



## Caracterización Hidrogeoquímica de la Quebrada Yuruguaico, Región de Tarapacá Año 2024

Felipe Lisandro Omar Torres Fernández

**Profesor Guía:** Msc. Sr. Abraham Elías Gonzalez Martínez  
**Profesores Comisión:** Msc. Sra. Liubow Nikolaivna González Martínez  
Dr. Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

### Resumen

El análisis hidrogeoquímico del Área de Protección Permanente Yuruguaico (APP Yuruguaico) durante el 2021 revela una mineralización estacional, con mayores concentraciones en invierno y primavera, atribuida a una menor dilución. Las aguas son neutras a alcalinas y se observa un aumento en concentraciones de iones aguas abajo. Los metales trazas, como hierro y cobre presentan bajas concentraciones, indicando una baja interacción con sedimentos pudiendo estar relacionado con una baja interacción con sedimentos derivados de la meteorización y oxidación de las rocas provenientes de la Formación Collahuasi y la granodiorita El Escorial. La Red de Monitoreo abarca distintos puntos en la Quebrada Yuruguaico, con aguas que muestran un aumento de conductividad eléctrica y concentración de iones aguas abajo, aunque menos evidente en aguas superficiales. Las Pruebas Hidráulicas realizadas muestran valores de conductividad y transmisividad variados, y los niveles estáticos de los pozos se mantienen estables hasta julio, posterior a este mes, los niveles varían y vuelven a estabilizarse en octubre.

**Palabras Claves:** *Area de protección permanente, Quebrada Yuruguaico, Monitoreo Ambiental, Red de Monitoreo.*

### 1 Introducción

La Quebrada Yuruguaico se ubica en la I Región de

Región de Tarapacá a unos 163 km al SE de Iquique y cercana a la frontera con Bolivia, entre las coordenadas 21° 5'19,41"S - 68°48'39,02"O y 21° 3'58,27"S - 68°46'33,17"O, aproximadamente a 5,5 km de la obra más cercana del Proyecto de la Compañía Minera Teck Quebrada Blanca (CMTQB) (Figura 1 del Anexo). La quebrada tiene un largo aproximado de 7.5 km., abarcando una superficie total de 156,6 ha. Dentro del contexto de la implementación del proyecto de Quebrada Blanca 2, y en línea con lo indicado en la RCA N° 74/2018.

El presente trabajo responde a la necesidad de monitoreo y caracterización hidrogeoquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la quebrada, cuyo desarrollo es sustentado con la obtención de datos que permitan evaluar el comportamiento histórico de las aguas que integran la zona.

Los objetivos específicos presentados en este trabajo consisten en:

- Conocer la geología subterránea del medio y como esta interactúa con el agua subterránea mediante la perforación de sondajes.
- Estimar los parámetros hidráulicos y el comportamiento hidrogeológico del medio, mediante la realización de ensayos hidráulicos en sondajes.
- Monitorear los niveles freáticos y entender la interacción entre el agua subterránea y superficial y sus variaciones estacionales

- Conocer la variación espacial de la química y fisicoquímica de las muestras de agua superficial y subterránea dentro de la Quebrada y entender a qué se deba dicha variación.

## 2 Marco Geológico

El área de trabajo concentra rocas de origen magmático (ígneas, subvolcánicas y volcánicas), las cuales subyacen a los depósitos modernos de origen volcanoclástico o sedimentario. Las rocas volcánicas, en su mayoría corresponden a andesitas y basalto-andesitas pertenecientes a la Formación Collahuasi, son expuestas en los sectores N-NW, y una pequeña porción aflora hacia el norte de la confluencia entre Qda. Yuruguaico y Qda. Ramucho. Hacia el norte de la zona de trabajo, afloran grandes cúmulos de rocas hipabisales de composición riolítica-dacítica, pertenecientes a la Formación Collahuasi. La zona también evidencia rocas volcanoclásticas que en su mayoría corresponden a ignimbritas de la Formación Carcote, que afloran en ambas laderas de la Quebrada Yuruguaico.

En cuanto a las rocas intrusivas presentes en la zona, en su mayoría corresponden a Granodioritas de la Formación el Escorial, y se encuentran distribuidas hacia el SE de la Quebrada Yuruguaico, hospedándose a lo largo de la extensión que forman las rocas volcánicas de la Formación Collahuasi junto con los otros granitoides, y en menor medida, por rocas metamórficas de la Formación Choja (Vergara & Thomas, 1984), la cual se extiende por más de 200 km., hospedando a numerosos pórfidos de Cu. Los depósitos sedimentarios modernos, en su mayoría se exponen hacia las laderas de los cerros (depósitos de piedemonte) o en las zonas topográficamente bajas de las Quebradas (coluvios y aluvios).

El mapa de la Figura 2, se elaboró en base a las versiones digitales de las Cartas geológicas del Sernageomin: Copaquiri, Quehuita (Vergara, 1978a), Ujina (Vergara, 1978b) y sector occidental del cuadrángulo Volcán Miño (Vergara, 1978a), escala 1:50.000. A continuación, se describe la litología en detalle de las rocas que afloran en el área de trabajo.

### 2.1 Formación Collahuasi (Pzcr & Pzca) Carbonífero Superior - ¿Triásico Inferior?

La Formación Collahuasi, originalmente definida por Vergara (1978b) en la localidad de Collahuasi, abarca

rocas volcánicas e intrusivos subvolcánicos.

Inicialmente considerada cretácica, Vergara & Thomas (1984) la redefinieron como de edad paleozoica superior. Aunque la base no se expone, se apoya discordantemente sobre los Esquistos de Sierra de Moreno, intrusivos del Paleozoico Inferior y rocas sedimentarias devónicas-carboníferas. La cubierta discordante consiste en rocas sedimentarias y volcánicas del Triásico Medio y Superior, así como Jurásico marino.

### 2.2 Granodiorita el Escorial (Pzgdee) ¿Pérmico?

Tomlinson *et al.* (2001) lo define como un extenso plutón (~60 km<sup>2</sup>) de composición granodiorítica a monzodiorítica, de color gris claro a gris verdoso, expuesto inmediatamente al norte y al sur de Quebrada Blanca, extremo suroriental del cuadrángulo Copaquiri y sector nororiental del cuadrángulo Quehuita. En esta localidad intruye a volcanitas paleozoicas de la Formación Collahuasi y se encuentra intruido por la Monzonita Cuarzifera de la mina Quebrada Blanca (Tmcb), de edad terciaria.

### 2.3 Pórfidos Dacíticos (Tpda) Eoceno-Oligoceno

Se integra en esta unidad a un conjunto de stocks porfíricos, de composición dacítica a riódacítica, que afloran a lo largo de la zona trabajada. Se caracterizan por sus colores gris rosado claro y por presentar abundantes ojos de cuarzo, plagioclasas, biotitas y hornblenda como rasgo petrográfico principal.

Petrográficamente corresponden a pórfidos dacíticos de hornblenda y biotita, con abundantes fenocristales de cuarzo, plagioclasa, ortoclasa-sanidina y minerales máficos en menor proporción, incluidos en una masa fundamental microfésica de cuarzo y feldespato (Tomlinson *et al.*, 2001).

### 2.4 Domo Quilaquila (TOdaq) Oligoceno Superior

Corresponde a un domo porfírico gris claro de pequeñas dimensiones, que aflora en la porción NW del cuadrángulo Volcán Miño. Intruye y cubre a volcanitas y granitoides paleozoicos y está cubierto parcialmente por la ignimbrita Carcote (TMic).

Petrográficamente corresponde a una dacita porfídica con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y sanidina, incluidos en una masa fundamental vítrea

con microlitos de plagioclasa (Tomlinson *et al.*, 2001).

## **2.5 Ignimbrita Carcote (TMic)**

### **Mioceno Superior**

La Ignimbrita de Carcote, extensa en aproximadamente 8.500 km<sup>2</sup> en Chile y adyacente a Bolivia, presenta un espesor uniforme de 10 a 30 metros, rellenando suavemente la topografía en las unidades que la subyacen (Ireland, 2010). En el área de estudio, esta roca aflora casi toda la extensión de las laderas de la Quebrada Yuruguaico.

Exhibe varios tipos de pómez, diferenciados por contenido cristalino, siendo las más comunes las pómez con 1-2% de cristales. La proporción de biotita aumenta con el contenido cristalino, y diferentes tipos de pómez tienen composiciones variadas (Tomlinson *et al.*, 2001).

## **2.6 Depósitos de Piedemonte (Tsg)) (Gravas del Mioceno-Plioceno)**

La unidad de Gravas del Mioceno-Plioceno, según Tomlinson *et al.* (2001), representa depósitos no consolidados de gravas polimícticas que forman extensas planicies aluviales y depósitos de piedemonte más antiguos que los actuales. Estas gravas se sitúan sobre diversas unidades geológicas, siendo la más joven la Ignimbrita Huasco (Mioceno Inferior-Medio,  $16.3 \pm 0.8$  Ma).

Niveles de ignimbritas y tobas de ceniza, con edades entre 11 y 2.8 Ma (Mioceno Superior-Plioceno Superior bajo), se intercalan frecuentemente. En el sector norte, están cubiertos por depósitos pleistocenos y, en el extremo sur, se conectan con las calizas de la Formación El Loa (Mioceno Superior-Plioceno Superior bajo).

La unidad es diacrónica, con una base post-Mioceno Medio a pre-Pleistoceno y aflora en el norte, en cuencas intermontanas, y en el sur, en el piedemonte de Sierra de Moreno. La correlación regional sugiere que es equivalente a la Formación Huaylas en la Región de Tarapacá.

## **2.7 Depósitos Coluviales (Qc)**

### **Plioceno-Pleistoceno**

De acuerdo con Tomlinson *et al.* (2001), estas corresponden a depósitos no consolidados e incoherentes originados por el colapso de

afloramientos rocosos situados en los márgenes de las quebradas profundas. Tal es el caso de los depósitos ubicados en el cañón de la Quebrada Yuruguaico, cercano a la confluencia con Quebrada Ramucho, los cuales consisten en una acumulación caótica de bloques, gravas y arenas, constituidos por calizas de la Formación El Loa, con escarpes característicos de deslizamiento rotacional.

## **2.8 Depósitos Aluviales (Qal)**

### **Pleistoceno-Holoceno**

Las unidades aluviales cuaternarias existentes en la franja trabajada corresponden a depósitos de gravas y ripios polimícticos, mal seleccionados y subangulares a redondeados, con matriz de arena limo y arcilla, situados en el fondo de quebradas mayores y en drenajes menores que disectan piedemontes del Plioceno-Pleistoceno, originados por corrientes torrenciales esporádicas.

Otros depósitos aluviales existentes en el área de trabajo son aquellos asociados a la degradación del cordón volcánico Neógeno-Cuaternario, y comprenden depósitos de corrientes torrenciales derivados de la erosión de laderas pronunciadas de los edificios volcánicos y las zonas de alteración asociados a éstos.

## **3 Metodología**

A continuación, se detalla la metodología empleada para la generación de la red de monitoreo ambiental en la Quebrada Yuruguaico.

La metodología de estudio de la Quebrada Yuruguaico consistió en una serie labores destinadas a generar un entendimiento preliminar de un sistema hidrogeológico que nunca fue explorado previamente, mediante la utilización de imágenes satelitales (análisis topográfico e identificación de presencia de vegetación vigorosa *NDVI*), y posteriores trabajos en terreno con el objetivo de identificar puntos de interés en cuanto a recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Después de esto, se llevó a cabo una campaña de terreno entre los días 9 y 12 de junio de 2019. Durante esta campaña, se recorrió una extensión aproximada de 13 km de la Quebrada Yuruguaico con el propósito de documentar puntos de interés. Estos incluyeron tramos secos, áreas con afloramientos de

agua estancada, zonas de bofedales y zonas de vegetación de pajonales.

A partir de esta información, se seleccionaron puntos de agua superficial y subterránea para ser incluidos en la red de monitoreo, como se indica en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente.

**Tabla 1.** Puntos de observación en zonas de afloramiento de agua.

Punto Medición	Coordenadas UTM (WGS 1984)		Caudal (l/s)	Medición de parámetros <i>in situ</i>
	UTM Este	UTM Norte		
QY-005	526.027	7.673.361	n/a	T°, pH, CE, TDS, ORP
QY-014	525.900	7.671.740	0,15	
QY-016	525.696	7.671.431	n/a	
QY-019	525.383	7.671.020	n/a	
QY-029	523.503	7.670.239	n/a	
QY-032	523.105	7.670.202	n/a	
QY-039	521.524	7.668.550	1,5	
QY-040	520.895	7.668.127	5	
QY-041	523.910	7.670.542	0,15	
QY-044	522.528	7.670.018	n/a	
QY-048	522.748	7.671.061	n/a	

Después de definir la red de monitoreo de agua superficial, se realizó una campaña de perforación de 3 pozos (Tabla 3) durante los meses de octubre a noviembre de 2020, utilizando dos métodos de perforación: (a) con un sistema de entubación simultánea (ODEX), el cual permitió instalar una tubería de revestimiento en simultáneo con la perforación, con la finalidad de evitar el derrumbe del pozo, y (b) otro sistema que utilizó aire reverso (RC), cuyo rápido avance fue de gran utilidad para perforar en tramos de mayor profundidad.

Esta campaña permitió reconocer litologías mediante la recuperación y reconocimiento de muestras de *cuttings* representativas cada 2 m, y con ello, registrar el avance y las características del medio rocoso subsuperficial de los diferentes puntos perforados y, también, alcanzar la profundidad del nivel freático.

**Tabla 2.** Ubicación de los pozos de perforación construidos para la red de monitoreo

Nombre punto	Coordenadas UTM (WGS 1984)		Cota (m s.n.m.)
	UTM Este	UTM Norte	
RAD-GWQ-QY-01	524.458	7.670.753	4.275
RAD-GWQ-QY-02	523.430	7.670.238	4.247
RAD-GWQ-QY-04	522.484	7.670.490	4.241

**Tabla 3.** Profundidad perforada con metodología ODEX y RC en cada sondaje.

Sondaje	Perforación ODEX (m b.n.t.) <sup>1</sup>		Perforación RC (m b.n.t.) <sup>1</sup>	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
RAD-GWQ-QY-01	0	46	46	52
RAD-GWQ-QY-02	0	12,70	12,70	52
RAD-GWQ-QY-04	0	27	27	52

<sup>1</sup>Metros bajo el nivel de terreno

Una vez implementada la red de monitoreo de agua superficial y subterránea (con la construcción de los pozos) (Figura 3 del Anexo), se llevaron a cabo campañas de monitoreo mensuales con un año de duración. Estas campañas incluyeron mediciones mensuales de niveles de agua subterránea, utilizando pozómetros. La medición se realizó desde la altura del collar del pozo (*stick-up*). Además, se monitoreó la calidad del agua superficial y subterránea, midiendo parámetros fisicoquímicos *in situ* y en laboratorios. También se midieron las concentraciones de aniones y cationes. Los laboratorios involucrados en la medición de la calidad del agua son ETFA's (entidades técnicas de fiscalización ambiental) autorizadas por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). En la Tabla 8 del Anexo, se indican las ETFA's que participan en el monitoreo y las metodologías de análisis que fueron utilizadas para determinar las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos y elementos químicos requeridos.

## 4 Resultados

El presente capítulo detalla el listado de resultados que se obtuvieron desde la construcción de los pozos (litología de subsuperficie, niveles durante la perforación, caudales durante los ensayos hidráulicos, resultados de parámetros hidráulicos obtenidos con datos de recuperaciones de niveles), hasta el posterior monitoreo realizado durante el año 2021 (con resultados de análisis de parámetros fisicoquímicos *in situ* y de laboratorio, análisis de aniones y cationes, y clasificación de las aguas que conforman la red de monitoreo).

### 4.1 Geología de subsuperficie

Las perforaciones realizadas, permitieron generar un registro de mapeo litológico (Tabla 9 en Anexo). En resumen, tras la perforación se pudo identificar que:

- Las litologías identificadas en los pozos correspondieron principalmente a depósitos fluvio-aluviales polimícticos, tobas de ceniza, areniscas y rocas ígneas intrusivas de mineralogía diorítica y granodiorítica con variaciones texturales, y mayor o menor contenido de fracturas abiertas, dependiendo de la ubicación geológica-estructural del pozo.
- Los pozos RAD-GWQ-QY-01, RAD-GWQ-QY-02 y RAD-GWQ-QY-04 se perforaron tanto en relleno fluvio-aluvial como en horizontes rocosos con diferentes grados de competencia, meteorización, alteración y fracturamiento.
- El sondaje RAD-GWQ-QY-01 presentó 20 m de relleno sedimentario subyacente por una marcada zona de transición de regolito granítico que gradúa en profundidad hacia una roca granodiorítica porfídica medianamente competente, afectada por una alteración propilítica y potásica de moderada a intensa.
- Los pozos RAD-GWQ-QY-02 y RAD-GWQ-QY-04 se caracterizan por la presencia de pocos metros de cobertura sedimentaria (4 y 2 m, respectivamente) finalizando en diorita competente con alteración propilítica moderada.

#### 4.2 Niveles Estáticos

Durante la perforación, se interceptó el nivel freático en los tres sondajes a diferentes profundidades. En los pozos RAD-GWQ-QY-01 y RAD-GWQ-QY-02, el nivel observado se encuentra cerca de la superficie, en el relleno fluvio-aluvial que sobryace al basamento rocoso. En el caso del sondaje RAD-GWQ-QY-04, el nivel fue encontrado a una mayor profundidad, localizado en la toba.

RAD-GWQ-QY-01: Los primeros aportes de agua aparecieron a los 22 metros de perforación, coincidiendo con una capa de granodiorita meteorizada. Aunque se detectaron indicios de humedad en las gravas arenosas fluvio-aluviales del relleno sedimentario, no se pudieron realizar pruebas de airlift debido al escaso aporte de agua. Tras la habilitación del sondaje, el nivel se estabilizó en 2,08 metros bajo nivel de terreno (m b.n.t.) en el relleno sedimentario. El nivel freático estabilizado tiene su origen en el acuífero del regolito y la granodiorita porfídica fracturada subyacente.

RAD-GWQ-QY-02: El nivel freático interceptado se encuentra a 0,78 m b.n.t. en el relleno sedimentario,

siendo el más somero respecto al nivel del terreno. Los primeros aportes de agua aparecen a 0,5 metros de profundidad, definiendo un acuífero libre en el relleno sedimentario. Se localiza otro acuífero en el sustrato rocoso, evidenciado por los aportes de agua con caudales de airlift crecientes a diferentes profundidades. Se cree que existe conexión hidráulica entre ambos acuíferos.

RAD-GWQ-QY-04: El nivel de agua interceptado en la roca tobácea es el más profundo de todos los pozos, encontrándose a 9,14 m b.n.t. Los principales aportes de agua aparecen en la roca y aumentan con la profundidad. Este sondaje no contiene agua en el relleno sedimentario, presentando un solo acuífero fisural de moderada a baja permeabilidad y porosidad secundaria debido a la meteorización y las fracturas.

Posteriormente, se llevaron a cabo monitoreos durante el año 2021. Los resultados de los monitoreos de los niveles freáticos para ese año se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Niveles medidos en desde enero 2021 hasta diciembre de 2021 (los niveles se presentan con el *stick-up* descontado).

Pozo	RAD-GWQ-QY-01	RAD-GWQ-QY-02	RAD-GWQ-QY-04	
<b>Cota Plataforma (m s.n.m.)<sup>1</sup></b>	4275	4247	4241	
<b>Niveles Estáticos (m b.n.t.)<sup>2</sup></b>	<b>Enero 2021</b>	2,08	0,39	8,96
	<b>Febrero 2021</b>	2,11	0,89	8,98
	<b>Marzo 2021</b>	2,16	0,97	8,97
	<b>Abril 2021</b>	2,21	0,98	8,71
	<b>Mayo 2021</b>	2,19	0,98	8,85
	<b>Junio 2021</b>	2,17	0,94	8,93
	<b>Julio 2021</b>	2,17	0,90	8,78
	<b>Agosto 2021</b>	2,20	S/M*	9,97
	<b>Septiembre 2021</b>	2,07	0,52	8,92
	<b>Octubre 2021</b>	2,19	0,72	9,67
	<b>Diciembre 2021</b>	2,14	0,30	9,00

\*S/M: Sin medición; <sup>1</sup>Metros sobre el nivel del mar; <sup>2</sup>Metros bajo el nivel de terreno

En la Figura 4 del Anexo, se muestra la evolución de los niveles considerando las mediciones que fueron realizadas desde enero hasta diciembre de 2021 en todos los puntos de agua subterránea

El nivel en el pozo RAD-GWQ-QY-01 se mantuvo constante alrededor de 2,2 m b.n.t durante 2021. El punto RAD-GWQ-QY-02 mostró una somerización de los niveles desde enero (0.39 m b.n.) hasta diciembre (0,3 m b.n.t.). El punto RAD-GWQ-QY-04, el más profundo de todos los pozos, mostró una leve somerización de los niveles entre enero (8,96 m b.n.t.) y julio (8,78 m b.n.t.), seguido por una mayor variación en los valores de profundidad de nivel (entre 8.71 y 9.97 m b.n.t.).

### 4.3 Ensayos y parámetros hidráulicos

Además, durante la perforación de los pozos, se llevaron a cabo pruebas de airlift para estimar el caudal a diferentes profundidades. Al finalizar cada perforación de 6 metros, se inyectaba aire a presión y se medía el flujo de agua resultante. En total, se realizaron 17 pruebas de airlift en todos los pozos. En el sondaje RAD-GWQ-QY-01, se llevaron a cabo 4 ensayos con un caudal promedio de 0,24 l/s. En el sondaje RAD-GWQ-QY-02, se realizaron 8 ensayos con un caudal promedio de 0,71 l/s. Finalmente, en el sondaje RAD-GWQ-QY-04, se efectuaron 5 ensayos con un caudal promedio de 1,86 l/s.

Una vez finalizada la perforación de los pozos a una profundidad de 52 m b.n.t., se realizó un ensayo airlift final durante 1-2 horas. Estos ensayos arrojaron un caudal promedio de 0,46 l/s (RAD-GWQ-QY-01), 0,95 l/s (RAD-GWQ-QY-02) y 2,49 l/s (RAD-GWQ-QY-04).

El desarrollo o limpieza de los pozos se realizó después de la habilitación y engravillado de los mismos, mediante la acción mecánica de inyección de aire a presión o airlift a través de tuberías de 1" de diámetro, acopladas a un cabezal de inyección. La prueba de recuperación se llevó a cabo en cada uno de los pozos una vez finalizado el desarrollo. Consistió en que, una vez detenida la inyección de aire en el pozo, se iniciaba la medición manual del ascenso del nivel de agua a través de un pozómetro. Cuando la recuperación alcanzaba valores iguales o superiores al 90% del nivel inicial, se detenía el ensayo. Todas las pruebas de recuperación se efectuaron al finalizar el desarrollo de los pozos. En

la Tabla 5 y la Tabla 6, se muestran los detalles y resultados de cada ensayo.

**Tabla 5.** Características del desarrollo de los sondajes.

Pozo	Tiempo (min)	Caudal (prom) (l/s)	Medida final cono de Imhoff (ml/l)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)
RAD-GWQ-QY-01	160	0,44	0,5	5,42	8,61	783
RAD-GWQ-QY-02	80	0,91	0,1	8,05	7,99	930
RAD-GWQ-QY-04	120	0,31	0,4	10,65	7,93	798

**Tabla 6.** Características de las pruebas de recuperación.

Pozo	Tramo ranurado (m b.n.t.)	Nivel antes de la prueba (m b.n.t)	Tiempo de recuperación (min)	Tiempo transcurrido hasta la primera medición (min)
RAD-GWQ-QY-01	8,45 a 14,37 20,3 a 49,90	2,17	160	9
RAD-GWQ-QY-02	8,34 a 43,97	0,41	60	5
RAD-GWQ-QY-04	2,47 a 32,13 38,07 a 49,90	9,6	30	1

Los resultados de las pruebas realizadas en los pozos tienen como objetivo la estimación de los parámetros hidráulicos de transmisividad (T) y conductividad hidráulica o permeabilidad (K). La interpretación gráfica y matemática de los parámetros se llevó a cabo mediante el método de Theis Recovery (Theis, 1935) para las pruebas de recuperación realizadas al finalizar tanto los ensayos de airlift final como los desarrollos.

El procesamiento y cálculo de los parámetros hidráulicos se realizó con el software AquiferTest Pro 9.0, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic. Esta herramienta es adecuada y ampliamente utilizada en la interpretación de pruebas de bombeo y ensayos hidráulicos. Teniendo los resultados de transmisividad y conocido el espesor saturado del sistema acuífero, se calculan las conductividades hidráulicas o permeabilidades del medio geológico. En la Tabla 7, se resumen los resultados obtenidos

de las pruebas de recuperación. Se puede observar que los valores de conductividad hidráulica estimados en cada pozo en la prueba de airlift final y desarrollo son del mismo orden de magnitud. En todos los casos, se logró un buen ajuste, lo que indica que los valores estimados son confiables.

**Tabla 7.** Resumen valores conductividad hidráulica (K) y transmisividad (T) calculados para los sondeos realizados.

Sondaje	K			T		
	Airlift (m/d)	Des <sup>1</sup> (m/d)	prom <sup>2</sup> (m/d)	Airlift (m <sup>2</sup> /d)	Des <sup>1</sup> (m <sup>2</sup> /d)	prom <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /d)
RAD-GWQ-QY-01	4,39E-03	9,51E-03	6,95E-03	1,25E-01	4,56E-01	2,90E-01
RAD-GWQ-QY-02	1,65E-02	7,06E-02	4,36E-02	8,50E-01	3,50E-00	2,18E-00
RAD-GWQ-QY-04	2,0	S/D	2,0E-00	8,50E01	S/D	8,50E01

<sup>1</sup> Desarrollo; <sup>2</sup> Promedio.

#### 4.4 Monitoreo Hidrogeoquímico y fisicoquímico de aguas superficiales y subterráneas

Durante el año 2021, se llevaron a cabo monitoreos mensuales de la calidad del agua desde enero hasta octubre. En cada campaña, se obtuvieron muestras de análisis *in situ* y para el envío a laboratorio para distintos puntos, dependiendo de la factibilidad para acceder a estos y la disponibilidad del recurso hídrico. Esta información se encuentra resumida en la Tabla 10 (Anexo).

Los puntos monitoreados durante este período incluyen 3 puntos de aguas subterráneas y 6 puntos de aguas superficiales del total 11 puntos que constituyen la red de monitoreo diseñada para la Quebrada Yuruguai. Particularmente, las aguas superficiales presentaron inconvenientes para ser monitoreadas, ya sea debido a problemas de acceso, escasez de agua o congelamiento de esta (Tabla 10 del Anexo).

La validación de los análisis químicos se realizó mediante la aplicación de una serie de criterios de aseguramiento y control de calidad (QAQC). Estos criterios corresponden a la comparación de resultados con los respectivos límites de detección informados por los laboratorios, el análisis de las concentraciones obtenidas en muestras blancas y duplicados, la detección de posibles valores fuera de tendencia y el cálculo del Error de Balance Iónico

Los parámetros medidos correspondieron a los indicados en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 74/2018: pH, conductividad eléctrica (CE), nitrato (NO<sub>2</sub>), nitrito (NO<sub>3</sub>), fosfato (PO<sub>4</sub>), sulfato (SO<sub>4</sub>), cloruro (Cl), sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), cobre (Cu) y hierro (Fe). Algunos de estos valores fueron obtenidos en campo y otros en laboratorio, lo que permitió tener tanto las características *in situ* como en un entorno controlado. Esto proporciona una visión completa y precisa de la calidad del agua en la red de monitoreo.

#### 4.5 Parámetros Fisicoquímicos *In situ*

Se realizaron mediciones *in situ* de parámetros fisicoquímicos, incluyendo pH y conductividad eléctrica, en línea con lo indicado en la RCA N° 74/2018. Estas mediciones se resumen en la Tabla 11 (Anexo) para aguas subterráneas y en la Tabla 12 (Anexo) para aguas superficiales. La Figura 5 (Anexo) muestra la evolución temporal de estos parámetros.

En general, las aguas del sector presentan condiciones neutras a levemente alcalinas, con valores de pH entre 6,06 y 9 UpH.

En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores oscilan entre 200  $\mu$ S/cm y 1.140  $\mu$ S/cm. Los puntos con mayor conductividad eléctrica se encuentran en el sector Yuruguai Intermedio Este (YIE), mientras que las aguas subterráneas en el sector Yuruguai Intermedio Oeste (Afluente- YIO) presentan aguas menos mineralizadas, con valores de conductividad eléctrica inferiores a 430  $\mu$ S/cm.

En resumen, los valores de conductividad eléctrica y pH son relativamente constantes a lo largo del recorrido aguas abajo, sin una tendencia espacial definida. Sin embargo, en promedio, se observan menores valores de conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo que caracterizan afluentes.

#### 4.6 Parámetros Fisicoquímicos Laboratorio

Los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio durante 2021 incluyen el pH y la conductividad eléctrica (CE), resumidos en la Tabla 13 y Tabla 14 (Anexo) con tendencias temporales presentadas en la Figura 6 y Figura 7 (Anexo), respectivamente.

En general, las aguas registran valores de pH entre 7,4 y 8,4 UpH, indicando condiciones neutras a levemente alcalinas. No se observan grandes diferencias entre los diferentes sectores de Quebrada Yuruguaiico en cuanto a estos parámetros.

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), los valores obtenidos varían entre 249 y 1.078  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se observan los mayores valores en el sector de YIE, en el punto RAD-GWQ-QY-02 (aguas abajo), respectivamente. Los puntos en el sector de YIO, que caracteriza un afluyente a la Quebrada Yuruguaiico, presentan aguas menos mineralizadas, con menores valores de CE, entre 249  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 273  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El pozo RAD-GWQ-QY-01 muestra un descenso constante en el valor de CE, disminuyendo desde 477  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en enero 2021 hasta 279,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en octubre 2021.

En general, los valores de CE y pH medidos en laboratorio son relativamente constantes en su recorrido aguas abajo, sin una tendencia espacial definida. Sin embargo, en promedio, se observan menores valores de conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo que caracterizan afluentes y mayores valores en el sector de YIE, en particular, en las aguas subterráneas del pozo RAD-GWQ-QY-02.

#### **4.7 Resultados de análisis de aniones en laboratorio**

Se analizaron los aniones nitrato, nitrito, fosfato, sulfato y cloruro (ver Figura 6 y Figura 7 del Anexo). El anión predominante es el sulfato, con concentraciones que varían entre 19 mg/L (QY-048, abril 2021) y 298,2 mg/L (QY-029, diciembre 2021).

Se observa un patrón similar a los valores de conductividad, con las aguas subterráneas. El pozo RAD-GWQ-QY-02 muestra una mayor mineralización en comparación con el pozo RAD-GWQ-QY-01, ubicado aguas arriba. Este aumento de la carga iónica no se observa en las aguas superficiales, lo que podría atribuirse a un aumento de la interacción agua-roca durante el flujo subterráneo en dirección aguas abajo y a una posible desconexión entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas en los sectores YS y YIE.

El segundo anión predominante es el cloruro, con concentraciones entre 9,4 mg/L (QY-041, julio 2021) y 75,04 mg/L (RAD-GWQ-QY-02, julio 2021).

Los iones nitrito y nitrato presentan concentraciones

menores a 1 mg/L. El contenido máximo de nitritos se observó en el pozo RAD-GWQ-QY-02, con una concentración de 0,755 mg/L en abril de 2021.

En cuanto al contenido de nitratos, se observa una mayor variabilidad de concentraciones. En las aguas subterráneas del sector YIE muestran un comportamiento similar al de los sulfatos y cloruros, donde el pozo RAD-GWQ-QY-02 registra un mayor enriquecimiento que el punto RAD-GWQ-QY-01, ubicado aguas arriba. En diciembre de 2021, se registró un resultado anómalamente elevado para el nitrato en los puntos RAD-GWQ-QY-02 (25,98 mg/L) y RAD-GWQ-QY-04 (11,13 mg/L).

Finalmente, los valores de fosfato son en su mayoría inferiores al límite de detección (LD) de Algoritmos o al límite de cuantificación (LQ) de ALS, con la excepción de los puntos RAD-GWQ-QY-04 (0,78 mg/L), RAD-GWQ-QY-01 (0,66 mg/L) y QY-048 (0,86 mg/L), los dos primeros valores obtenidos en el monitoreo de agosto de 2021 y el tercero en diciembre de 2021. No se identifica ninguna tendencia o comportamiento específico para este anión.

#### **4.8 Resultados de análisis de cationes en laboratorio**

Se analizaron las concentraciones totales de sodio, calcio, potasio, magnesio, cobre y hierro (ver Figura 8 y Figura 9 del Anexo). Las aguas del sector YIE mostraron en general condiciones más enriquecidas, especialmente en el punto RAD-GWQ-QY-02.

Los cationes predominantes son el sodio (5,7-106,8 mg/L) y el calcio (0,7-276,7 mg/L). El sodio mostró mayores concentraciones en el sector YIE, con los valores más altos en el pozo RAD-GWQ-QY-02 (57,9-85,7 mg/L) y el punto de aguas superficiales QY-029 (106,8 mg/L). El calcio mostró un comportamiento similar, con valores más altos en RAD-GWQ-QY-02 y en el sector YIE. Los valores de calcio fueron generalmente menores a 50 mg/L hasta septiembre de 2021, con excepciones en el pozo RAD-GWQ-QY-02 (54,1-175,3 mg/L).

Las concentraciones de potasio variaron entre 1,7-73,8 mg/L. Los contenidos de magnesio fueron inferiores a los cationes mencionados, oscilando entre 3,3 mg/L (QY-048) y 49,3 mg/L (QY-029).

Los metales minoritarios analizados, cobre y hierro, mostraron tendencias distintas. El cobre presentó la mayoría de los registros cercanos o por debajo del límite de detección/cuantificación (<0,013 mg/L Algoritmos; <0,0005 mg/L ALS), con máximos de 14,02 mg/L. Las concentraciones de hierro estuvieron mayormente cerca del límite de detección/cuantificación (<0,246 mg/L Algoritmos; <0,006 ALS), con las menores concentraciones en los puntos de aguas subterráneas (0,02-1,5 mg/L).

#### 4.9 Clasificación de las Aguas

El diagrama de Diagrama de Piper (1944) es utilizado para graficar las concentraciones relativas de iones mayoritarios (Alcalinidad ( $\text{HCO}_3+\text{CO}_3$ ),  $\text{SO}_4$ , Cl, Na+K, Mg y Ca) en las aguas. Se construyó con datos de diciembre de 2021 a partir de concentraciones totales de cationes para visualizar la concentración relativa de los elementos (ver Figura 10 en Anexo). De acuerdo con esto, se realiza una clasificación de Aguas por sectores de la Quebrada Yuruguaico:

Yuruguaico Intermedio Oeste (YIO): Aguas subterráneas del pozo RAD-GWQ-QY-04 son cloruro-sulfatada cálcicas; aguas superficiales QY-048 son bicarbonato-sulfatada cálcicas.

Yuruguaico Intermedio Este (YIE): Aguas superficiales QY-029 son bicarbonato-sulfatada calco-sódica; aguas subterráneas RAD-GWQ-QY-01 y RAD-GWQ-QY-02 son bicarbonatada calco-sódicas.

Yuruguaico Superior (YS): Este sector presenta una proporción similar de aniones para las aguas superficiales, sin embargo, el punto QY-019 es significativamente más enriquecido en bicarbonato que QY-014, ubicado aguas arriba. De este modo, el punto QY-014 se clasifica como sulfato-bicarbonatada calco-sódica, mientras que QY-019 se clasifica como bicarbonatada calco-sódica

Se elaboraron diagramas de Stiff (Stiff, 1951), utilizando los promedios estacionales de concentraciones de Ca, Mg, Na,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$  y Cl, lo cual se puede observar en la Figura 11 (Anexo). De este análisis se tiene que, en aguas subterráneas, hay un aumento de concentración de cationes y aniones en dirección aguas abajo, siendo RAD-GWQ-QY-02 el que presenta mayores concentraciones promedio. No una hay tendencia espacial clara en aguas superficiales. Por el contrario, los puntos de aguas

superficiales no muestran una tendencia espacial evidente, como es el caso de los puntos QY-019 y QY-029, ubicados en YS y YIE, respectivamente, los cuales son más mineralizados en comparación a otros puntos ubicados tanto aguas arriba, como aguas abajo en la quebrada. Por otro lado, las aguas subterráneas y superficiales del sector YIO, muestra menores concentraciones promedio de cationes y aniones en comparación con el sector YIE.

En resumen, se tiene una variación estacional y temporal, con una mayor mineralización en invierno y primavera. Variaciones significativas en concentraciones de cationes y aniones en el tiempo para un mismo punto.

## 5 Discusión

Los análisis hidrogeoquímicos realizados durante el 2021 en los puntos de aguas subterráneas y superficiales del APP Yuruguaico indican una mayor mineralización en invierno y primavera, probablemente debido a una menor dilución. Las aguas son generalmente neutras a levemente alcalinas posiblemente debido a la presencia de materia orgánica. Los valores de conductividad más altos se midieron en los puntos de aguas superficiales QY-029 (YIE) y QY-019 (YS), y en el pozo RAD-GWQ-QY-02 (YIE).

Las aguas subterráneas muestran una mayor concentración de iones en dirección aguas abajo, siendo el pozo RAD-GWQ-QY-02 (YIE) el punto de monitoreo de aguas subterráneas más mineralizado. Esta tendencia no se observa tan claramente para las aguas superficiales. El sector YIO, adyacente a la Quebrada Yuruguaico, presenta menores concentraciones de aniones y cationes en comparación con los demás sectores.

En cuanto a los metales traza, las concentraciones totales de hierro y cobre son inferiores o cercanas al límite de detección o cuantificación del laboratorio en la mayoría de los puntos de aguas superficiales y subterráneas. Estas bajas concentraciones pueden estar relacionadas con a una baja interacción con sedimentos derivados de la meteorización y oxidación de las rocas primarias, como andesitas y andesitas basálticas de la Formación Collahuasi y la granodiorita El Escorial.

## 6 Conclusiones

A lo largo del año 2021, se realizaron campañas de monitoreo mensuales desde enero hasta octubre. Estas fueron llevadas a cabo principalmente por la consultora Algoritmos SpA y, en menor medida, ALS, quienes fueron las entidades encargadas de los posteriores análisis de laboratorio

Los valores de conductividad hidráulica estimados según las pruebas de recuperación ejecutadas después del desarrollo y ensayos de airlift final en los pozos indican valores en el rango de  $4,39E-03$  a  $2,0E-00$  m/d, mientras que las transmisividades arrojan valores en el rango de  $1,25E-01$  a  $8,50E-01$  m<sup>2</sup>/d.

Los niveles estáticos medidos en los pozos se mantienen estabilizados hasta julio, posterior a esta fecha, los niveles exhiben comportamientos diferentes entre los distintos pozos, para luego volver a estabilizarse en octubre.

La red de monitoreo cubre varios puntos de aguas subterráneas y superficiales ubicados en la Quebrada Yuruguaico, que se divide de este a oeste en los sectores Yuruguaico Superior (YS), Yuruguaico Intermedio Este (YIE), Yuruguaico Intermedio Oeste (YIO) y Yuruguaico Inferior (YI).

En cuanto a la calidad del agua obtenida de estos monitoreos y del análisis de las mediciones realizadas *in situ*, se puede determinar que todas las aguas monitoreadas son neutras a ligeramente alcalinas. Las conductividades eléctricas son relativamente bajas (menores a  $1.500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), mostrando un aumento en dirección aguas abajo. Con relación a la concentración de iones, se observa un aumento en dirección aguas abajo para las aguas subterráneas, pero esta tendencia no es evidente para las aguas superficiales. El sector YIO, que caracteriza un afluente de la Quebrada Yuruguaico, presenta las menores concentraciones de aniones y cationes en comparación con los demás sectores, especialmente para las aguas superficiales y subterráneas.

Se puede inferir la ocurrencia de procesos de mineralización en las aguas subterráneas durante su recorrido aguas abajo, a través de la interacción agua/roca, particularmente en el pozo RAD-GWQ-QY-02, donde se presentan las mayores concentraciones de iones en general. Este pozo tiene

rocas menos meteorizadas y fracturadas en comparación con los demás pozos, lo que indica una zona con menor permeabilidad. Por otro lado, los puntos de aguas superficiales muestran tendencias similares a las aguas subterráneas, con aguas menos mineralizadas en los afluentes (sector YIO) en comparación con el cauce principal. Sin embargo, debido a que el registro es menos frecuente debido al congelamiento o la ausencia de agua en algunos puntos, esta tendencia debe ser validada y complementada con información de futuros monitoreos.

## 7 Referencias

- American Public Health Association, APHA. 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Estados Unidos.
- Ireland, T. 2010. Geological Framework of the Mineral Deposits of the Collahuasi district, Region de Tarapacá, Chile. Tesis de Doctorado (Inédito), University of Tasmania: 412 pp. Hobart, Australia.
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions, American Geophysical Union, vol 25:914–923. Washington D.C., Estados Unidos.
- RCA, Resolución de Calificación Ambiental N° 74. 2018. "Proyecto Minero Quebrada Blanca Fase 2". Iquique, Chile, 778 pp.
- Stiff, H.A., Jr. 1951. (In Press). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. J. Pet. Technol. 3:15–17.
- Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Transactions, American Geophysical Union, vol. 16, 519-524. Washington D.C., Estados Unidos.
- Tomlinson, A.J.; Blanco, N.; Makshev, V.; Dilles, J.H.; Grunder, A.L.; Ladino, M. 2001. Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca – Chiquicamata, Regiones I y II (20°30'–22°30' S). Servicio Nacional de Geología y Minería. Vol. I Texto: 381 pp. Santiago, Chile.
- Vergara, H. 1978a. Cuadrángulo Quehuita y sector occidental del cuadrángulo volcán Miño, Región de Tarapacá: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 32, mapa escala 1:50.000, 44 p. Santiago, Chile.
- Vergara, H. 1978b. Cuadrángulo Ujina, Región de Tarapacá: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 33, mapa escala 1:50.000, 63 p. Santiago, Chile.
- Vergara, H. & Thomas, A. 1984, Hoja Collacagua, Región de Tarapacá: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 59, mapa escala 1: 250.000, p. 79 p. Santiago, Chile.

Anexo

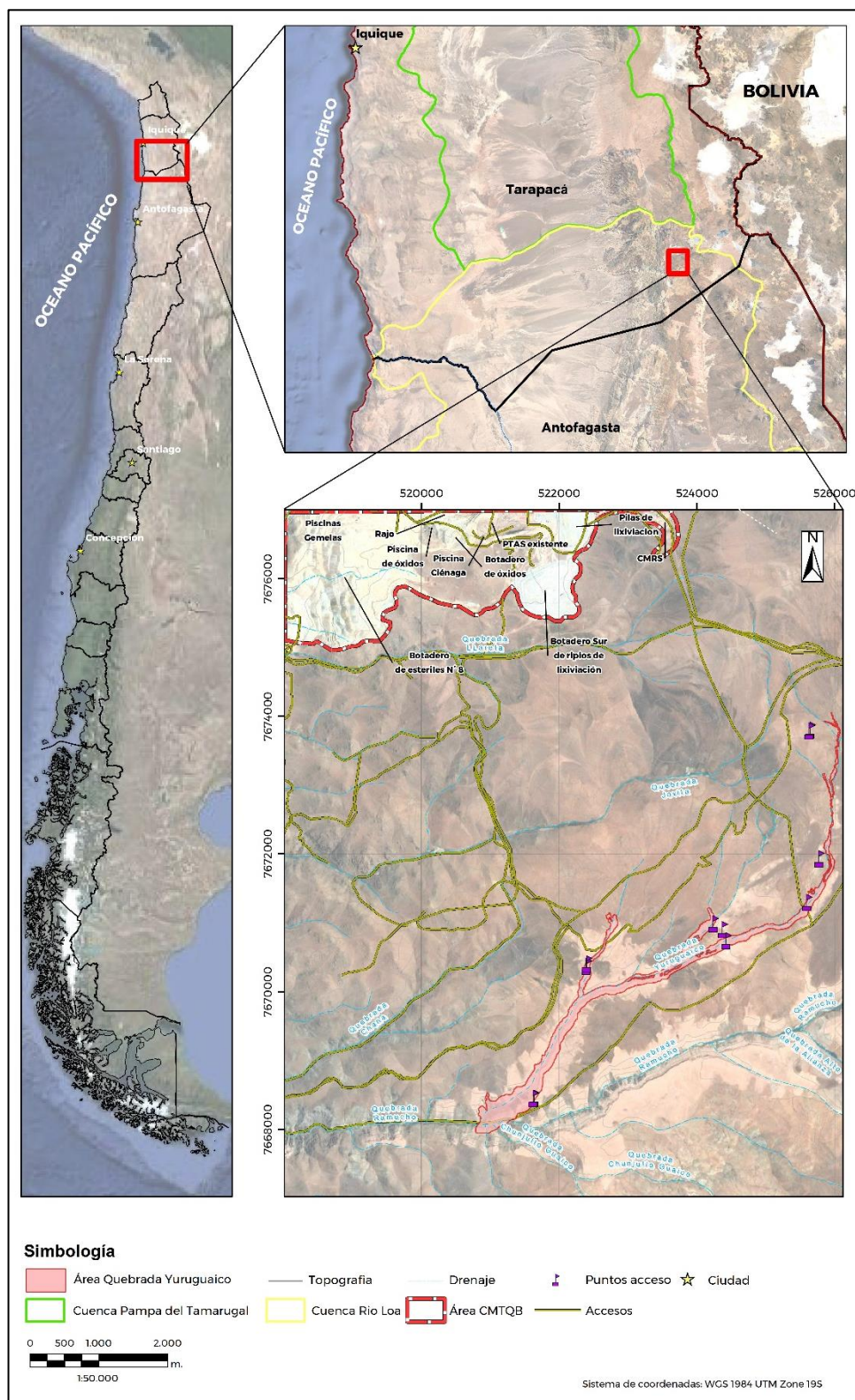


Figura 1. Mapa de ubicación del área estudiada

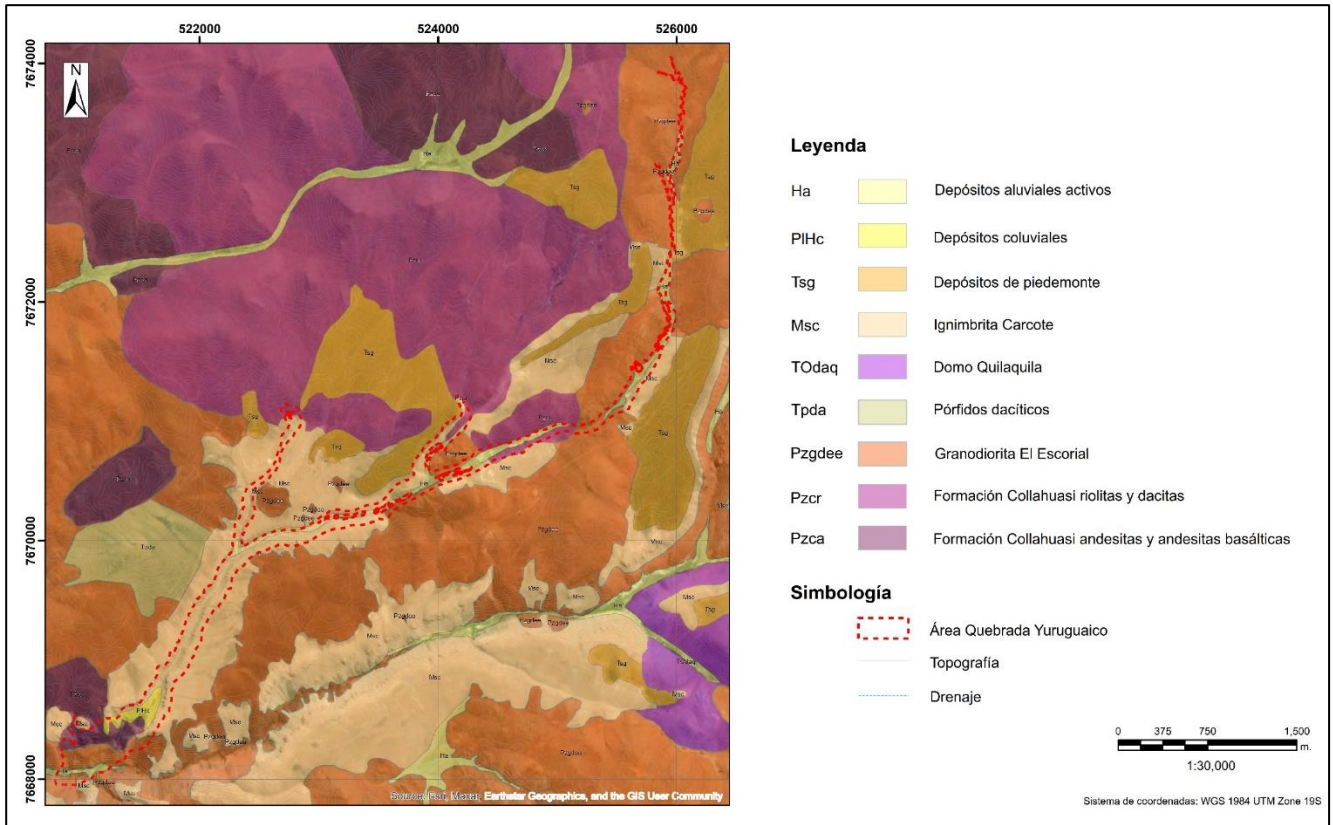


Figura 2. Mapa de Geológico del área de la Quebrada Yutuguaico

**Tabla 8.** Técnicas analíticas utilizadas para la medición de los parámetros comprometidos en el PMASS

Parámetro	ETFA (Laboratorio)	Límite de Detección	Límite de Cuantificación	Unidad	Metodología Utilizada
Nitrito (NO <sub>2</sub> )	Algoritmos	0,002	-	mg/L	SM 4500-NO2-B <sup>1</sup>
Nitrato (NO <sub>3</sub> )	Algoritmos	0,003	-	mg/L	SM 4500-NO3-B <sup>1</sup>
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	AGQ	0,50	-	mg/L	PE-2090
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	Algoritmos	3,34	-	mg/L	SM 4500-SO4 D <sup>1</sup>
Cloruro (Cl)	Algoritmos	0,41	-	mg/L	SM 4500-Cl-B <sup>1</sup>
Sodio* (Na)	Algoritmos	0,220	-	mg/L	SM 3120-B <sup>1</sup>
Potasio* (K)	Algoritmos	0,127	-	mg/L	SM 3120-B <sup>1</sup>
Calcio*(Ca)	Algoritmos	0,139	-	mg/L	SM 3120-B <sup>1</sup>
Magnesio* (Mg)	Algoritmos	0,068	-	mg/L	SM 3120-B <sup>1</sup>
Cobre* (Cu)	Algoritmos	0,013	-	mg/L	SM 3120-B <sup>1</sup>
Hierro* (Fe)	Algoritmos	0,246	-	mg/L	SM 3120-B <sup>1</sup>
Conductividad eléctrica	Algoritmos	0,15	-	µS/cm	SM 2510-B <sup>1</sup>
pH	Algoritmos	---	-	Unidad pH	SM 4500-H+B <sup>1</sup>
Nitrito (NO <sub>2</sub> )	ALS	-	0,3	mg/L	US EPA Method 300.1
Nitrato (NO <sub>3</sub> )	ALS	-	0,22	mg/L	US EPA Method 300.1
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	ALS	-	0,350	mg/L	US EPA Method 300.1
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	ALS	-	0,12	mg/L	US EPA Method 300.1
					SM 4500-SO4-E <sup>2</sup>
Cloruro (Cl)	ALS	-	0,08	mg/L	US EPA Method 300.1
					SM4500-Cl-B <sup>2</sup>

1 American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (2017). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 23RD Edition, Washington DC.

2 American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (2012). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22RD Edition, Washington DC.

**Tabla 9.** Resumen de la litología por Pozo

Pozos	Profundidad (tramo m)	Resumen de descripción litológica
RAD-GWQ-QY-01	0-20	Relleno Sedimentario. Depósitos fluvio-aluviales. Intercalación entre gravas arenosas y arenas gravosas con presencia de finos.
	20-30	Zona de transición. Roca granodiorítica muy meteorizada y deleznable. Suelo residual.
	30-52	Granodiorita porfídica con fracturas abiertas y pátinas de óxidos de hierro. Presenta alteración propilítica (clorita y epidota) y potásica (feldespato potásico) moderada a intensa.
RAD-GWQ-QY-02	0-4	Relleno Sedimentario. Depósitos fluvio-aluviales compuestos por grava arenosa polimíctica con presencia de rocas volcánicas, piroclásticas e intrusivas.
	4-30	Microdiorita holocristalina, equigranular, fanerítica, de grano fino. Cristales de plagioclasa, hornblenda, magnetita ± biotita. Plagioclasas y minerales ferromagnesianos alterados principalmente por clorita. Roca fresca, dureza R4. Fracturación de leve a moderada, fracturas parcialmente abiertas, con pátinas de óxidos de hierro.
	30-34	Microdiorita holocristalina. Fracturación de leve.
	34-52	Microdiorita holocristalina. Roca fresca, dureza R4. Fracturación de leve a moderada
RAD-GWQ-QY-04	0-2	Relleno sedimentario del tipo fluvio-aluvial, polimíctico.
	2-12	Toba con matriz de ceniza, levemente meteorizada, sin evidencia de fracturamiento. Se observan cristales de biotita y cuarzo, disgregable.
	12-24	Arenisca rojiza polimíctica, levemente meteorizada con escasas fracturas.
	24-50	Diorita con fracturas abiertas con pátina de óxidos de hierro. Presencia de epidota y clorita.
	50-52	Roca muy alterada. Posible estructura en Diorita.

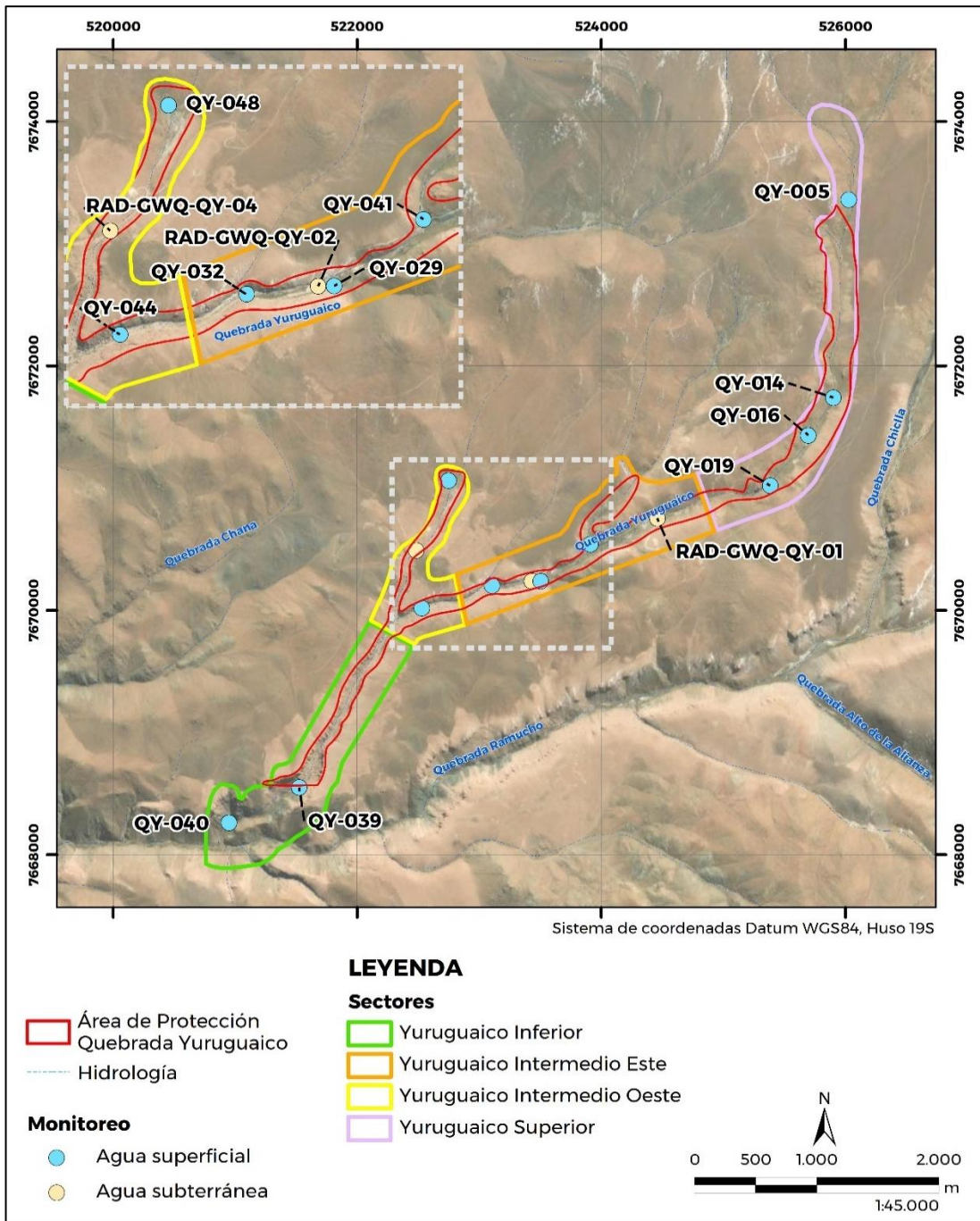
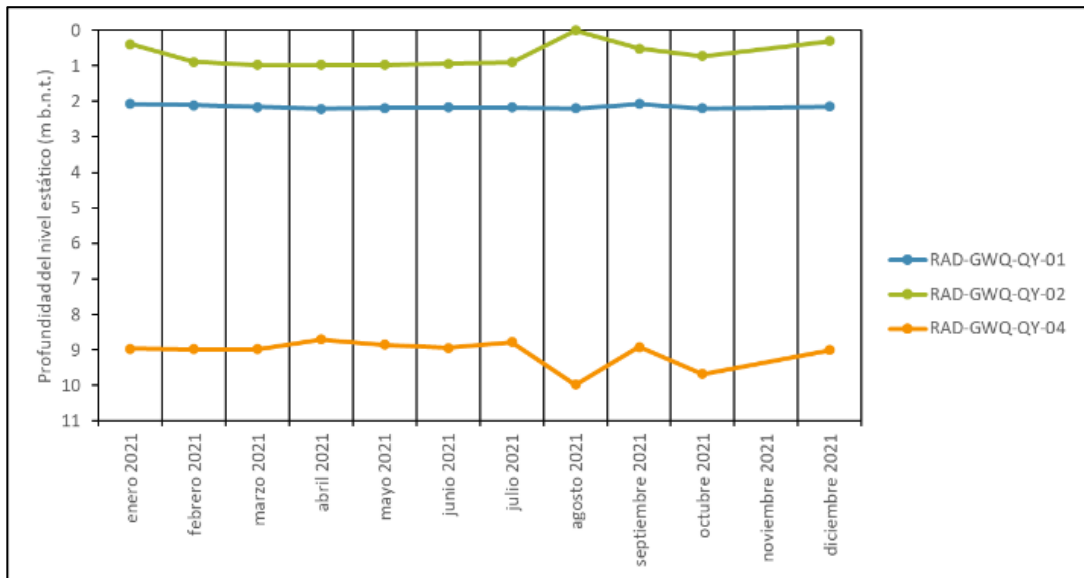


Figura 3. Red de Monitoreo en Quebrada Yuruguaique



**Figura 4.** Niveles registrados en Quebrada Yurugaico

Tabla 10. Resumen de muestras obtenidas durante 2021.

Nombre punto	Tipo de agua	Coordenada Este*	Coordenada Norte*	Enero			Febrero			Marzo			Abril			Mayo			Junio			Julio			Agosto			Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
				O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B	O	D	B			
RAD-GWQ-QY-01	Subterránea	524.458	7.670.753	✓			✓			✓			✓			✓			✓			✓			✓			✓	✓	✓							✓		
RAD-GWQ-QY-02	Subterránea	523.43	7.670.238	✓			✓	✓	✓	✓			✓			✓			✓			✓			✓			✓									✓		
RAD-GWQ-QY-04	Subterránea	522.484	7.670.490	✓	✓	✓	✓			✓			✓			✓			✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓			✓						✓		
QY-005	Superficial	526.027	7.673.361																																				
QY-014	Superficial	525.9	7.671.740													✓																					✓		
QY-016	Superficial	525.696	7.671.431																																				
QY-019	Superficial	525.383	7.671.020																																		✓		
QY-029	Superficial	523.503	7.670.239																																		✓		
QY-032	Superficial	523.105	7.670.202													✓			✓																				
QY-039	Superficial	521.524	7.668.550																			✓			✓			✓											
QY-040	Superficial	520.95	7.668.260																			✓			✓			✓											
QY-041	Superficial	523.91	7.670.542																✓																				
QY-044	Superficial	522.528	7.670.018																																				
QY-048	Superficial	522.748	7.671.061	✓			✓	✓	✓	✓			✓			✓																					✓		

Nota: \*El sistema de coordenadas corresponde a WGS84.

O: Muestra original. D: Muestra duplicado. B Muestra de blanco.

Gris: No existe información reportada; Verde: Problemas de acceso; Amarillo: Flujo de agua ausente, escaso y/o agua estancada no representativa; Azul: Punto de monitoreo congelado; Celeste: No se realizó monitoreo por cambio de ETFA.

**Tabla 11.** Resumen parámetros medidos *in situ* (en campo) en puntos de aguas subterráneas visitados en 2021.

Parámetro (unidad)	Nombre punto	RAD-GWQ-QY-01	RAD-GWQ-QY-02	RAD-GWQ-QY-04	Parámetro (unidad)	RAD-GWQ-QY-01	RAD-GWQ-QY-02	RAD-GWQ-QY-04
	Mes/Sector	YIE	YIE	Afluente - YIO		YIE	YIE	Afluente - YIO
pH (UpH)	ene-21	8,53	5,57	6,93	Conductividad eléctrica (µS/cm)	361,7	743,0	200,8
	feb-21	8,23	8,36	8,03		372,3	859,0	225,8
	mar-21	8,2	7,77	7,46		381,7	988,0	304,8
	abr-21	7,91	8,2	6,95		362,5	1012	283,3
	may-21	7,9	7,81	7,62		295,0	870,0	229,0
	jun-21	7,08	8,11	8		310,2	985,0	422,1
	jul-21	7,66	6,94	6,87		322,3	1.141	276,1
	ago-21	8,76	8,36	7,4		316,0	1.041	281,3
	sept-21	7,38	7,19	7,71		400,2	11,86	309,6
	oct-21	8,49	7,99	7,89		286,0	816,0	264,0
	dic-21	7,34	7,39	6,21		266,0	755,0	276,0
	Máximo	<b>8,76</b>	<b>8,36</b>	<b>8,03</b>		<b>400,2</b>	<b>1.141</b>	<b>422,1</b>
	Mínimo	<b>7,08</b>	<b>5,57</b>	<b>6,21</b>		<b>266,0</b>	<b>11,86</b>	<b>200,8</b>
	Promedio	<b>7,95</b>	<b>7,61</b>	<b>7,37</b>		<b>334,0</b>	<b>838,4</b>	<b>279,3</b>

**Tabla 12.** Resumen parámetros medidos *in situ* (en campo) en puntos de aguas superficiales visitados en 2021

Parámetro	Nombre punto	QY-005	QY-014	QY-016	QY-019	QY-029	QY-032	QY-039	QY-040	QY-041	QY-044	QY-048
	Mes monitoreo											
pH	ene-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,01
	feb-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,21
	mar-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,25
	abr-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,65
	may-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,68
	jun-21	-	7,48	-	-	-	7,4	-	-	-	-	-
	jul-21	-	-	-	-	-	7,44	-	-	8,05	-	-
	ago-21	-	-	-	-	-	-	8,35	8,15	-	-	-
	sept-21	-	-	-	-	-	-	6,85	6,25	-	-	-
	oct-21	-	-	-	-	-	-	7,61	7,7	-	-	-
	dic-21	-	6,75	-	6,98	7,69	-	-	-	-	-	7,03
	Máximo	-	7,48	-	6,98	7,69	7,44	8,35	8,15	8,05	-	8,25
	Mínimo	-	6,75	-	6,98	7,69	7,40	6,85	6,25	8,05	-	7,01
	Promedio	-	7,12	-	6,98	7,69	7,42	7,60	7,37	8,05	-	7,64
Conductividad eléctrica (µS/cm)	ene-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	195,3
	feb-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168,5
	mar-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	162,9
	abr-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	324,8
	may-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	169,0
	jun-21	-	249,9	-	-	-	399,3	-	-	-	-	-
	jul-21	-	-	-	-	-	308,4	-	-	359,0	-	-
	ago-21	-	-	-	-	-	-	376,7	431,8	-	-	-
	sept-21	-	-	-	-	-	-	523,3	542,3	-	-	-
	oct-21	-	-	-	-	-	-	330,0	383,0	-	-	-
	dic-21	-	425,2	-	1.455	1.466	-	-	-	-	-	193,0
	Máximo	-	425,2	-	1.455	1.466	399,3	523,3	542,3	359,0	-	324,8
	Mínimo	-	249,9	-	1.455	1.466	308,4	330,0	383,0	359,0	-	162,9
	Promedio	-	337,6	-	1.455	1.466	353,9	410,0	452,4	359,0	-	202,3

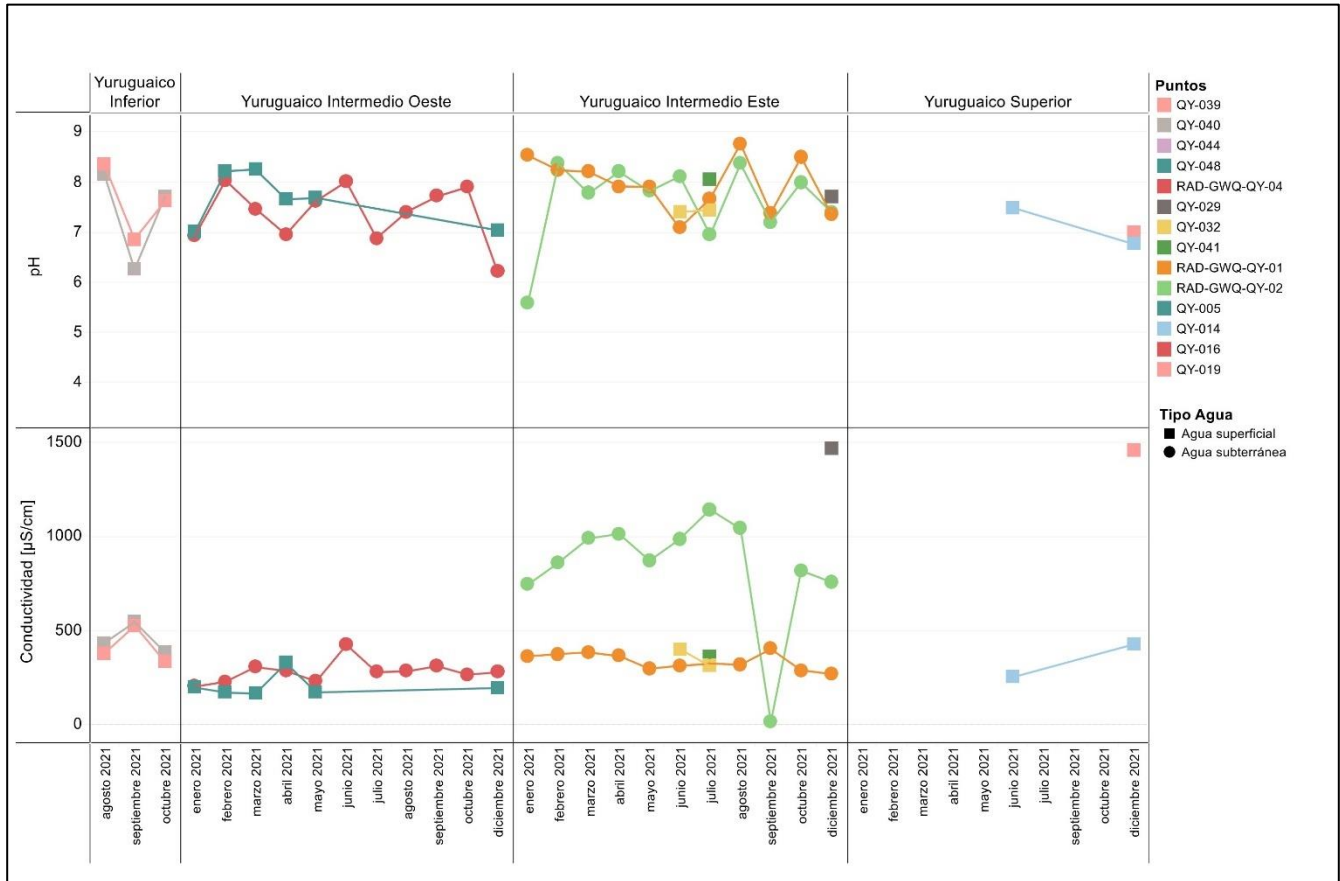


Figura 5. Variación de valores de pH y conductividad eléctrica medidos en campo durante 2021

**Tabla 13.** Resumen de resultados de parámetros fisicoquímicos obtenidos en laboratorio durante 2021 en aguas subterráneas

Parámetro (unidad)	Nombre punto	RAD-GWQ-QY-01	RAD-GWQ-QY-02	RAD-GWQ-QY-04	Parámetro (unidad)	RAD-GWQ-QY-01	RAD-GWQ-QY-02	RAD-GWQ-QY-04
	Mes/Sector	YIE	YIE	Afluente - YIO		YIE	YIE	Afluente - YIO
pH	ene-21	8,53	7,97	7,99	Conductividad eléctrica (µS/cm) (*)	476,8	989,8	268,2
	feb-21	8,23	7,72	8,02		428,7	985,1	257,1
	mar-21	8,2	7,87	7,9		370,3	975,2	261,3
	abr-21	7,91	7,72	7,91		353,6	959,1	249,4
	may-21	7,9	7,88	8,09		336,1	1.012	262,3
	jun-21	7,08	7,87	8,02		325,8	1.025	260,7
	jul-21	7,66	7,89	7,8		321,6	1.078	270,7
	ago-21	8,76	7,77	8,06		295,9	971,1	262,7
	sept-21	7,38	7,58	7,39		288,5	867,7	273,1
	oct-21	8,19	7,66	7,99		279,5	812,3	257
	dic-21	-	-	-		-	-	-
	Máximo	8,39	7,97	8,09		476,8	1.078	273,1
	Mínimo	8,00	7,58	7,39		279,5	812,3	249,4
	Promedio	8,23	7,79	7,92		347,7	967,5	262,3

**Tabla 14.** Resumen de resultados de parámetros fisicoquímicos obtenidos en laboratorio durante 2021 en aguas superficiales.

Parámetro	Nombre punto	QY-005	QY-014	QY-016	QY-019	QY-029	QY-032	QY-039	QY-040	QY-041	QY-044	QY-048
	Mes monitoreo											
pH	ene-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,99
	feb-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,64
	mar-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,51
	abr-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,3
	may-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,8
	jun-21	-	7,43	-	-	-	7,44	-	-	-	-	-
	jul-21	-	-	-	-	-	7,55	-	-	8,32	-	-
	ago-21	-	-	-	-	-	-	8,06	8,04	-	-	-
	sept-21	-	-	-	-	-	-	6,65	6,65	-	-	-
	oct-21	-	-	-	-	-	-	7,58	7,86	-	-	-
	dic-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máximo	-	7,43	-	-	-	7,55	8,06	8,04	8,32	-	9,30
	Mínimo	-	7,43	-	-	-	7,44	6,65	6,65	8,32	-	7,64
Promedio	-	7,43	-	-	-	7,50	7,43	7,52	8,32	-	8,45	
Conductividad eléctrica (μS/cm) (*)	ene-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	162,2
	feb-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	163,6
	mar-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	162,8
	abr-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	157,7
	may-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	165
	jun-21	-	249,2	-	-	-	407,7	-	-	-	-	-
	jul-21	-	-	-	-	-	307,5	-	-	299,7	-	-
	ago-21	-	-	-	-	-	-	365,2	375,4	-	-	-
	sept-21	-	-	-	-	-	-	235,3	235,3	-	-	-
	oct-21	-	-	-	-	-	-	341,7	367,8	-	-	-
	dic-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máximo	-	249,2	-	-	-	407,7	365,2	375,4	299,7	-	165,0
	Mínimo	-	249,2	-	-	-	307,5	235,3	235,3	299,7	-	157,7
Promedio	-	249,2	-	-	-	357,6	314,1	326,2	299,7	-	162,3	

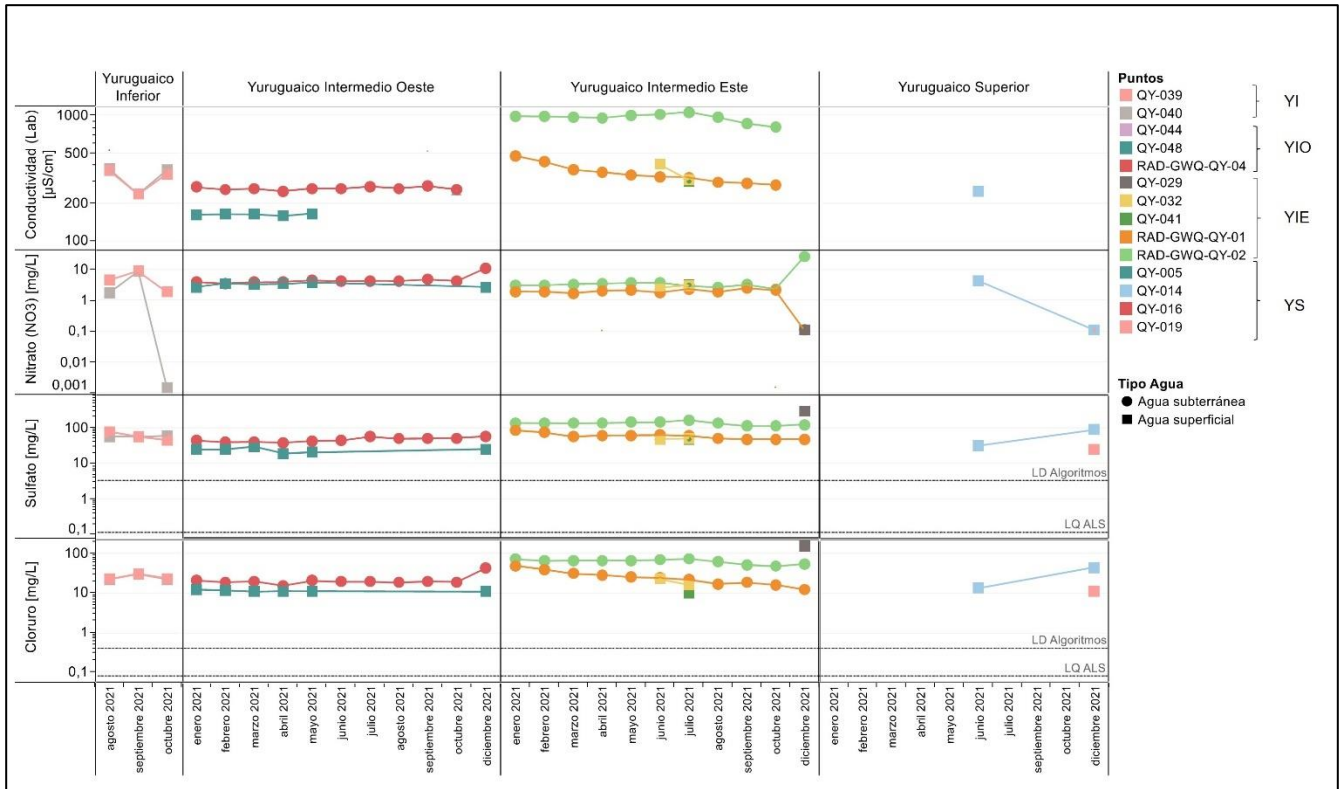


Figura 6. Valores de conductividad eléctrica medida en laboratorio y concentraciones de NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> y Cl medidas en 2021 (LD: Límite de detección; LQ: Límite de cuantificación)

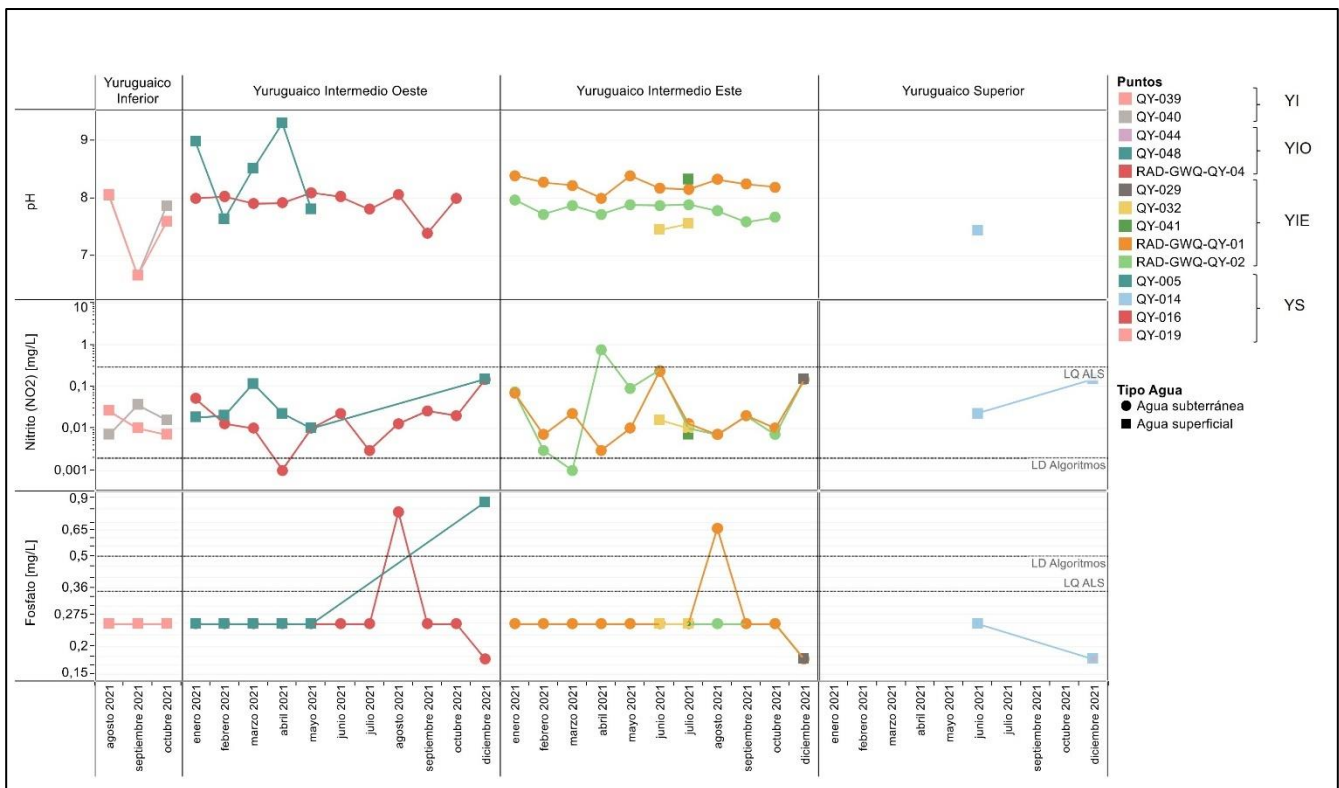
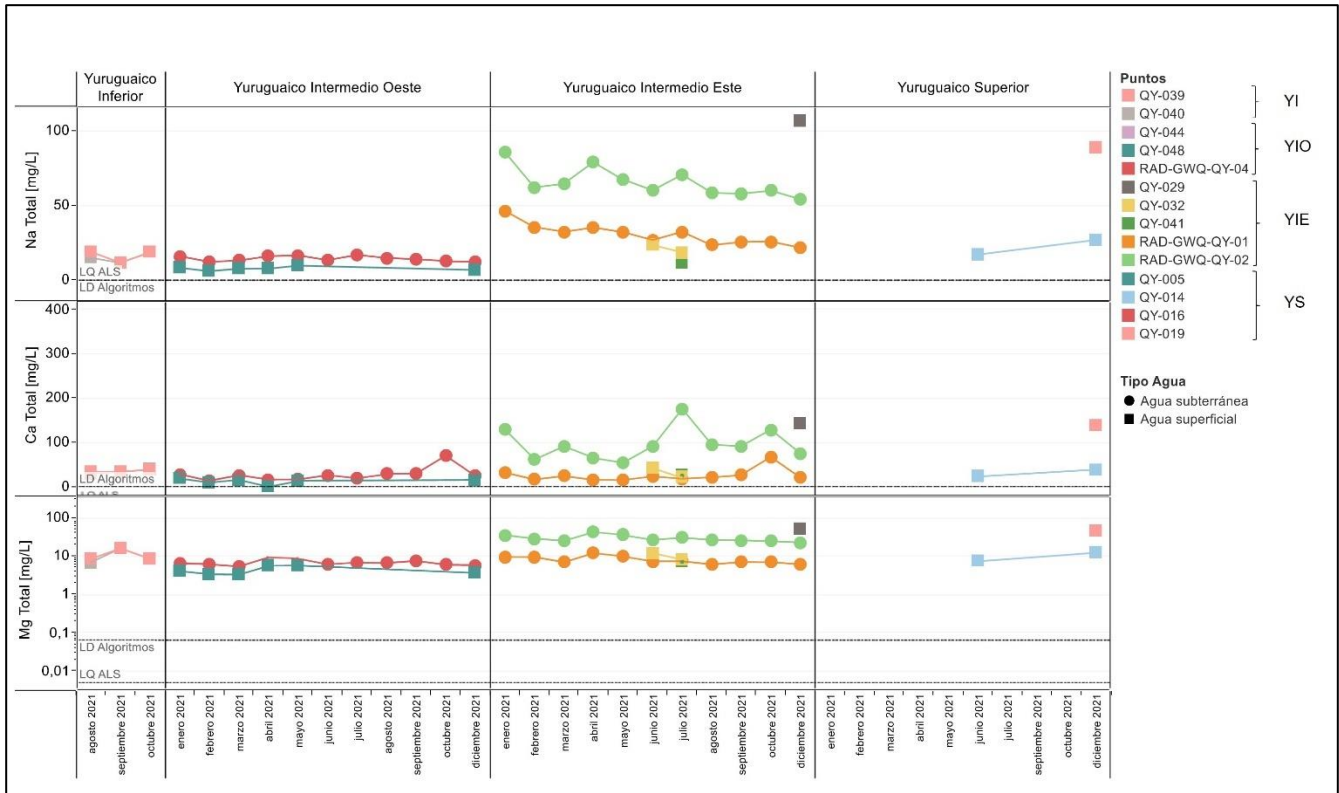
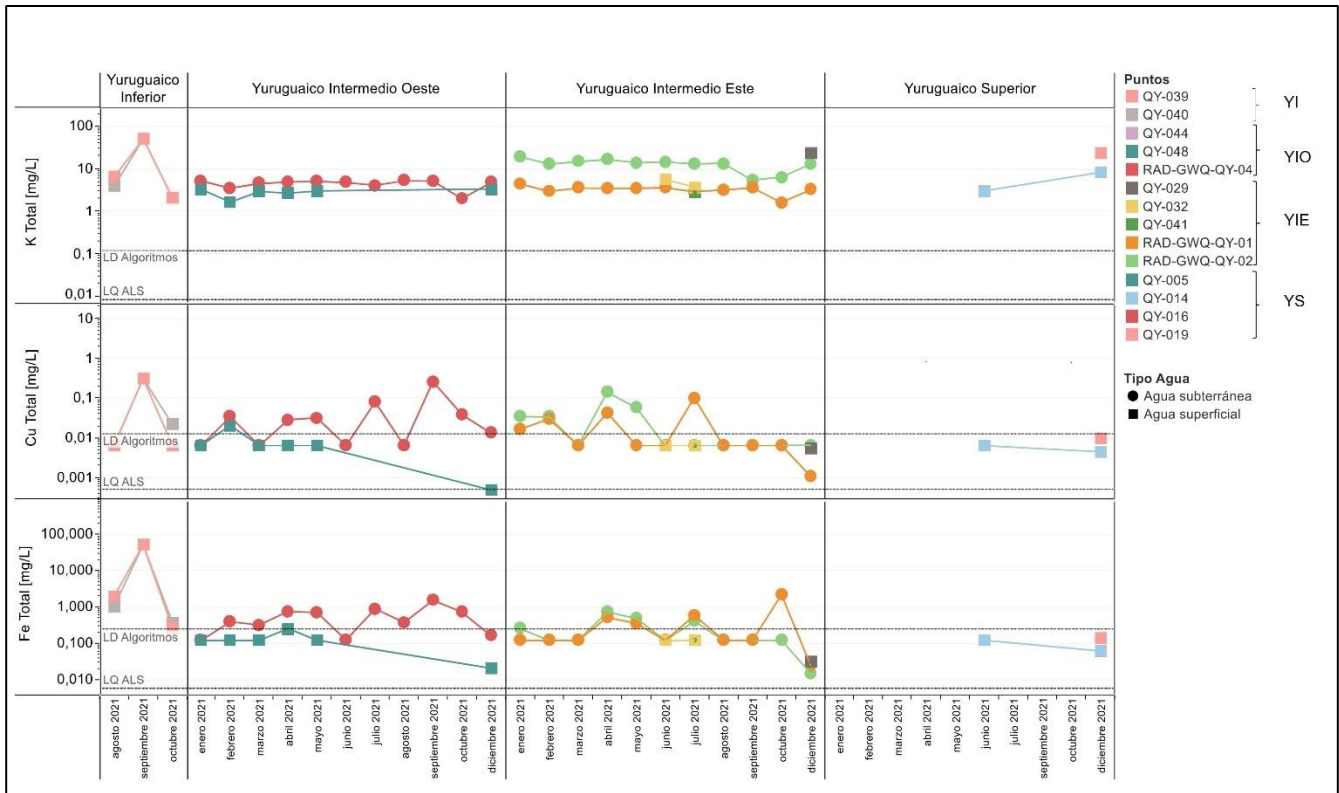


Figura 7. Valores de pH medido en laboratorio y concentraciones de NO<sub>2</sub>, y PO<sub>4</sub> medidas durante 2021 (LD: Límite de detección; LQ: Límite de cuantificación)



**Figura 8.** Concentraciones de cationes obtenidas por ETFA Algoritmos SpA durante 2021 (LD: Límite de detección; LQ: Límite de cuantificación)



**Figura 9.** Concentraciones de cationes obtenidas por ETFA Algoritmos SpA durante 2021 (LD: Límite de detección; LQ: Límite de cuantificación)

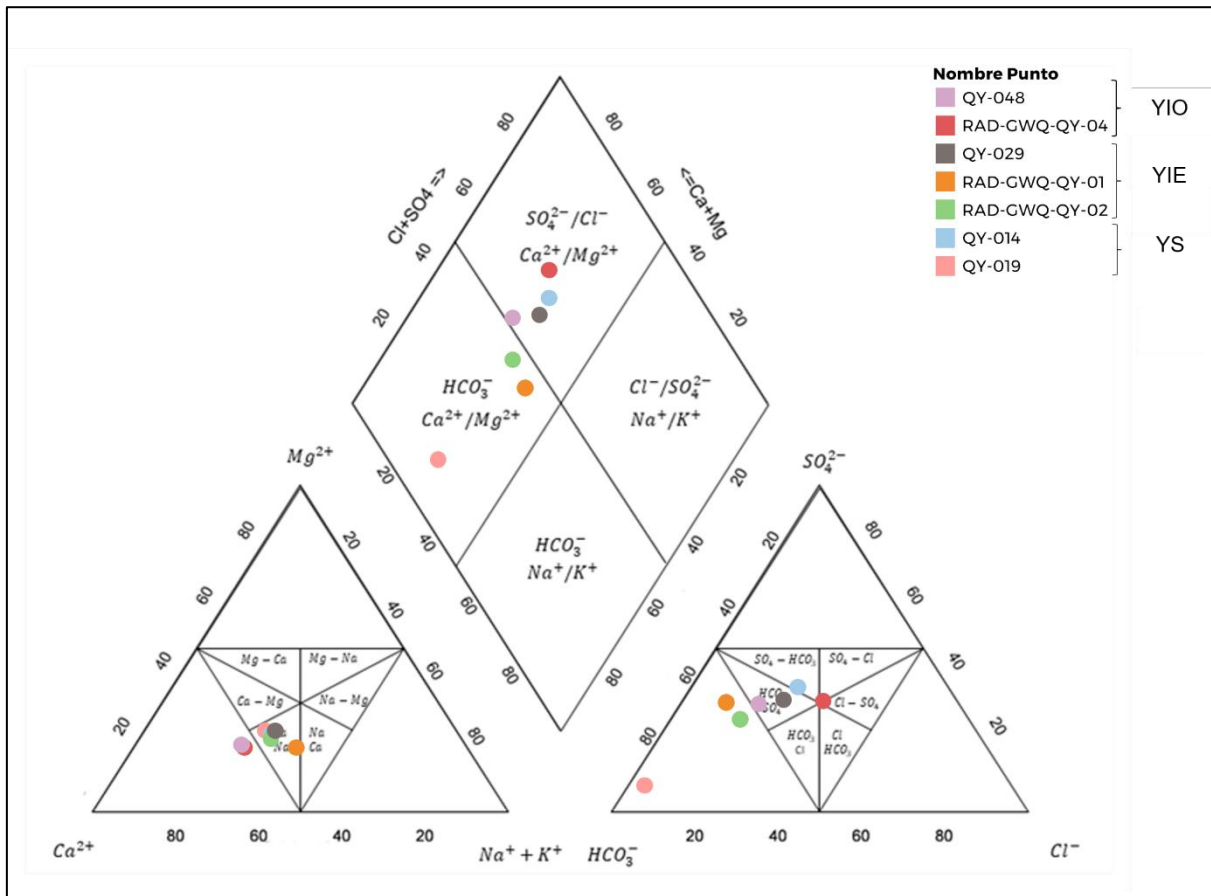


Figura 10. Diagrama de clasificación de Piper para las muestras de diciembre de 2021.

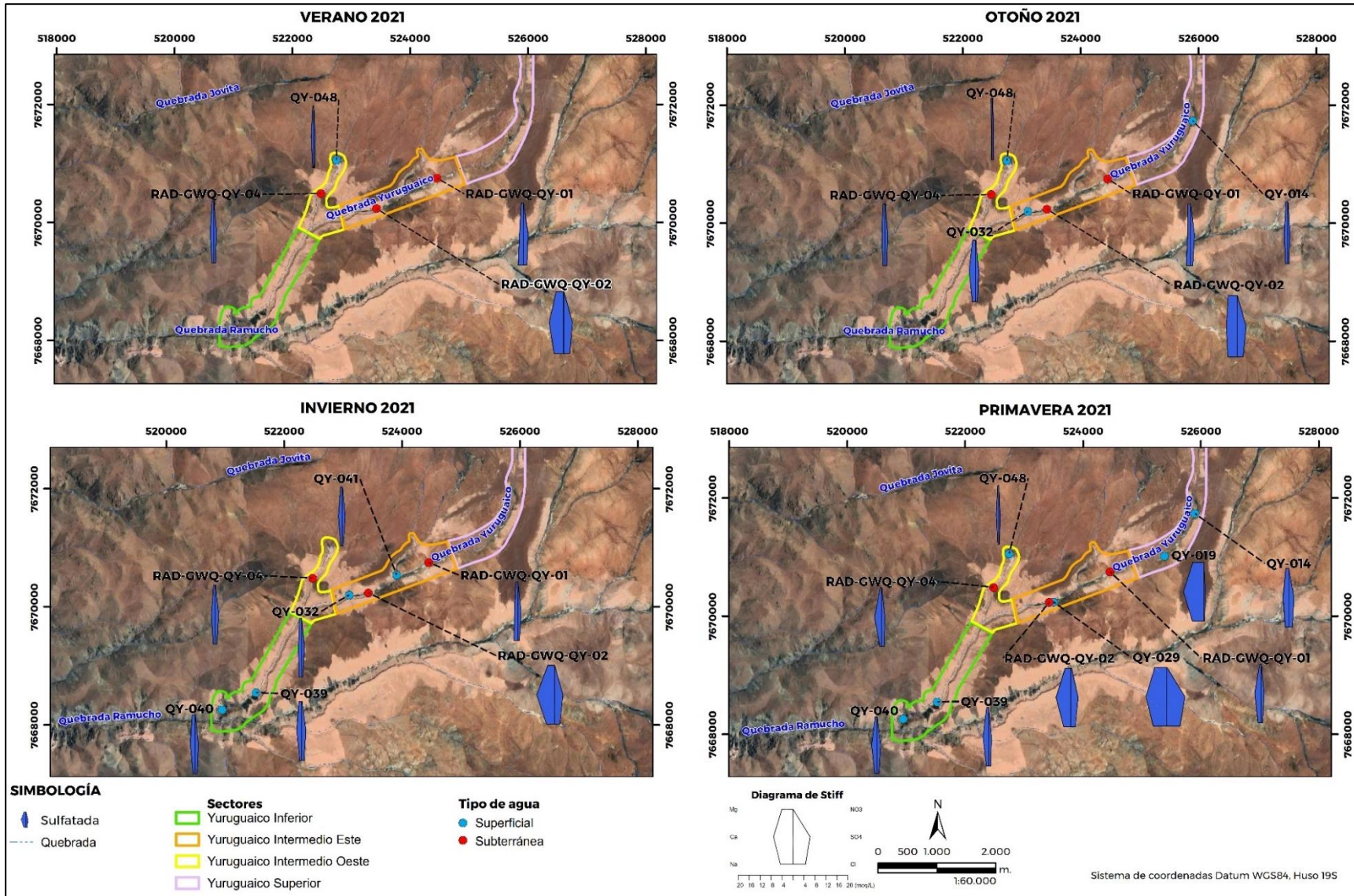


Figura 11. Diagrama de Stiff con los valores promedio estacionales de Ca, Mg, Na, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> y Cl para el año 2021