Gómez (1991) lo denomina, Bloque Benjamín Aceval, no fue incluido como área de muestreo.

Las lecturas con el *GPS* y conductímetro realizados en cada sitio consistían en determinar los campos, en donde se incluyen los codificados geográficos y los datos relevantes para su posterior interpretación.

Se intentó muestrear en una malla la mayor equidistancia posible entre los puntos (Figura 4), *a priori* teniendo como referencia trabajos precedentes, especialmente el Proyecto FESH 2001 (TNO 2001).

En la Tabla 1 se especifican los valores críticos que clasifican los tipos de aguas en el aspecto de su salinidad. Conforme la concentración del TSD en el agua, se conocerá su carácter dulce o salino.

Resultados y discusión

En la Tabla 2 se describen los valores en detalle del pozo, localidad, y lecturas efectuadas durante el muestreo. El presente trabajo sus conclusiones se sostienen en base a estos valores obtenidos.

En la Tabla 2 se representa la agrupación de todos los valores de georreferenciamiento y datos finales obtenidos por medio del instrumental. A partir del análisis de dicha tabla se efectúan las evaluaciones. Complementariamente se grafican los lugares de muestreo en la Figura 4.

El 96% de las aguas de los pozos presentan valores o iguales a 1000 ppm de Totales de Sólidos Disueltos, por lo cual se determina el predominio de aguas dulces en la zona de estudio, en consideración a los criterios de clasificación de Davis y De Wiest (1967).

El 4% de las aguas de los pozos restantes fueron hallados con características salobres o de muy alta salinidad, de propiedades organolépticas bien sensibles en cuanto al sabor y olor; todos ellos en aproximación o en la ribera del río Paraguay.

De acuerdo a las características físico-químicas

Tabla 1. Tipo de agua subterránea en base al total de sólidos disueltos (Fuente: Davis y De Wiest, 1967).

Tipo de Agua	TDS en mg/l (ppm)
Dulce	≤1.000
Salobre	1.000 - 10.000
Salada	10.000 - 100.000
Salmuera	≥100.000

observadas en el muestreo, se ha constatado un sesgo de comportamiento bien delineado en las aguas de los pozos en casi toda el área del Grupo Asunción. Se trata de las consabidas aguas dulces del Acuífero Patiño, que se destacan por su potabilidad siendo de consumo masivo y consuetudinario.

Por otro lado, durante el recorrido se han localizado pozos con aguas de características completamente diferentes en cuanto sus parámetros medidos. Se trata de los pozos 79 y 94, localizados en el Bañado Norte* (Banco San Miguel) y Surubí y Limpio respectivamente.

El pozo piezométrico de monitoreo 38 de la SEAM presenta salobridad, y fue el único lugar donde no fue posible el muestreo. Para el mismo se adjuntaron datos de conductividad eléctrica y pH del informe técnico de la SEAM correspondiente al año 2016, y fueron incluidos en la tabla, tabulado como el pozo número 70, y que se localiza en Villa Jardín – Limpio.

Así mismo, se han encontrado aguas con características sucedáneas a las del Acuífero Patiño, que bordean los rangos de potabilidad para el consumo humano (en algunos casos impracticables) según el Protocolo de la ERSSAN, siendo en promedio ligeramente salobres. Son los pozos 20, 54, 56, 57, 80 y 85, también en los arrimos al río Paraguay.

Por medio de los datos obtenidos, hace suponer de que se tratan de aguas subterráneas completamente diferentes, de distintos acuíferos, por lo cual se han agrupado de acuerdo a sus características en conformidad a los valores de concentración de los Totales Sólidos Disueltos; siendo este parámetro el firmante del tipo de agua en cuanto a su ionización, y se describe del siguiente modo: Dentro del primer grupo, se asocia a aquellos pozos con

Tabla 2 (inicio). Detalles del muestreo.

P#	Localidad	Municipio	Latitud	Longitud	pH	C.E ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TSD (ppm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Pf. (m)
1	Parque Ñú Guazú	Luque	-25.269092°	-57.537900°	6,3	277	182	24.7	111,0
2	Sr. Montanía	M. R. Alonso	-25.187864°	-57.539905°	5,0	326	215	25.6	15,0
3	Ing. Roa	V. Elisa	-25.357970°	-57.569162°	5,9	471	311	23.4	S/D
4	JS Mbocayaty	Ñemby	-25.369941°	-57.567677°	5,5	148	98	24.6	192,0
5	Paí Ñú 1	Ñemby	-25.358637°	-57.559862°	5,8	165	109	25.5	201,0
6	ESSAP	Paraguarí	-25.613245°	-57.151330°	5,9	131	86	28.2	70,0
7	ESSAP 2	Paraguarí	-25.589670°	-57.172749°	5,4	76	50	24.5	S/D
8	JS Peguahó	Paraguarí	-25.585810°	-57.222472°	6,2	95	63	23.9	S/D
9	Sr. R. Cogliolo	S. Antonio	-25.409975°	-57.573870°	5,3	120	79	25.7	S/D
10	Flia. Arévalos	S. Antonio	-25.401378°	-57.571672°	5,3	232	153	24.1	S/D
11	Colegio San Blas	S. Antonio	-25.418845°	-57.566295°	5,8	159	105	25.4	S/D
12	JS Pirayú	Pirayú	-25.514357°	-57.259149°	6,1	59	39	24.7	S/D
13	JS Ypacaraí	Ypacaraí	-25.416012°	-57.315539°	6,2	259	171	25.1	195
14	JS Itauguá	Itauguá	-25.409857°	-57.349796°	6,2	50	33	24.8	148
15	Lav. Punto Brillo	F. de la Mora	-25.321222°	-57.560505°	5,3	283	170	24.6	S/D
16	Record Electric	Asunción	-25.316163°	-57.565668°	5,0	190	125	23.4	S/D
17	Dr. Félix Villar	S. Lorenzo	-25.362250°	-57.517847°	5,0	217	143	23.1	111
18	Sr. Rufino Gullón	S. Lorenzo	-25.377584°	-57.517674°	6,0	156	103	23.0	110
19	Tablada Nueva	Asunción	-25.263192°	-57.597508°	7,6	412	272	26.0	S/D
20	Trayecto a Mbiguá	Asunción	-25.258855°	-57.613465°	8,1	923	601	24.9	S/D
21	Copetrol - Colón	Asunción	-25.280330°	-57.642942°	8,4	252	166	25.2	S/D
22	Com. de Ingeniería	Asunción	-25.305606°	-57.653347°	6,0	124	82	25.0	120
23	FaCEN - UNA	S. Lorenzo	-25.335516°	-57.518995°	5,4	41	27	23.0	S/D
24	JS 3 de Mayo	Luque	-25.294553°	-57.462002°	6,1	106	70	23.5	S/D
25	Aguatería Cencerro	Luque	-25.289263°	-57.455793°	5,3	332	219	24.0	S/D
26	SENASA - Pozo 3	Areguá	-25.315875°	-57.393360°	7,0	165	109	25.1	S/D
27	SENASA - Pozo 5	Areguá	-25.309527°	-57.396370°	5,7	44	29	24.7	S/D
28	SENASA - Pozo 6	Areguá	-25.316581°	-57.396125°	6,5	105	69	24.8	S/D
29	JS Valle Pucú	Areguá	-25.295274°	-57.439068°	5,8	61	40	25.2	142
30	Club River Plate	Asunción	-25.304502°	-57.598525°	5,8	370	244	24.0	S/D
31	Prof. González	Lambaré	-25.355257°	-57.619277°	5,4	253	167	24.0	S/D

Tabla 2 (continuación). Detalles del muestreo.

P#	Localidad	Municipio	Latitud	Longitud	pH	C.E ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TSD (ppm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Pf. (m)
32	Aguat. S.Miguel	Lambaré	-25.358303°	-57.633594°	5,2	72	48	25.2	90
33	Paí Ñú P4	Ñemby	-25.369198°	-57.541831°	6,9	141	93	14.1	190
34	JS - Capiatá	Capiatá	-25.352095°	-57.447740°	6,4	131	86	25.1	152
35	JS CONAVI P. 3	Itauguá	-25.396918°	-57.385401°	6,4	82	54	24.1	S/D
36	JS Las Piedras	Itá	-25.456634°	-57.406370°	5,4	117	77	24.6	136
37	Aveiro	Itá	-25.485697°	-57.385186°	6,1	55	36	24.9	S/D
38	JS - Itauguá Guazú	Itauguá	-25.432735°	-57.355760°	6,4	142	94	24.5	130
39	JS Curupicaity	Itá	-25.503100°	-57.397988°	6,2	108	71	24.7	S/D
40	Sr. Cecilio Picagua	Guarambaré	-25.484660°	-57.442201°	5,2	45	30	23.4	S/D
41	Flia. García	Yaguarón	-25.568836°	-57.283800°	5,7	265	175	24.3	80
42	JS Ypané P3	Ypané	-25.449342°	-57.506532°	6,6	97	64	25.7	152
43	Aguatería S. María	Itá	-25.536103°	-57.325895°	6,4	138	91	25.1	110
44	Huertal - Arrua í	Itá	-25.541967°	-57.340384°	6,6	356	235	25.0	S/D
45	Sr. Benítez	Guarambaré	-25.489018°	-57.483407°	6,0	300	198	25.0	S/D
46	JS Ypané P1	Ypané	-25.458383°	-57.506053°	6,7	116	77	27.0	122
47	JS Ybyraró P1	J. A. Saldívar	-25.427200°	-57.458342°	5,1	96	63	23.9	152
48	Escuela Amistad	Luque	-25.280146°	-57.480282°	5,4	167	110	22.0	154
49	JS Marín Caaguy	Luque	-25.237105°	-57.445987°	6,7	214	141	24.3	116
50	Ag. Emmanuel	Limpio	-25.209675°	-57.467656°	5,8	353	233	24.5	S/D
51	JS Cañada Garay	Luque	-25.257027°	-57.454868°	5,2	78	51	24.4	S/D
52	Ag. Manantial	Limpio	-25.188037°	-57.441491°	5,5	68	45	24.0	S/D
53	JS Limpio P1	Limpio	-25.166950°	-57.473705°	5,8	252	166	21.7	150
54	JS Rincón	Limpio	-25.136814°	-57.468192°	5,9	1223	734	24.3	S/D
55	JS Piquete C. - P. 2	Limpio	-25.131199°	-57.470422°	6,3	451	298	23.0	S/D
56	Pozo Caballero	Limpio	-25.115639°	-57.484458°	5,5	1163	768	23	3
57	TGL Paraguay	M. R. Alonso	-25.208821°	-57.553020°	6,7	1276	842	19	S/D
58	JS Rincón	Ñemby	-25.397166°	-57.529290°	5,8	94	62	23,3	128
59	Aguatería Cencerro	Capiatá	-25.382420°	-57.464940°	5,5	178	118	23	S/D
60	5ta Compañía	Capiatá	-25.374566°	-57.458319°	5,3	225	149	22,2	S/D
61	Ag. S. Domingo	San Lorenzo	-25.313028°	-57.514488°	6,0	51	34	21,4	S/D
62	Agrog. S.Gabriela	F. De La Mora	-25.310478°	-57.528197°	5,6	197	130	19,1	S/D

Tabla 2 (continuación). Detalles del muestreo.

P#	Localidad	Municipio	Latitud	Longitud	pH	C.E ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TSD (ppm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Pf. (m)
63	Sr. Fernández	Paraguarí	-25.629520°	-57.152483°	5,7	111	73	23,5	S/D
64	Res. Universitaria	San Lorenzo	-25.344228°	-57.532150°	5,9	227	150	20	100
65	Caraguatayty	Itá	-25.465899°	-57.347677°	6,0	109	72	20	S/D
66	Flia. Cabrera	Itá	-25.480210°	-57.338900°	7,0	158	104	20	S/D
68	Aguatería BR	Pirayú	-25.460060°	-57.286710°	5,6	70	46	23,3	72
69	Flia. Báez	Yaguarón	-25.508800°	-57.309430°	6,3	108	71	23,6	42
70	Villa Jardín	Limpio	-25.148100°	-57.496660°	6,9	14.820	9.781	S/D	30
71	Flia. Lezcano	Yaguarón	-25.499240°	-57.317100°	6,4	420	277	14,8	50
72	Flia. Bogarín	Yaguarón	-25.523240°	-57.267910°	6,3	77	51	24	100
73	JS Aldama Cañada	J.A. Saldivar	-25.419650°	-57.404260°	6,6	66	44	24	130
74	Flia. Carrillo	V. Elisa	-25.375448°	-57.583575°	7,4	128	85	21	S/D
75	JS Estanzuela	Itauguá	-25.349500°	-57.369150°	5,8	42	28	24	91
76	Huerta Sr. Ferreira	Areguá	-25.339850°	-57.384770°	5,8	51	34	24,1	S/D
77	Campamento Oasis	Areguá	-25.351020°	-57.402580°	5,7	48	32	24	S/D
78	Granja Mi Retiro	Areguá	-25.338000°	-57.418800°	6,1	47	31	21,7	S/D
79	Club Mbiguá	Asunción	-25.268170°	-57.638780°	7,9	28.600	18.876	24,4	100
80	C.E. Caacupé mí	Asunción	-25.256310°	-57.612540°	8,3	3.245	2.142	18,4	80
81	Iglesia MDV	Fdo. D L Mora	-25.307430°	-57.534608°	7,3	262	173	23,2	30
82	Flia. Ruíz Díaz	Limpio	-25.185803°	-57.515996°	5,7	229	151	25,2	85
83	Esc. Loma Merlo	Luque	-25.247770°	-57.502550°	6	88	58	23,2	S/D
84	Aguatería AIA	M.R. Alonso	-25.212060°	-57.525380°	5,2	395	261	25,1	200
85	Aguatería Paniagua	Limpio	-25.146400°	-57.475810°	6,2	516	341	26,9	S/D
86	Lactolanda	Fdo. D L Mora	-25.339308°	-57.584421°	5,9	193	127	22,6	100
87	Farmaco S.A.	Lambaré	-25.376862°	-57.617743°	5,5	55	36	24,3	S/D
88	Agua BES P1	V. Elisa	-25.368365°	-57.582471°	5,9	115	76	24,6	140
89	Balneario Dubai	V. Elisa	-25.362860°	-57.591307°	5,1	139	92	24,9	80
90	A. Comisión O & S	V. Elisa	-25.391266°	-57.583563°	5,8	111	73	25,5	120
91	Ag. Ysry Sati	Capiatá	-25.336450°	-57.472740°	7,4	163	108	26,4	100
92	Ag. Barrio Tarumá	Ypané	-25.418260°	-57.495540°	6,1	95	63	26,3	60
93	C. S. Trinidense	Asunción	-25.260502°	-57.583746°	7,2	145	96	25,9	100
94	Flia. Belabedoba	Limpio	-25.169720°	-57.505480°	6,7	53.600	35.376	24,5	90

Tabla 2 (final). Detalles del muestreo.

P#	Localidad	Municipio	Latitud	Longitud	pH	C.E ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TSD (ppm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Pf. (m)
95	C. G. Caballero ZC	Asunción	-25.234780°	-57.557514°	7,2	405	267	25.4	60
96	Bo. R. Brugada	Asunción	-25.280610°	-57.629010°	6,3	233	154	22.8	0
97	Flia. Aquino R.	San Lorenzo	-25.379340°	-57.489790°	5,9	155	102	12.7	100
98	Superm. Pueblo	Lambaré	-25.333890°	-57.613460°	6,5	363	240	14.6	S/D
99	Flia. Aquino	Asunción	-25.324600°	-57.643350°	6,4	103	68	24	26
100	Est. Def. del Chaco	Asunción	-25.292241°	-57.656918°	7,6	206	136	14.2	80

aguas de ≤ 1.000 ppm de Total de Sólidos Disueltos (aguas dulces); el segundo grupo a aquellos pozos cuyas aguas se encuentren entre el rango de Total de Sólidos Disueltos de ≥ 1000 ppm y 10.000 ppm (aguas salobres); y finalmente los pozos cuyas aguas superen o igualen al valor crítico de los 10.000 ppm (aguas saladas). De cada conjunto establecido se realizaron observaciones puntuales de acuerdo a los resultados.

Los grupos se establecen en función a la concentración de TSD (Tabla 1), entonces en el primer grupo se clasificarán aquellos que contengan valores a inferiores o iguales a 1.000 partes por millón. Son los pozos que contienen agua dulce.

El Acuífero Patiño para TSD ≤ 1.000 ppm – Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

El pozo con aguas de mayor conductividad eléctrica para los agrupados con aguas dulces ocurre en Mariano Roque Alonso (Tabla 3), en las cercanías del río Paraguay. Se lo interpreta como perteneciente al Acuífero Patiño fuertemente influenciado por los acuíferos chaqueños.

Los mejores valores de medición para consumo humano fueron observados en el pozo artesiano de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, con muy baja conductividad eléctrica, y precisamente aparece con el del valor mínimo en todo el conjunto de datos en lo concerniente a éste parámetro.

El valor promedio de conductividad eléctrica denota agua dulce, aunque con valores algo llamativos. Se supone a estos valores como contaminación

del acuífero por efluentes ionizados; presencia de nitratos, mineralización del agua por desplazamientos en fisuras de cuerpos ígneos y consecuente hidrólisis de silicatos y/o leves intrusiones salinas. El último argumento sería muy válido tener en cuenta en las zonas de interdigitación de los Acuíferos Patiño con los contiguos Chaqueños. Sin dudas, merece especial estudio en detalle de acuerdo a la zona.

El 94% de los pozos indican un sesgo de valores inferiores a los 300 microSiemens por centímetro. Los demás restantes muestreos con resultados diferentes tuvieron su ocurrencia en las cercanías del río Paraguay y se los atribuye con tendencia a lo salobre, por influencia de acuíferos salados, considerando ensayos químicos reportados en otros trabajos.

Para el abastecimiento masivo de agua potable existen normas de calidad para sus diferentes propiedades. Esto es variable de acuerdo a los países y organizaciones sanitarias mundiales, siendo constantemente actualizados sin diferir mucho entre sí.

En Paraguay, el ente estatal ERSSAN establece los valores admisibles óptimos para aprovisionamiento de agua a la población considerando el parámetro de conductividad eléctrica el valor crítico de 1.250 microSiemens/cm. Sólo el agua de un pozo no cumple con el requisito, y efectivamente en el lugar no se utiliza el agua sino para actividades de limpieza.

El 10% de las aguas de los pozos superan los límites recomendados. Todos aquellos lugares que superan o igualan el valor de 400 microSiemens/

Tabla 3. Pozos con aguas salobres. *) Pozo de muestreo #38 de la SEAM. (Datos recabados del Informe Técnico de la Institución en el año 2016).

P#	Loc.	Munic.	Lat.	Lon.	pH	C.E ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TSD (ppm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Prof. (m)
70*	Villa Jardín	Limpio	-25.148°	-57.496°	6.9	14.820	9.781	S/D	30
80	C.E. Caacupé mí	Asunción	-25.256°	-57.612°	8.3	3.245	2.142	18.4	80

centímetro tienden a ser salobres, y se encuentran cercanos al río Paraguay. En determinados lugares se ha constatado el consumo normal de aguas que orillan los valores admisibles.

Se ha establecido esta agrupación de datos en atención al carácter dulce del agua, por lo cual los valores de Total de Sólidos Disueltos no superarán los 1000 ppm de concentración (Tabla 1).

Para conocer los valores aproximados de Total de Sólidos Disueltos de las aguas subterráneas, primeramente se obtiene el valor de Conductividad Eléctrica. Posterior a ello, el módulo de la C.E se multiplica por el factor 0.66. Este factor representa el cociente entre las medidas de CE en relación a su TSD, el cual usualmente oscila entre los módulos de 0.55 y 0.77. El valor 0.66 es el número intermedio entre los extremos del rango aludido.

De los 96 pozos observados y promediados se verifica el valor de 140 ppm de TDS, lo cual sugiere buena calidad de agua. Cabe convenir que el valor debería ser inferior, entonces se presume ligera contaminación o mineralizaciones de fondo en su concentración de TSD. Barthel (1995) estima al Acuífero Patiño como el que presenta mayor contaminación.

Resulta razonable suponer influencia salina en el norte del Grupo Asunción de estas aguas subterráneas, sin embargo la cantidad de muestreos alejados de los contactos de acuíferos salinizadores indican otros elementos responsables de estos valores llamativos. Estos argumentos expuestos necesitan ser confirmados o desestimados por medio de pesquisas futuras.

Los valores inferiores a 300 ppm son los predominantes, los demás, que notablemente son minoría sugieren otras características hidroquímicas o influencias extra-acuífero.

Es destacable que los valores-tendencia se encuentran alejados de los valores críticos de potabilidad para consumo humano, por lo cual nos referimos a aguas en buenas condiciones.

Mediante los datos obtenidos en este muestreo se ha observado que las aguas del Acuífero Patiño son ligeramente ácidas. El rango no es amplio, y constata un aumento de álcalis en las zonas ribereñas del río Paraguay, en consonancia con el aumento de salinidad en las aguas. La composición litológica por donde circula el acuífero controla los valores del pH, así como los aportes de aguas meteóricas.

Considerando el protocolo de la ERSSAN, el 80% de los pozos, si bien no alcanzan los requerimientos óptimos para consumo humano -según la Dirección del Laboratorio de Aguas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (2017), son aceptables en un rango de 5 a 9 - . Cabe señalar aquí, que en ninguno de los pozos muestreados se ha observado un valor extralimitado de carácter alcalino.

Segundo grupo – Pozos (1) con valores de TSD ≥ 1000 y ≤ 10.000 ppm (Salobres).

En la Tabla 3 se especifican los pozos cuyas aguas ostentan medidas que le confieren el carácter salobre. Así mismo es observable un aumento de alcalinidad en cuanto a pH. No sería sorpresa localizar otros pozos de aguas con éstos atributos si se explorase en mayor detalle la zona.

Los responsables del pozo en Caacupé mí se encuentran conscientes del carácter especial de las aguas que emergen de sus cañerías que provienen del sustrato. Se lo utiliza deliberadamente para servicios generales de limpieza y lavado dado su carácter no potable para consumo. Su propiedad organoléptica de sabor amargo hace suponer concentración especial de potasio, magnesio o boro

(Laboratorio de Aguas – FaCEN, 2017).

Tercer grupo – Pozos (3) con valores de TSD ≥ 10.000 ppm (aguas saladas)

Por sus características hidroquímicas (Tabla 4) se los agrupa por separado, y no pueden considerarse como propios del Acuífero Patiño, sino como pertenecientes a unidades hidrogeológicas diferentes. Estos pozos fueron perforados en lugares de cotas entre los 60 y 70 metros sobre el nivel del mar, con escasa pendiente; y la profundidad de los pozos 79 y 94 son bastante similares: de 90 a 100 mts.

Los pozos 79 y 94 se destacan notablemente por sus propiedades organolépticas de sabor salado, amargo y olor fétido; estos últimos aspectos especialmente en el pozo en Surubi i.

Se verifica un ligero aumento de los valores del pH, con tendencia a los alcalinos en relación a los acuíferos sureños de Patiño. La vegetación se manifiesta con menor densidad, y se observan las palmáceas del tipo *Copernicia alba* (caranday) con suelos de color marrón oscuro (alfisoles). La zona donde se localizan estos pozos recuerdan los horizontes del bajo Chaco.

La asociación de estos paisajes en relación a las ocurrencias de aguas de pozos con marcada salinidad es recurrente (en estos dos pozos y también por experiencias relatadas por otros investigadores de aguas subterráneas), y podrían considerarse como referencia para considerar el tipo de agua subterránea que se obtendría en caso de realizarse perforaciones. Ciertos aspectos observables en superficie sugieren cierto comportamiento hidroquímico de las aguas subterráneas.

El pozo 94 se encuentra a pocos metros del arroyo Itay, próximo a su desembocadura al riacho San Francisco (un brazo del río Paraguay). Se sabe

de dicho curso hídrico su alto nivel de contaminación, no descartándose difusión de químicos desde del arroyo al acuífero por lixiviado; y si tal efecto ocurriese, en qué módulo. Se han reportado otros pozos con estas características en la zona que no aparecen en este trabajo.

Si se explorase exhaustivamente la faja colindante al río Paraguay no sería sorpresa encontrarse con pozos de aguas con atributos semejantes, incluso con mayores índices de salinidad.

Los acuíferos chaqueños serían los responsables de conferir aumento de concentración de TSD a las aguas del Acuífero Patiño por su contacto geológico-geográfico, que implica asomo entre las unidades hidrogeoquímicas que contienen a los acuíferos aludidos del Grupo Asunción y los chaqueños, tornándolas de carácter salobre.

Se explica la salinización del Acuífero Patiño teniendo presente la existencia de descompresión hidráulica por sobre-explotación y el consecuente descenso de los niveles freáticos; entonces se produce una intrusión salina proveniente de los acuíferos del bajo Chaco (TNO, 2001).

Existen exposiciones de nefelinitas de la Provincia Alcalina de Asunción en diversos puntos ribereños del río Paraguay. Por citar algunos, Tablada Nueva, Remansito, Confuso, Villa Hayes, Surubi y, además en el mismo lecho del río Paraguay en zonas.

Cuando el acuífero circula por fisuras o grietas, los valores de transmisividad son relativamente elevados en relación a los acuíferos porosos, y sería razonable suponer que la difusión de aguas saladas se realiza a través de estos conductos hidráulicos en el caso que los controles estructurales sean favorables para que la circulación tenga efecto. Sin embargo estos cuerpos ígneos también pueden

Tabla 4. Pozos con aguas saladas.

P#	Loc.	Mun.	Lat,	Lon.	pH	C.E ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TSD (ppm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Prof. (m)
79	C, Mbiguá	Asunción	-25.268 $^{\circ}$	-57.638 $^{\circ}$	7.9	28.600	18.876	24.4	100
94	Fla.. Dellavedova	Limpio	-25.169 $^{\circ}$	-57.505 $^{\circ}$	6.7	53.600	35.376	24.5	90

actuar como barreras para impedir conexión entre acuíferos (Custodio y Llamas, 1983).

Se interpreta que de acuerdo a los sentidos estructurales de estos macizos rocosos para que sirvan como conductores hidráulicos o como paredones impermeables en el subsuelo. Perfiles geofísicos deberían ser elaborados a lo largo de los contactos geológicos, cuyo eje central podría considerarse a la zona del río Paraguay para conocer el modo de interacción entre los acuíferos si existiese.

Del texto de Custodio y Llamas (1983), se extrae el siguiente párrafo: *“Los pozos en rocas volcánicas pueden, a veces, dar caudales espectaculares con descensos mínimos, pero en la misma formación y a escasa distancia, pueden ser prácticamente estériles”*.

Con el pozo 94 no fue posible efectuar comparación porque no se tienen registros de muestreos más antiguos. La cantidad de muestreos resulta insuficiente, por lo cual el argumento de salinización no puede ser concluyente para este tipo de manifestaciones. No se presupone injerencia humana para el suceso del aumento de sales para este pozo.

Niveles de Salinidad del Acuífero Patiño

Como se observa en las Figuras 5 y 6, que se han elaborado en base al muestreo en éste trabajo, los valores de conductividad eléctrica (y proporcionalmente los totales de sólidos disueltos) aumentan en la franja ribereña del río Paraguay.

Como se observa en las Figuras 5 y 6, que se han elaborado en base al muestreo en éste trabajo, los valores de conductividad eléctrica (y en consecuencia los totales de sólidos disueltos) aumentan en la franja ribereña del río Paraguay.

El incremento de los niveles de salinidad del Acuífero Patiño en el sector mencionado ha sido estudiado por varios investigadores y se trata de una realidad demostrada (aunque sólo existen conjeturas acerca de sus causas) que incide en gran medida en los municipios establecidos en los arrimos al río.

Conclusiones

Se han verificado tres tipos de aguas subterráneas en la región de estudio, considerando los valores

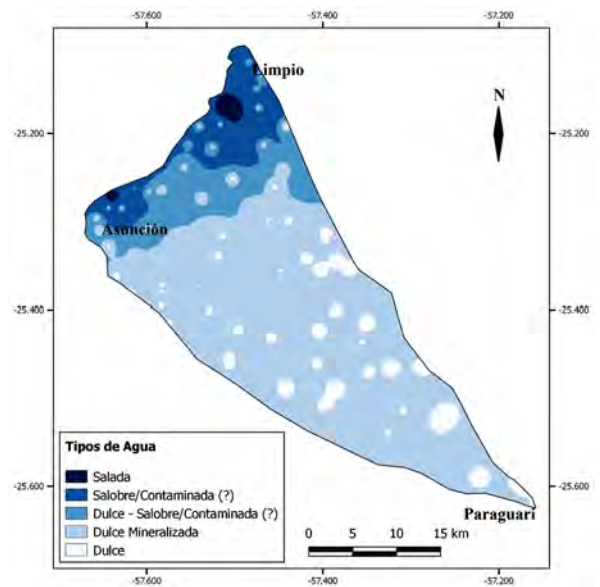


Figura 6. Mapa de tipos de aguas en el Acuífero Patiño.

de Totales de Sólidos Disueltos y la clasificación de Davis & De Wiest, 1967: aguas dulces (96%), salobres (2%) y saladas (2%).

El carácter salino del agua se manifiesta en el entorno ribereño del río Paraguay. Esto debido a la fuerte influencia de los acuíferos chaqueños que difunden sus aguas en sentido bien general N-S, en dirección al Norte del departamento Central. Ninguno de los pozos con agua salada es apto para consumo humano.

Asunción se ve afectada por éste suceso en el sector del bañado Norte. En el banco San Miguel, frente al antiguo puerto se ha encontrado un pozo con aguas saladas con sabor indudablemente salino. Tal vez se trate del pozo con aguas de mayor salinidad en las cercanías del microcentro de Asunción. Un pozo con aguas de características salobres se localiza a pocos kilómetros al este del mencionado bañado teniendo como referencia el pozo frente a la bahía de Asunción.

En la ciudad de Mariano Roque Alonso no se han encontrado pozos con aguas salobres o saladas considerando los valores de TSD. En este municipio en los arrimos a la planicie del río Paraguay se identificó un pozo con valor de conductividad eléctrica que sugiere tendencia a salinización.

En la urbanización Surubí'i de Limpio se ha localizado un pozo con aguas muy saladas. Tal vez el de mayor salinidad en toda la zona de la ribera del río Paraguay. Sus propiedades organolépticas de sabor y olor son bastante sensibles. A pocos kilómetros al Noreste, en Villa Jardín, también perteneciente al municipio de Limpio, se encuentra el pozo de monitoreo número 38 de la SEAM (que en este trabajo se lo codifica como Pozo 70) con características semejantes al anterior, según los datos obtenidos por el monitoreo de aquella institución, aunque no con módulos de propiedades físico-químicas tan elevados.

Se comprobó incremento de salinidad en el pozo 79 con respecto a mediciones en trabajos anteriores. De ese modo se argumenta que paralelamente al aumento de su salinidad, también podría tratarse del acuífero responsable de incrementar a los del Acuífero Patiño más próximos en su zona de interdigitación, siempre que exista conectividad entre ellos.

Existe una franja de interfase entre los pozos con aguas saladas y dulces. Los valores máximos con tendencia hacia lo salobre serían en el orden de los 2000 ppm. Se considera a las aguas de estos pozos como del Acuífero Patiño salinizados por recibir aportes de los acuíferos chaqueños por difusión. Donde se encuentran pozos con aguas de estas características se estima como los lugares de interdigitación, o contacto directo en subsuperficie de estos acuíferos contiguos.

Estos lugares de interfase usualmente se encuentran en las rocas sedimentarias del Grupo Asunción situadas en cotas de mayor elevación y muy próximos en referencia a los depósitos chaqueños del Cenozoico por donde circulan los acuíferos chaqueños.

Se ha constatado que la salinización no ocurre in extenso en toda la faja ribereña del río Paraguay donde se producen los contactos con las unidades del Grupo Asunción y la Formación Cuaternaria chaqueña. Esto podría significar que no en todas las fronteras entre las unidades hidrogeológicas existe difusión e interdigitación, como se ha visto en los pozos 79 y 21 en Asunción, y en los pozos 94 y 82

en Surubí'i – Limpio.

En sectores, existen barreras que impiden conexión entre los acuíferos chaqueños y orientales, y se ha mencionado a presencia de mantos piroclásticos, emplazamientos ígneos con discontinuidades, controles tectónicos que no favorecen a los conductos hidráulicos para difusión, y fracturamientos que funcionan como embalses. Esto podría significar que en los contactos hidrogeológicos entre el Grupo Asunción y las unidades chaqueñas existen zonas de compartimentación o separación entre los acuíferos; así como zonas de contacto hidráulico y difusión de salinidad.

Los cambios climáticos o estacionales inciden en el comportamiento físico-químico de los acuíferos. Las recargas también actúan como atenuadores de concentraciones de elementos indeseables considerando los aspectos de potabilidad del agua para consumo humano.

En los lugares de muestreo donde se verifican aguas saladas con frecuencia son topográficamente bajos; el suelo del tipo alfisoles y la vegetación es notablemente de menor densidad. Las palmeras chaqueñas, *Copernicia alba* (caranday), ya aparecen. Paisajísticamente recuerda al bajo Chaco. Esta asociación de características podría resultar como indicador de aguas subterráneas saladas o salobres.

En el escenario de las aguas dulces que abarca a la mayoría de los municipios asentados sobre el Grupo Asunción, se han observado buenos valores de potabilidad y la población normalmente se sirve de ellas.

En promedio las conductividades eléctricas arrojan resultados en el orden de los 200 y 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ciertamente son valores que se encuentran en el dominio de la potabilidad, aunque son llamativos porque se supone deberían ser menores.

El carácter ligeramente ácido de sus aguas (en su mayoría) se demuestra por mediciones en esta investigación. Son valores no óptimos; no obstante, aceptables para consumo.

Existe una tendencia al aumento de conductividad eléctrica; en contados casos drásticos. Esto fue verificado luego de cotejar 30 pozos con mediciones de trabajos anteriores. Elementos de aportes antró-

picos del tipo efluentes o de desperdicios sanitarios (?) podrían explicar el hecho, aunque esto debería investigarse para demostrar o desestimar dicho argumento, estudiando y monitoreando cada pozo en su respectivo lugar con mayor detalle.

Literatura citada

- Bartel, W. & Muff, R. (1995). Observaciones Geológicas de Paraguay Central en Relación al Agua Subterránea. Págs. 23-29. 2° *Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos en el Paraguay*. San Lorenzo. PY.
- BGR-MOPC. (1999). *Hoja Caacupé 5470*. Texto Explicativo. Asunción. PY
- Cardozo, S. & Crosa, C. (2006). *Estudio de la Contaminación del Acuífero Patiño*. Trabajo final de grado. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - UNA. Asunción PY.
- Carvalho, F. & Villar, F. (2016). Acuífero Patiño. Fuente Estratégica del Gran Asunción. *Revista de la Facultad de Ciencias y Tecnologías*, 7: 51-71.
- Custodio, E. & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*. Volumen II. Barcelona: Editorial Omega. Barcelona. ES. 1224 pp.
- Davis, S.N. & De Wiest, R.J.M. (1967). *Hidrogeología*. Barcelona: Ediciones Ariel. 560 pp.
- Degraff, J., Orué, D. & Franco, R. (1981). Interpretación Geofísica y Geológica del Valle de Ypacaraí (Paraguay) y su formación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 36(3): 240-256.
- Eckel, E.B., Milton, C. & Sulsona, P.T. (1959). Geology and mineral resources of Paraguay-
-a reconnaissance, with sections on Igneous and metamorphic rocks and soils. *Geological Survey Professional Paper*, 327: 110 pp.
- ERSSAN (2000). *Reglamento de Calidad para Permissionarios*. Ley N° 1.614/2000 sobre el Marco Regulatorio y Tarifario del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario. Asunción, Paraguay.
- Fulfaro, V. (1996). Geology of Eastern Paraguay. Pp. 17-29 in: Comin-Chiaramonti, P. & Gomes, C.B. (eds). *Alkaline Magmatism in Central Eastern Paraguay: Relationships with Coeval Magmatism in Brazil*. São Paulo: Editora da USP. 464 pp.
- Gómez, D. (1991). Consideraciones Morfoestructurales y Estratigráficas de la Antiforma de Asunción y su Relación con la Exploración de Aguas Subterráneas. 1er. Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos en el Paraguay. Casa de la Cultura. Asunción. PY.
- SENASA - TNO. (2001). *Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA*. San Lorenzo. 45 pp.
- Proyecto PAR 83/005. (1986). *Mapa Geológico del Paraguay*. Asunción: Comisión Nacional de Desarrollo Regional. Ministerio de Defensa Nacional. 270 pp.
- Rios, J., Martínez, O. & Centurión, C. (1995). Contaminación de Agua Subterránea en Áreas Puntuales del Gran Asunción. 2° *Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos en el Paraguay*, 1: 159-160.