

Caracterización hidrogeoquímica e hidrodinámica y estimación de la recarga de los acuífero Salto y Arapey

AUTOR: WILSON ESTEBAN ABELENDA FALCÓN

TUTORA: DRA. MARÍA PAULA COLLAZO

CO-TUTOR: LIC. ROBERTO CARRIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

LICENCIATURA EN GEOLOGÍA

TRABAJO FINAL DE GRADO

MARZO 2016

A mi Madre...

Agradecimientos

A mi tutora y co-tutor de tesis; Dra. Paula Collazo y Lic. Roberto Carrión por la paciencia y consejos para ser posible este trabajo.

A las Instituciones públicas que cedieron datos de perforaciones y análisis químicos; OSE (Obra Sanitaria del Estado) DINAMIGE (Dirección Nacional de Minería y Geología) y Facultad de Ciencias-UdelaR.

A la Directora Nacional de Minería y Geología, Dra. Leda Sánchez Bettucci.

A los licenciados en geología Ximena Lacués, Alberto Manganelli, Andrés Pérez e Ignacio Fernández por su paciencia en enseñar y haberme incursionado en hidrogeología.

A mis amigos y compañeros de trabajo, Walter, Enrique, Sergio, Valentina, por dedicarme su tiempo en consejos, y acompañarme en los trabajos de campo y gabinete.

A mi grupo de estudio; Valentina Ribero y Natalia Cabrera (Flia. Cabrera-Laborde).

A mi familia y amigos que me apoyaron en todos estos años de estudio.

Contenido

Resumen	6
1. Introducción	7
1.1 Objetivo Generales	7
1.2 Objetivo Específico	7
2. Área de estudio	8
3. Métodos y Actividades	9
4. Hidrografía	12
5. Antecedentes Geológicos	12
5.1 Formación Arapey	13
5.2 Secuencia Sedimentaria	14
a) Formación Guichón	14
b) Formación Fray Bentos	15
c) Formación Salto	16
d) Unidad Informal Nueva Hespérides	17
e) Depósitos del Reciente y Actual	18
6. Hidrogeología	19
6.1 Acuífero Salto	19
6.2 Acuífero fisurado (Arapey)	19
7. Resultados	20
7.1 Geología	20
7.2 Balance Hídrico	26
7.3 Rasgos Hidrogeológicos del acuífero Salto	30
7.4 Rasgo Hidrogeológico del acuífero Arapey	33
7.5 Piezometría	35
7.5 a Acuífero Salto	35
7.5 b Acuífero Arapey	39
7.6 Diferencias de nivel estático (1997-2015)	42
7.7 Hidrogeoquímica	44

7.7 a Acuífero Salto.....	46
7.7 b Acuífero Arapey.....	55
7.8 Elementos Trazas.....	63
8. Discusión.....	65
9. Conclusiones.....	66
10. Recomendaciones.....	69
11. Bibliografía.....	70
ANEXO 1 Descripción de perforaciones.....	74
ANEXO 2 Banco de dantos de perforaciones	81
ANEXO 3 Modelado acuífero Salto – Montaña 1995.....	84

Resumen

El trabajo consistió en un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de las aguas subterráneas del acuífero Salto y Arapey. Para ello se realizó una red de monitoreo de niveles estáticos y muestreo de agua subterránea para analizar los parámetros fisicoquímicos en laboratorio e *in situ*. Para analizar los parámetros hidráulicos, se estimó el balance hídrico de los acuíferos, se monitorearon los niveles estáticos -con la finalidad de construir mapas piezométricos-, observando su evolución en el tiempo. El valor de agua excedido anualmente por la precipitación es de 325 mm/m² y el área aflorante del acuífero Salto es de 250 Km². Con una infiltración del 25%, la recarga anualmente del exceso de agua es de 2.03 x 10⁷ m³. Para el caso del acuífero Arapey, el área aflorante es de 160 Km² estimando una infiltración del 15%, anualmente la recarga es de 7.80 x 10⁶ m³. A pesar del volumen de extracción anual no se ha constatado descenso en los niveles piezométricos en los pozos de los acuíferos. Esto es debido a que la recarga de los acuíferos es aún mayor que el volumen de extracción anual.

Para los parámetros hidrogeoquímicos se tomaron muestras de agua subterránea; siete para el acuífero Salto y 14 para el acuífero Arapey. En el caso del acuífero Salto, los resultados muestran que el agua subterránea presenta pH, temperatura y conductividad eléctrica normales según las normas de calidad, mientras que algunas perforaciones se encuentran contaminadas con nitrato, sulfato y potasio. Para el acuífero Arapey se constató, que al igual que para el acuífero Salto, el agua subterránea presenta pH, temperatura y conductividad eléctrica normales, según las normas de calidad (UNIT 883:2008), aunque también se encontraron valores anómalos en nitratos, lo que sugiere una contaminación posiblemente vinculada a la cercanía de una fosa séptica, o bien al uso de fertilizantes. El agua de este acuífero presenta concentraciones mayores de calcio que las del acuífero Salto, y esto puede estar dado por la disolución de calcita presente en las vacuolas del basalto.

1. Introducción

La zona de investigación se sitúa en el Departamento de Salto, sobre el margen del río Uruguay, ocupando un área de aproximadamente 500 km². Los acuíferos principales son Salto y Arapey. El primero es de tipo sedimentario, libre a semiconfinado; mientras que el segundo es de tipo fracturado y de comportamiento libre a semiconfinado.

El cinturón rural de la ciudad de Salto se caracteriza por una actividad agrícola-ganadera intensiva, por lo que el agua subterránea es un recurso indispensable para el desarrollo de la zona.

De la base de datos de DINAMIGE se extrajo información de 492 pozos con una profundidad media de 46 metros. Presentan un caudal medio de 8.800 litros/hora y una extracción anual de $2,3 \times 10^7$ m³/año, considerando ambos acuíferos. En base a estos datos la zona se la considera como la cuarta más grande en extracción de agua subterránea del País, representando el 10,6%, ubicada por debajo de extracción de agua subterránea de los acuíferos Raigón, Costeros y Basamento Cristalino de oeste (DINAMIGE, Junio 2009).

1.1 Objetivo Generales:

El objetivo general es la caracterización hidráulica y química del agua subterránea de los acuíferos Salto y Arapey.

1.2 Objetivo Específico

- a) Estimar la recarga de los acuíferos Salto y Arapey analizando los posibles descensos de los niveles de agua subterránea a consecuencia de la explotación intensiva de los pozos destinados a riego.
- b) Establecer la dinámica de ambos acuíferos, analizando los niveles estáticos en el tiempo y sus líneas de flujo.
- c) Interpretar los análisis hidroquímicos para determinar la posibilidad de contaminación.
- d) Determinar si existe una variación de los componentes fisicoquímico del agua subterránea en ambos acuíferos.
- e) Determinar la aptitud química de los acuíferos para ser utilizada para riego.

El poder cumplir con los objetivos planteados permitirá adquirir una base conceptual útil para la prospección de acuíferos, de calidad adecuada para el uso urbano y rural.

2. Área de estudio.

El área de estudio comprende aproximadamente 500 Km², siendo su límites sur el río Daymán, el norte el embalse de Salto Grande y Brazo del Itapebí Grande, como límite occidental se encuentra el río Uruguay, mientras que al oriente se localiza el Meridiano 430000 del sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84 (figura 1).

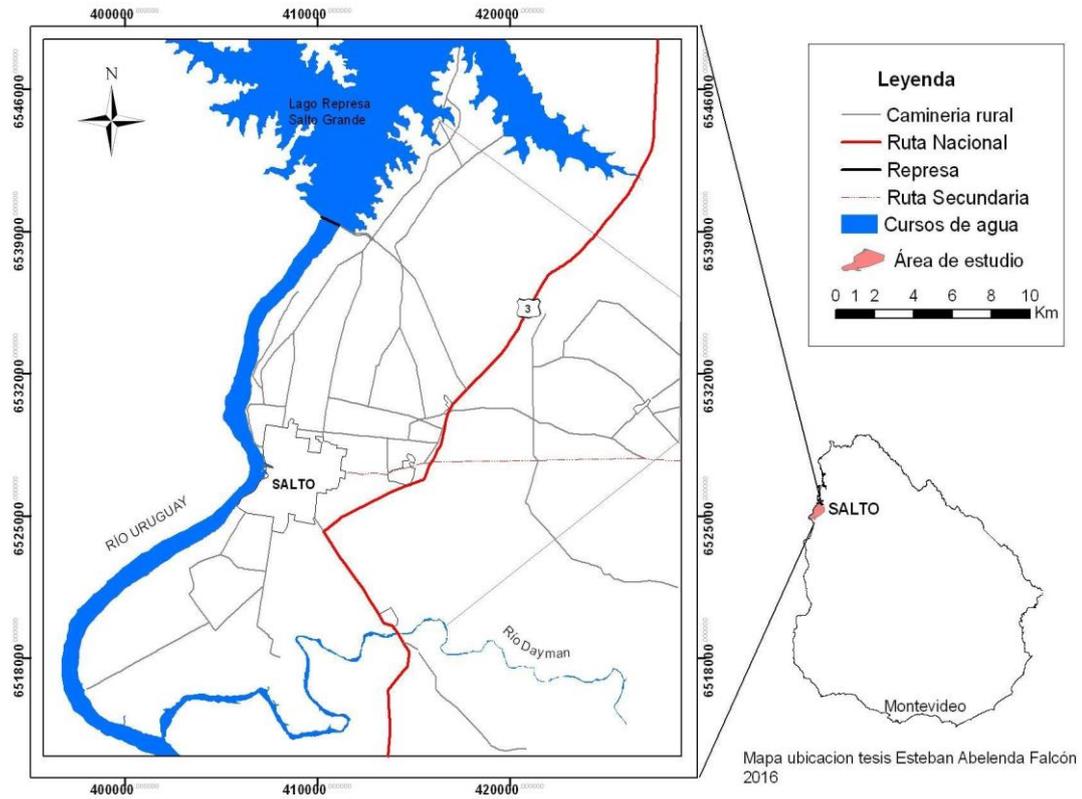


Fig. 1 Mapa de ubicación del área de estudio. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.

3. Métodos de estudio y plan de actividades

Para la realización de este trabajo final, se desarrollaron tareas de gabinete, campo y laboratorio que consistieron en:

Trabajo de gabinete I

- Recopilación y análisis de antecedentes e información bibliográfica.
- Recopilación y tratamiento de datos de perforaciones de organismos públicos y empresas privadas generando un inventario de pozos.
- Análisis de antecedentes geológicos.
- Ampliación de la red de monitoreo realizada por DINAMIGE, seleccionando nuevos puntos de muestreo.
- Determinación de los puntos de muestreo para agua subterránea.

Trabajo de Campo

- Reconocimiento de unidades geológicas (litologías, geometría de las unidades, aspectos estructurales) e hidrogeológicas de la zona de estudio.
- Muestreos y análisis del agua subterránea en los puntos de control ya planificados con anterioridad en la etapa de Gabinete I.
- Medición de profundidad del nivel estático, profundidad total, determinación de parámetros fisicoquímicos *in situ* (pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales) y toma de muestras para análisis químico.

Tareas de laboratorio

Los parámetros fisicoquímicos de muestras de agua subterránea fueron realizados por el Laboratorio de Tecnogestión del Ministerio de Industria Energía y Minería. En las tablas 1 y 2 se detallan los parámetros, métodos y equipos que utilizó el laboratorio.

Trabajo de gabinete II

- Procesamiento y análisis de la información obtenida en campo como suministrada por el laboratorio.
- Cálculo de la recarga de los acuíferos Salto y Arapey.
- Representación gráfica (mapas y diagramas como por ejemplo: diagramas de Piper, Schoeller-Berkaloff) de datos hidroquímicos, realizando los balances iónicos y cálculos de errores correspondientes
- Determinación de la aptitud del agua subterránea para distintos usos, en el ámbito urbano y rural, por el método “Riesgo de absorción de sodio” (RAS).
- Determinación de la evolución hidrodinámica de los acuíferos Salto y Arapey comparando los resultados con estudios anteriores.
- Modelado de mapas piezómetros, de conductividad y de diferencias de niveles estáticos en el tiempo utilizando el modelo matemático de interpolación inversa a la distancia.
- Software utilizado: ArcGis versión 10.1, Microsoft Office, Corel draw, NETPATH-WIN, entre otros.
- Interpretación de los resultados, conclusiones y recomendaciones.

Tabla 1. Métodos utilizados por el laboratorio de Tecnogestión del MIEM.

Parámetros	Unidades	Método *
pH	Unidades pH	Electrométrico – 4500-H ⁺
Turbidez	NTU	Nefelométrico – 2130
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Titulométrico - 2340
Calcio	mg/L CaCO ₃	Titulométrico – 3500-Ca
Magnesio	mg/L Mg	Por cálculo - 3500-Mg
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Argentométrico – 4500-Cl ⁻ B
Alcalinidad Fenolftaleína	mg/L CaCO ₃	Titulométrico – 2320
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Titulométrico – 2320
Nitratos	mg/L NO ₃ ⁻	Electrométrico – 4500-NO ₃ ⁻ D
Nitritos	mg/L NO ₂ ⁻	Colorimétrico – 4500-NO ₂ ⁻ B
Fósforo total	mg/L P	Colorimétrico – 4500 -P E
Sólidos Totales	mg/L	Gravimétrico – 2540 B
Sílice	mg/L SiO ₂	Colorimétrico – 4500 -SiO ₂
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	Turbidimétrico – 4500 –SO ₄ ²⁻ E
Sodio	mg/L Na	Fotométrico - 3500-K B
Potasio	mg/L K	Fotométrico - 3500-Na B
Plomo	µg/L Pb	ICP-MS - 3125
Selenio	µg/L Se	ICP-MS - 3125
Cobre	µg/L Cu	ICP-MS - 3125
Arsénico	µg/L As	ICP-MS - 3125
Cromo total	µg/L Cr	ICP-MS - 3125
Cadmio	µg/L Cd	ICP-MS - 3125
Níquel	µg/L Ni	ICP-MS - 3125
Manganeso	µg/L Mn	ICP-MS - 3125
Vanadio	µg/L V	ICP-MS - 3125
Cinc	µg/L Zn	ICP-MS - 3125

* A.P.H.A 1992

Tabla 2. Equipos utilizados por el laboratorio de Tecnogestión del MIEM.

Método electrométrico	Equipo ORION, modelo STAR LONG
Método nefelométrico	Equipo ORION, modelo AQ 4500
Método colorimétrico	Equipo PG Instrumets, modelo T70
Método fotométrico	Equipo JENWAY, modelo PFP7
Método ICP MS	Equipo Perkin Elmer, modelo Nexion 3000

4. Hidrografía

El área de estudio presenta morfología ondulada con presencia de una red de drenaje superficial densa y de gran extensión perteneciente a la cuenca del río Uruguay. Las mayores alturas alcanzan los 80 metros sobre el nivel del mar (msnm) al este del área. El río principal es el Uruguay que fluye entre cotas de ocho y 10 msnm. Aguas arriba de la zona de estudio se encuentra el embalse Salto Grande con cota 35.5 msnm, mientras al sur está delimitada por el río Daymán con cota 10 msnm, en la desembocadura con el río Uruguay. El arroyo San Antonio Grande, el arroyo Ceiba Grande y la cañada del Sauce son los cursos principales que cortan el área de estudio. El primero desemboca en el río Uruguay, al norte de la ciudad de Salto, y los otros dos al sur, en el río Daymán.

5. Antecedentes Geológicos

El área de estudio forma parte de la Cuenca Norte de nuestro país y su evolución tectono-sedimentaria corresponde a las edades Paleozoica-Eo-Mesozoica. El magmatismo Mesozoico asociado a la apertura del océano Atlántico, se encuentra representado en la plataforma sudamericana principalmente en las regiones Sur y Sureste de Brasil, Noroeste y Sureste de Uruguay, Este de Paraguay y Noreste de Argentina (Figura 2). Este magmatismo constituyó uno de los más extensos del continente con volúmenes preservados en el entorno de un millón de kilómetros cúbicos (Peate 1997) y es conocido como Provincia magmática Paraná–Etendeka. Esta se encuentra representada por rocas basálticas y andesíticas de afinidad tholeítica y en forma subordinada por rocas riolíticas y riodacíticas, que constituyen apenas el 3 % del magmatismo (Bellieni et al., 1986).

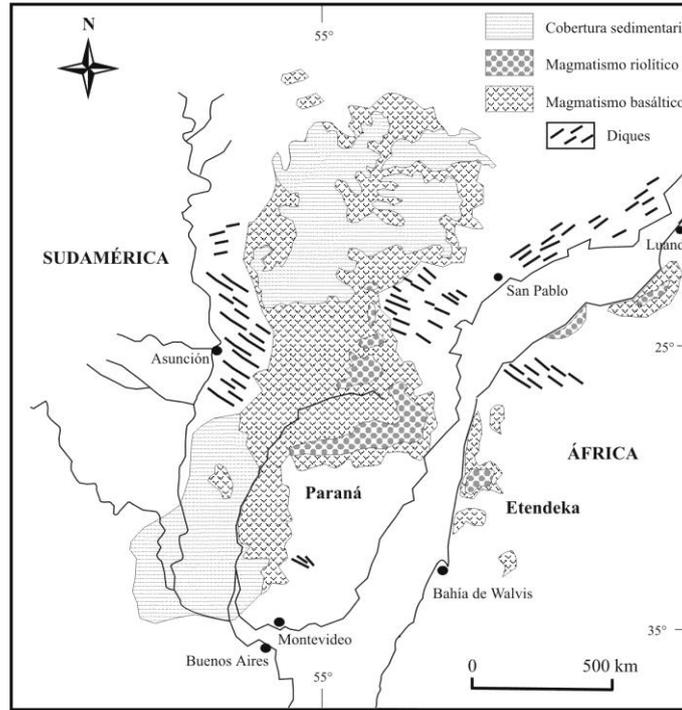


Fig. 2 Reconstrucción predrift del sector Sureste de Sudamérica y Este de África, mostrando la distribución de la Provincia Paraná–Etendeka en relación al rift proto-Atlántico. Modificada de Peate (1997).

Según los datos geocronológicos varios autores sugieren que el magmatismo (tholeítico y alcalino) asociado a la separación de Sudamérica y África se inició a fines del Paleozoico y contó con varios episodios magmáticos, dándose el más importante durante el Cretácico Inferior (Turner et al., 1994; Velázquez et al., 1996; Féraud et al., 1999).

Específicamente, en el área de estudio se encuentran unidades volcánicas y sedimentarias (ver mapa geológico figura 3), que corresponde a depósitos del Cretácico Inferior hasta el Reciente y que se describen a continuación:

5.1 Formación Arapey.

La Formación Arapey fue descrita por Walther (1911), denominando a esta unidad como “rocas eruptivas de Serra Geral”. Posteriormente Caorsi y Goñi (1958) las denominaron “lavas de Arapey”. Bossi (1966) le asignó el rango de Formación que incluye a las rocas efusivas y a los filones de alimentación. Esta Formación abarca el mayor evento extrusivo de tipo fisural, que ocupa una superficie de más de 1:000.000 de Km² en los países de la región (Brasil, Paraguay, Argentina y Uruguay) dentro de la cuenca del Chaco-Paraná. Bossi y Heide (1979) describieron a la Formación Arapey como derrames basálticos con niveles de areniscas eólicas interstratificadas. Bossi y Schipilov (1998) propusieron dividir la unidad en seis bloques, donde cada bloque presenta coladas individuales y características diferentes en su

textura, mineralogía y geoquímica, a saber: Los catalanes, Curtina, Piedra Sola, Paso de los Toros, Tomás Gomensoro e Itapebí. La zona de estudio corresponde al bloque VI llamado Itapebí, con un área total de 5.900 Km². Las primeras determinaciones de edad absoluta para esta unidad (K/Ar) han sido establecidas en 125 ± 10 Ma por Umpierre (1965), y 126.8 ± 1.3 Ma por Creer *et al.* (1965). Posteriormente Féraud *et al.* (1999) por método ⁴⁰Ar/³⁹Ar obtuvieron una edad de 132.9 ± 1.3 Ma. Según Montaña (1995) las características tectono-estructurales del área basáltica están dominadas por aquellos lineamientos de dirección NO. Estas direcciones se observan mediante fotointerpretación en el encallado de los arroyos Itapebí Grande, y en los tramos NO del arroyo San Antonio Grande y el tramo final del río Daymán. De ellas se destacan las del arroyo Itapebí y río Daymán, que limitan el bloque basáltico, relativamente más hundido. Las diaclasas, fracturas y fallas se presentan con mayor frecuencia con direcciones NO (N55° - 60°O) y NE (N25° - 30°E); mientras que con menor frecuencia direcciones NS y EO. Hausman y Fernández (1967), proponen que las direcciones NO y NE corresponderían a zonas de cizallamiento, mientras que los lineamientos NS y EO - según la teoría del elipsoide de tensión-, constituirían las líneas de alivio (fracturas abiertas), y se transformarían en el principal objetivo exploratorio hidrogeológico de la unidad.

5.2 Secuencias sedimentarias

En la cuenca del litoral oeste del país, el registro cretácico sedimentario ha sido definido como Grupo Paysandú (Bossi, 1966; Goso, 1999; Goso *et al.*, 1999; Goso y Perea, 2004) y reúne a las formaciones Guichón, Mercedes y Asencio. El espesor aparente preservado es de 220 m en litologías areno-conglomerádicas de origen continental. En la comarca de estudio únicamente se encuentra aflorando la Formación Guichón, que corresponde a la base del grupo Paysandú (Bossi y Navarro, 1991).

a) Formación Guichón

La primera secuencia depositacional posterior al evento que generó los basaltos de la Formación Arapey corresponde a la Formación Guichón (Cenomaniano) (Lambert, 1940); quien las describió como areniscas finas, bastante arcillosas, rojas, con granos cuarzosos y redondeados. Estos depósitos se encuentran bien desarrollados con extensión y espesores importantes en la Cuenca Cretácica del Río Uruguay, mientras que en el área de estudio constituye apenas un remanente que transgrede la lineación del Río Daymán que representa

un alto estructural que controló la depositación de las sedimentitas Cretácicas (ANCAP 1994). Según Goso (1999), la litofacie arenosa predomina sobre las conglomerádicas y las pelíticas. Aproximadamente el 90 % corresponde a areniscas cuarzosas, finas a medias, de color rosado grisáceo variando a un rojizo grisáceo. Presentan una matriz pelítica de color rosado intenso, que constituye aproximadamente el 30 - 35 % del total de la roca y le da la textura matriz-sostén. El grado de selección es de moderado a bueno. Litológicamente pueden ser definidos como *wackes* feldespáticos. En estas litofacies predomina el aspecto masivo, aunque también se han identificado laminación plano paralela, de tipo cruzada (“*ripple*”), formas de lecho onduladas y estratificación gradada. Al norte de la cuenca, las areniscas presentan procesos secundarios de silicificación. La litofacies conglomerádica es de color rosa formada por cantos polimícticos de cuarzo, arenisca y basaltos, angulosos a subredondeados. Se caracterizan por su baja selección granulométrica y presentan estructuras sedimentarias tales como gradación normal, cruzada acanalada o masiva. Su matriz es de arena media a fina a veces pelítica (Goso 1999). Subordinadamente la Formación Guichón presenta estratos de pelitas marrones y rojizas de orden métrico de espesor. Son masivas y laminadas con estructuras de carga y geometrías lenticulares. Análisis por difracción de RX (Goso y Perea, 2003) en dos muestras revelaron una composición fundamentalmente esmectítica (> 90 %) y subordinadamente caolinítica (< 10 %). Las relaciones de contacto de la Formación Guichón es discordante con el resto de las unidades geológicas a saber; en la base con los basaltos de la Formación Arapey y al tope con Formación Mercedes (Cretácico Superior); Formación Fray Bentos (Oligoceno); Formación Salto (Plio-Pleistoceno) o con depósitos cuaternarios.

b) Formación Fray Bentos

La Formación Fray Bentos (Goso, 1965) está representada por areniscas finas, limolitas, loésicas, fangolitas y niveles conglomerádicos y diamictíticos de color rosado-marrón rojizo. Su distribución es amplia, aflorando desde Bella Unión (en el departamento de Artigas) y en la faja costera del departamento de Colonia, así como también en las cuencas de Santa Lucía y Laguna Merín (Veroslavsky *et al.*, 2003). En la tabla 3 se muestran las diferentes facies litológicas y su interpretación geológica.

Tabla 3. Principales facies sedimentarias de la formación Fray Bentos, tomado de Veroslavsky *et al.*, (2003).

Facies: litología, estructuras, geometría y fósiles	Ambiente	Localidades
Areniscas medias a gruesas, con estratificación cruzada en artesa y tabular planar, geometría lenticular; areniscas conglomerádicas con base erosiva, con intraclastos, con fósiles (xenartros, notoungulados)	Depósitos fluviales: facies de relleno de canal, barras longitudinales y transversales.	Paso Cuello y Picada de Berget (Canelones) Ruta 3 km 556 (Salto)
Pelitas, arcillitas, areniscas y fangolitas masivas y estratificadas, con intercalaciones de niveles de paleosuelos, con fósiles (marsupiales, notoungulados)	Depósitos fluviales: facies de planicies de inundación.	Paso Cuello, Picada de Berget y Rancho Verde (Canelones), Ruta 3 km 556 (Salto)
Sílex y depósitos carbonáticos interdigitados laminares, con continuidad lateral. Calcretas tenaces, laminares, nodulares y “brechoides” con niveles silíceos; con icnofósiles (rizolitos, pedotúbulos).	Paleosuelos: procesos de calcretización-silcretización en clima semiárido, cálido, con intensos procesos de evapotranspiración.	Ruta 2, (Fray Bentos), Picada de Berget (Canelones–Florida)
Diamictitas y fangolitas	Flujos gravitacionales: remoción en masa	Colonia, (Nueva Helvecia), Río Negro
Limolitas finas, pelitas arenosas, masivas, a veces muy limosas con contribución de vidrio volcánico	Depósitos eólicos, loésicos, con intensos procesos de retrabajo y colonización por paleosuelos.	Ruta 2, (Fray Bentos), Nueva Palmira (Colonia)

Según Goso y Bossi (1969) esta Formación suprayace en discordancia a unidades cretácicas y al basamento cristalino, y subyace a los depósitos miocénicos, pliocénicos y pleisocénicos. Varios autores han interpretado las condiciones paleoclimáticas, como por ejemplo Romano (1999) que lo caracterizó como seco y cálido, con un patrón de pluviosidad estacional y con lluvias periódicas. Por otra parte, Ferrando y Dasa (1974) sugirieron temperaturas templado-cálidos con escasa pluviosidad y distribuida irregularmente; mientras que Goso y Bossi (1966) destacan una aridez creciente en un régimen eólico periglacial o peridesértico.

c) Formación Salto

La Formación Salto está constituida, según Goso y Bossi (1965), por depósitos fluviales atribuidos al Mio-Plioceno compuesto por psamitas y psefitas. Esta unidad está caracterizada por constituir una angosta faja paralela al río Uruguay, desde la localidad de Bella Unión, al Norte al Sur del río Daymán. En territorio Argentino, la Formación Salto adquiere la denominación de Salto Chico (Rimoldi, 1962). Goso y Bossi (1966) sugieren que la Formación Salto es equivalente a la Formación Raigón en el Sur de Uruguay, debido a que

ambas son de edad Terciario (Plioceno). Posteriormente, Bossi y Ferrando (2001) consideraron que la Formación Salto evolucionó a la Formación Barra del Chuy. En ese mismo año, Iriondo y Kröhling (2001) aportaron datos radiométricos (TL) para la unidad, obteniendo una edad en torno a los 90.000 años. Según Preciozzi et al. (1985), esta unidad en su área tipo no alcanzaría los 30 metros de potencia, registrándose en el barrio de Corralito de la ciudad de Salto un espesor de 27 metros. Las relaciones de discordancia de la Formación Salto se da con unidades cretácicas (Formaciones Arapey, Guichón y Mercedes) y Paleógenas (Formación Fray Bentos). Según Montaña (1995), los procesos depositacionales de esta unidad fueron controlados por la paleo-estructura definida por antiguas lineaciones de dirección NO (arroyo Itapebí Grande y río Daymán) y por el reflejo de la tectónica de basculamiento de los bloques de eje NNE. Su depocentro se encuentra ubicado en los sectores O y SO de la región. En el Sur, en el tramo del Río Daymán comprendido entre la Ruta 3 y su desembocadura, se apoya directamente sobre los depósitos Cretácicos de la Formación Guichón, mientras que hacia el Este y Norte está controlado por la paleotopografía de los basaltos de la Formación Arapey.

d) Unidad Informal Nueva Hespérides

Esta unidad fue definida por Montaña (1995) y comprende a sedimentos limo-arcillosos de color amarronado, cuya potencia no superan los cuatro a cinco metros. La unidad tiene un aspecto peneplanizado y se encuentra localizada en Nueva Hespérides (inmediaciones al Aeropuerto de Salto) dispuesta en las cotas topográficas más altas de dicha área (por encima de la cota 40 msnm). Esta se encuentra apoyada sobre los depósitos de la Formación Salto, preferentemente sobre las facies psamo-psefíticas. Por sus características litológicas y su ubicación stratigráfica, esta unidad sería correlacionable a los depósitos de la Formación Dolores, asignados al Pleistoceno Superior (Goso, 1972). Sobre estos sedimentos limo-arcillosos se desarrollan suelos de considerable espesor (hasta dos metros), arcillosos y negros. Presenta un alto porcentaje de carbonatos de calcio y variable contenido de fracción arena y grava. Su tonalidad de colores van desde pardo-rosado, grises a ocre, presentando un grado de litificación relativamente elevado, de acuerdo a su contenido en carbonato de calcio. Este se presenta en forma de nódulos, venas y diseminado en la roca. La unidad corresponde a una antigua terraza de los principales cursos fluviales, pero con una cota algo superior a la de las actuales planicies.

e) Depósitos del Reciente y Actual.

Según Montaña (1995) estos depósitos comprenden bancos o paquetes limoarenosos que ocupan la planicie más próxima de los cursos fluviales. Son sedimentos de origen fluvial, de coloraciones pardo oscuras en función de su contenido en materia orgánica. La presencia de fracciones arenosas y gravillosas está relacionada directamente con el sustrato del área de aporte (Figuras 3 y 8).

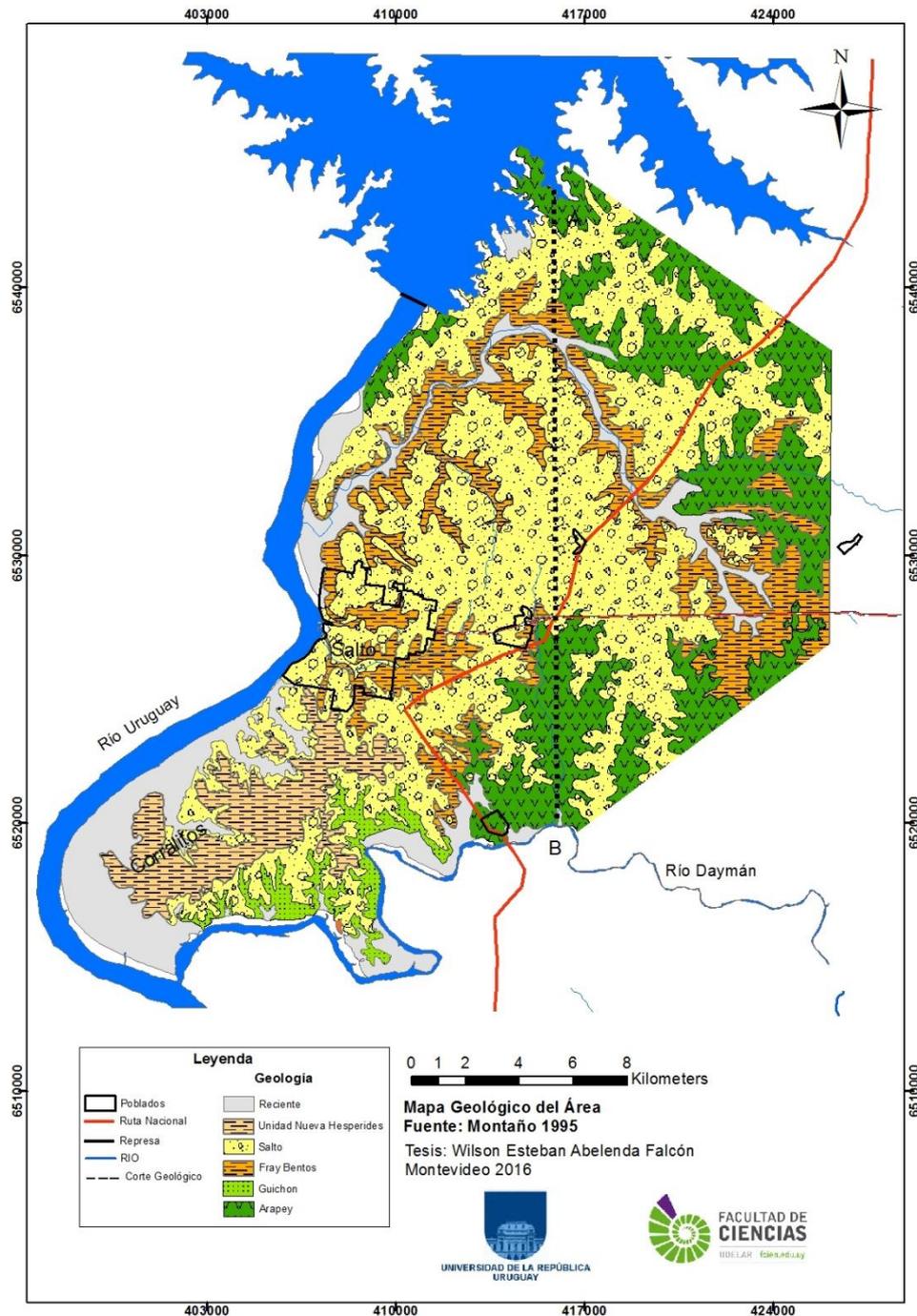


Fig. 3 Mapa geológico de la zona de estudio modificado de Montaña, 1995 Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.

6. Hidrogeología

En la zona de estudio se diferencian dos unidades hidrogeológicas principales; el Acuífero Salto, de porosidad primaria, compuesto por areniscas de origen fluvial y el Acuífero Arapey, fisurado de porosidad secundaria constituido por basaltos tholeíticos.

La Formación Fray Bentos se comporta como un acuitardo, aunque en las inmediaciones de la ciudad de Salto se registraron perforaciones con gran caudal convirtiendo en un acuífero muy productivo. Esto se puede deber a la disolución de carbonato de calcio que permite la acumulación y circulación del agua subterránea. Por otra parte, la Formación Guichón no se la considera debido a su poca expresión areal en la zona de estudio (Ver perfiles de perforaciones en anexo 1).

6.1 Acuífero Salto (sedimentario)

El acuífero Salto es una unidad hidrogeológica principal en la zona de estudio, ya que constituye un acuífero de gran extensión, no es profundo y presenta caudales medios de 7 m³/h (según el banco de datos de DINAMIGE) por lo que, los agricultores que utilizan el agua subterránea para el riego no tienen que realizar grandes inversiones para captarla. Así mismo, es necesario el control hidráulico y ambiental de este acuífero para no verse comprometido en los futuros años por la demanda y la contaminación. Este acuífero está constituido por areniscas finas a muy finas y gravas de sedimentación fluvial. Se apoya sobre las arcillas de la Formación Fray Bentos. Al acuífero Salto es un acuífero de tipo libre a semiconfinado. El semiconfinamiento se debe a que en la zona de Corralitos (próximo a la desembocadura de los ríos Dayman y Uruguay) se encuentra recubierto por una arcilla rojiza de baja permeabilidad (Formación Dolores o informalmente Nueva Hespérides) que le da cierto grado de confinamiento.

6.2 Acuífero Arapey (fisurado)

Al igual que el acuífero Salto, el acuífero Arapey es otra unidad importante en el área por su extensión y aportes de grandes caudales fomentando una mayor producción agrícola-hortofrutícola intensiva. Para captar agua de esta unidad a veces se requiere mayor profundidad pero también aporta mayor caudal (ver capítulo Resultados). El área de afloramiento de basaltos se localiza predominantemente al este y norte de la zona del estudio como se muestra en la Figura 3 mapa geológico de la zona.

Según Montaña (1995) la capacidad de estas rocas de almacenar agua y de permitir la circulación de la misma depende de la densidad e interconexión de la fracturación, así como también de la abertura y volumen de vacíos provocados por esta estructura. Además de esto, la circulación del agua subterránea también se puede dar por las discontinuidades generadas por los diferentes derrames, principalmente entre el nivel de basalto vacuolar y el lajoso. Esto sería debido a la densidad de fracturas horizontales, ligadas muchas veces a fracturas verticales. A esta situación se le suma la presencia de areniscas entre coladas, con cierta porosidad acumulando grandes cantidades de agua (Montaña 1999).

7. Resultados

7.1 Geología

Formación Arapey

El conjunto de derrames basálticos que conforman la Formación Arapey se caracterizan por presentar tres niveles, bien definidos, a) vacuolar hacia el tope, b) un masivo central y, c) lajoso en la base. Los espesores de estas coladas se encuentran en el entorno de los 20 - 30 metros, de acuerdo a datos de banco de perforaciones de DINAMIGE y, 25 y 30 m según Rosa Filho (1987) aunque el nivel lajoso no excede los 10 metros.

- a) Nivel vacuolar: de acuerdo con Montaña (1995) en el campo se observó que este nivel es de color variable dependiendo del grado de alteración, que va desde el gris cuando está fresco a marrón-rojizo cuando presenta meteorización. Las vacuolas se encuentran rellenas de calcita, cuarzo y algunas presentan zeolitas y minerales cloríticos (ver figura 4). También se observaron vacuolas sin rellenar. Este nivel se caracteriza por presentar porosidad primaria y secundaria. La primaria está dada por las vacuolas sin rellenar que se encuentran conectadas por microcanales, mientras que la porosidad secundaria se debe a la disolución de minerales máficos.

- b) Nivel masivo: En este caso son rocas compactas, masivas, de colores oscuros con tonalidades desde el gris, verde oscuro a negro. Presentan en ocasiones estructuras internas de disyunción esferoidal, surcada por una red de diaclasas que se intersectan ortogonalmente. El espaciamiento entre las diaclasas no suele ser superior a los 50 centímetros. Por tener textura masiva, no presenta porosidad primaria. En algunos casos puede llegar a presentar porosidad secundaria debido a la disolución de minerales máficos (Montaño, 1995).



Fig. 4. A la izquierda: Basalto vacuolar relleno de calcita y cuarzo. Derecha: basalto masivo diaclasado.

- c) Nivel Lajoso: Este nivel presenta una lajosidad horizontal y un mayor grado de alteración por lo que no generan buenos afloramientos en el campo. La porosidad es alta, del tipo fisural dado por los planos lajosos abiertos. Ver figura 5



Fig.5 A la izquierda afloramiento de basalto lajoso. A la derecha contacto entre nivel escoriaceo y lajoso.

Formación Salto

Esta Unidad se compone por psamitas y ortopsefitas cuarzosas rojizas con tonalidades en grises, naranjas y verdes afectadas por procesos de silicificación, que le confiere un cierto grado de cementación, aunque en la mayoría de los casos está pobremente cementado con carbonato de calcio, o bien, sin cementación. Tal como lo sugiere Montaña (1995) las psamitas (figura 6) tienen una granulometría variable, que van desde finas, medias, gruesas a gravilosas. Su composición es principalmente cuarzosa, con grados de redondeamiento variable; en granulometría finas, el grado de redondeamiento es bueno a muy buenos, mientras que en granulometrías gruesas a gravilosas son subangulosos a subredondeado.



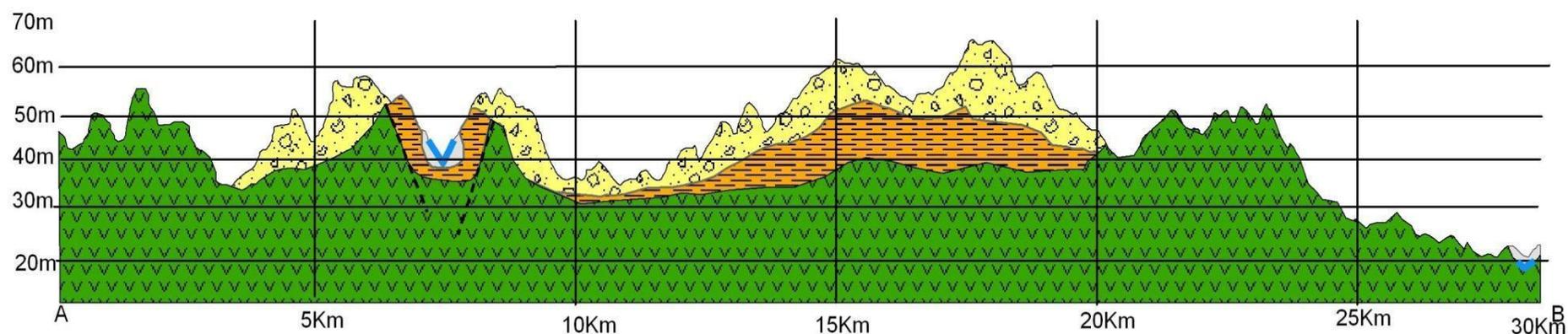
Fig. 6. Variación de psamitas en la zona de estudio. A) Al tope se observa psamitas silicificadas apoyada sobre arenisca rojiza alterada con niveles de grano más gruesos. B, C y D) Arenisca silicificada diferencialmente.

Por otro lado, las psamitas están compuestas por gravas y cantos bien redondeados de hasta 15 centímetros de diámetro, de composición cuarzosa (calcedonia, ópalo) y en menor proporción clastos de pelitas rojas (Figura 7).



Fig. 7. Depósitos de pefitas. A y C) Deposito de clastos de cuarzo apoyada sobre arenisca fina B) Conglomerado de clastos de cuarzo con matriz arenosa fina. D) Intercalación de arenisca fina con niveles pefíticos.

Corte Geológico



Leyenda

-  Reciente
-  Salto
-  Fray Bentos
-  Arapey
-  Falla

Tesis: Wilson Esteban Abelenda Falcón
Montevideo 2016



Fig8. Corte geológico de la zona A-B. Escala vertical exagerada con el fin de mostrar variaciones litológicas.

7.2 Balance hídrico

La región bajo estudio se caracteriza por tener un clima templado con precipitaciones repartidas durante el año, aunque los meses más lluviosos suelen ser desde diciembre a marzo, y durante el período de octubre-noviembre con precipitaciones superiores a los 120 mm por mes. Los meses con menor precipitación corresponden a junio-agosto de 46 a 70 mm por mes. Los veranos son cálidos, con temperaturas máximas de 33° C. Los otoños y las primaveras son templados, con promedio de 18° C y mínimas de 9° C. Los inviernos son fríos con temperaturas promedio de 12° C y mínimas de 2° C. Por el clima y los suelos es un área ideal para la actividad agrícola-hortofrutícola. Para esta actividad se utilizan invernaderos y son regados en invierno para proteger las plantaciones de las heladas. Por ello, el uso del agua subterránea en esta zona es esencial durante todo el año. Asimismo, es importante conocer el clima del área para la estimación de la recarga del acuífero y para ello se utilizaron los valores de precipitación y evapotranspiración de la estación INIA Salto Grande (tabla 4), que fueron graficados (Figuras 9, 10, 11 y 12) para determinar la cantidad de agua (en milímetros) que excede en la relación precipitación/evapotranspiración. Se estima que la recarga principal de los acuíferos se dan entre los meses de marzo a junio y en el mes de octubre, esto es debido a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración como se observa en la gráfica de la figura 12. En los meses de diciembre y enero la evapotranspiración es mayor que la precipitación, por lo que en estos meses los acuíferos no se recargan por infiltración de la precipitación. La infiltración del agua subterránea depende del tipo de suelo, la geología, la vegetación y de la intensidad de las precipitaciones. El valor de agua excedido anualmente de la precipitación es de 325 mm/m² y el área del acuífero Salto aflorante es de 250 Km² con una infiltración del 25% (según Montaña 1995). Por lo tanto, la recarga anualmente por exceso de agua es de 2.03 x 10⁷ m³. Para el caso del acuífero Arapey, el área aflorante es de 160 Km² con una infiltración estimada del 15%, por lo que anualmente la recarga es de 7.80 x 10⁶ m³.

Según la base de datos de 492 perforaciones con un caudal medio de 8.8m³/hora con 15 horas de extracción por día, se estima una extracción anual de 2.3 x 10⁷ m³ /año (DINAMIGE, Junio 2009). Si sumamos la recarga de los acuíferos Salto y Arapey la misma es de 2.81 x 10⁷ m³. Por lo que la extracción sería menor a los valores de recarga de 5,1 x 10⁶ m³.

Tabla 4 Valores de evapotranspiración y precipitaciones de la estación Salto Grande (Fuente web del INIA)

Información del CLIMA: INIA Salto Grande Desde 1996 hasta 2015					
Variable: Evapotranspiración "Penman" mm					
Período:	Promedio:	Acumulada:	Desvío Estandar:	Total de Registros:	
Enero	192,1	3650,2	1,5	620,0	
Febrero	144,7	2750,1	1,4	565,0	
Marzo	121,5	2309,3	1,1	620,0	
Abril	74,2	1409,4	0,8	600,0	
Mayo	43,5	825,6	0,5	620,0	
Junio	29,3	556,0	0,4	600,0	
Julio	38,2	726,7	0,5	620,0	
Agosto	62,8	1192,8	0,8	620,0	
Setiembre	87,4	1660,3	0,9	600,0	
Octubre	123,5	2345,6	1,2	620,0	
Noviembre	154,6	2936,7	1,5	600,0	
Diciembre	180,6	3430,9	1,6	620,0	
Variable: Precipitación Acumulada mm					
Período:	Promedio:	Acumulada:	Desvío Estandar:	Total de Registros:	
Enero	138,4	2629,0	13,1	620,0	
Febrero	156,8	2979,5	15,7	565,0	
Marzo	166,3	3159,2	17,2	620,0	
Abril	144,6	2746,8	13,1	600,0	
Mayo	102,6	1950,3	12,0	620,0	
Junio	91,0	1728,1	12,1	600,0	
Julio	46,3	879,2	6,1	620,0	
Agosto	70,4	1336,9	8,1	620,0	
Setiembre	95,3	1811,4	9,8	600,0	
Octubre	177,4	3370,0	16,0	620,0	
Noviembre	149,8	2846,1	13,0	600,0	
Diciembre	158,8	3016,5	15,9	620,0	
Variable: Temperatura Promedio (Máx + Min / 2)					
Período:	Máximo:	Mínimo:	Promedio:	Desvío Estandar:	Total de Registros:
Enero	33,7	17,1	25,7	2,8	620
Febrero	32,6	15,7	24,5	2,8	565
Marzo	31,5	13,7	22,6	3,2	620
Abril	28,7	9,7	19,0	3,5	600
Mayo	27,7	4,8	15,4	3,9	620
Junio	25,6	2,1	13,0	4,2	600
Julio	25,7	2,4	12,4	4,7	620
Agosto	27,9	3,9	14,4	4,9	620
Setiembre	28,7	7,0	15,9	3,9	600
Octubre	30,0	7,9	19,2	3,4	620
Noviembre	30,1	12,3	21,5	3,2	600
Diciembre	32,5	16,1	23,8	2,9	620

A pesar del volumen de extracción anual no se han constatado descensos en los niveles piezométricos de los pozos en los acuíferos. Cabe destacar que, únicamente en la zona norte de la ciudad de Salto, se observa un descenso, no mayor a un metro. Esto es debido a que los cálculos de recarga de los acuíferos es aún mayor que el volumen de extracción anual.

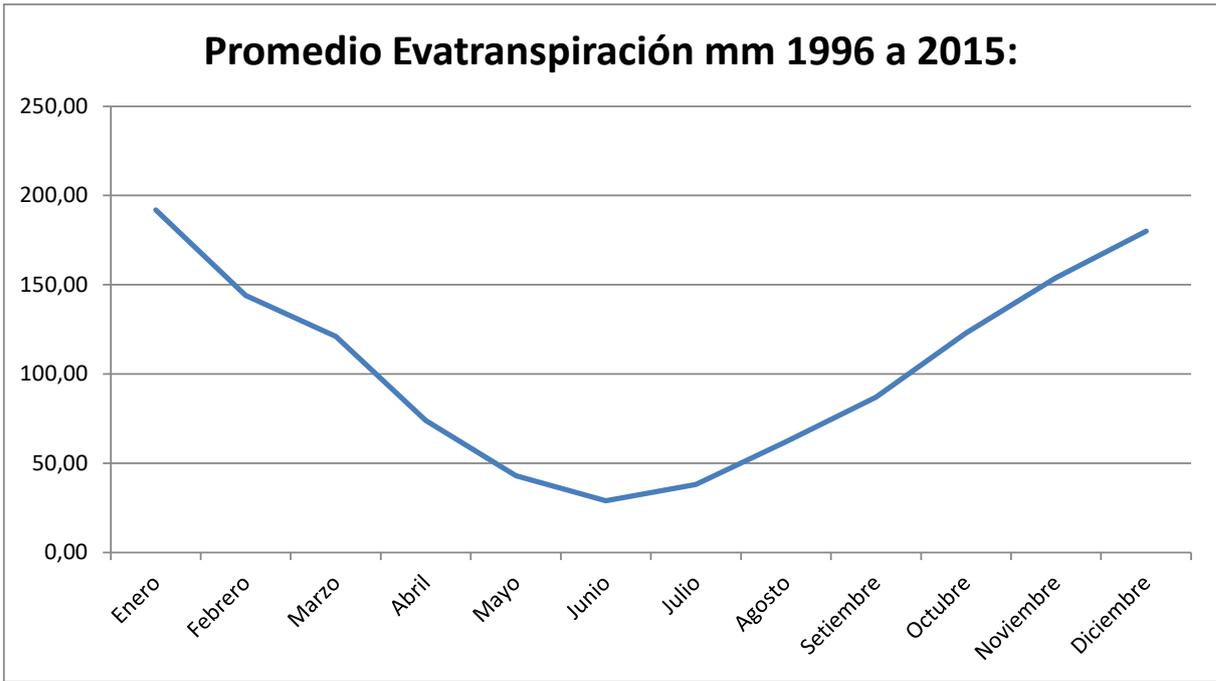


Fig. 9. Promedio de evapotranspiración entre los años 1996 a 2015. Fuente: Banco de datos web de INIA.

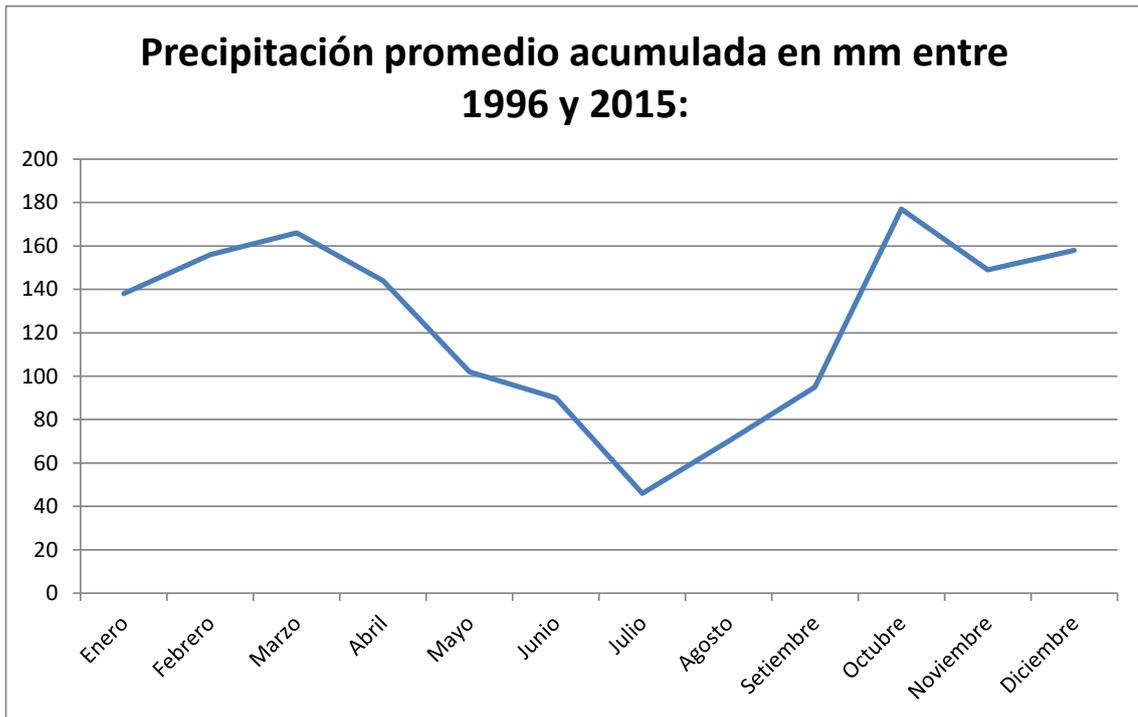


Fig. 10. Precipitación acumulada entre los años 1996 a 2015. Fuente: Banco de datos web de INIA.

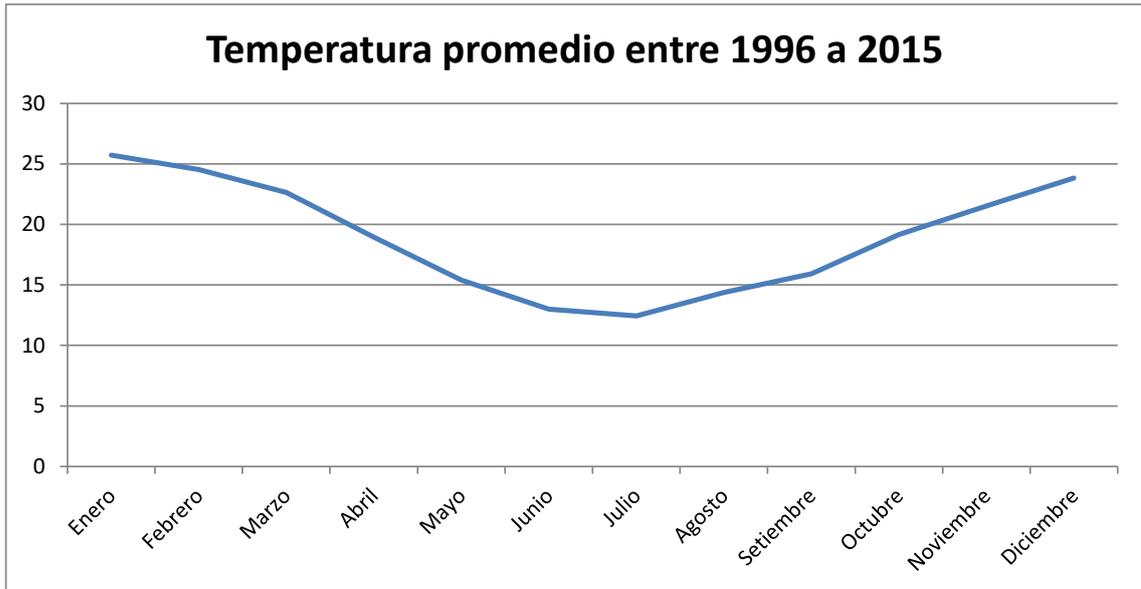


Fig. 11. Temperatura promedio entre los años 1996 a 2015. Fuente: Banco de datos web de INIA.

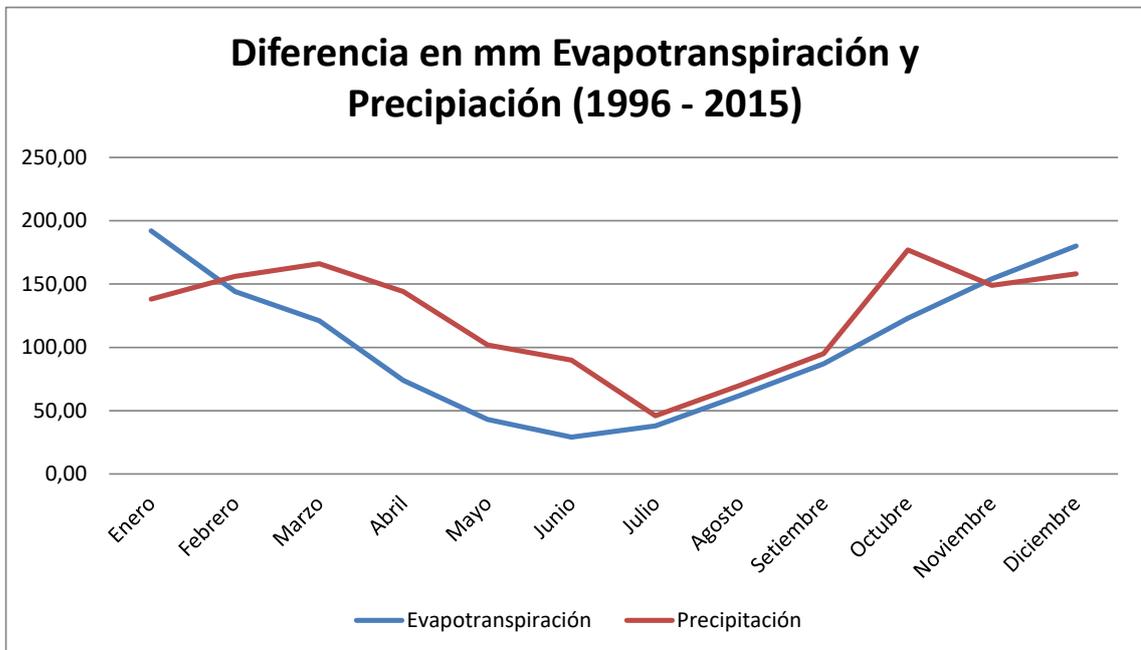


Fig. 12 Diferencia en mm entre evapotranspiración precipitación durante los años 1996 y 2015

7.2 Rasgos hidrogeológicos del acuífero Salto.

Profundidad

El espesor del acuífero Salto surge del análisis de las perforaciones existentes en el área. De acuerdo a los datos obtenidos de estas perforaciones, el mayor espesor del acuífero se encuentra en la localidad de Corralitos con una potencia máxima de 32 metros y en los alrededores de la ciudad de Salto con un espesor de 20 metros. Los menores espesores se encuentran en Colonia Gestido y Colonia 18 de Julio, con 12 metros de espesor (ver tabla 5). Las perforaciones que captan agua del acuífero Salto, en su mayoría se encuentran a profundidades entre los 20 y 30 metros (figura 13). Esto coincide con la potencia del acuífero en las áreas de mayor espesor. Seguidos de estos, las perforaciones pueden llegar hasta los 40 metros llegando hasta el acuitardo.

Tabla 5. Espesor del acuífero Salto según datos de perforaciones

Lugar de Medida	Espesor (m)	Observaciones
Colonia 18 de Julio	12	Sobrepuesto a la Fm. Fray Bentos
Colonia Gestido	12	Sobrepuesto a la Formación Arapey y Fm Fray Bentos.
Corralito	32	Cubierto por los sedimentos de la Formación Nueva Hespérides
Alrededores de ciudad Salto	20	-

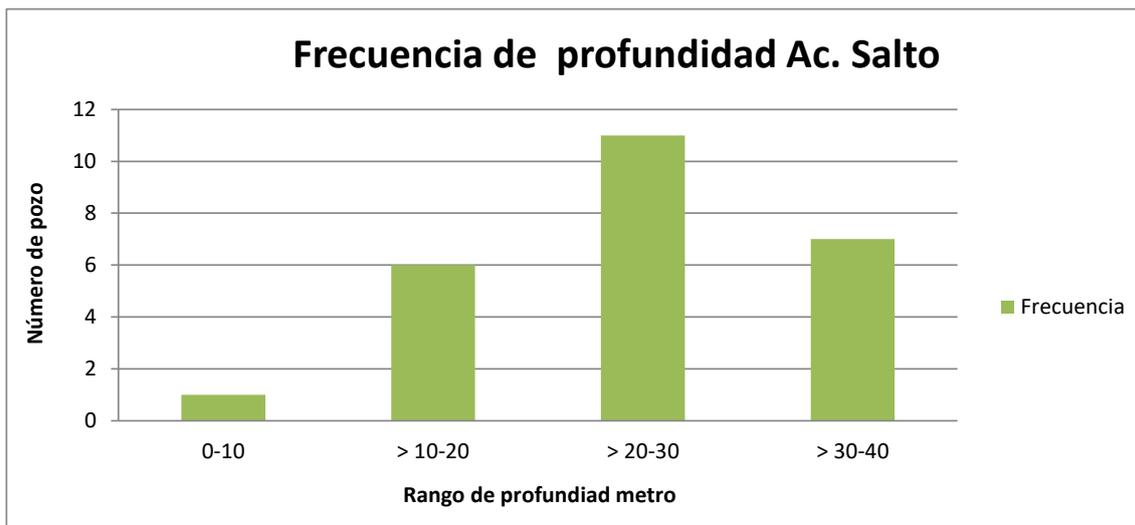


Fig. 13. Frecuencia profundidad acuífero Salto.

Caudal

El caudal específico (caudal que por metro de depresión se puede extraer del acuífero) se determinó para la perforación N° 5 (ver anexo 1 fig. A1.3) en 6,0 m³/h/m; perforación que sólo extrae agua del acuífero Salto, según los datos constructivos del mismo. El caudal promedio para el acuífero Salto es de 7.0 m³/h. Según la base de datos, la mayor concentración de perforaciones tiene un caudal menor a 5.0 m³/h (figura 14). Especialmente los caudales no son de forma uniforme, por lo que no es preciso indicar en qué localidad se encuentran los mayores caudales.

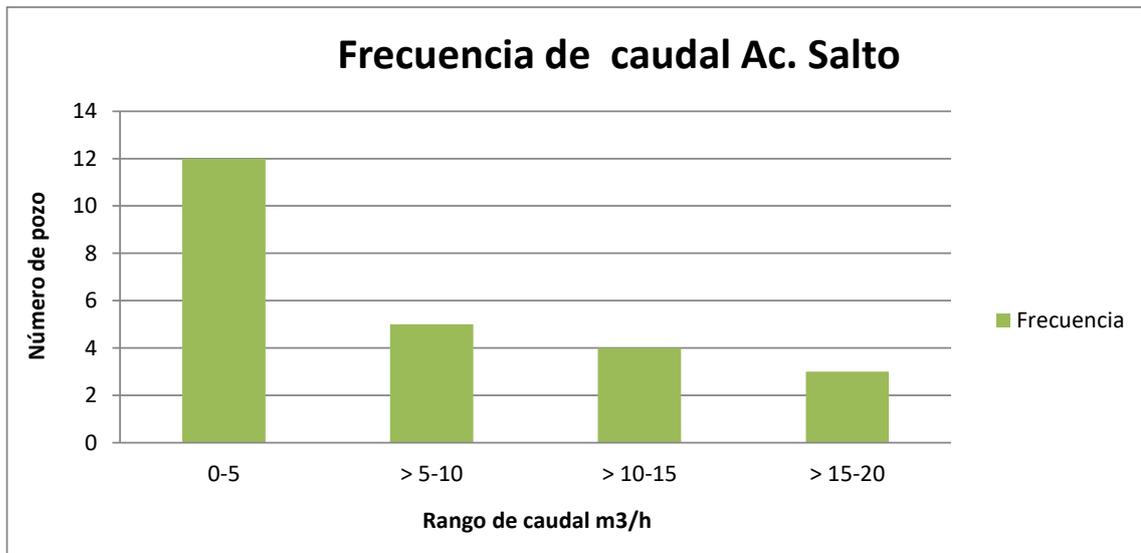


Fig. 14. Frecuencia de caudal acuífero Salto.

Nivel Estático

En lo que respecta a los niveles estáticos de las perforaciones, se realizó un gráfico de frecuencias (figura 15) en ella se observa que la mayoría de las perforaciones cuenta con niveles entre los 10 y los 20 metros. Los niveles más someros se encuentran en la zona de Corralitos y los más profundos, mayores a 20 metros, corresponden al paraje de Colonia Osimani Llerena.

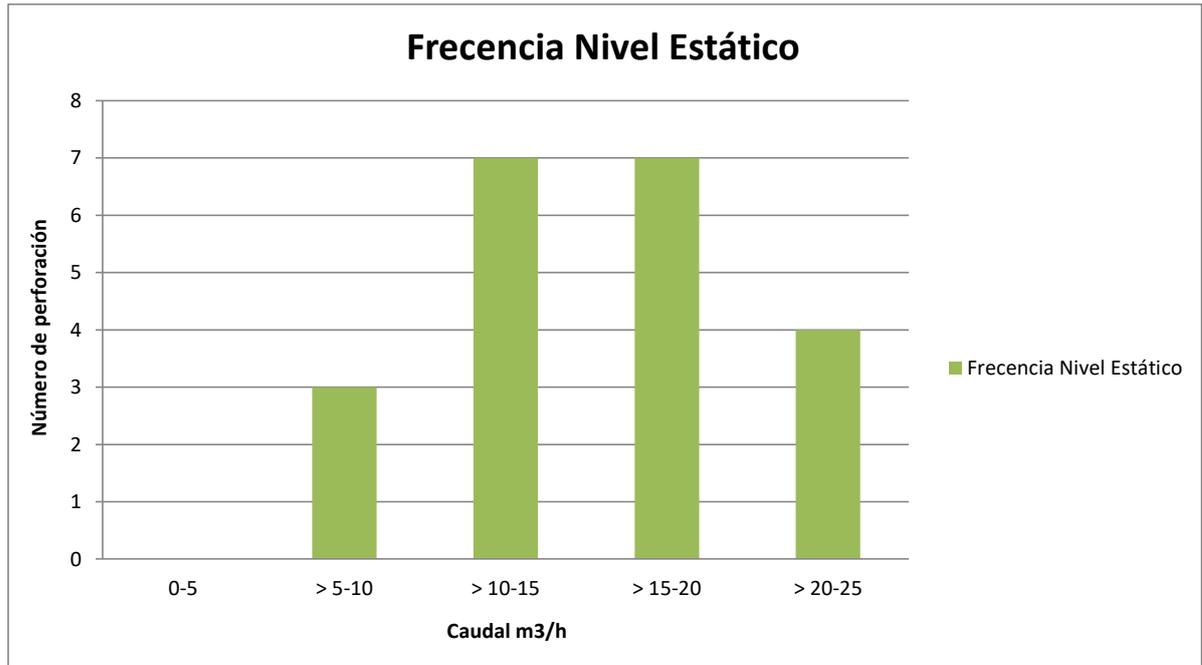


Fig.15 Frecuencia nivel estático acuífero Salto.

Parámetros hidráulicos

En este trabajo no se realizaron pruebas hidráulicas para poder estimar la permeabilidad y transmisibilidad. Sin embargo se cuenta como antecedente de permeabilidad el valor de 2,5 m/día, dato arrojado de ensayo de bombeo realizado por OSE y presentado por Montaña (1995). Considerando los valores de permeabilidad propuesto por Benítez (1972), en Custodio y Llamas (1976), la permeabilidad del acuífero Salto estaría comprendida entre uno y 10 m/día con una porosidad eficaz media no mayor a 20%.

Para determinar la transmisibilidad del acuífero, se considera el único valor de permeabilidad obtenido por ensayo (2,5 m/día) y el espesor medio del acuífero se estimó 25 metros obteniéndose un valor de transmisibilidad de 62,5 m²/día.

7.3 Rasgos hidrogeológicos del acuífero Arapey

Profundidad

Para este tipo de análisis del acuífero Arapey se realizó la gráfica de frecuencia de profundidades de los pozos, en la que se observa que el rango de profundidad más frecuente es de 20 a 40 metros, seguidos por 40 a 60 metros según la gráfica (figura 16). La profundidad promedio para este acuífero es de 42 m, con una profundidad máxima alcanzada de 114 m en el club remeros y una mínima de 25 m en el poblado Garibaldi. Esto coincide con los límites de coladas de la propia formación donde se encuentran las napas. Estos pozos, que captan agua del acuífero Arapey, son más profundos que los del acuífero Salto.

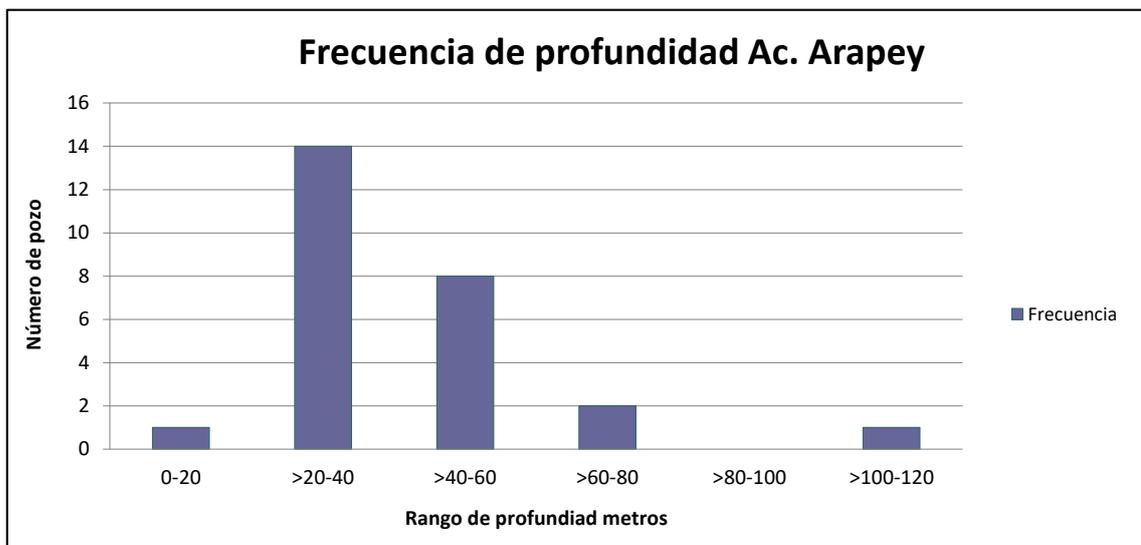


Fig. 16. Frecuencia de profundidad acuífero Arapey.

Caudal

De acuerdo al análisis de datos de caudales del registro de perforaciones el promedio para el acuífero Arapey es de 15.0 m³/h, observándose caudales máximos de 40 m³/h, con una profundidad de 114 m en el club remeros de Salto, y el mínimo es de 2 m³/h con una profundidad de 28 metros, en la localidad de Daymán. Se realizaron gráficos de frecuencia de caudal (figura 17) constatándose que el núcleo de las perforaciones presenta un caudal entre los cinco y los 10 m³/h. A diferencia del acuífero Salto, en el de Arapey es posible obtener caudales mayores.

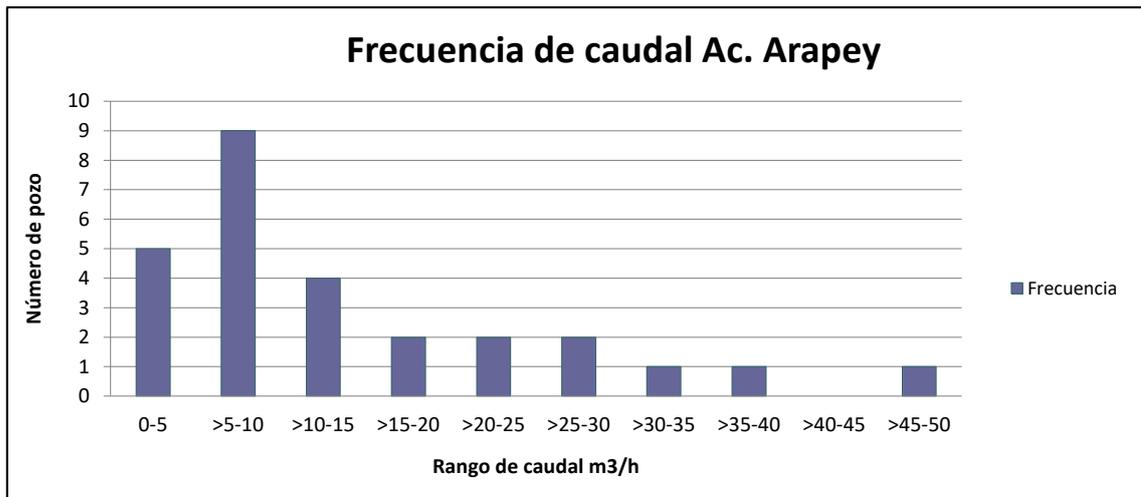


Fig. 17. Frecuencia de caudal acuífero Arapey.

Nivel Estático

En lo que respecta a los niveles estáticos, el rango con mayor frecuencia se encuentra entre los 15 y los 20 metros seguidos por 10 a 15 y 20 a 25 metros. El valor mínimo de nivel estático es de 7,27 metros que corresponde a una perforación de 42 m, con un caudal de 14 m³/h, y el valor máximo es de 33,68 metros, correspondiente a una perforación ubicada al Este de la localidad de Colonia Gestido, de la que se desconoce la profundidad y el caudal (véase figura 18). Por otra parte se observó, de acuerdo a las ubicaciones de las perforaciones, que los niveles estáticos más someros se encuentran en la zona centro y Sur del área, mientras que los niveles más profundos, se ubican al norte en la localidad de Colonia Gestido.

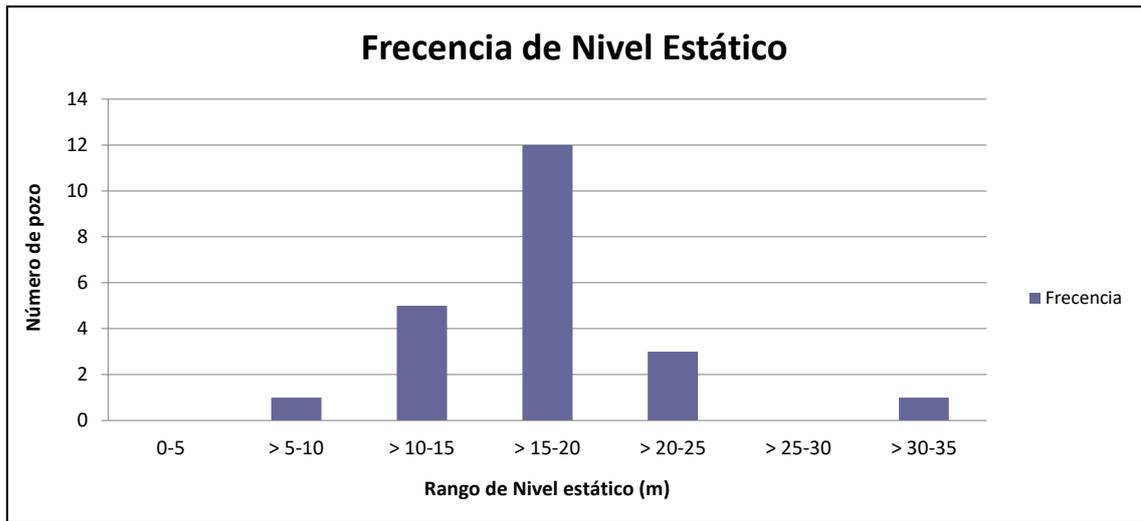


Fig. 18. Frecuencia de nivel estático acuífero Arapey.

7.4 Piezometría

La piezometría que se presenta a continuación corresponde a los acuíferos Salto y Arapey de manera individual para los años 1997 y 2015. Este análisis se llevó a cabo con el objeto de determinar si existen variaciones en los descensos de los niveles piezométricos con el transcurso del tiempo, producto de la creciente demanda de agua subterránea en el área de estudio. Para poder realizar este análisis se monitorearon los niveles piezométricos en el mes de abril del 2015 de 30 perforaciones (Figura 19 y 20). Los valores de niveles piezométricos del año 1997 fueron tomados de estudios de monitoreo realizados por DINAMIGE y la piezometría correspondiente presentada por Montaña (1995).

7.4 a Acuífero Salto.

En lo que respecta a la dinámica del acuífero Salto y que se aprecia en el mapa piezométrico de la figura 20 se observa lo siguiente:

1. Zona de recarga: ubicada en el Norte, con cota de isopieza de 40 metros en las proximidades de la localidad Colonia 18 de Julio y sur del área de estudio (zona Corralitos) con isopiezas de 25 metros.
2. Zona de descarga: se observa que el flujo subterráneo tiene direcciones al Oeste, hacia el río Uruguay y Sur hacia el río Daymán del área de estudio comportándose como efluentes del sistema.

Considerando la piezometría de simulación del acuífero Salto con un aumento del 50% de la extracción, según Montaña (1995) (ver anexo 3 figura A 3.1), en los años 1997 (ver figura 21) y 2015 (ver figura 20) se puede observar que no hubo cambios significativos en el diseño de las isopiezas. Este comportamiento, nuevamente sugiere que la recarga del acuífero

es mayor a su descarga y extracción, a pesar de la creciente demanda de agua subterránea de la zona.

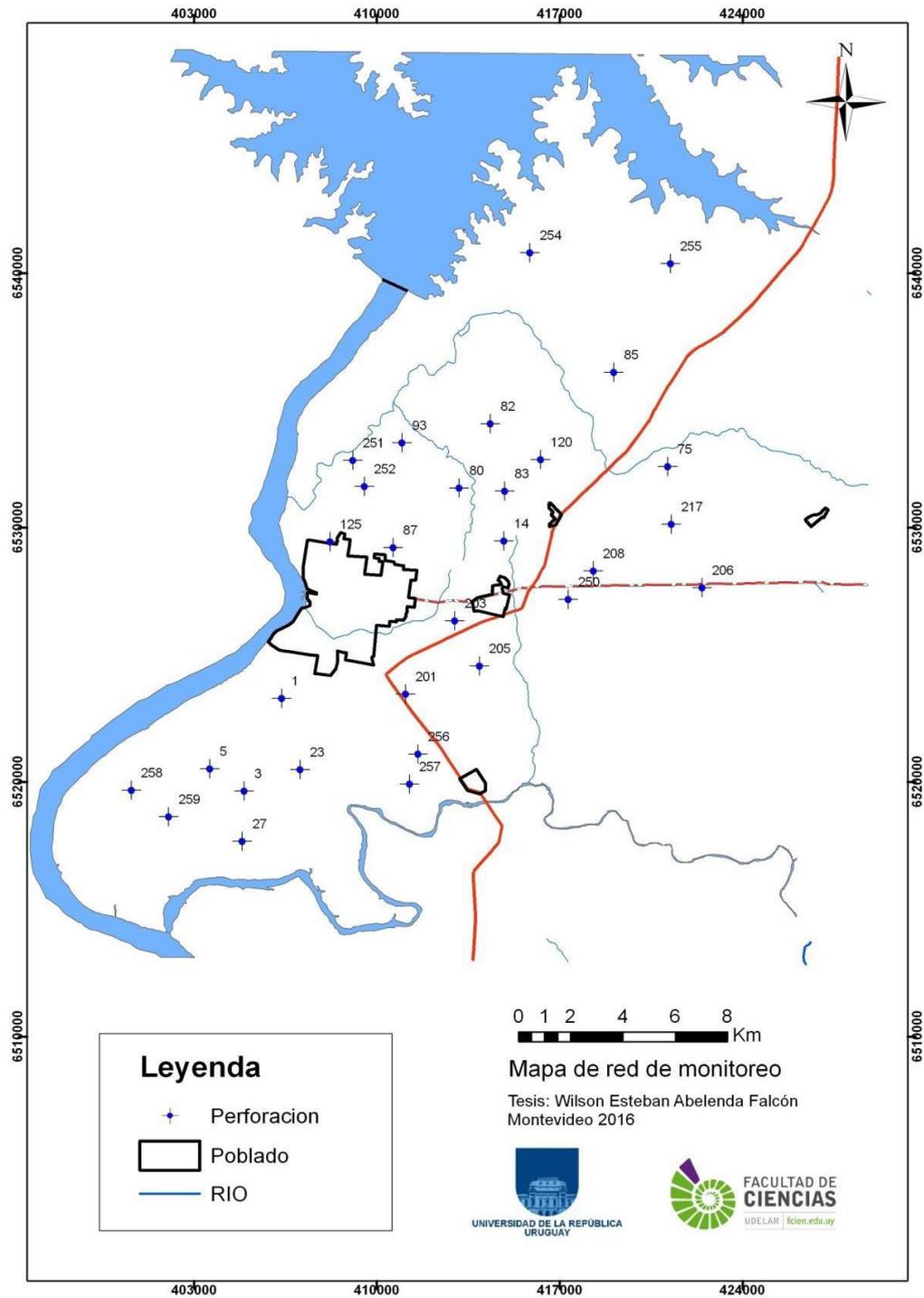


Fig. 19. Mapa de red de monitoreo. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.

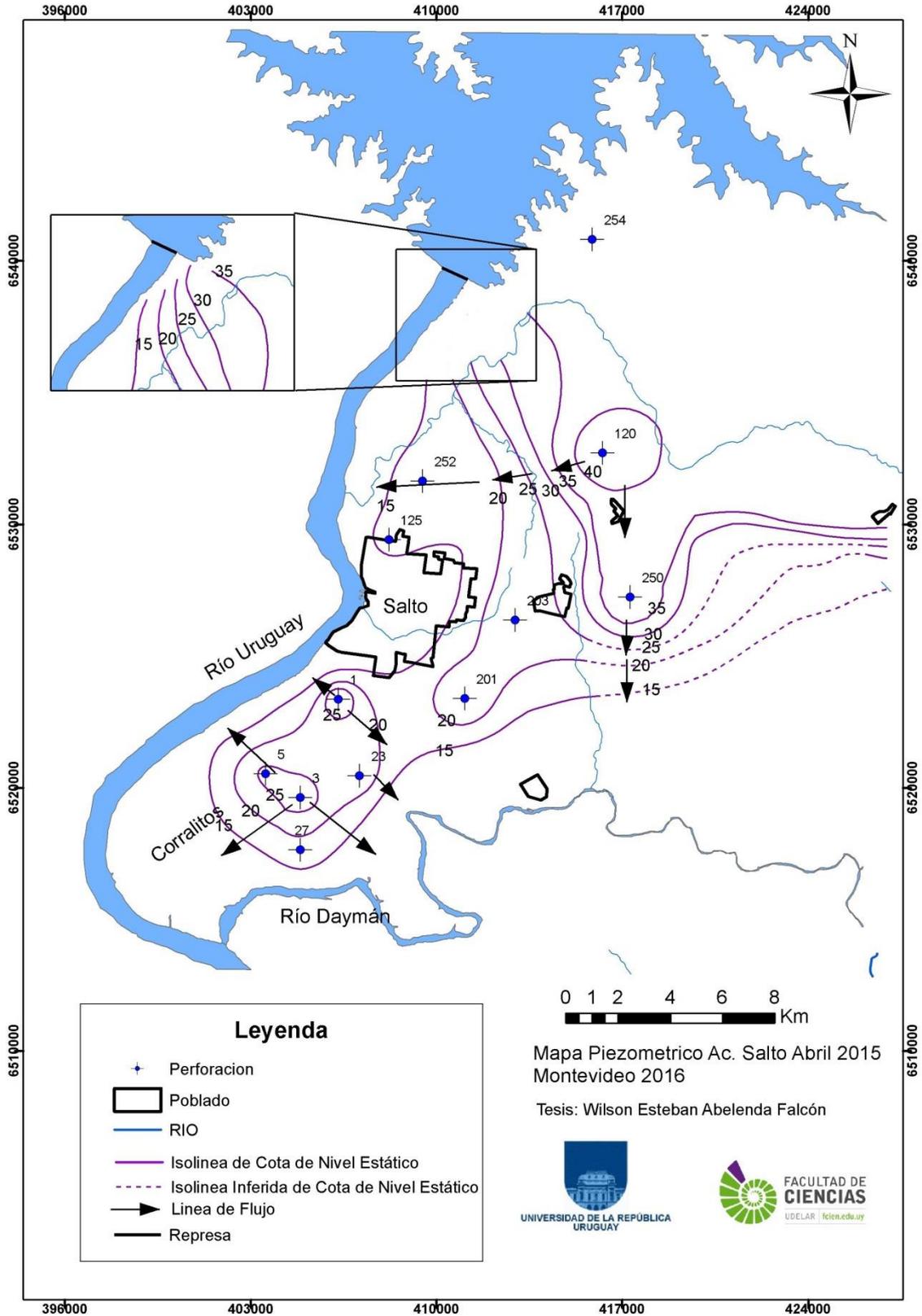


Fig. 20. Mapa piezométrico Abril 2015 Ac. Salto. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.

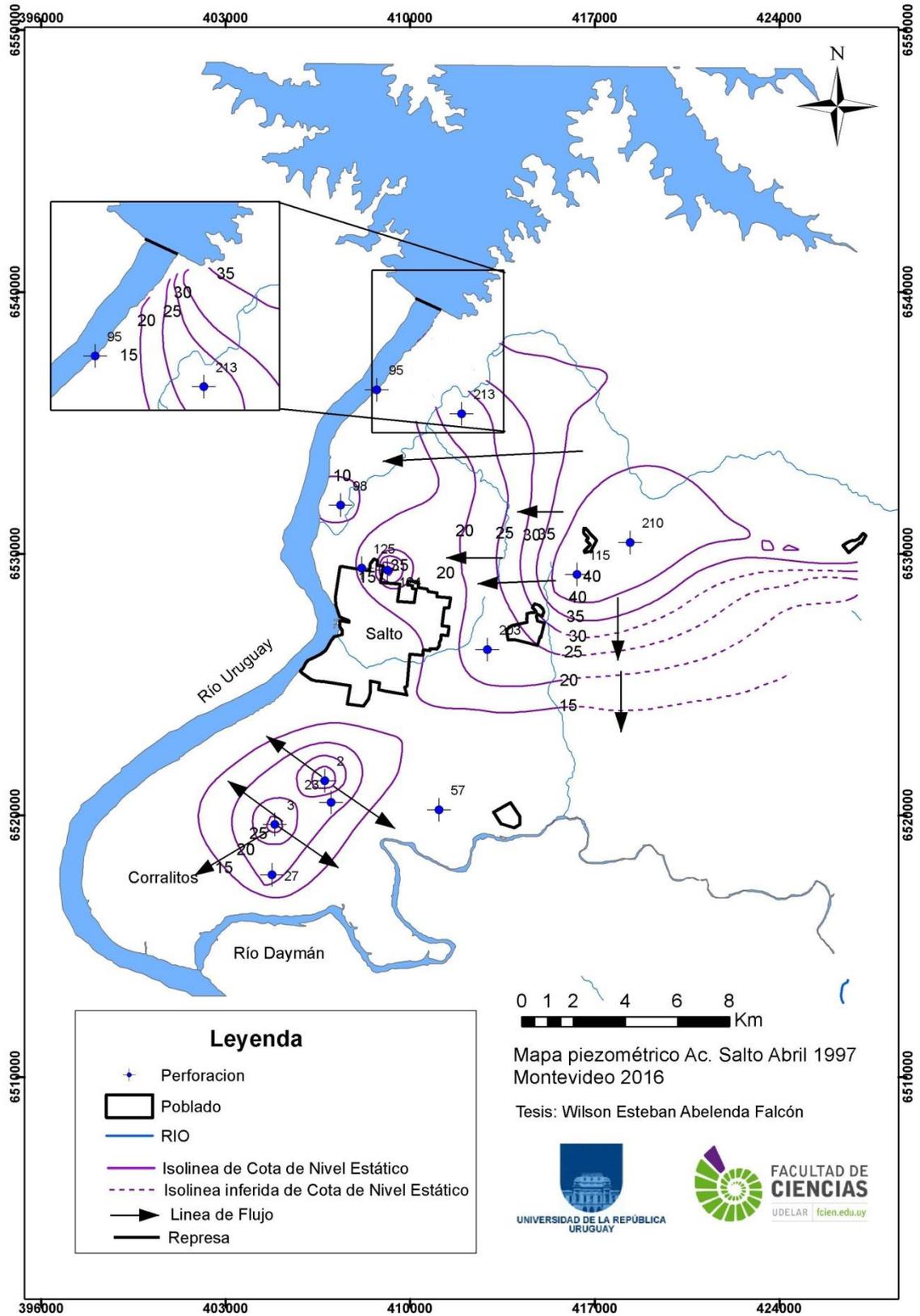


Fig. 21. Mapa Piezométrico Abril 1997 Ac Salto. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.

7.4 b Acuífero Arapey:

Al igual que para el acuífero Salto los datos piezométricos se procesaron para los años 1997 y 2015. De éste se realizaron dos mapas piezométricos que se muestran en las Figuras 22 y 23. De ellos se desprende que la zona de recarga se ubica al Norte del área de estudio, influenciado por la represa de Salto Grande; mientras que la zona de descarga se encuentra al Sur con dirección hacia el río Daymán, y al suroeste hacia el río Uruguay. Al ser un acuífero fisurado, la posibilidad de recargarse por infiltración directa de precipitaciones es muy difícil debido a las limitaciones del área, ya que está condicionada por la densidad de fracturas que presenten las unidades geológicas involucradas. En la zona Norte de la ciudad de Salto, el basalto se encuentra con mayor densidad de fracturas que al Sur (Montaño 1995). Su alimentación es posible de verificar a partir de la coincidencia de una fractura con el emplazamiento de una corriente superficial, como un río o un arroyo, por ejemplo, arroyo San Antonio Grande, arroyo San Antonio Chico al Norte, entre otros.

El monitoreo realizado de niveles estáticos en abril del 2015 se comparó con los datos de abril 1997. Se observa que el agua subterránea tiene direcciones bien definidas influenciada al norte por la represa Salto Grande con cota mayor recargando el acuífero, estas direcciones son de norte a sur y norte suroeste. Comparando las líneas de flujo del año 1997 y las del año 2015, no se encuentran diferencias en lo que respecta a la dirección de flujo.

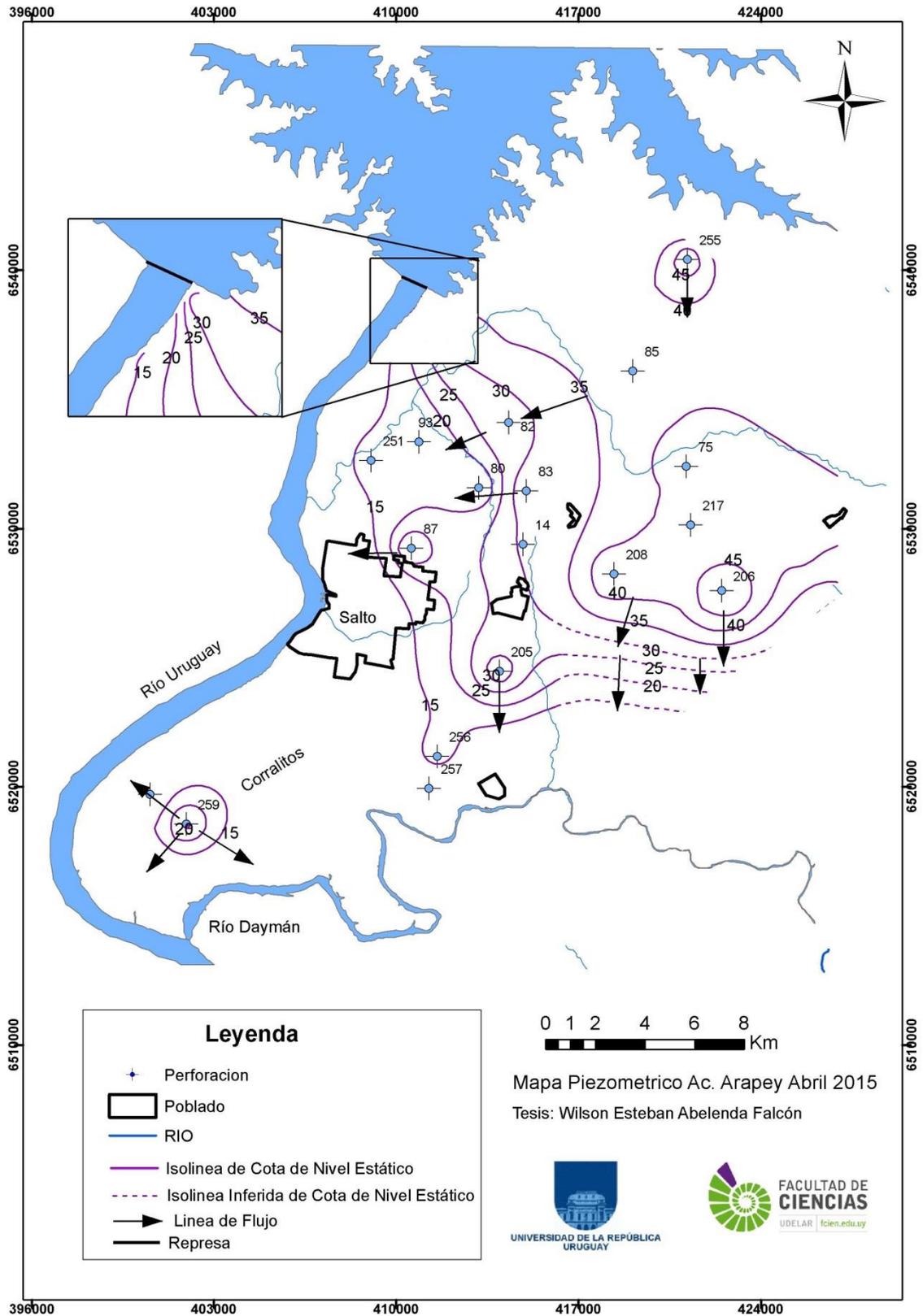


Fig. 22. Mapa piezométrico para abril 2015 Ac. Arapey. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.

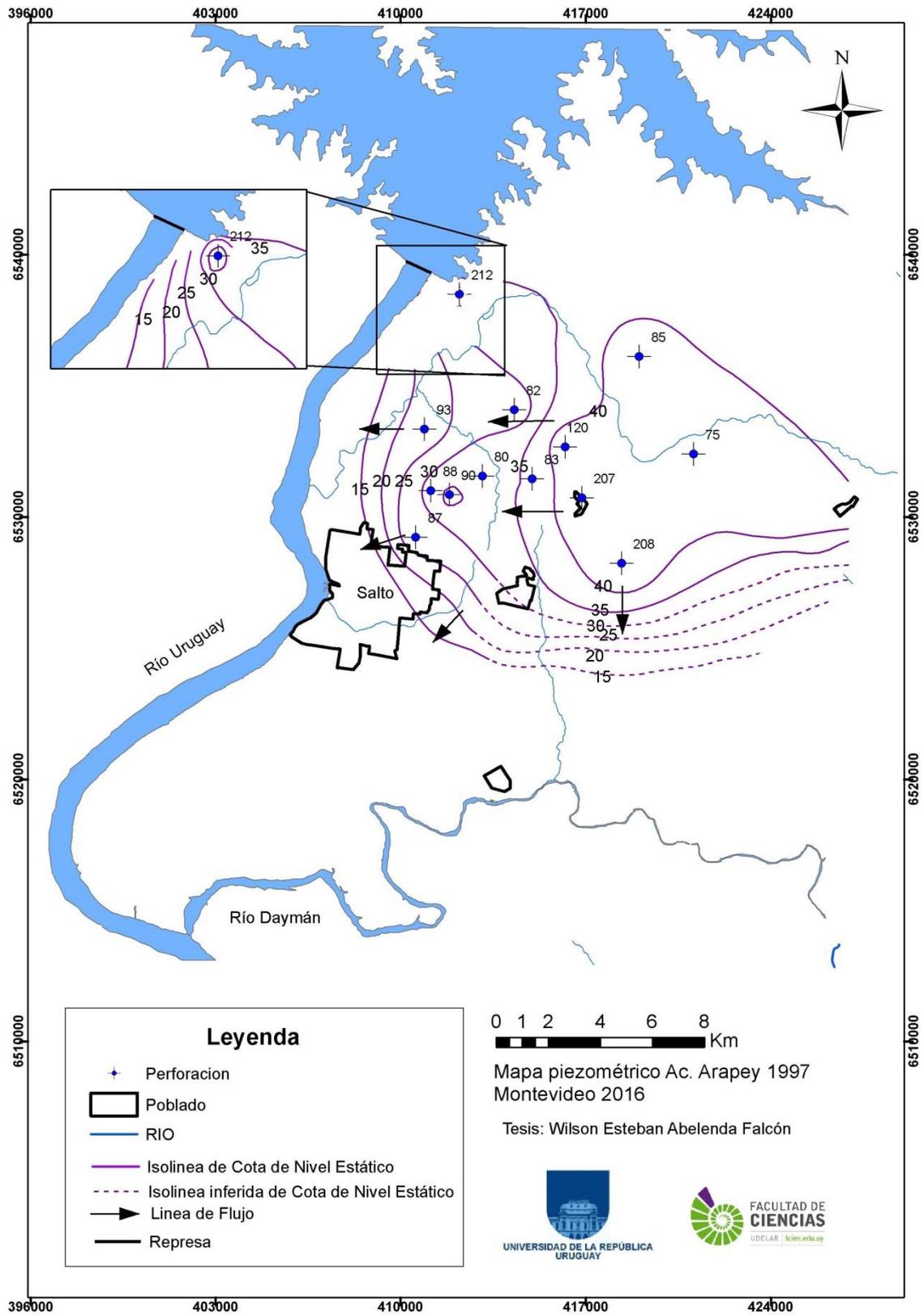


Fig. 23. Mapa piezométrico Abril 1997 Ac. Arapey. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.

Según las líneas piezométricas presentadas en las figuras 20 y 22, se puede observar que la recarga del acuífero también está dada por la infiltración de aguas superficiales, efecto de la represa de Salto Grande. La cota de este embalse es de 35 msnm y por debajo de ella es de 11 msnm, lo que se da una infiltración hacia los acuíferos. Otra zona de recarga de los acuíferos se da en la zona de Corralitos (Figura 1) y a la vez descarga en los ríos Daymán y Uruguay. Esta zona de descarga y recarga se observa en los mapas piezométricos y coincide con el análisis del trabajo de Montaña (1995).

7.5 Diferencias de niveles estáticos (1997-2015).

La diferencia de niveles estáticos entre abril de 1997 y abril 2015 se muestra en la Figura 24, en la que se puede observar a pocos kilómetros al NE de la ciudad de Salto, el nivel estático de los pozos tuvo un descenso no mayor a un metro; mientras que en el resto de la zonas se encuentra recuperada y en algunos casos sin variación alguna. Estas diferencias no tienen por qué ser alarmantes, y no requieran especial atención ya que dicho descenso puede estar dado por la propia fluctuación del nivel estático del acuífero, variaciones en las precipitaciones, evapotranspiración y temperatura del año (medido) y el uso de la perforación. Además de estos parámetros a tener en cuenta, pueden existir errores en las mediciones de campo por el uso de la perforación y no haberse tenido en cuenta el tiempo de recuperación del mismo. No se tratan de pozos piezómetros, sino de perforaciones de uso industrial-agrícola. Sí llama la atención en la ciudad de Salto y al sur, donde los niveles superan el metro de recuperación. Para analizar mejor la tendencia de los niveles estáticos en la región, se graficaron 11 perforaciones (figura 25) del banco de datos de DINAMIGE, que fueron monitoreados en el periodo comprendido entre setiembre 1996 hasta abril del 2015. Del análisis de la información se deduce que el nivel estático, más allá de las fluctuaciones, no ha sufrido cambios significativos. Analizando la gráfica se observa que en octubre de 1997, enero 1999 y setiembre de 2013 los niveles tendieron a descender y los picos de recuperación de los mismos, ocurren en julio 1998 y agosto del 2001.

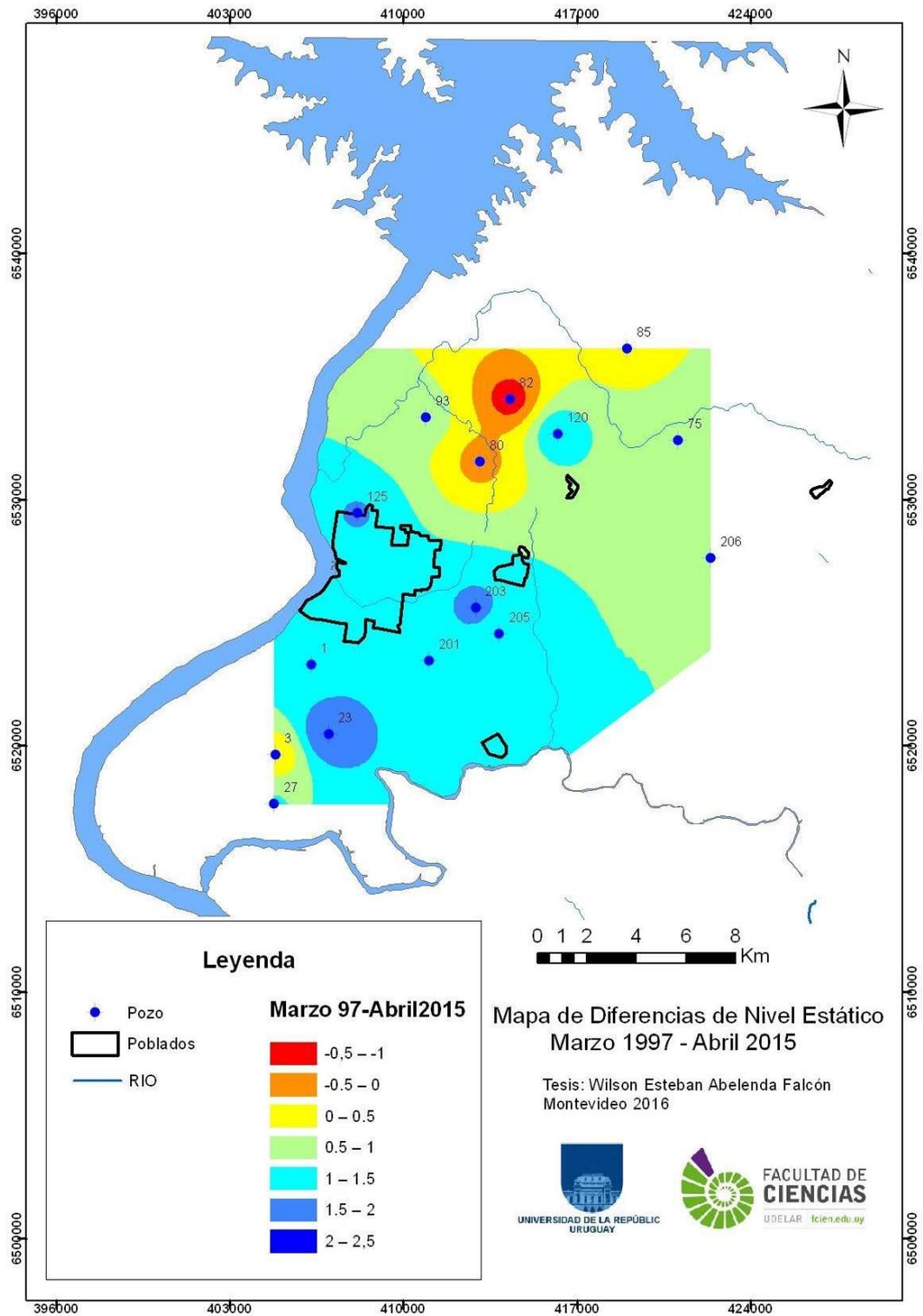


Fig. 24. Mapa de diferencia de niveles estáticos entre marzo 1997 y abril 2015. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84

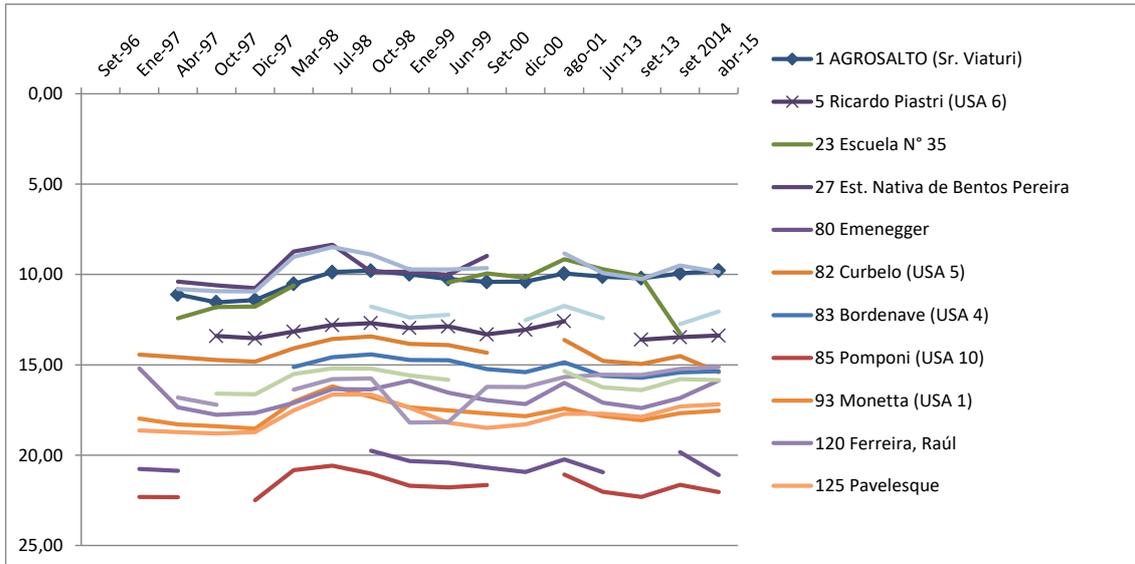


Fig. 25. Niveles estáticos de las perforaciones entre los años 1996 y 2015. Fuente: Banco de datos DINAMIGE.

7.6- Hidrogeoquímica.

El agua subterránea pasa a través de un cuerpo mineralizado, disolviendo y movilizándolo algunos elementos químicos. Esto permite un incremento de las concentraciones de los elementos a lo largo del tiempo. Las concentraciones de los elementos en agua subterránea van a depender de diferentes factores como ser el tiempo de contacto con el cuerpo mineralizado, la roca encajante, la química y el ambiente hidrogeoquímico.

Para poder analizar la química del agua subterránea en los acuíferos Salto y Arapey se dispuso de 22 análisis fisicoquímicos completos (ver tabla 6) realizados por el Laboratorio de Tecnogestión del Ministerio de Industria Energía y Minería del Uruguay. Los datos que se presentan tuvieron tratamiento de cálculo de error según la fórmula a continuación, descartándose aquellos que presentaban errores mayores a los admitidos.

$$\text{Error (\%)} = 100 * (\sum \text{Cat} - \sum \text{An}) / (\sum \text{Cat} + \sum \text{An}).$$

Tabla 6 Análisis fisicoquímico completo de muestras de los acuíferos Salto y Arapey

Resultado de Laboratorio																	
Numero de Perforacion	pH (unidades de pH)	Turbidez NTU	Sólidos totales (mg/L)	Alcalinidad			Dureza (mg/L CaCO ₃)	Calcio (mg/L CaCO ₃)	Magnesio (mg/L Mg ²⁺)	Nitratos (mg/L NO ₃ ⁻)	Nitritos (mg/L NO ₂ ⁻)	Cloruros (mg/L Cl ⁻)	Fósforo total (mg/L P)	Sílice (mg/L SiO ₂)	Sulfatos (mg/L SO ₄ ²⁻)	Sodio (mg/L Na ⁺)	Potasio (mg/L K ⁺)
				Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad bicarbonatada (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad fenolftaleína (mg/L CaCO ₃)											
27	7,46 ± 0,02	0,11 ± 0,01	345 ± 35	155 ± 8	155 ± 8	No cont	156 ± 8	118 ± 6	9,5 ± 0,5	37,6 ± 2,6	0,172 ± 0,017	4,0 ± 0,2	<0,10 (****)	74,5 ± 3,7	9,7 ± 1,0	9,8 ± 0,5	4,4 ± 0,2
254	6,66 ± 0,02	0,14 ± 0,01	249 ± 25	94 ± 5	94 ± 5	No cont	101 ± 5	67 ± 3	8,3 ± 0,4	20,7 ± 1,5	0,025 ± 0,002	4,7 ± 0,2	0,11 ± 0,02	80,2 ± 4,0	<5,0	7,4 ± 0,4	1,2 ± 0,1
255	7,18 ± 0,02	7,90 ± 0,79	462 ± 46	314 ± 16	314 ± 16	No cont	279 ± 14	201 ± 10	18,9 ± 0,9	5,4 ± 0,4	0,032 ± 0,003	2,5 ± 0,1	0,29 ± 0,03	82,0 ± 4,1	<5,0	16,8 ± 0,8 (**)	1,4 ± 0,1 (**)
256	7,45 ± 0,02	0,10 ± 0,01	465 ± 46	276 ± 14	276 ± 14	No cont	175 ± 9	128 ± 6	11,6 ± 0,6	52,8 ± 3,7	<0,017	6,7 ± 0,3	<0,10 (****)	82,9 ± 4,1	8,7 ± 0,9	61,0 ± 3,1	2,5 ± 0,1
257	7,55 ± 0,02	0,30 ± 0,03	454 ± 45	260 ± 13	260 ± 13	No cont	276 ± 14	221 ± 11	13,3 ± 0,7	25,3 ± 1,8	0,025 ± 0,002	29,8 ± 1,5	<0,10 (****)	70,2 ± 3,5	22,4 ± 2,2	24,6 ± 1,2	1,2 ± 0,1
258	7,06 ± 0,02	0,91 ± 0,09	460 ± 46	291 ± 14	291 ± 15	No cont	292 ± 15	233 ± 12	14,2 ± 0,7	44,2 ± 3,1	<0,017	4,5 ± 0,2	<0,10 (****)	85,4 ± 4,3	10,5 ± 1,0	15,3 ± 0,8	2,7 ± 0,1
259	6,11 ± 0,02	3,37 ± 0,33	255 ± 26	20 ± 1	20 ± 1	No cont	79 ± 4	40 ± 2	9,5 ± 0,5	90,4 ± 6,3	0,045 ± 0,005	10,9 ± 0,5	0,14 ± 0,02	39,2 ± 2,0	<5,0	12,2 ± 0,6 (**)	4,4 ± 0,2 (**)
203	7,30 ± 0,02	0,50 ± 0,05	502 ± 50	259 ± 13	259 ± 13	No cont	284 ± 14	220 ± 11	15,8 ± 0,7	44,7 ± 3,1	<0,017	13,6 ± 0,7	<0,025	87,7 ± 4,4	7,4 ± 0,4	20,5 ± 1,0	2,4 ± 0,1
208	7,28 ± 0,02	<0,06	432 ± 43	271 ± 13	271 ± 13	No cont	247 ± 12	193 ± 9	13,2 ± 0,6	29,1 ± 2,0	<0,017	8,1 ± 0,4	<0,025	88,3 ± 4,4	7,6 ± 0,4	31,5 ± 1,6	1,9 ± 0,1
206	7,08 ± 0,02	<0,06	564 ± 56	292 ± 15	292 ± 15	No cont	332 ± 17	255 ± 13	18,9 ± 0,9	47,8 ± 3,3	<0,017	19,2 ± 1,0	<0,025	82,3 ± 4,1	20,6 ± 1,0	26,5 ± 1,3	1,8 ± 0,1
217	7,24 ± 0,02	0,18 ± 0,05	518 ± 52	291 ± 15	291 ± 15	No cont	307 ± 15	216 ± 11	22,0 ± 1,0	35,6 ± 2,5	<0,017	8,6 ± 0,4	<0,025	89,7 ± 4,5	9,7 ± 0,5	23,5 ± 1,2	1,5 ± 0,1
85	7,23 ± 0,02	0,38 ± 0,04	396 ± 40	249 ± 13	249 ± 13	No cont	243 ± 12	192 ± 10	12,5 ± 0,6	24,9 ± 1,7	<0,017	6,1 ± 0,3	<0,025	81,0 ± 4,0	7,4 ± 0,4	22,5 ± 1,1	1,1 ± 0,1
120	7,14 ± 0,02	11,6 ± 1,0	660 ± 66	291 ± 15	291 ± 15	No cont	378 ± 19	318 ± 16	14,5 ± 0,7	124 ± 9	0,017 ± 0,005	17,9 ± 0,9	0,14 ± 0,07	79,2 ± 4,0	17,2 ± 0,9	25,5 ± 1,3	2,3 ± 0,1
83	7,45 ± 0,02	0,10 ± 0,01	418 ± 42	232 ± 12	232 ± 12	No cont	175 ± 9	160 ± 8	3,6 ± 0,2	33,5 ± 2,3	<0,017	5,0 ± 0,3	<0,025	83,1 ± 4,2	6,9 ± 0,3	40,6 ± 2,0	1,1 ± 0,1
82	7,53 ± 0,02	0,10 ± 0,01	442 ± 44	226 ± 11	226 ± 11	No cont	220 ± 11	190 ± 10	7,5 ± 0,3	40,8 ± 2,9	<0,017	8,1 ± 0,4	<0,025	80,6 ± 4,0	8,3 ± 0,4	22,5 ± 1,1	1,1 ± 0,1
80	7,77 ± 0,02	0,12 ± 0,01	400 ± 40	252 ± 13	252 ± 13	No cont	212 ± 11	185 ± 9	6,6 ± 0,3	12,3 ± 0,9	<0,017	4,5 ± 0,2	<0,025	83,1 ± 4,2	6,4 ± 0,3	22,5 ± 1,1	1,6 ± 0,1
125	7,40 ± 0,02	0,28 ± 0,04	508 ± 51	266 ± 13	266 ± 13	No cont	266 ± 13	233 ± 12	8,1 ± 0,4	29,4 ± 2,1	<0,017	16,2 ± 0,8	<0,025	85,4 ± 4,3	13,4 ± 0,7	21,5 ± 1,1	1,2 ± 0,1
251	7,67 ± 0,02	0,46 ± 0,05	384 ± 38	238 ± 12	238 ± 12	No cont	212 ± 11	196 ± 10	4,0 ± 0,2	20,8 ± 1,5	<0,017	3,0 ± 0,2	<0,025	88,0 ± 4,4	3,5 ± 0,2	6,7 ± 0,3	2,1 ± 0,1
93	7,54 ± 0,02	0,12 ± 0,01	346 ± 35	236 ± 12	236 ± 12	No cont	204 ± 10	159 ± 8	11,0 ± 0,6	17,3 ± 1,2	<0,017	4,0 ± 0,2	<0,025	79,7 ± 4,0	6,0 ± 0,3	25,5 ± 1,3	1,1 ± 0,1
1	6,85 ± 0,02	0,88 ± 0,08	424 ± 42	113 ± 6	113 ± 6	No cont	175 ± 9	130 ± 7	11,3 ± 0,6	76,5 ± 5,4	<0,017	12,6 ± 0,6	<0,025	79,1 ± 4,0	14,6 ± 0,7	15,4 ± 0,8	1,8 ± 0,1
23	7,76 ± 0,02	0,12 ± 0,01	318 ± 32	195 ± 10	195 ± 10	No cont	152 ± 8	109 ± 5	10,7 ± 0,5	12,3 ± 0,9	<0,017	3,5 ± 0,2	<0,025	62,7 ± 3,1	11,6 ± 0,6	29,5 ± 1,5	14,9 ± 0,7
5	7,22 ± 0,02	0,09 ± 0,01	618 ± 62	161 ± 8	161 ± 8	No cont	278 ± 14	218 ± 11	14,7 ± 0,7	30,0 ± 2,1	<0,017	12,1 ± 0,6	<0,025	71,3 ± 3,6	167,5 ± 8,4	53,0 ± 2,6	1,0 ± 0,1

7.6 a Acuífero Salto

En la red de monitoreo se extrajeron siete muestras de agua correspondientes al acuífero Salto. El tratamiento de los datos puede observarse en la tabla 7 con sus cálculos de error correspondientes. Se constató que el agua subterránea del acuífero Salto presenta pH, temperatura y conductividad eléctrica apta para consumo según norma UNIT 883:2008, mientras que algunas perforaciones se encuentran con valores anómalos, como por ejemplo altos contenidos en nitratos.

Tabla 7. Resultados de análisis fisicoquímico de elementos mayores en acuífero Salto

Pozo	203	125	1	23	5	27	254
CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	512	503	413	178	612	344,00	
pH	7,40	7,30	6,80	7,10	7,60	7,60	6,40
aniones	mg/l						
HCO ₃ ⁻	316,0	324,0	138,0	238,0	196,0	189,00	115,00
SO ₄ ⁼	7,4	13,4	14,6	11,6	167,5	9,70	5,00
Cl ⁻	13,6	16,2	12,6	3,5	12,1	4,00	4,70
NO ₃ ⁻	44,7	29,4	76,5	12,3	30,0	37,60	20,70
sumaniones	381,7	383	241,7	265,4	405,6	240,3	145,4
cationes	mg/l						
Na ⁺	20,5	21,5	15,4	29,5	53,0	9,80	7,40
K ⁺	2,4	1,2	1,8	14,9	1,0	4,40	1,20
Ca ⁺⁺	88,0	93,0	52,0	44,0	88,0	47,00	27,00
Mg ⁺⁺	15,8	8,1	11,3	10,7	14,7	9,50	8,30
sumcaciones	126,7	123,8	80,5	99,1	156,7	70,7	43,9
	mg/l						
NH ₄ ⁺							
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻	58,3	45,6	89,1	15,8	42,1	41,6	25,4
Na ⁺ +K ⁺	22,9	22,7	17,2	44,4	54	14,2	8,6
aniones(meq/l)	meq/l						
HCO ₃ ⁻	5,18	5,31	2,26	3,90	3,21	3,10	1,89
SO ₄ ⁼	0,15	0,28	0,30	0,24	3,49	0,20	0,10
Cl ⁻	0,38	0,46	0,35	0,10	0,34	0,11	0,13
NO ₃ ⁻	0,72	0,47	1,23	0,20	0,48	0,61	0,33
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻	1,10	0,93	1,58	0,30	0,82	0,72	0,47
sumaniones	6,44	6,52	4,16	4,44	7,53	4,02	2,46
cationes(meq/l)	meq/l						
Na ⁺ +K ⁺	0,95	0,97	0,72	1,66	2,33	0,54	0,35
Na ⁺	0,89	0,93	0,67	1,28	2,30	0,43	0,32
K ⁺	0,06	0,03	0,05	0,38	0,03	0,11	0,03
Ca ⁺⁺	4,40	4,65	2,60	2,20	4,40	2,35	1,35
Mg ⁺⁺	1,31	0,67	0,93	0,88	1,21	0,79	0,69
sumcaciones	6,66	6,28	4,25	4,75	7,94	3,67	2,39
aniones(%)	%	%	%	%	%	%	%
HCO ₃ ⁻	80,46	81,45	54,44	87,87	42,69	77,08	76,77
SO ₄ ⁼	2,39	4,28	7,32	5,44	46,36	5,03	4,24
Cl ⁻	5,95	7,00	8,54	2,22	4,53	2,80	5,39
NO ₃ ⁻	11,20	7,27	29,69	4,47	6,43	15,09	13,60
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻	17,15	14,27	38,24	6,69	10,96	17,89	18,99
sumaniones	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
cationes(%)	%	%	%	%	%	%	%
Na ⁺ +K ⁺	14,31	15,36	16,84	35,04	29,33	14,66	14,76
Na ⁺	13,39	14,87	15,76	27,01	29,00	11,60	13,47
K ⁺	0,92	0,49	1,08	8,03	0,32	3,06	1,28
Ca ⁺⁺	66,08	73,99	61,18	46,34	55,38	63,97	56,52
Mg ⁺⁺	19,61	10,65	21,98	18,62	15,29	21,37	26,72
sumcaciones	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Relacionesiónicas							
rNa ⁺ /rK ⁺	14,52	30,46	14,54	3,37	90,10	3,79	10,48
rMg ⁺⁺ /rCa ⁺⁺	0,30	0,14	0,36	0,40	0,28	0,33	0,51
rSO ₄ ⁼ /rCl ⁻	0,40	0,61	0,85	2,45	10,24	1,79	0,79
rCl ⁻ /rHCO ₃ ⁻	0,07	0,09	0,16	0,08	0,11	0,04	0,07
icb	-1,49	-1,12	-1,02	-15,87	-5,84	-3,78	-1,66
Kr	4,91	5,08	2,37	3,22	3,57	2,83	1,69
INDICE SAR	0,5	0,6	0,5	1,0	1,4	0,3	0,3
Error (%)	1,68	-1,65	1,12	3,35	2,70	-4,50	-1,39

Características Físico-Químicas

Temperatura: del total de las muestras analizadas en campo, surge que la temperatura media del agua subterránea para el acuífero Salto es de 20,5°C, encontrándose temperaturas máximas de 21,2°C y mínimas de 20°C. Estas temperaturas son consistentes con las temperaturas normales del agua subterránea.

Potencial de hidrogeniones: en lo que respecta al pH en campo, el valor mínimo se encuentra en la perforación 254 con un valor de 6,4 y el máximo en las perforaciones 5 y 27 con valores de 7,6 cada una. Estos valores son normales en el agua subterránea.

Conductividad Eléctrica en campo (CE): la CE del acuífero Salto (ver figura 26) presenta un valor medio medido de 427 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa un valor mínimo en la perforación N°23 con 178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un valor máximo en la perforación N° 5 de 612 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dureza Total: la dureza total muestra un valor medio para este acuífero de 240 mg/l y para los bicarbonatos (HCO_3^-), el valor medio es de 216 ppm con un máximo de 324 ppm en la perforación 125 y un mínimo de 115 para la perforación 254. Según el valor medio de dureza total se la clasifica como agua dura.

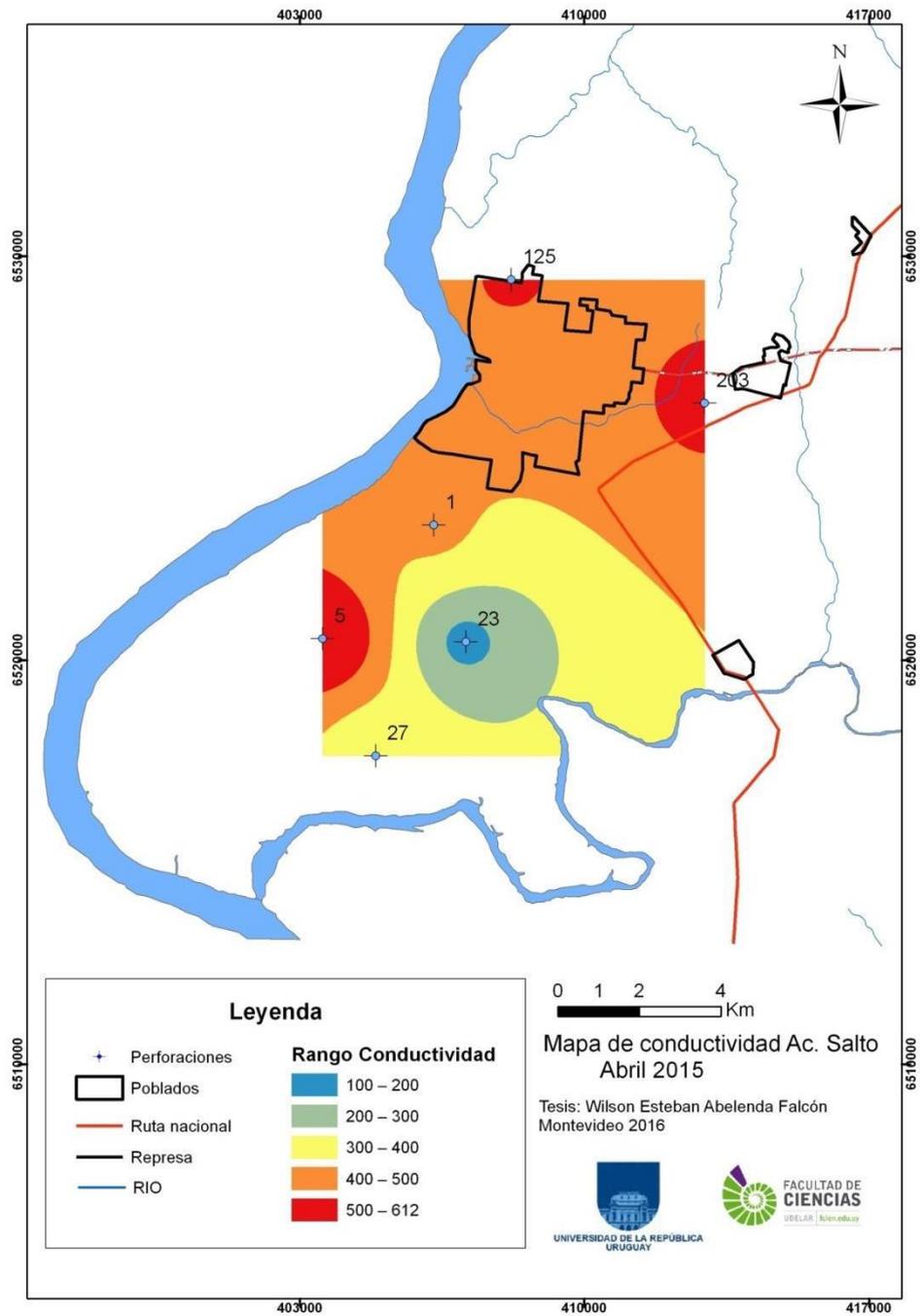


Fig. 26. Mapa de rango de conductividades eléctricas del acuífero Salto. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84

Iones Principales

Sodio: del análisis estadístico descriptivo del elemento surge que la concentración media de Na^+ en el acuífero Salto es de 22,4 mg/l. Su valor máximo es de 53 mg/l correspondiente a la perforación N° 5 ubicada en la zona de Corralitos y el valor mínimo de 7.4 mg/l en la perforación N° 254 ubicada al Norte de la represa de Salto Grande. Estos valores están dentro de los valores de calidad de agua potable según la norma UNIT 883:2008.

Potasio: este elemento se encuentra en la zona de estudio en una concentración media de 3,8 mg/l. El valor máximo constatado es de 14,9 mg/l perteneciente a la perforación N° 23 y el valor mínimo es de 1,0 mg/l en la perforación N° 5, ubicadas ambas en la zona de Corralitos. Este valor máximo de K^+ podría indicar contaminación generada por el uso de fertilizantes y pesticidas.

Calcio: las muestras analizadas en el laboratorio presentan una concentración media de Ca^{++} de 62,7 mg/l con valores máximo de 93 mg/l en la perforación N° 125 ubicada al Norte de la ciudad de Salto y un mínimo de 27 mg/h en la perforación N° 254 al Norte de la represa de Salto Grande.

Magnesio: del análisis se desprende que la concentración media de Mg^{++} en aguas subterráneas del acuífero Salto es de 11,2 mg/l. La concentración máxima es de 15,8 mg/l correspondiente a la perforación N° 203 y el mínimo valor es de 8,1 mg/l en la perforación N° 125 ubicadas respectivamente al Este y al Norte de la ciudad de Salto.

Bicarbonato: habiendo analizado los resultados del laboratorio se determinó una concentración media para HCO_3^- de 216,6 mg/l cuyo valor máximo de 316 mg/l correspondiente a la perforación N° 203 y el mínimo de 115 mg/l en la perforación N° 125 ubicadas respectivamente al Este y al Norte de la ciudad de Salto.

Sulfato: valores de concentración máxima para este elemento corresponde a la perforación N° 5 ubicada en la zona de Corralitos con un valor de 167,5 mg/l. El valor mínimo es de 5,0 mg/l perteneciente a la perforación N° 254 ubicada al Norte de la represa. El valor medio para este elemento en el acuífero Salto es de 32,7 mg/l. Este valor máximo de sulfato indicando contaminación que puede estar dada por la cercanía de una fosa séptica o el uso de fertilizantes y pesticidas.

Cloruros: se determinó que la concentración media de los cloruros para el acuífero Salto es de 9,5 mg/l, con valor máximo de 16,2 mg/l y mínimo de 3,5 mg/l en las perforaciones N° 125 y 23 respectivamente.

Nitratos: la máxima concentración se obtuvo en a la perforación N° 1 con un valor de 76,5 mg/l y el mínimo de 12,3 mg/l en la perforación N° 23. La concentración media de nitratos en el acuífero es de 36 mg/l. Según el valor máximo permitido dentro de los valores de calidad de agua potable según la norma UNIT 883:2008 para nitratos es de 50 mg/l, por lo que la perforación N° 1 sobrepasa dicho valor. Esta contaminación podría estar dada por la cercanía de una fosa séptica o uso de fertilizaciones.

A partir de estos datos se construyeron los siguientes diagramas de Piper (figura 27), Schoeller (figura 28) y el RAS (figura 29) para el acuífero Salto que se muestran a continuación.

El diagrama de Piper corresponde a diagramas triangulares donde se utilizan para representar la proporción de tres componentes en la composición de un una sustancia. La suma de los tres componentes debe de presentar el 100% de la composición de lo que se considera. En hidroquímica se utiliza un triángulo para los cationes y otro para los aniones, por lo tanto, el diagrama de Piper está formado por dos triángulos con un rombo que recoge la información de ambos triángulos. Por tanto, cada análisis queda representado por tres puntos (los dos triángulos y el rombo central).

Tesis: Wilson Esteban Abelenda Falcón
 Marzo 2016

**DIAGRAMA DE PIPER
 PARA ACUIFERO SALTO**

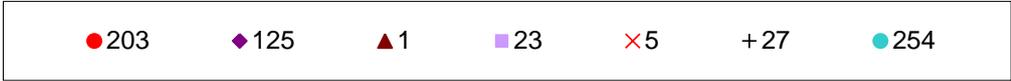
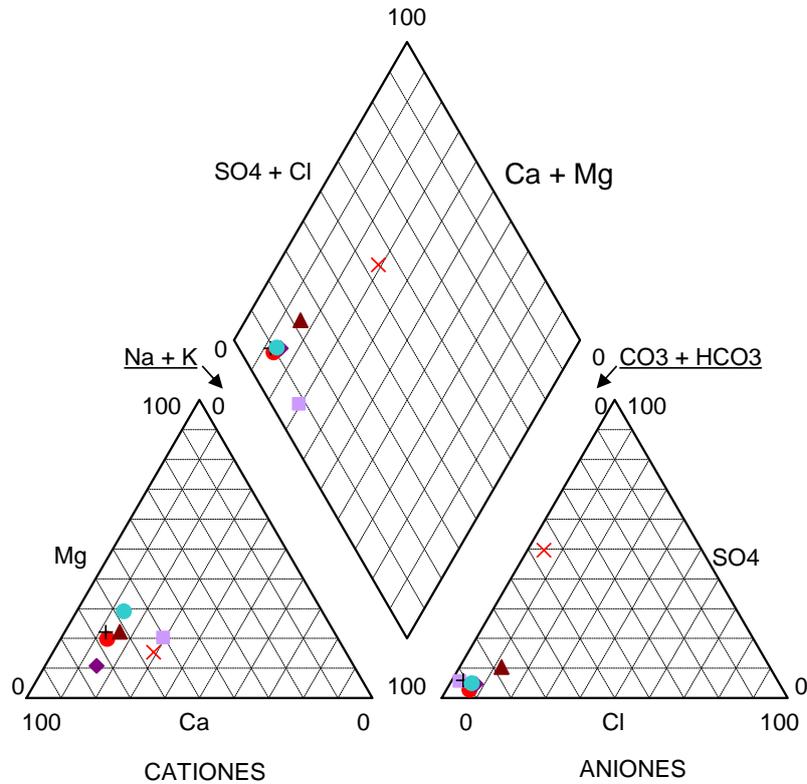


Fig. 27. Diagrama Piper acuífero Salto.

En los Diagramas de Schoeller – Berkaloff o también conocido como Columnas Verticales se representa el valor en miliequivalentes por litro (meq/l) de distintos aniones y cationes, utilizando una escala logarítmica, y uniendo los puntos mediante una secuencia de líneas. Este diagrama es útil para representar en un mismo cuadro aguas de baja y de alta salinidad, y observar la relación entre iones asociada con la inclinación de las líneas.

DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF ACUIFERO SALTO

Tesis: Wilson Esteban Abelenda Falcón
Marzo 2016

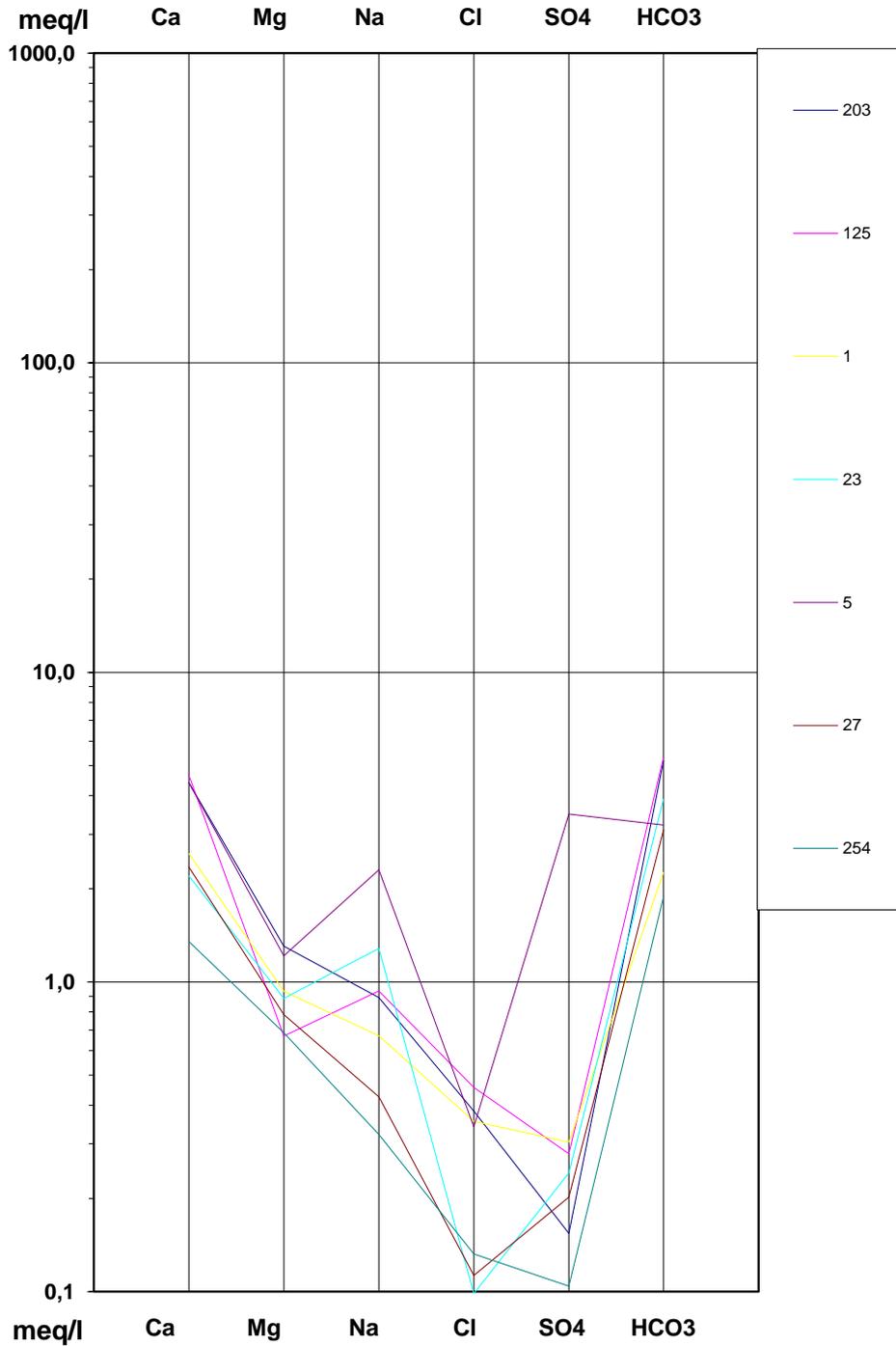


Fig.

28. Diagrama Schoeller acuífero Salto.

La relación de absorción de sodio (RAS) es un parámetro que refleja la posible influencia del ion Na^+ sobre las propiedades del suelo, ya que tiene efectos dispersantes sobre los coloides de este afectando a la permeabilidad. Sus efectos no dependen solo de la concentración en Na^+ sino también del resto de los cationes. Se basa en una fórmula que relaciona los contenidos de Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} y que expresa el porcentaje de sodio intercambiable en el suelo en situación de equilibrio. Altos niveles de RAS podrían dañar la estructura del suelo y generar problemas de infiltración de agua ya que el suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas reduciendo la infiltración de agua y aire.

$$SAR = \frac{Na \text{ (meq/l)}}{\sqrt{\frac{Ca \text{ (meq/l)} + Mg \text{ (meq/l)}}{2}}}$$

CLASIFICACION DE LAS AGUAS PARA RIEGO ACUIFERO SALTO

Tesis: Wilson Esteban Abelenda Falcón

Marzo 2016

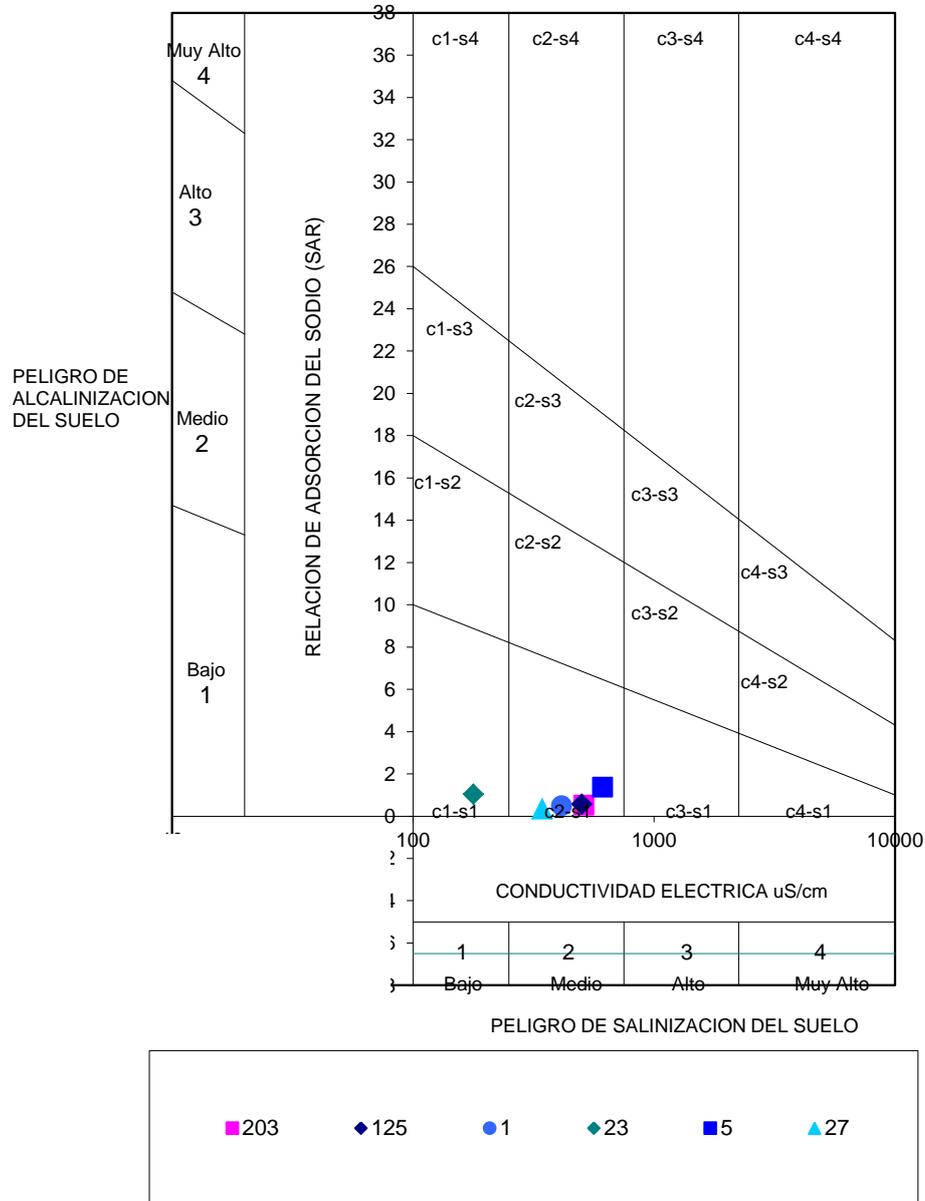


Fig. 29. Diagrama RAS acuífero Salto.

7.6 b Acuífero Arapey

En la red de monitoreo se pudo extraer 14 muestras de agua correspondientes a este acuífero y el tratamiento de los datos se encuentran en el tabla 8 con sus respectivos cálculos de error. Se constató que el agua subterránea del acuífero Arapey presenta pH, temperatura y conductividad eléctrica apta para consumo según norma UNIT 883:2008. Al igual que en el acuífero Salto se encontraron valores anómalos en nitratos (perf. N°256 y 120) lo que indica contaminación que puede estar dada por la cercanía de una fosa séptica o el uso de fertilizantes y pesticidas.

Tabla 8 Resultados de análisis fisicoquímico de elementos mayores en acuífero Arapey.

Pozo	208	206	217	85	83	82	80	93	255	256	257	258	120	251	
CE uS/cm	500	630	560	460	454	440,00	418,00	405,00	546,00	565,00	615,00	570,00	716,00	407,00	
pH	7,00	7,00	7,10	6,80	7,40	7,40	7,40	7,40	7,20	7,30	7,60	6,90	6,70	7,40	
aniones															
	mg/l														
HCO ₃	331,0	356,0	335,0	304,0	283,0	276,00	307,00	287,00	383,00	336,00	318,00	355,00	355,00	290,00	
SO ₄ =	7,6	20,6	9,7	7,4	6,9	8,30	6,40	6,00	5,00	8,70	22,40	10,50	17,20	3,50	
Cl-	8,1	19,2	8,6	6,1	5,0	8,10	4,50	4,00	2,50	6,70	29,80	4,50	17,90	3,00	
NO ₃ -	29,1	47,6	35,6	24,9	33,5	40,80	12,30	17,30	5,40	52,80	25,30	44,20	124,00	20,80	
sumaniones	375,8	443,4	388,9	342,4	322,4	332,2	330,2	314,3	395,9	404,2	395,5	414,2	514,1	317,3	
catiónes															
	mg/l														
Na+	31,5	26,5	23,5	22,2	40,6	22,50	22,60	25,50	16,80	61,00	24,60	15,30	25,50	6,70	
K+	1,9	1,8	1,5	1,1	1,1	1,10	1,60	1,10	1,40	2,50	1,20	2,70	2,30	2,10	
Ca++	77,0	102,0	86,0	77,0	142,0	76,00	74,00	63,60	80,00	51,00	88,00	93,00	127,00	78,00	
Mg++	13,2	18,9	22,0	12,5	3,8	7,50	6,60	11,00	18,90	11,60	13,30	14,20	14,50	4,00	
sumcatiónes	123,6	149,2	133	112,8	187,3	107,1	104,7	100,2	117,1	125,1	127,1	125,2	169,3	90,8	
aniones(meq/l)															
	meq/l														
HCO ₃	5,43	5,84	5,49	4,98	4,64	4,52	5,08	4,70	6,28	5,51	5,21	5,82	5,82	4,75	
SO ₄ =	0,16	0,43	0,20	0,15	0,14	0,17	0,13	0,13	0,10	0,18	0,47	0,22	0,35	0,07	
Cl-	0,23	0,54	0,24	0,17	0,14	0,23	0,13	0,11	0,07	0,19	0,84	0,13	0,50	0,08	
NO ₃ -	0,47	0,77	0,57	0,40	0,54	0,66	0,20	0,28	0,09	0,85	0,41	0,71	2,00	0,34	
Cl-HNO ₃	0,70	1,31	0,82	0,57	0,68	0,89	0,38	0,39	0,16	1,04	1,25	0,84	2,50	0,42	
sumaniones	6,28	7,57	6,51	5,71	5,46	5,58	5,49	5,22	6,54	6,73	6,39	6,68	8,68	5,25	
catiónes(meq/l)															
	meq/l														
Na++K+	1,42	1,20	1,06	0,99	1,79	1,01	1,02	1,14	0,77	2,72	1,10	0,73	1,17	0,35	
Na+	1,37	1,15	1,02	0,97	1,77	0,98	0,98	1,11	0,73	2,65	1,07	0,67	1,11	0,29	
K+	0,05	0,05	0,04	0,08	0,08	0,08	0,04	0,08	0,04	0,06	0,08	0,07	0,05	0,05	
Ca++	3,85	5,10	4,30	3,85	7,10	3,80	3,70	3,18	4,00	2,55	4,40	4,65	6,35	3,90	
Mg++	1,09	1,56	1,82	1,08	0,30	0,62	0,55	0,91	1,56	0,96	1,10	1,17	1,20	0,38	
sumcatiónes	6,36	7,86	7,18	5,88	9,19	5,43	5,26	5,23	6,33	6,22	6,60	6,56	8,72	4,58	
aniones(%)															
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
HCO ₃	86,38	77,06	84,36	87,25	84,90	81,03	81,65	90,10	96,00	81,85	75,25	84,61	67,08	90,61	
SO ₄ =	2,52	5,67	3,10	2,70	2,63	3,10	2,48	2,39	1,59	2,69	6,74	3,18	4,13	1,39	
Cl-	3,63	7,14	3,72	3,01	2,58	4,09	2,31	2,16	1,08	2,80	12,12	1,84	5,81	1,61	
NO ₃ -	7,47	10,14	8,82	7,08	9,89	11,79	3,61	5,34	1,33	12,65	5,89	10,35	23,04	6,39	
Cl-HNO ₃	11,10	17,28	12,54	10,04	12,47	15,87	5,92	7,50	2,41	15,46	18,01	12,21	28,84	8,00	
sumaniones	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
catiónes(%)															
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
Na++K+	22,30	15,24	14,77	16,90	19,51	18,55	19,36	21,75	12,11	43,63	16,67	11,20	13,40	7,54	
Na+	21,54	14,66	14,23	16,43	19,21	18,08	18,58	21,22	11,54	42,61	16,21	10,14	12,72	6,37	
K+	0,76	0,59	0,53	0,48	0,31	0,52	0,78	0,54	0,57	1,03	0,47	1,05	0,67	1,17	
Ca++	60,54	64,88	59,90	65,52	77,25	70,03	70,28	60,85	63,21	40,97	65,67	70,31	72,65	85,23	
Mg++	17,16	19,87	25,33	17,58	3,24	11,42	10,36	17,40	24,68	15,40	16,66	17,90	13,75	7,22	
sumcatiónes	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Relaciones iónicas															
rNa/rK	28,18	25,08	26,63	34,31	62,75	34,77	23,91	33,41	20,40	41,48	34,85	9,63	18,85	5,42	
rMg/rCa	0,28	0,31	0,42	0,27	0,04	0,16	0,15	0,29	0,39	0,38	0,25	0,25	0,19	0,08	
rSO ₄ /rCl	0,69	0,79	0,88	0,90	1,02	0,76	1,05	1,11	1,48	0,96	0,56	1,73	0,71	0,65	
rCl/rHCO ₃	0,04	0,09	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,01	0,03	0,16	0,02	0,09	0,02	
icb	-5,22	-1,22	-3,38	-4,78	-11,73	-3,41	-7,04	-9,09	-9,88	-13,39	-0,31	-4,79	-1,32	-3,08	
Kr	4,94	5,58	5,06	4,57	5,35	4,27	4,54	4,13	5,40	4,26	4,39	5,40	5,39	4,45	
INDICE SAR	0,3	0,6	0,6	0,6	0,9	0,7	0,7	0,8	0,4	2,0	0,6	0,4	0,6	0,2	
Error (%)	0,61	1,86	4,88	1,43	25,43	-1,43	-2,11	0,04	-1,65	-3,90	-2,42	-2,38	0,19	-6,84	

Características Físico-Químicas

Temperatura: Según los datos obtenidos en el campo referente a las temperaturas del agua subterránea de éste acuífero tiene como mínimo 18°C y máximo 22,6°C.

Potencial de hidrogeniones: los datos de pH tomados en el campo muestran que el agua subterránea del acuífero Arapey presenta un valor medio de 7,2 con un mínimo de 6,8 y máximo en 7,4.

Conductividad Eléctrica en campo (CE): presenta valores máximos de En 716 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y mínima de 407 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el valor medio es de 520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 30).

Dureza total: la dureza total que involucra a los cationes de Ca^{++} y Mg^{+} arroja un valor medio es de 233 mg/l , mientras que el valor medio de los bicarbonatos (HCO_3^-) para estas aguas es de 323mg/l.

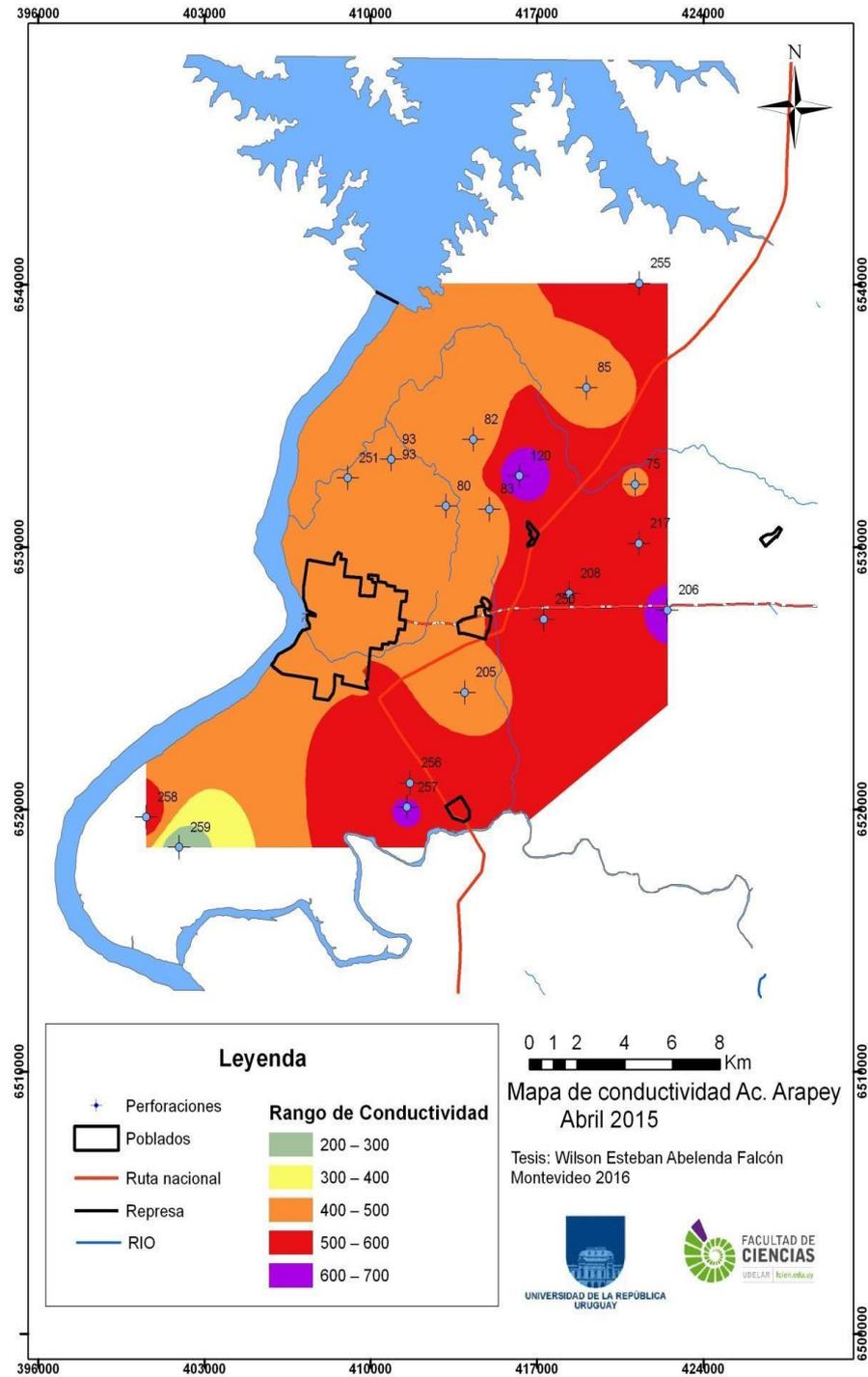


Fig. 30. Mapa de rango de conductividades. Sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84

Iones Principales

Sodio: del análisis estadístico de este elemento surge que la concentración media de sodio en el acuífero Arapey es de 25,0 mg/l, con un valor máximo de 61 mg/l correspondiente a la perforación N° 256 ubicada en la zona de Daymán y un valor mínimo de 6,7 mg/l en la perforación N° 251 ubicada al norte de la ciudad de Salto. Estos valores están dentro de los estándares de calidad de agua potable según la norma UNIT883:2008.

Potasio: este elemento se encuentra en la zona de estudio en una concentración media de 1,7 mg/l. El valor máximo constatado es de 2,7 mg/l perteneciente a la perforación N° 258 en la zona de Corralitos, y el valor mínimo es de 1,1mg/l en la perforación N° 85, 83, 82 y 93 ubicadas al norte de la ciudad de Salto.

Calcio: las muestras analizadas en el laboratorio presentan una concentración media de calcio de 82,5 mg/l con valores máximo de 142 mg/l en la perforación N° 83 ubicada al noreste de la ciudad de Salto y un mínimo de 51 mg/l en la perforación N° 256 en la localidad de Daymán.

Magnesio: del análisis de los resultados se desprende que la concentración media de magnesio en las aguas subterráneas del acuífero Arapey es de 13 mg/l. La concentración máxima es de 22 mg/l correspondiente a la perforación N° 217 y el mínimo valor es de 3,6 mg/l en la perforación N° 83 ubicadas respectivamente al Este de Colonia 18 de Julio y al noreste de la ciudad de Salto.

Bicarbonato: la concentración media para el HCO_3^- es de 325,6 mg/l. El valor máximo (383 mg/l) se obtuvo de en la perforación N° 255 localizada al Este de la represa Salto Grande, mientras que el valor mínimo (276 mg/l) se ubica al Norte de la ciudad de Salto, en la perforación N° 82.

Sulfato: el valor máximo de este compuesto corresponde a la perforación N° 257 ubicada en la zona de Daymán con un valor de 22,4 mg/l. El valor mínimo es de 5,0 mg/l perteneciente a la perforación N° 255 ubicada al Este de la represa. El valor medio es de 10,3 mg/l.

Cloruros: se determinó que la concentración media de los cloruros para el acuífero Arapey es de 9,5 mg/l, con valor máximo de 29,8 mg/l y mínimo de 2,5 mg/l. en las perforaciones N° 257 y 255 respectivamente.

Nitratos: el valor máximo de concentración de este anión, en aguas subterráneas del acuífero Arapey, corresponde a la perforación N° 120 con un valor de 124 mg/l y el mínimo de 5,4 mg/l en la perforación N° 255. La concentración media de nitratos en el acuífero es de 37

mg/l. Según el valor máximo permitido dentro de los valores de calidad de agua potable (UNIT 883:2008) para nitratos es de 50 mg/l, por lo que la perforación N° 256 y 120 sobrepasan este valor. La perforación N° 206 se encuentra en el límite, con una concentración de nitratos de 47,6 mg/l. Estos valores podrían sugerir una contaminación antrópica dada por la cercanía de una fosa séptica o bien por el uso de fertilizaciones. La perforación N° 83 no fue considerada para el análisis hidroquímico en este trabajo debido a que los resultados de laboratorio presentaban errores en el entorno de 25%.

A partir de los datos obtenidos se construyeron los diagramas de clasificación (Figuras 31, 32 y 33) y uso de agua (Piper, Schoeller y el RAS) para el acuífero Arapey y que se muestran a continuación:

Tesis: Wilson Esteban Abelenda Falcón
Marzo 2016

**DIAGRAMA DE PIPER
ACUIFERO ARAPEY**

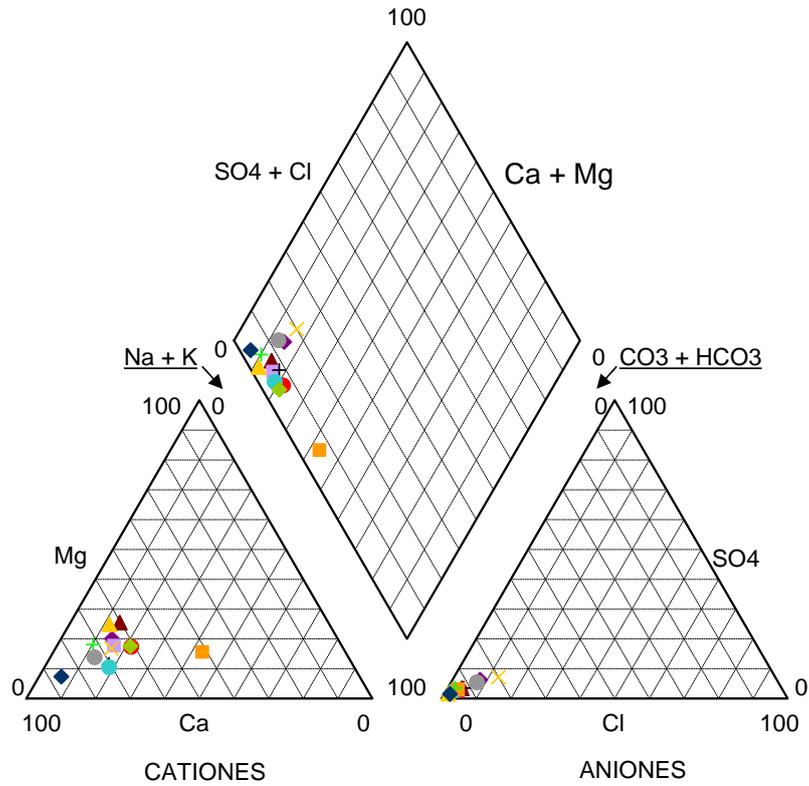


Fig. 31. Diagrama Piper acuífero Arapey

DIAGRAMA DE SCHOELLER-BERKALOFF ACUIFERO ARAPEY

Tesis: Wilson Esteban Abelenda Falcón

Marzo 2016

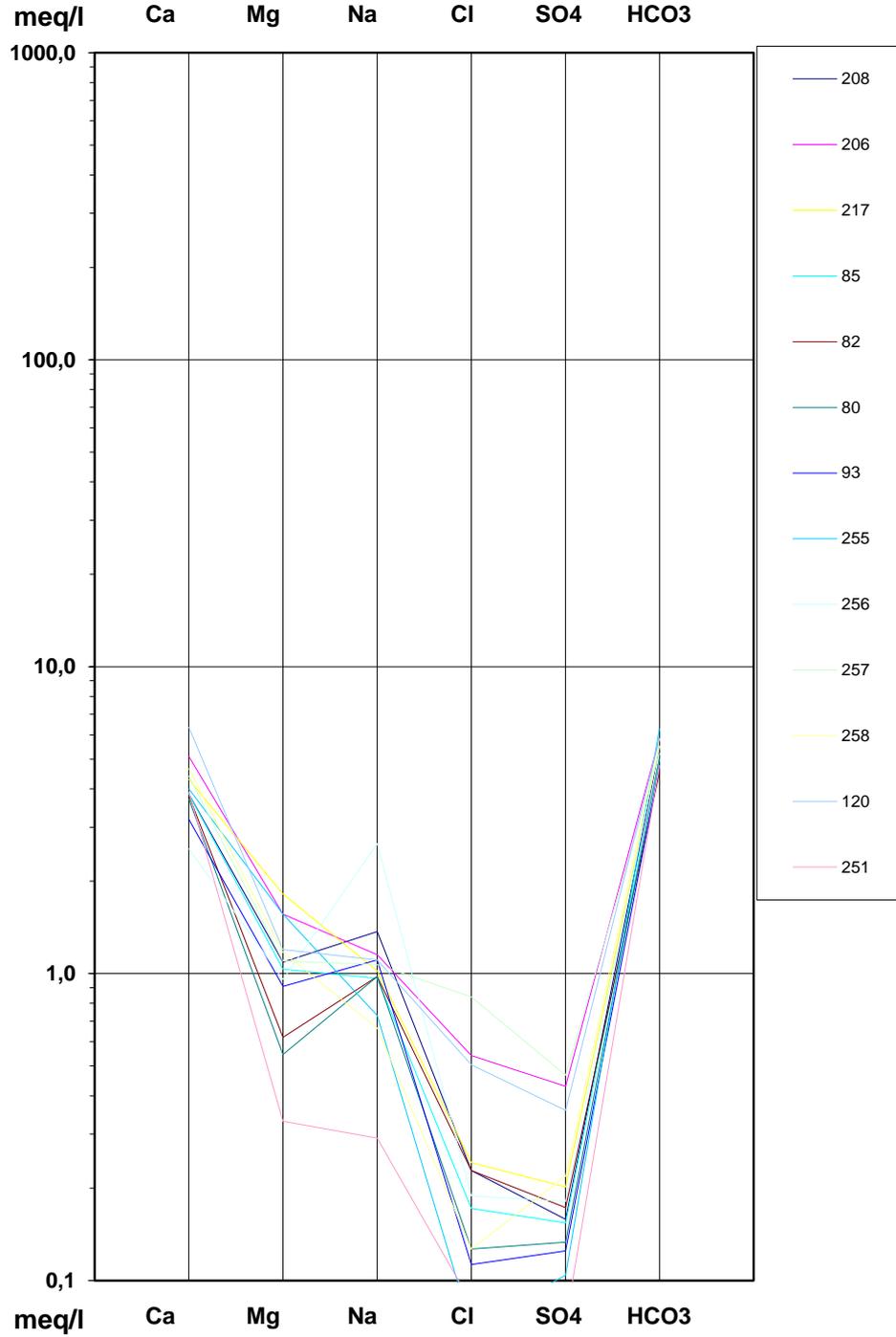


Fig. 32. Diagrama Schoeller acuífero Arapey

CLASIFICACION DE LAS AGUAS PARA RIEGO ACUIFERO ARAPEY

Tesis: Wilson Esteban Abelenda Falcón
Marzo 2016

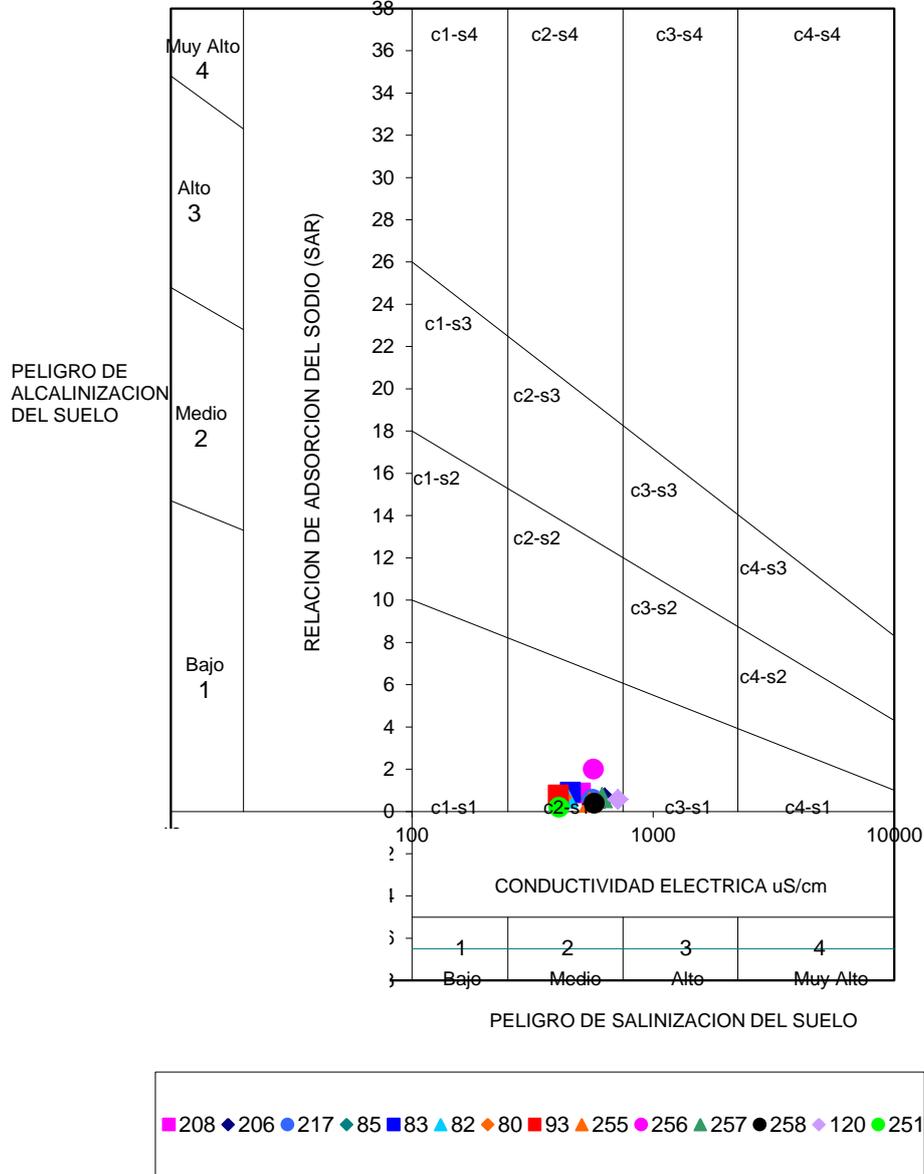


Fig. 33. Diagrama RAS acuífero Arapey

7.7 Elementos Trazas

Para el análisis de elementos trazas se realizaron ocho análisis en ICP-MS en el laboratorio de Tecnogestión del Ministerio de Industria Energía y Minería – DINAMIGE (ver tabla 9). De éstos, dos corresponden al acuífero Salto (muestras 27 y 254), mientras que para el acuífero Arapey se realizaron seis análisis (muestras 83, 255, 256, 257, 258 y 259).

Identificación de la muestra	V (mg/L)	Cr (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	As (mg/L)	Se (mg/L)	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)
27	0,0453	< 0,001	< LD	0,0014	< LD	0,0466	0,0096	< 0,001	< LD	< LD
83	0,0234	< 0,001	< LD	0,0017	< LD	< 0,01	0,0068	< 0,001	< LD	< LD
254	0,015	< LD	< LD	< 0,001	< LD	0,0253	< 0,001	< 0,001	< LD	< LD
255	0,0452	< 0,001	0,0228	0,0024	< 0,01	0,0442	0,0035	< 0,001	< LD	0,0097
256	0,0402	< 0,001	< LD	0,0015	< LD	0,035	0,0091	0,0012	< LD	< LD
257	0,198	< LD	< 0,002	0,0021	< LD	< 0,01	0,0057	0,0021	< LD	< LD
258	0,147	< 0,001	0,0069	0,0021	< LD	0,0281	0,0014	0,0013	< LD	< LD
259	0,0024	< 0,001	0,0534	0,0024	< LD	0,0299	0,0011	0,0012	< LD	0,0123
LD (< LD No detectado; menor al límite de detección)	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,003	0,003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0006

Tabla 9. Análisis de elementos trazas de muestras de agua de los acuíferos Salto y Arapey

A continuación se analiza cada elemento traza según las normas nacionales e internacionales:

Vanadio: Según Galindo *et al.* (1999) el vanadio ejerce un papel bioquímico muy importante tanto en los vegetales como animales, realizan en estos últimos al parecer una acción importante en la calcificación ósea, siendo por otra parte un inhibidor de la biosíntesis del colesterol. Su origen posiblemente se debe a la presencia de minerales arcillosos que provienen de la meteorización de rocas ígneas. Hasta el día de hoy no hay un criterio establecido por la OMS de cuánto es la concentración de este elemento para que no sea tóxico para la salud y en el ambiente.

Manganeso: este elemento es un indicador de contaminación industrial. Los valores máximos permitidos en agua potable, siguiendo los criterios de la OSE, son de 0.1 mg/l, mientras que para la OMS es de 0.4 mg/l. En este estudio ninguna perforación superó dicho valores.

Níquel: Según los criterios establecidos por la OMS los valores máximos para este elemento son 0,70 mg/l. Ninguna muestra analizada supera dicho valor.

Arsénico: Según Galindo *et al.* (1999, 2005) el origen del Arsénico podría ser de origen volcánico. Es necesario realizar controles con el fin de observar si existe un incremento de la concentración producto del uso de pesticidas (los arsenitos como herbicidas y arseniatos como insecticidas). Ninguna perforación supera en concentración las normas tanto de la OMS (0,01

mg/l) como la de la OSE (0,02 mg/l). Las perforaciones número 27 y 256 se encuentran en el límite para norma de la OMS.

Selenio: Según Galindo *et al.* (1999) la presencia de Selenio está dada por el vidrio volcánico presente en la roca. Constituye un nutriente esencial para los animales siendo además un agente desintoxicante de ciertos metales pesados, como el Cadmio. Por otra parte, dosis excesivas de Selenio son perjudiciales, provocando síntomas de intoxicación parecidas al del Arsénico. Su toxicidad ante exposiciones prolongadas puede originar la muerte. También se ha demostrado que la presencia de Arsénico en aguas destinadas al consumo acentúa la toxicidad del Selenio (Catalán Lafuente, 1981). Valores establecidos para agua potable -según la OSE y la OMS- son de 0.01mg/l. Según los análisis de las perforaciones ninguna cuenta con valores que superen las normas de calidad.

Plomo: Según Galindo *et al.* (1999) la presencia en las aguas subterráneas puede deberse a la interacción con las plagioclasas presentes en los sedimentos psamíticos. Los valores recomendados por la OMS deberían ser inferiores a 0.01 mg/l, mientras que la OSE acepta valores de hasta 0.03 mg/l. Ningún resultado de los análisis de las perforaciones realizadas superan los valores de las normas.

Discusión

Se realizó un mapa de rango de conductividades para cada acuífero (Figura 26 y 30), donde se muestra que al Este de la zona de estudio la conductividad aumenta. Interpolando el mapa geológico con el mapa de rango de conductividades, este coincide -en su mayoría- con zonas de afloramiento de rocas basálticas, que son claramente más conductivas.

El Acuífero Salto, se clasifica como “bicarbonatada cálcica” (ver Figura 27), y presentase un rango de pH entre 6.4 a 7.4. Por otro lado, su conductividad eléctrica se presenta valores entre 178 a 612 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El agua de la perforación N° 5 se encuentra en el campo de “agua sulfatada”. Con los mismos datos se construyó la gráfica Schoeller- Berkaloff (Figura 28) donde se observa que el agua se encuentra enriquecida en Ca^{++} , Na^+ , HCO_3^- y empobrecida en Mg^{++} , Cl^- , y SO_4^- . La perforación 5 muestra un pico de SO_4^- en 3.49 meq/l, mientras que el resto de las muestras son inferiores a 0.47 meq/l de SO_4^- . Los resultados sugieren que el contenido del HCO_3^- del acuífero Salto presentan concentraciones menores que las del acuífero Arapey. Analizando los datos del RAS (Figura 29) se puede clasificar al agua subterránea como C2-S1 y, únicamente la perforación 23 se encuentra en el campo del C1-S1. Por otro lado, el agua del Acuífero Arapey presenta concentraciones mayores de Ca^{++} que las del acuífero Salto, y esto puede estar dado por la disolución de calcita presente en las vacuolas del basalto. Así mismo las aguas de este acuífero puede clasificarse como “bicarbonatada cálcica”. La conductividad comparándola con la del acuífero Salto es mayor.

Analizando los datos del riesgo de absorción de sodio, todas las muestras se encuentran en la categoría C2-S1, representando un peligro de salinización medio y, un peligro de alcalinización bajo del suelo.

8 Conclusiones

Las conclusiones que se presentan a continuación son el resultado del análisis hidrodinámico e hidrogeoquímico presentadas de manera integral para los acuíferos Salto y Arapey.

- 1- El valor de agua excedido de la precipitación en la zona de estudio es de 325 mm/m^2 anualmente. El área del acuífero Salto aflorante es de 250 Km^2 con una infiltración del 25%, la recarga anualmente del exceso de agua es de $2.03 \times 10^7 \text{ m}^3$. Para el caso del acuífero Arapey, el área aflorante es de 160 Km^2 estimando una infiltración del 15%, anualmente la recarga es de $7.80 \times 10^6 \text{ m}^3$. Estos valores se ven reflejados en el mapa de diferencias de niveles estáticos entre los años 1997-2015 (Figuras 24 y 25) los mismos se han mantenido a lo largo del tiempo.
- 2- Según las líneas piezométricas se puede observar que la recarga de los acuíferos está dada por la infiltración de aguas superficiales y el efecto de la represa de Salto Grande. La cota de este embalse es de 35 msnm y por debajo de ella es de 11 msnm, lo que provoca la infiltración hacia los acuíferos.
- 3- En lo que respecta a la dinámica del acuífero Salto y que se aprecia en el mapa piezométrico (Figura 19) se observa:
 - Zona de recarga: ubicada en el Norte con cota de isopieza de 40 m en las proximidades de la localidad Colonia 18 de Julio y Sur del área de estudio (zona Corralitos) con isopiezas de 25 metros.
 - Zona de descarga: el flujo subterráneo tiene direcciones al Oeste hacia el río Uruguay y, hacia el Sur en dirección al el río Daymán comportándose como efluentes del sistema.
- 4- Comparando las líneas de flujo entre los años 1997 y 2015 y la simulación propuesta por Montañó (1995) (Figura A3.1) no se encuentra diferencias en lo que respecta a la dirección de las mismas, ni a las cotas de niveles estáticos de la zona de Corralitos.

- 5- La hidráulica del acuífero Arapey se realizó mediante el monitoreo de niveles estáticos de las perforaciones y se comparó con los niveles de abril 1997. Se observa que el agua subterránea tiene direcciones bien definidas influenciada al Norte por la represa Salto Grande, con cota mayor recargando el acuífero. Estas direcciones son de Norte a Sur y Norte Suroeste. En esta comparación no se encontró diferencias en las direcciones de flujo.

- 6- La diferencia de niveles estáticos entre abril de 1997 y 2015 representado en el mapa (Figura. 24) muestra que a pocos kilómetros al NE de la ciudad de Salto el nivel estático tuvo un descenso no mayor a un metro, mientras que el resto de las zonas se encuentran recuperadas, y en algunos casos sin variación. Este descenso puede estar dado por la propia fluctuación del nivel estático del acuífero y factores como la precipitación, evapotranspiración, temperatura y el uso de la perforación. Otro componente a tener en cuenta es el error en la medición en el campo; el tiempo de recuperación de la perforación, por ejemplo si esta se encontraba en uso momentos antes de tomar la medida correspondiente, ya que son perforaciones de uso industrial-agrícola. Esta tendencia (Figura 25) sugiere que no ha habido cambio y solo se pueden considerar las variaciones como meras fluctuaciones del nivel estático.

- 7- Analizando los resultados fisicoquímicos se encontraron valores anómalos en el acuífero Salto en nitratos (perforación 1), sulfato (perforación 5) y potasio (perforación 23) lo que indica contaminación que puede estar dada por la cercanía de una fosa séptica o el uso de fertilizantes y pesticidas. Son aguas que se encuentran enriquecidas en Ca^{++} , $\text{Na}^+ \text{HCO}_3^-$ y empobrecida en Mg^{++} , Cl^- y SO_4^- . El diagrama de Piper (Figura 27) el agua subterránea se puede clasificar como “Bicarbonatada cálcica”.

- 8- Al igual que en el acuífero Salto, el Arapey presenta valores anómalos en nitratos (perforaciones 256, 120 y 206) lo que indica contaminación antrópica. Estas aguas tienen mayor concentración de calcio que las del acuífero Salto, y esto puede estar dado por la disolución de calcita presente en las vacuolas del basalto. El agua subterránea se encuentra enriquecida en Ca^{++} , HCO_3^- y algunas en Na^- y empobrecida en Mg^{++} , Cl^- y SO_4^- . Se las clasifica como “Bicarbonatada Cálctica”.

- 9- Analizando el contenido del HCO_3^- se observa que las perforaciones que captan agua del acuífero Salto tienen una menor concentración que aquellas del Arapey.
- 10- Analizando los datos de RAS se clasifican estas aguas como C2-S1 y solo la perforación 23 en el campo del C1-S1 (Figuras 29 y 33). En el trabajo realizado por Montaña (1995) muestra que el 99% de las muestras analizadas corresponden al campo C2-S1. Comparando los resultados de ambos estudios no se encuentra una variación en el riesgo de absorción de sodio. Esto significa:
- En relación al peligro de salinización del suelo (C2), las aguas presentan una salinidad media; conductividad entre los 250 y los 750 microhoms/cm a 25°C que correspondería de 160 a 480 mg/l de sólidos disueltos. Esta agua puede utilizarse con moderación en plantaciones donde el cultivo sea tolerante a las sales.
 - En relación al peligro de alcalinización del suelo (S1), todas las muestras son de bajo riesgo, esto significa que el agua puede utilizarse en casi todos los suelos con escasa posibilidad de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable.
- 11-Según los resultados de los análisis ICP-MS, ninguna perforación analizada supera la norma UNIT883:2008 ni de la OMS.
- 12-En este trabajo no se pudo concluir si existe una relación hidráulica e hidrogeoquímica entre ambos acuíferos.

9. Recomendaciones

- A. A pesar de que no se constató descenso en los niveles piezométrico resulta necesario la continuación del monitoreo de los acuíferos Salto y Arapey, y un incremento de sitios en la red de monitoreo.
- B. Se recomienda realizar pozos de monitoreo en cada acuífero y que estos se encuentren equipados de manera permanente a fin de obtener datos de niveles estáticos de forma continua y en el tiempo real.
- C. Es imprescindible que en los futuros monitoreos se incluya la calidad del agua subterránea para ambos acuíferos con el fin de obtener concentraciones de iones mayores y trazas, además de incluir en el análisis estudios de isotopos.

10– Bibliografía

- A.P.H.A, A.W.W.A. y W.P.C.F., (1992). Standard methods for the examination of water and waste water, 18^a.
- ANCAP (1994) Potential oil resources of the uruguayan sedimentary basins. 99pp. Montevideo (informe interno)
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, R., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, M., Roisemberg, A., & Stolfa, D. (1986) Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paranfi plateau (Brazil): Geological, mineralogical and petrochemical relationships. *Journal of Petrology*, 27, 915-944.
- Benítez, A. (1972). Captación de aguas subterráneas. 2da edición, Editorial DOSSAT S.A, p. 619.
- Bossi J, & Ferrando L. (2001). Carta Geológica del Uruguay: Escala 1/500.000: Versión 2.0. (CD-ROM). Montevideo : Facultad de Agronomía.
- Bossi J. & Navarro R. (1991). Geología del Uruguay. 2 vol. Montevideo, Universidad de la República. 948p.
- Bossi, J. & Heide, E. (1970). Carta Geológica del Uruguay a escala 1/100.000". Segmento Arapey, Sector XVIII , Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- Bossi, J. & Schipilov, A. (1998). Grupo Arapey: basaltos confinantes del Acuífero Guaraní en Uruguay. *Agrociencia* II(1):12-25.
- Bossi, J. & Schipilov, A. (2007). "Rocas Ígneas básicas del Uruguay". No. 552.3 (899) BOS. pp 4-92.
- Bossi, J. (1966). Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo. 469 pp.
- Bossi, J., Ferrando, L; Montaña, J; Campal, N; Morales, H; Gancio, F; Schipilov, A; Piñeyro, D & Sprechmann, P. (1998). Carta Geológica del Uruguay. Esc. 1/500.000. Facultad de Agronomía. Geoeditores SRL. Montevideo, Uruguay.
- Bossi, J.; Heide, E. & de Oliveira, T. (1969). Segmento Salto (Sectores XIX y XX). En: Bossi, J. y Goso, H. (eds.), Carta Geológica del Uruguay a escala 1:100.000. Universidad de la República-MGAP-MIEM. Memoria, 57 pp., 1 mapa. Montevideo.
- Caorsi, J. & Goñi, J. (1958). Geología Uruguaya. *Boletín del Instituto Geológico del Uruguay*. 37:1-73
- Catalan Lafuente, J. (1981). Química del Agua. Ed. Bellisco, Madrid 424pp.
- Creer, K.M., Miller, J.A & Gilbert Smith, A. (1965) Radiometric Age of the Serra Geral Formation. *Nature* 207(4994):282-283
- Custodio, E. & LLamas, M.R. (1976). Hidrología subterránea. Editorial Omega. Barcelona, vol 1 y 2, 1750 pp.
- Custodio, E., (1997). Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales, químicos, isotópicos y térmicos. En E. Custodio, M. Llamas y J. Samper (editores): La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica, pp. 83-110. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Eriksson, E. & V. Khunakasem, (1969). Chloride concentration in groundwater, recharge rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain. *Journal of Hydrology*, 7: pp. 178-197.
- F.A.O., (1993). CropWat. Riego y Drenaje, Nro. Pp. 46 - 215.
- Féraud, G.; Bertrand, H.; Martínez, M.; Ures, C.; Schipilov, A. & Bossi, J. (1999). ⁴⁰Ar/³⁹Ar age and geochemistry of the southern extension of Paraná traps in Uruguay. II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Córdoba, Actas: 57-59.

- Ferrando, L. & Dasa, M. (1974). Mineralogía de la fracción arcillosa de la Formación Fray Bentos. In Congreso Brasileiro de Geología, No. 28, Actas 2: 3-13. Porto Alegre
- Fetter, C.W. 1994 “Applied Hydrogeology”, Tercera Edición pp. 27
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc. London, pp. 604.
- Galindo, G.; Fernández-Turiel, J., & Gimeno, Y. D. (2005). El arsénico en las aguas termales del sur de la cuenca del Río Salí, Tucumán, Argentina. En: Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea IV Congreso Hidrológico Argentino. Río Cuarto 63-72.
- Galindo, G., Herrero M.A., Flores M. & Fernández Turiel J.L., (1999).. Correlación de metales trazas en aguas subterráneas someras de la Cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires, Argentina. In: A. TINEO (Ed.), Hidrología Subterránea, II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica n° 13, Instituto de Correlación Geológica – CONICET, Fac. Cs. Nat. e Inst. Miguel Lillo de la Univ. Nac. de Tucumán, 13:251-261.
- Goso Aguilar, C. & Perea, D. (2003). El Cretácico post-basáltico de la Cuenca Litoral del Río Uruguay: geología y paleontología, pp. 141-169 de Veroslavsky G, Ubilla M & Martínez S (eds.): Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos minerales – Mesozoico, D.I.R.A.C.-Facultad de Ciencias, Montevideo
- Goso Aguilar, C; Perea, D; & Perinotto, JAJ. (1999). Análisis de facies y paleogeografía de la Formación Guichón (Cretácico inferior), en la Cuenca del Litoral, Uruguay. Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología, v. 6 , p. 2-15.
- Goso, C. (1999). Análise estratigráfica do Grupo Paysandú (Cretáceo) na Bacia do Litoral Uruguai. Tese de Doutorado. UNESP, Rio Claro, 184 pp. [inérito]
- Goso, H. & Bossi J (1969). Cenozoico, en Bossi J: Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, 469 p. Goso, 1965
- Goso, H. & Bossi, J. (1966). Cenozoico. In Geología del Uruguay (Goso, H; editor). Departamento de Publicaciones, Universidad de la República: 469 p. Montevideo.
- Goso, H., (1972). Cuaternario. Publicación interna de la Dirección de Suelos. Ministerio de Agricultura y Pesca. Informe Técnico, 32 pág. (inérito).
- Hausman y Fernández (1967). Hidrogeología de los basaltos del noroeste de Uruguay. Publ. Mimeogr. Fac. Agronomía, Montevideo, Uruguay,
- Heinzen, W. et al., (2003). Mapa Hidrogeológico del Uruguay. Escala 1/1.000.000. Dirección Nacional de Geología y Minería. Montevideo, Uruguay
- Hendrickx, J.M.H. & G.R. Walker, (1997). Recharge from precipitation. En I. Simmers (Ed.): Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas, pp. 19-114, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Inia.uy (2016) INIA URL: <http://www.inia.uy/>
- Iriondo, M.H. & Kröhling, D. 2001. A neofomed Kaolinitic mineral in the Upper Pleistocene of NE Argentina. International Clay Conference 12 (Bahía Blanca), Abstract, 6 p.
- Lambert, R. (1940) Memoria explicativa de un Mapa Geológico de Reconocimiento del departamento de Río Negro". Bol. Instituto Geológico del Uruguay. No. 28.
- Montaño, J. (1995). Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego (MGAP-MTOP-Banco Mundial) 266 páginas.
- Montaño, J. (1999). Caracterización y vulnerabilidad de Sistemas Hidrogeológicos Discontinuos. Cuenca del Arroyo Carrasco. Montevideo, Uruguay. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 203 pp.

- Montaño, J., Montaño, M & Gagliardi, S. (2006). Recursos Hídricos subterráneos del Uruguay. Boletín Geológico y Minero. Madrid, España. 117 (1): pp. 201-222.
- Montaño, X. J. (1995). Uso y Conservación del agua subterránea.. Montevideo: MEVIR - Tack Ltda, 1995. v. 1000. 35p
- Peate, D.W. (1997). The Paraná–Etendeka province. Pp. 217-245 en: Mahoney, J.J. y Coffin, M.F. (eds.): Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism. Geophysical Monograph 100
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. & Rossi, P. (1985) Memoria Explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500.000. DINAMIGE–M.I.E.M. Montevideo, 90 pp., 2 figs., 1 mapa.
- Rimoldi, H. (1962) Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande. Estudio geológico-geotectónico para la presa de compensación proyectada en el Paso Hervidero (provincia de Entre Ríos). 1as. Jornadas Geológicas Argentinas. Buenos Aires. Actas 2, 287-310.
- Romano, A.L. (1999), Sedimentología de la Formación Fray Bentos (Oligoceno) en el área tipo, República Oriental del Uruguay. Tesis no publicada. 80pp. Departamento de Ciencias Geológicas FCEN-UBA
- Rosa Filho, E.F. (1987) Contribuição ao Estudo das Águas Subterrâneas nos Basaltos no Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, n 37, , p 22-52
- Samper Calvete, F.J., (1997). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balances de agua: utilización, calibración y errores. En E. Custodio, M. Llamas y J. Samper (editores): La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica, pp. 41-82, Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares J. & García-Vera, M.A., (1999). Programa Visual Balan V.1.0. Código interactivo para la realización de balances hidrológicos (Visual Balan V.1.0. interactive code to hydrologic balance). Universidad de la Coruña. España. Pp.124.
- Scanlon, B. R., (1991). Evaluation of moisture flux from chloride data in desert soils. Journal of Hydrology 128: 137-156.
- Scanlon, B. R., Healy R. W. & Cook P. G., (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrology Journal, 10(1): Pp. 18-39.
- Schöeller, H., (1962). Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris. Pp. 642 .
- Simmers, I., (1997). Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas. International Association of Hydrogeologist. Ed. A.A. Balkema. Rotterdam. Netherlands. Pp. 277 .
- Turner, S. ; Regelous, M. ; Kelley, S. ; Hawkesworth, C. ; Mantovani, M. S. M. (1994). Magmatism And Continental Break-Up in the South Atlantic: High Precision 40Ar-39Ar Geochronology. Earth And Planetary Science Letters, v. 1221, n. 3-4, p. 333-348,.
- Umpierre, M., (1966). Edades K/Ar de rocas de la Sierra de las Animas. In: J., Bossi, Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo, pp. 134-135.
- Varni M. & Carrera J., (1998). Simulation of groundwater age distributions. Water Resources Research. Vol. 34: Pp. 3271-3281.
- Varni, M. (2005). Evaluación de la recarga al acuífero del azul: valores medios y variaciones temporal y espacial. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas, pp. 185, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.
- Velázquez, V.F.; Gomes, C.B.; Orué, D.; & Comin-Chiaramonti, P., (1996) Magmatismo alcalino do Paraguai: uma revisao e atualizacao das provincias. Bol. IG – USP. Sér. Cient., 27:61-79.
- Veroslavsky, G. et al. (2003). “Cuencas sedimentarias de Uruguay: Geología, paleontología y recursos naturales Mesozoico”. Montevideo: DI.R.A.C, Pp. 65-72; 145-150.

- Veroslavsky, G. et al. (2004). “Cuencas sedimentarias de Uruguay: Geología, paleontología y recursos naturales. Cenozoico”. Montevideo: D.I.R.A., Pp. 83- 90: 147-164.
- Veroslavsky, G., Daners, G. y de Santa Ana, H. (2003). Rocas sedimentarias pérmicas en la plataforma continental uruguaya: el prerift de la Cuenca de Punta del Este. Geogaceta 34:203-206
- Walther, K. (1911) Las rocas cristalinas fundamentales de los alrededores de Montevideo. Revista del Instituto de Agronomía, (9): 1-39, Montevideo

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN DE PERFORACIONES

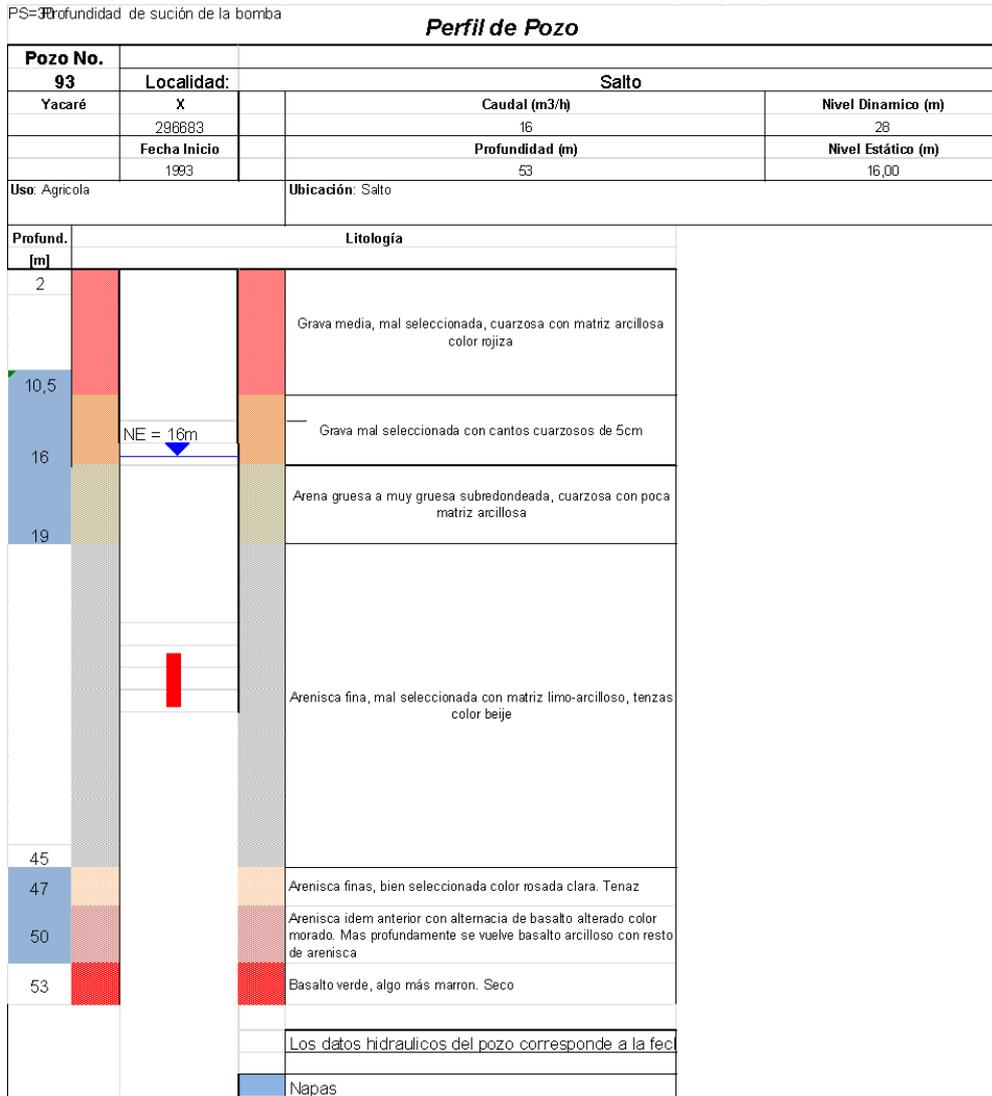


Figura A1.1. Perfil constructivo de perforación. Banco de datos DINAMIGE

PS= Profundidad de succión de la bomba

Perfil de Pozo

Pozo No.	Localidad:		Salto	
87	X	Y	Caudal m3/h	Nivel Dinamico
Yacaré	296384	6528457	15	25
	Fecha Inicio	Fecha Finalización	Profundidad (m)	Nivel Estático (m)
	03/04/1993	04/04/1993	55	18,00
Uso: Agrícola			Ubicación: Salto	
Profund. [m]	Litología			
2				
4				
10,5				Arenisca gruesa a muy gruesa, cuarzo feldespática subangulosa de diametro 0,5 a 1cm. Presenta intercalaciones de niveles cuarcíticos verdosos a los 6m y de 12 a 15 metros con poca o sin arcilla, mal seleccionada color más marron.
16		NE = 18m		
31				Arenisca fina a muy fina, cuarzo feldespática regular a a bien seleccionada, de color marron. Hacia la base se observa una arcilla verde tenaz.
33				
39				
41				Arenisca muy fina a limo, mal seleccionada color marron claro masiva. A la base se encuentra clastos de basalto
47				
50				Basalto marron rojizo, duro con niveles de alteracion.
55				
Los datos hidraulicos del pozo corresponde a la fecha de finalizacion del mismo				
Napas				

Figura A1.2. Perfil constructivo de perforación. Banco de datos DINAMIGE

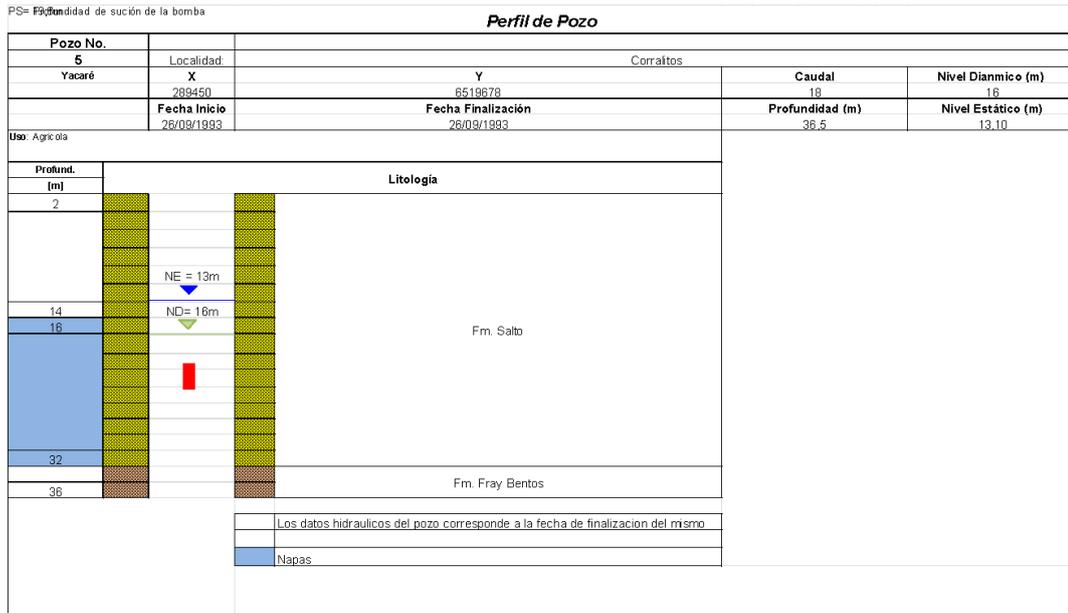


Figura A1.3 Perfil constructivo de perforación. Banco de datos DINAMIGE

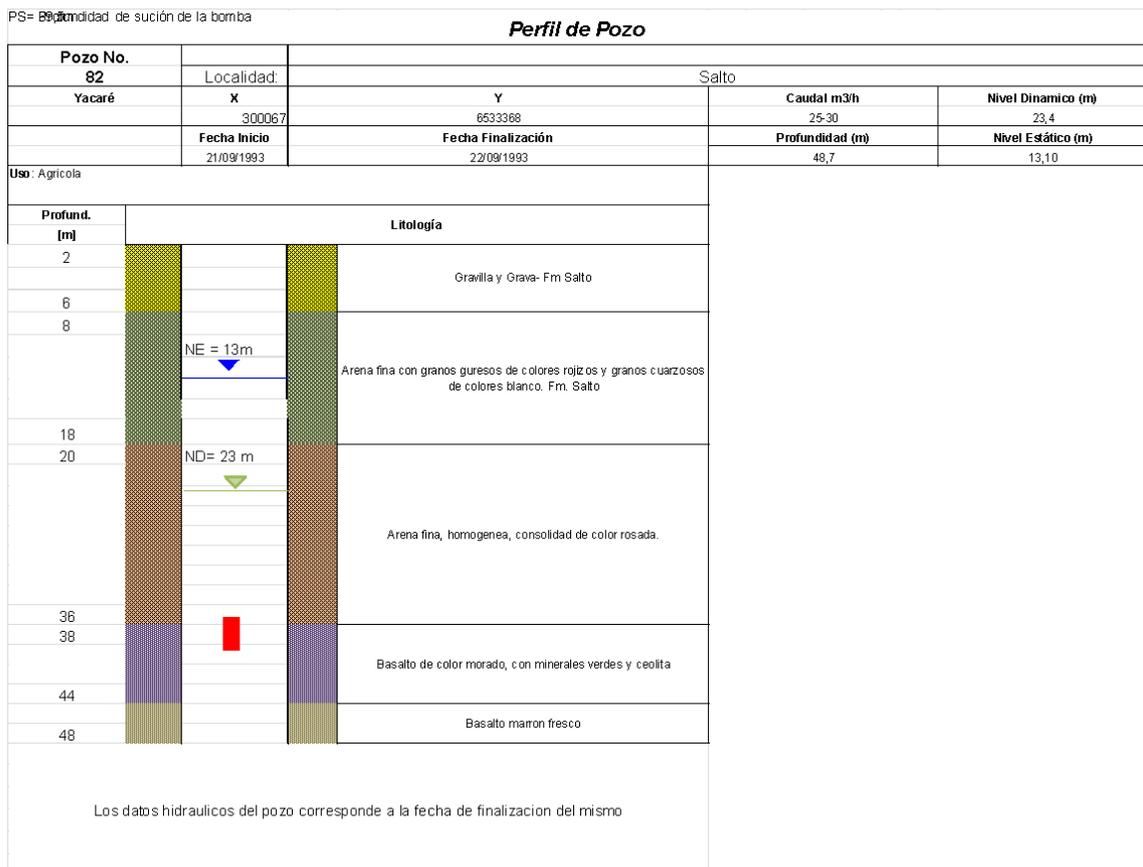


Figura A1.4 Perfil constructivo de perforación. Banco de datos DINAMIGE

PS= 52 Profundidad de succión de la bomba

Perfil del Pozo

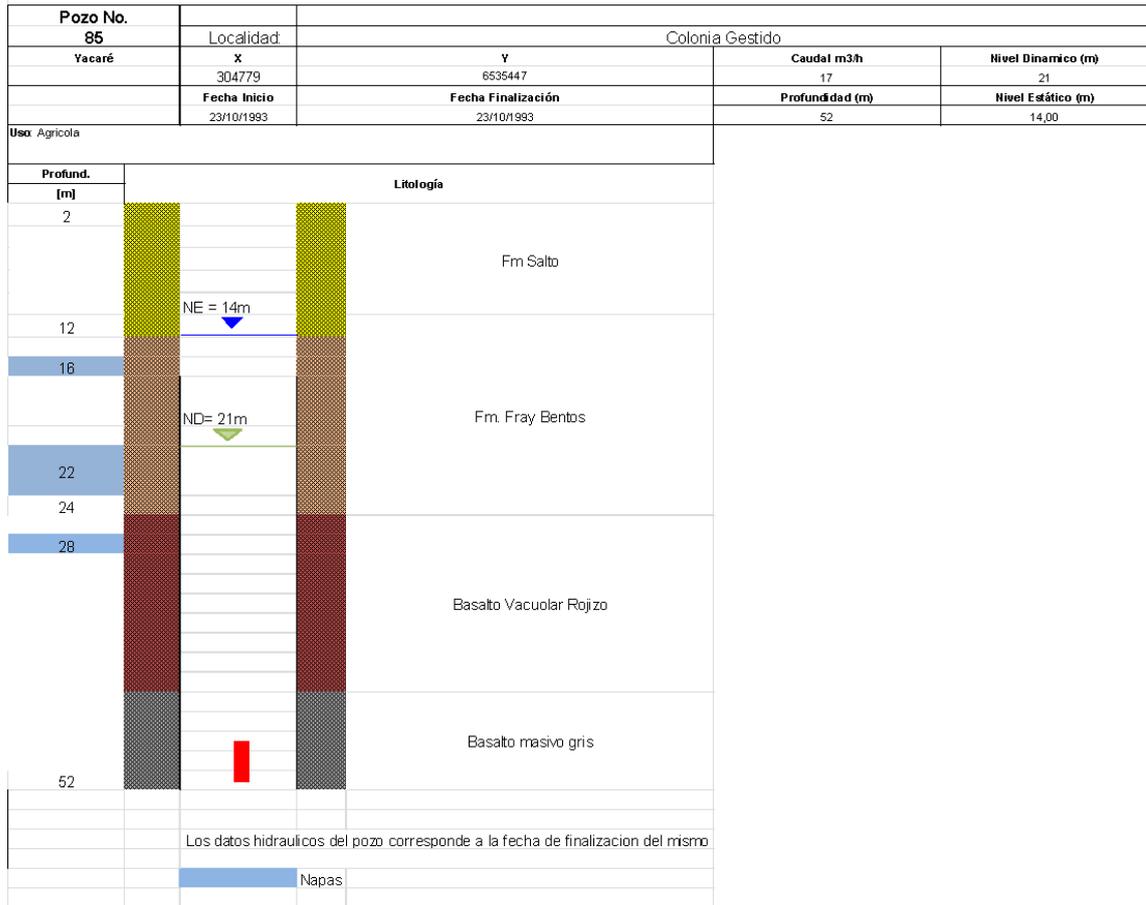


Figura A1.5 Perfil constructivo de perforación. Banco de datos DINAMIGE

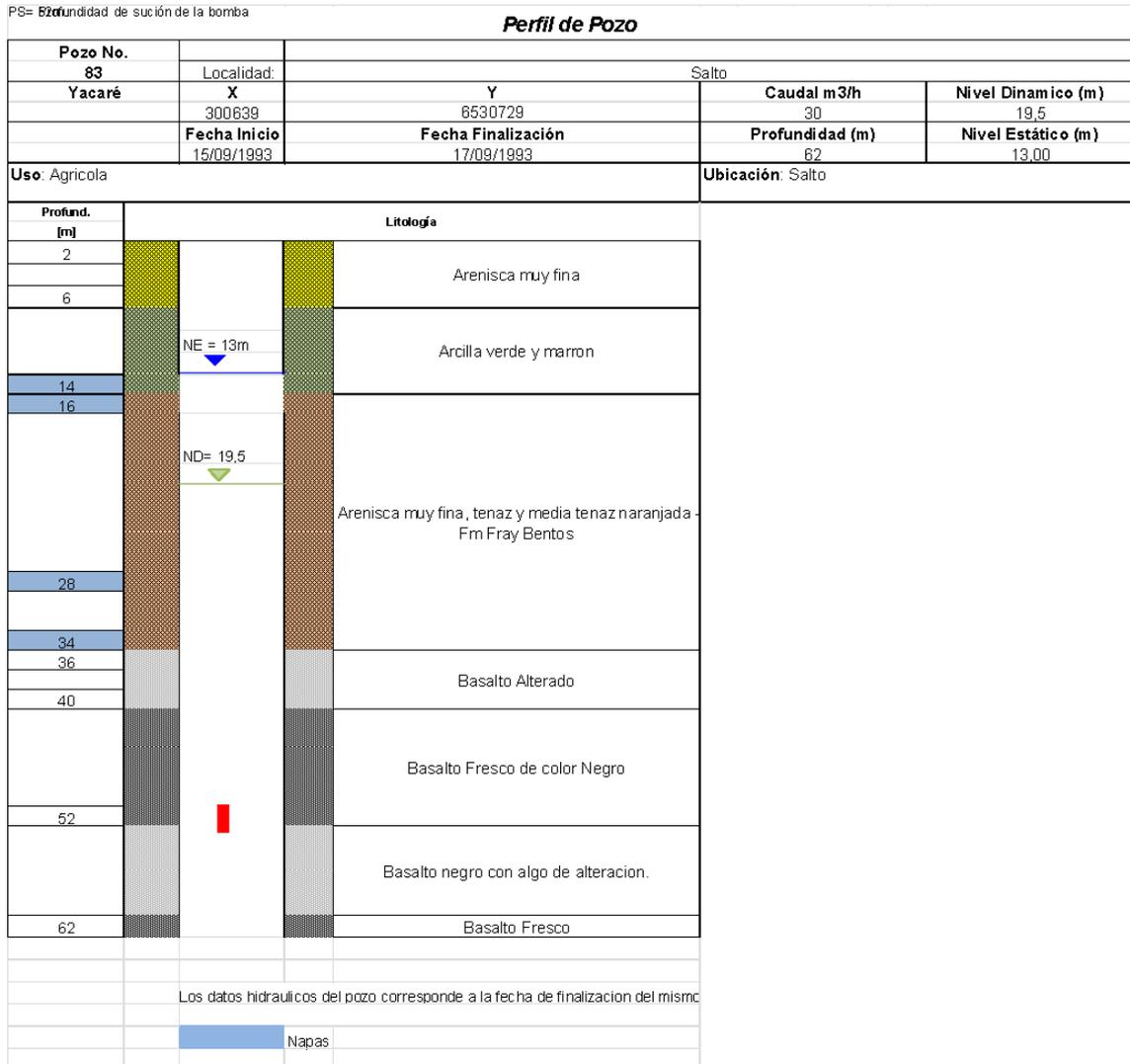


Figura A1.6 Perfil constructivo de perforación. Banco de datos DINAMIGE

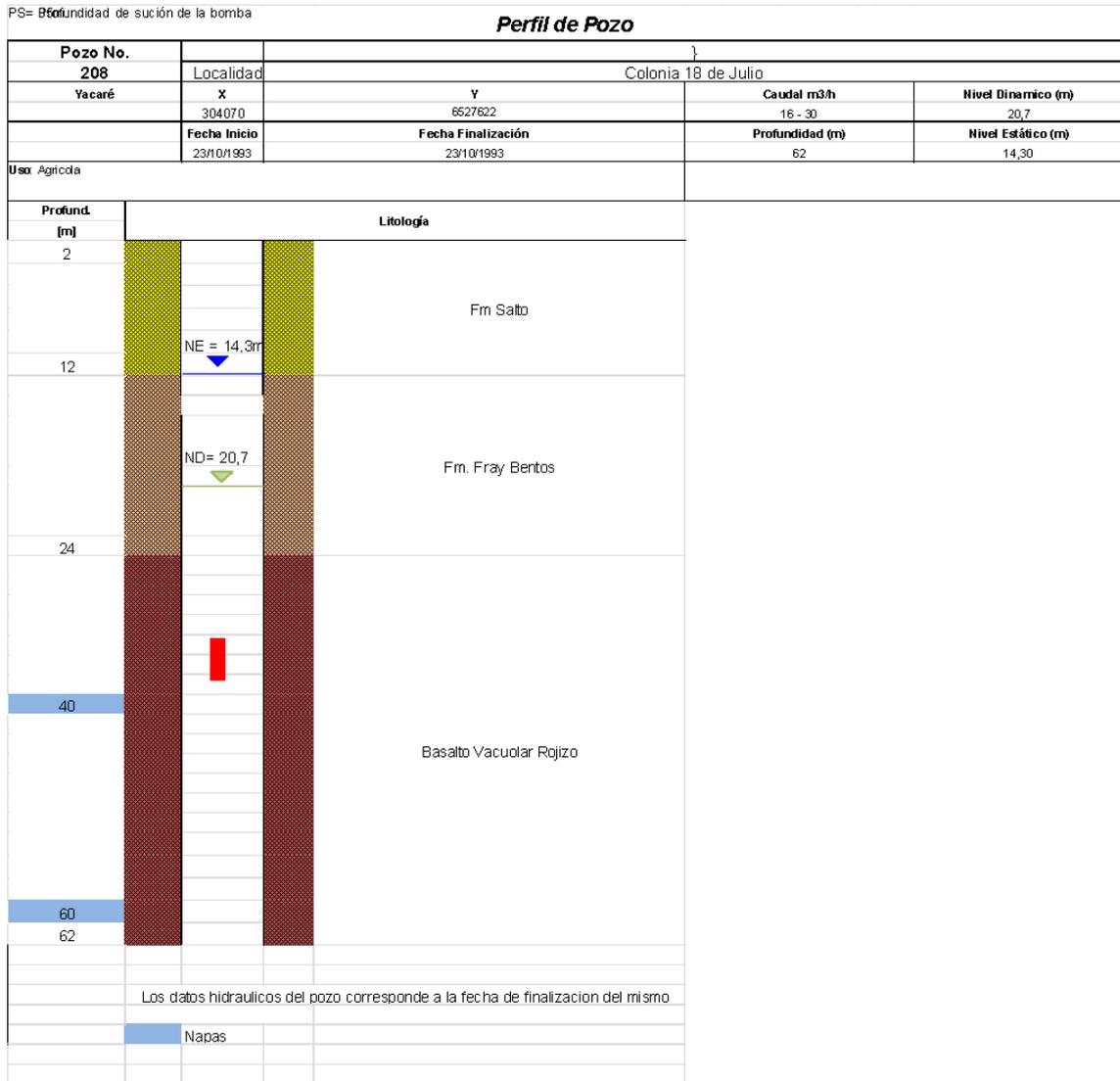


Figura A1.7 Perfil constructivo de perforación. Banco de datos DINAMIGE

ANEXO 2

Banco de perforaciones por acuífero

Tabla A2.1. Perforaciones que captan agua del acuífero Salto

BASE DE DATOS GENERAL DE LOS ACUIFEROS SALTO						
N °	PARAJE	X	Y	Z	Prof.	Caudal
1	Arenitas Blancas	293.20	6523.05	44	24.50	
2	Nueva Hespérides	292.65	6520.52	46	32.20	9.00
3	Córralitos	290.80	6518.55	42	30.50	16.00
5	Córralitos	289.50	6519.70	33	36.50	18.00
7	Córralitos	288.20	6516.70	36	13.00	
9	Córralitos	287.10	6515.50	26	11.00	12.00
18	Córralitos	287.00	6518.15	21	10.00	4.00
23	Nueva Hespérides	292.20	6519.60	32	32.00	8.00
27	Córralitos	290.70	6516.90	34	30.70	12.00
47	Cno.al Cementerio viejo	302.25	6523.90	54	20.00	1.00
51	Cno.al Cementerio viejo	303.00	6525.40	62	20.00	1.00
57	El Chircal	297.00	6519.45	34	28.00	1.00
70	Cd. Gestido	309.55	6534.00	68	16.40	2.00
95	A° San Antonio Gde.	294.35	6535.55	20	26.00	14.00
96	Cd. Osimani Llerena	293.30	6532.20	25	32.00	4.20
98	Cd. Osimani Llerena	293.10	6531.60	25		6.00
100	Prox. a Salto Grande	297.60	6536.90	36	30.00	3.70
108	Cd. Gestido al NW	303.20	6538.80	64	27.00	4.00
115	Ruta 3 y Rodó	302.15	6528.50	65	28.00	12.00
124	Apolón al E del Río	294.95	6528.60	50	38.00	1.20
125	Apolón al E del Río	293.95	6528.70	34	25.00	6.50
203	Arroyo Ceibal	297.90	6525.40	40	25.00	2.00
209	Parada Herrería	310.30	6528.35	77	28.00	1.00
210	Cd. 18 Julio	304.15	6529.75	58	25.00	20.00
213	A° San Antonio Gde.	297.70	6534.60	28	22.50	3.50
214	Córralitos	286.80	6518.70	30	16.80	10.00
215	Córralitos	286.10	6516.75	22	34.00	
216	Córralitos	288.05	6516.40	35		
219	Córralitos	286.60	6519.55	21		

Tabla A2.2 Perforaciones que captan agua del acuífero Arapey

BASE DE DATOS GENERAL ACUIFEROS ARAPEY						
N °	PARAJE	X	Y	Z	Prof.	Caudal
14	Próx. vía y Rodó	300.70	6528.70	58	36.50	8.00
38	La Bolsa	309.55	6522.80	63	40.00	
41	Paso Morales	308.70	6517.70	48		
43	El Tropezón	304.20	6526.30	65	27.50	24.00
45	El Tropezón	305.65	6525.70	68	21.30	7.00
50	Cno.al Cementerio viejo	303.40	6521.90	51		2.50
63	Pobl. Garibaldi al SE	308.75	6531.20	63	27.00	9.00
66	Parada Herrería	309.00	6528.65	35	35.00	8.00
71	Col. Garibaldi	308.10	6534.70	70	41.00	8.00
75	Poblado Garibaldi	306.90	6531.80	65	25.00	6.00
80	Al N Hipódromo	298.55	6530.65	55	48.00	19.00
82	Col. 18 Julio al NW	300.10	6533.50	40	48.70	25.00
83	Col. 18 Julio al NW	300.50	6530.75	57	64.00	35.00
85	Col. Gestido	305.00	8536.15	66	50.00	4.00
87	Apolón y R.3 vieja.	296.45	6529.55	50	55.00	14.00
88	Rodó al E de R 3 vieja.	296.95	6530.25	50	30.00	7.00
90	Garibaldi al E de R 3 vieja.	297.65	6530.10	55	42.00	14.00
93	Col. Osimani Llerena	296.95	6533.30	40	61.00	30.00
105	Paso Terrible	304.85	6543.15	53	20.00	1.20
106	Paso Terrible	304.30	6540.35	55	48.00	4.00
120	2 km N Col. 18 Julio	301.90	6532.20	62	?	48.00
126	Costa río al N muelle	293.00	6527.10	10	114.50	40.00
149	Rutas 3 y 31	301.45	6526.20	56	31.50	9.60
202	Termas Daymán	299.50	6519.00	21	38.00	2.00
204	Empalme Ruta 3	299.30	6524.40	52	31.00	14.00
205	Empalme Ruta 3	298.70	6523.70	45		
206	Albisu	308.20	6527.10	60	35.00	12.00
207	Col. 18 de Julio	302.75	6529.80	67		
208	El Tropezón	303.90	6527.55	64	52.00	30.00
211	Col. Gestido al E	308.90	6536.60	80		
217	Parada Herrería	307.05	6529.50	50	30.00	20.00
218	Pta. San Antonio Gde.	301.65	6534.30	50	28.00	6.00

ANEXO 3

Modelado acuífero Salto – CONSUR

1995

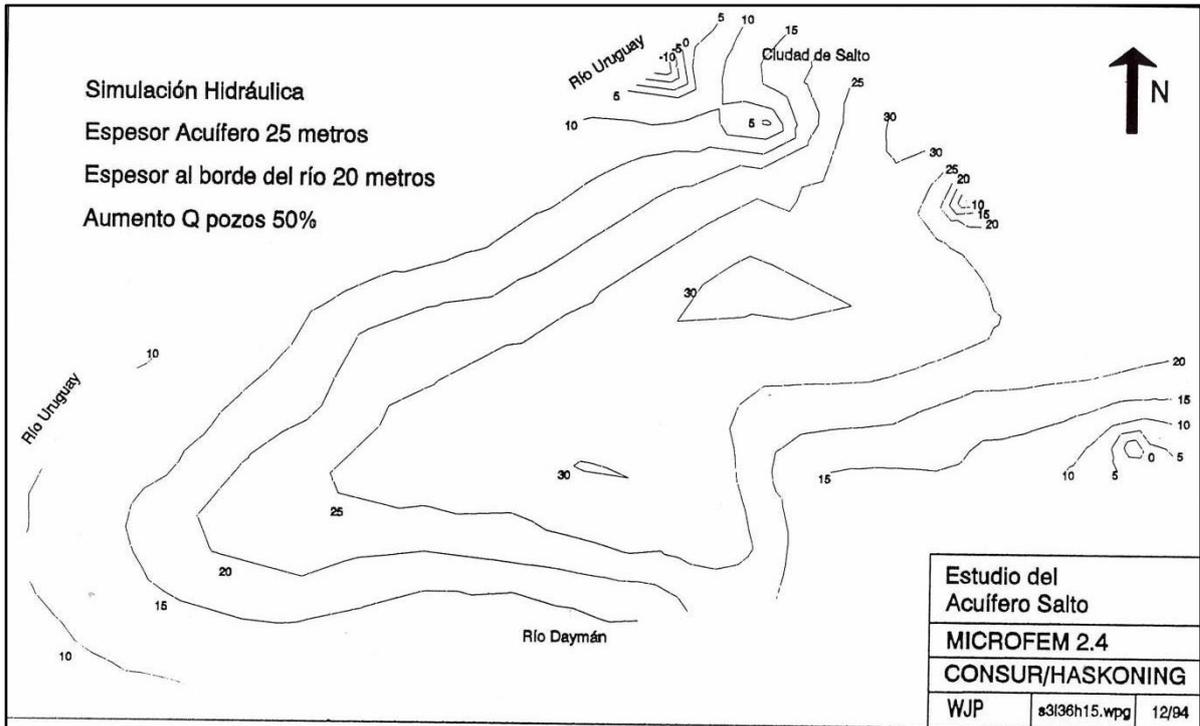


Figura A3.1. Simulación de Isolneas piezométricas del acuífero Salto con un aumento de bombeo del 50%. Tomado de Montaña, 1995

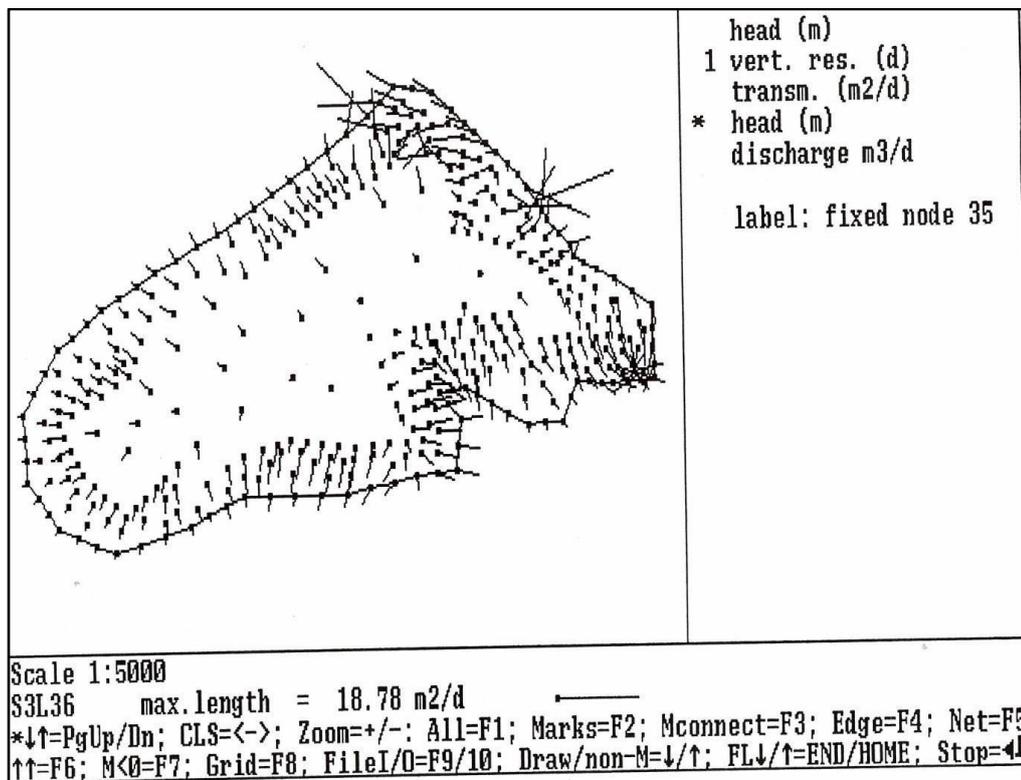


Figura A3.2. Simulación de dirección de flujo del acuífero Salto con un aumento de bombeo del 50%. Tomado de Montaña,