Trabajo Final de Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP.

Análisis de la calidad del agua subterránea a partir de parámetros fisicoquímicos en la localidad de Miraflores, Chaco.

Autora
Fornés Magalí

Directores
Dr. Luis Guarracino
Dra. María José González

2020

Resumen

Desde el año 2015 se desarrolla en la UNLP un proyecto del Programa Geoscientists Without Borders (GWB) cuyo objetivo es buscar fuentes de agua subterráneas para las localidades rurales y aborígenes de Miraflores, Chaco. Como resultado de los estudios de prospección geofísica realizados en la región en el marco del proyecto, se construyeron varios pozos de los cuales se tomaron muestras del agua y se realizaron análisis fisicoquímicos tanto in situ como en el laboratorio para evaluar la calidad de la misma. La mayoría de los pozos se ubican sobre paleocauces, antiguos lechos de ríos o arroyos, que se encuentran a profundidades variables entre 8 y 15 metros. Estos cuerpos subterráneos pertenecientes a paleosistemas de drenaje no cuentan con una gran dimensión y continuidad, y en general están formados por sedimentos de granulometría de arena fina, permitiendo el almacenamiento de agua subterránea de calidad variable. Teniendo en cuenta la dispersión de la población en pequeños grupos de familias en extensas áreas rurales, y que las fuentes de agua dulce en el área son muy escasas, estos paleocauces constituyen una importante reserva de agua subterránea para potencial consumo humano, especialmente en épocas de sequía.

El rol de los sedimentos en la calidad del agua también es importante ya que en la región predominan los sedimentos de textura fina y loéssicos. En particular se analiza su influencia a partir del análisis granulométrico y mineralógico, mediante difracción de rayos X y microscopía SEM-EDS, de las muestras tomadas tanto en el paleocauce como en el loess circundante.

Abstract

Since 2015, a project of the Geoscientists Without Borders Program (GWB) is being developed at the UNLP. The objective of this project is the search of groundwater sources aimed at finding groundwater sources for rural and aboriginal communities of Miraflores, Chaco. As a result of the geophysical prospecting studies performed in the region as part of the project, several wells were built. Water samples were extracted and physicochemical analyzes were performed both on site and in the laboratory to assess the quality of the water. Most wells are located on paleochannels, ancient riverbeds or streams, which are located at variable depths between 8 and 15 meters. These underground bodies bodies, which are part of a drainage paleosystem, do not have a large dimension and continuity, and are generally formed by fine sand granulometry sediments, allowing the storage of groundwater of variable quality. Given the dispersion of the population into small groups of families in large rural areas, and the scarcity of fresh water sources, these paleochannels constitute an important reserve of groundwater for potential human consumption, especially in times of drought.

The role of sediments in water quality is also important as fine-textured and loessic sediments predominate in the region. In particular, its influence is analyzed from granulometric and mineralogical analysis, by X-ray diffraction and SEM-EDS microscopy, from samples taken in both the paleochannels and surrounding loess.

ÍNDICE

1. Introducción 6
1.1. Miraflores y el Impenetrable Chaqueño 6
1.2. Antecedentes 8
1.3. Objetivos 12
2. Marco Teórico 13
2.1. Geología, y geomorfología del área 13
2.2. Hidrogeología, contaminantes y problemática del agua 15
3. Materiales y Métodos 19
3.1. Muestreo 19
3.2. Mediciones en campo 20
3.3. Determinaciones fisicoquímicas en muestras de agua 22
3.4. Determinaciones en sólidos 23
4. Resultados 26
4.1. Resultados en muestras de agua 26
4.2. Resultados en muestras de sedimentos 31
4.2.1. Caracterización textural 31
4.2.2. Cálculo de Porosidad y Conductividad hidráulica 34
4.2.3. Resultados DRX y SEM-EDS 35
4.2.3.1. Muestra M1 35
4.2.3.1.1. MG1: Fracción Gruesa de M1 38
4.2.3.1.2. MF1: Fracción Fina de M1 39
4.2.3.2. Muestra M2 41
4.2.3.2.1. MG2: Fracción gruesa de M2 43
4.2.3.2.2. MF2: Fracción fina de M2 45
5. Conclusiones 48
6. Referencias Bibliográficas 50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de Miraflores y el Parque Nacional El Impenetrable. 6
Figura 2: Sistema utilizado para la recolección de agua de lluvia (izquierda). Pozo para la conservación de agua (derecha). 7
Figura 3: Sistema de transporte de agua potable para abastecimiento de pobladores de la ciudad de Miraflores y zonas aledañas. 7
Figura 4: Cultivo de algodón (izquierda), ganado porcino (derecha). 8
Figura 5: Resistividad de las rocas, sedimentos y minerales, en seco o con agua. Tomado de Loke, 2016. 10
Figura 6: Tomografías realizadas: Modelos de resistividad eléctrica del subsuelo. Tomado de Amaya, 2018. 11
Figura 7: Ubicación de las 10 perforaciones realizadas durante la campaña 2017 del Proyecto. 12
Figura 8: Mapa de la Llanura Chacopampeana, con detalle en los distintos depocentros. Tomado de Ramos, 1999. 14
Figura 9: Mapa de Permeabilidad a gran escala de la Provincia de Chaco. Tomado de Memendi, 2011. 15
Figura 10: Mapa de Cuencas hídricas. Tomado del Anuario de Precipitaciones 1956-2010, APA. 16
Figura 11: Mapa de niveles de As en los pozos de la provincia del Chaco, Administración Provincial del Agua, 2014. Tomado de Litter et al., 2019. 18
Figura 12: Bomba de extracción manual, pozo 5. 19
Figura 13: Mapa de la ubicación de los pozos donde se tomaron muestras de agua subterránea. 20
Figura 14: Medición de turbidez in situ de muestra de agua. 21
Figura 15: Kit de Arsénico 1.17927.0001-Merckoquant. 22
Figura 16: Escala colorimétrica del Test 1.17927.0001-Merckoquant. 22
Figura 18: Esquema de clasificación de partículas según su diámetro, USDA. 25
Figura 17: Microscopio electrónico de barrido Phillips modelo SEM 505. 25
Figura 20: Mapa de Conductividades medidas en agua de pozos censados, campaña 2015. Extraído de Guarracino, 2017. 26
Figura 19: Mapa de niveles de Arsénico en pozos censados, campaña 2015. Extraído de Guarracino, 2017 26
Figura 21: Diagramas comparativos de las concentraciones en agua de distintos parámetros en cada uno de los pozos. 30

Figura 22: Diagrama de Piper-Hill-Langellier para las muestras de agua de cada uno de los pozos. 31
Figura 23: Textura resultante de las muestras de sedimentos según el triángulo de clasificación USDA de suelos y sedimentos. 32
Figura 24: Curva granulométrica de la muestra M1, tomada del paleocauce. 33
Figura 25: Curva granulométrica de la muestra M2, de suelo superficial..... 33
Figura 26: Diagrama DRX de la muestra M1 total. 35
Figura 27: SEM de M1 total a escalas de diferente magnificación. a) 50X. b) 100X. 36
Figura 28: Espectro EDS global correspondiente a la micrografía de la figura 27.a. 37
Figura 29: SEM de MG1 (fracción gruesa o arenosa de M1). Magnificación a 50x y 100 x respectivamente. 38
Figura 30: Datos EDS de MG1. 38
Figura 31: SEM de la fracción fina del sedimento 1 (MF1) a diferente magnificación. A) 50x. b) 100 x. 39
Figura 32: Datos EDS de la fracción fina de la muestra 1 (MF1). 39
Figura 33: Datos SEM-EDS de MF1 a magnificaciones superiores a 500 x. 40
Figura 34: Diagrama DRX de la muestra de M2 total..... 41
Figura 35: SEM de M2 total a escalas de diferente magnificación. a) 50X. b) 100X. 42
Figura 36: Espectro EDS del sedimento mostrado en la figura 2.b 42
Figura 37: SEM de la fracción gruesa del sedimento 2 (magnificación 50 y 100 x respectivamente). 44
Figura 38: EDS del material grueso de MG2. 44
Figura 39: Análisis SEM-EDS de partículas de MG2 a mayor significación. 45
Figura 40: SEM de MF2 a 50x y 100x respectivamente. 46
Figura 41: EDS de MF2. 46
Figura 42: SEM-EDS de partículas de MF2 a magnificación 2000x y 1000x. 47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Detalle de los pozos de explotación realizados y ubicación. 19
Tabla 2: Parámetros fisicoquímicos analizados, unidades de expresión, y límites de detección según los métodos utilizados en el laboratorio. 23
Tabla 3: Resultados de los parámetros medidos in situ. Campaña 2018. 27
Tabla 4: Resultados de parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio. Resaltados se encuentran los valores que exceden los recomendados por la OMS. 28
Tabla 5: Resultados del análisis de sedimentos por el método de Bouyoucos de las muestras. 32
Tabla 6: Resultados de porosidad calculados mediante la fórmula de Wu y Wang (2006). 34
Tabla 7: Datos EDS correspondientes a la micrografía de la Figura 27.b. 37
Tabla 8: Valores de los puntos indicados en la Figura 29.b 39
Tabla 9: EDS de partículas identificadas como 1 y 2 en la Figura 35b. 43

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 53

1. Introducción

1.1. Miraflores y el Impenetrable Chaqueño

La localidad de Miraflores se encuentra en la provincia de Chaco, Argentina. Forma parte del departamento General Güemes, a 47 km de la cuidad de Castelli por la ruta Provincial 9. Abarca una superficie poblada de 3,46 km^2, y limita con el Parque Nacional "El Impenetrable", ubicado entre los ríos Bermejito y Teuco-Bermejo (Figura 1).

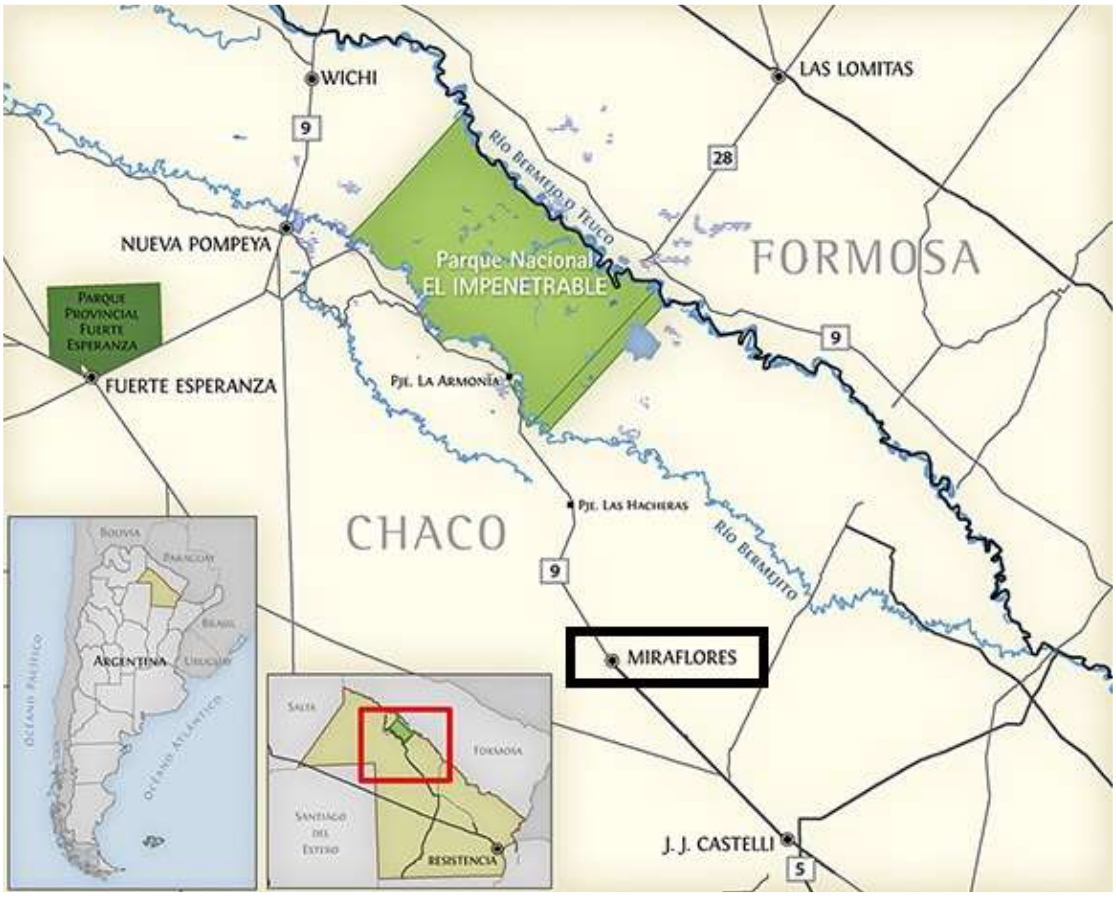


Figura 1: Ubicación de Miraflores y el Parque Nacional El Impenetrable.

El Impenetrable es un extenso bosque, que, si bien es proclive a los procesos de desertificación por encontrarse en un ambiente árido con gran escasez de agua, está caracterizado por una increíble biodiversidad, permitida por las crecientes periódicas de los ríos que lo limitan (Tiddi et al., 2014).

Al censo del 2010, la Localidad de Miraflores contaba con 4737 habitantes, y se registró un porcentaje de necesidades básicas insatisfechas (NBI) de 29,9%, ubicando a la provincia de Chaco muy por encima de la media del país (17,7%), y siendo este valor aún mayor en los establecimientos indígenas (66,5%) (INDEC, 2010).

En los alrededores de la ciudad, los asentamientos cuentan con gran deficiencia de infraestructura sanitaria básica, así como también una inadecuada, y a veces inexistente, instalación para la provisión de agua.

Los pobladores se abastecen mediante la recolección de agua de lluvia en pozos (Figura 2), y la conservación y administración de los ~100.000 litros semanales que llegan al centro de la ciudad transportados desde Castelli (Figura 3). Sin embargo, este servicio resulta insuficiente para el abastecimiento de la demanda, especialmente en épocas de sequía.

Figura 2: Sistema utilizado para la recolección de agua de lluvia (izquierda). Pozo para la conservación de agua (derecha).

Figura 3: Sistema de transporte de agua potable para abastecimiento de pobladores de la ciudad de Miraflores y zonas aledañas.

La vegetación que se extiende en toda la región corresponde a la del dominio chaqueño, integrada principalmente por especies xerófilas, adaptadas tanto a las importantes fluctuaciones de disponibilidad hídrica como a las variaciones de temperatura. Se pueden encontrar especies como el quebracho colorado santiagueño, el quebracho blanco y el quebracho colorado chaqueño; además de palo santo, mistol, algarrobo y arbustos.

El uso del suelo en la región es predominantemente ganadero, tanto vacuno como caprino y porcino, mientras que la agricultura se basa casi exclusivamente en extensos cultivos de algodón (Figura 4).

Figura 4: Cultivo de algodón (izquierda), ganado porcino (derecha).

1.2. Antecedentes

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto *"Groundwater resources for small rural and Aboriginal communities in Chaco province"*, presentado desde la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, y aprobado en 2013 por el programa Geoscientist Without Borders (GWB). El proyecto se presenta ante una sequía muy importante en Miraflores, Chaco, ciudad de origen de un estudiante de Geofísica, con el objetivo de localizar fuentes de agua a las que los pobladores puedan acceder en su cotidianeidad y especialmente en tales eventualidades.

El programa GWB es creado y financiado por la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG, https://seg.org/), una organización internacional sin fines de lucro, que promueve la geofísica de exploración. GWB (https://seg.org/About-SEG/Geoscientists-Without-Borders) financia hoy en día 45 proyectos en distintas áreas o categorías, que permitan la aplicación de conocimientos y herramientas geofísicas por parte de profesionales y estudiantes, en regiones donde puedan generar un cambio positivo a la comunidad.

Con este objetivo, el proyecto *"Groundwater resources for small rural and Aboriginal communities in Chaco province",* fue aprobado en la categoría Water Managment, siendo el primer proyecto de estas características en Argentina.

Los estudios en la zona comenzaron en el año 2014, con la evaluación de la situación hídrica y socio-económica de la región, habitada por familias rurales y comunidades Quom, Toba, y Wichí. También se realizó el análisis preliminar de muestras de agua de pozos de abastecimiento existentes, utilizada para consumo durante las épocas de sequía. Estos estudios dieron como resultado valores de arsénico y conductividad de las muestras de agua mayores a los recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

Con la información recopilada se determinaron los puntos de posible explotación y se evaluaron áreas de prioridad teniendo en cuenta las necesidades socio-económicas de los habitantes y los problemas hídricos de la zona en particular (Guarracino, 2017).

Mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografías de resistividad eléctrica (TER) se determinaron las extensiones laterales y verticales de los paleocauces.

El método de prospección eléctrico determina, mediante la inyección artificial de corriente eléctrica, el contraste en la resistividad y su distribución en el subsuelo. La resistividad es la inversa de la conductividad, por lo que representa el grado de oposición de un material al paso de corriente eléctrica. Es una propiedad que depende de la naturaleza del sedimento o roca, de su granulometría, porosidad, composición, así como también de la presencia o no de fluidos en sus poros o fisuras, y sus características como el grado de saturación, salinidad, etc.

Por lo general, la resistividad en sedimentos y rocas que no presentan agua es alta, siendo poco conductores, o semiconductores. Cuando estos sí presentan agua en sus poros o fisuras, la resistividad disminuye significativamente, puesto que el agua contiene cationes y aniones que facilitan la conducción de corriente eléctrica (Figura 5). Además, la circulación de corriente será mayor cuanto más elevada sea la salinidad del agua y/o mayor sea el grado de saturación del medio, y por lo tanto, menor aún la magnitud de resistividad obtenida (Auge, 2008).

En el área se realizaron estudios geoeléctricos, sondeos eléctricos verticales y tomografías de resistividad eléctrica, buscando generar un modelo del subsuelo y localizar paleocauces cercanos a comunidades y familias rurales que pudieran servir de fuente de abastecimiento de agua potable.

El sondeo eléctrico vertical (SEV) mide la variación vertical de la resistividad aparente en profundidad a un punto en la superficie, en una dimensión.

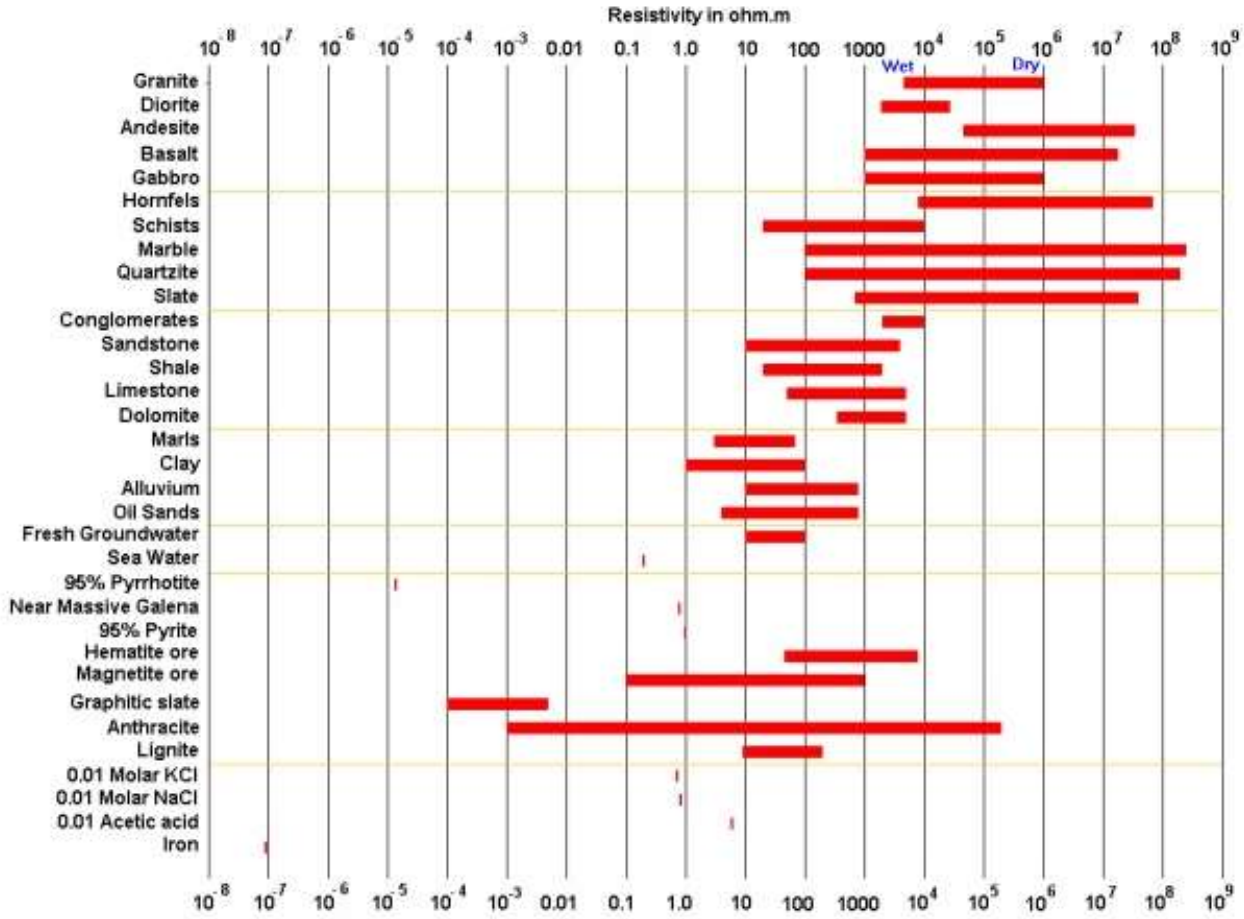


Figura 5: Resistividad de las rocas, sedimentos y minerales, en seco o con agua. Tomado de Loke, 2016.

La tomografía de resistividad eléctrica, en cambio, analiza los contrastes de resistividad del subsuelo en dos dimensiones, en la vertical y en la horizontal a un punto en la superficie, asumiendo que las estructuras se conservan en el área y no varían en la perpendicular a estas direcciones (Figura 6).

Se observó como resultado que el terreno se compone en su mayor parte de material fino, arcillas y limos, cuya resistividad es baja, en presencia de agua con elevada salinidad. Estos valores contrastan fuertemente con una resistividad mucho mayor correspondiente a material arenoso, con una morfología compatible a la de un paleocauce. El nivel freático se midió entre los 5 y los 12 metros en los distintos parajes (Amaya, 2018).

En base a los resultados obtenidos y su interpretación en los distintos perfiles analizados, se desarrollaron, en noviembre de 2017, diez perforaciones. En ocho de ellas pudieron instalarse bombas de tipo manual, ya que el área no cuenta con corriente eléctrica (Figura 7).

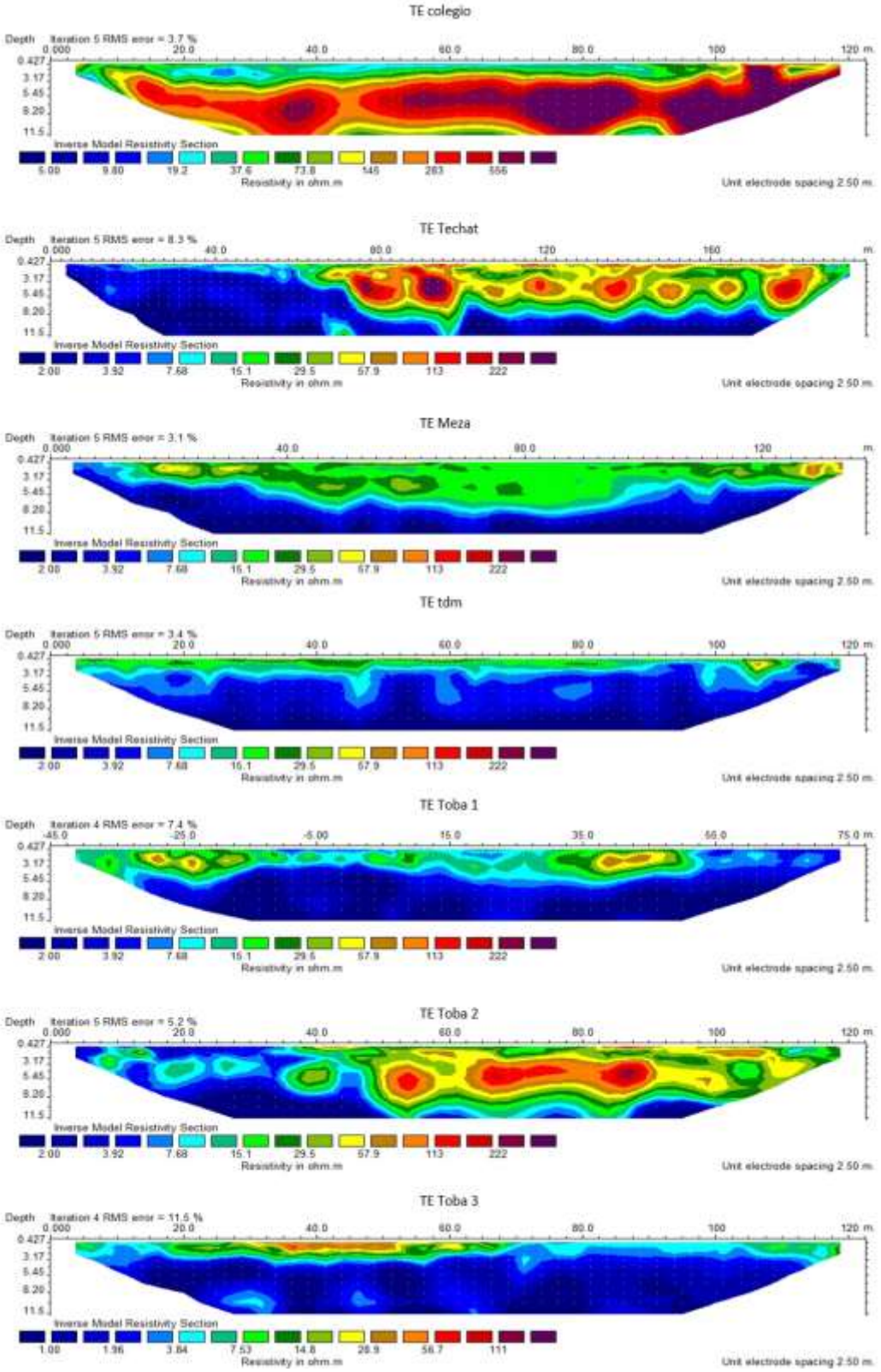


Figura 6: Tomografías realizadas: Modelos de resistividad eléctrica del subsuelo. Tomado de Amaya, 2018.

Figura 7: Ubicación de las 10 perforaciones realizadas durante la campaña 2017 del Proyecto.

1.3. Objetivos

Como resultado de los estudios de prospección realizados en la región de Miraflores en el marco del proyecto del Programa GWB, se construyeron pozos con bombas manuales, previos a la realización de este trabajo. La mayoría de los pozos se encuentran sobre paleocauces que se hallan a poca profundidad y teniendo en cuenta la dispersión de la población en pequeños grupos de familias en extensas áreas rurales, estos paleocauces constituyen la principal fuente de aguas subterránea en la región. En este contexto general, el objetivo del trabajo final de licenciatura (TFL) es la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas en la región de Miraflores a partir de la toma de muestras de los pozos mencionados y el análisis de los principales parámetros fisicoquímicos, tanto in situ como en laboratorio. Además, se analizará el rol de los sedimentos en la calidad del agua mediante el análisis granulométrico y mineralógico de muestras tomadas tanto en el paleocauce como en el loess circundante.

2. Marco Teórico

2.1. Geología, y geomorfología del área

La Provincia del Chaco forma parte del antepaís andino, dentro de la gran Llanura Chaco-Pampeana, provincia geológica extensa y de baja pendiente (Figura 8). Si bien se encuentra poco afectado tectónicamente por la orogenia andina, sufrió a lo largo de su compleja historia varios episodios de subsidencia y leves levantamientos tectónicos, generando distintos depocentros, como las cuencas del Salado, Colorado, Claromecó, y Chaco Paranense (en la cual se centra este estudio), sobre los cuales se acumularon grandes cantidades de sedimentos (Ramos, 1999).

El subsuelo de estas cuencas se reconstruye a partir del análisis de perforaciones y estudios geofísicos. La región presenta a grandes rasgos depósitos clásticos marinos del Cámbrico-Ordovícico cubiertos discordantemente por una secuencia silúrico-devónica, seguido por depósitos glaciarios del Carbónico superior (Ramos, 1999). Durante el Mesozoico medio, como consecuencia de un evento de vulcanismo extensional se depositan sedimentos eólicos y fluviales en la cuenca. Sobre ellos se acumulan sedimentos continentales subácueos Cenozoicos (Russo et al., 1979), cubiertos por la Formación Paraná, resultado de la ingresión marina del Mioceno Medio. A partir del Terciario Superior-Cuaternario se depositan los grandes mantos de loess y sedimentitas controladas por sistemas fluviales y aluviales que subyacen a la cubierta edafizada.

El loess es un sedimento limoso de origen eólico asociado a vulcanismo (Martínez y Osterrieth, 2013). Los suelos de la región, al derivar de estos mantos de loess, sufren generalmente limitaciones por salinidad, sodicidad y anegabilidad moderados. Esto también restringe la posibilidad de desarrollar vegetación, por lo que su exposición y riesgo de erosión es alto. La permeabilidad en ellos es moderada (PROSAP-UTF, 2015).

Según la clasificación de suelos Soil Taxonomy (2014), los suelos del área estudiada varían entre Natrustalf, Natracualf, Argiacuoles, y Haplustoles, en relieve normal a subnormal. Generalmente son ácidos en superficie, con las limitaciones previamente mencionadas. Estas limitaciones restringen su capacidad de uso, por los que se los clasifica mayormente como de clase IV y V, siendo aptos para cultivos limitados, y para forestación y pastoreo (INTA, 2007).

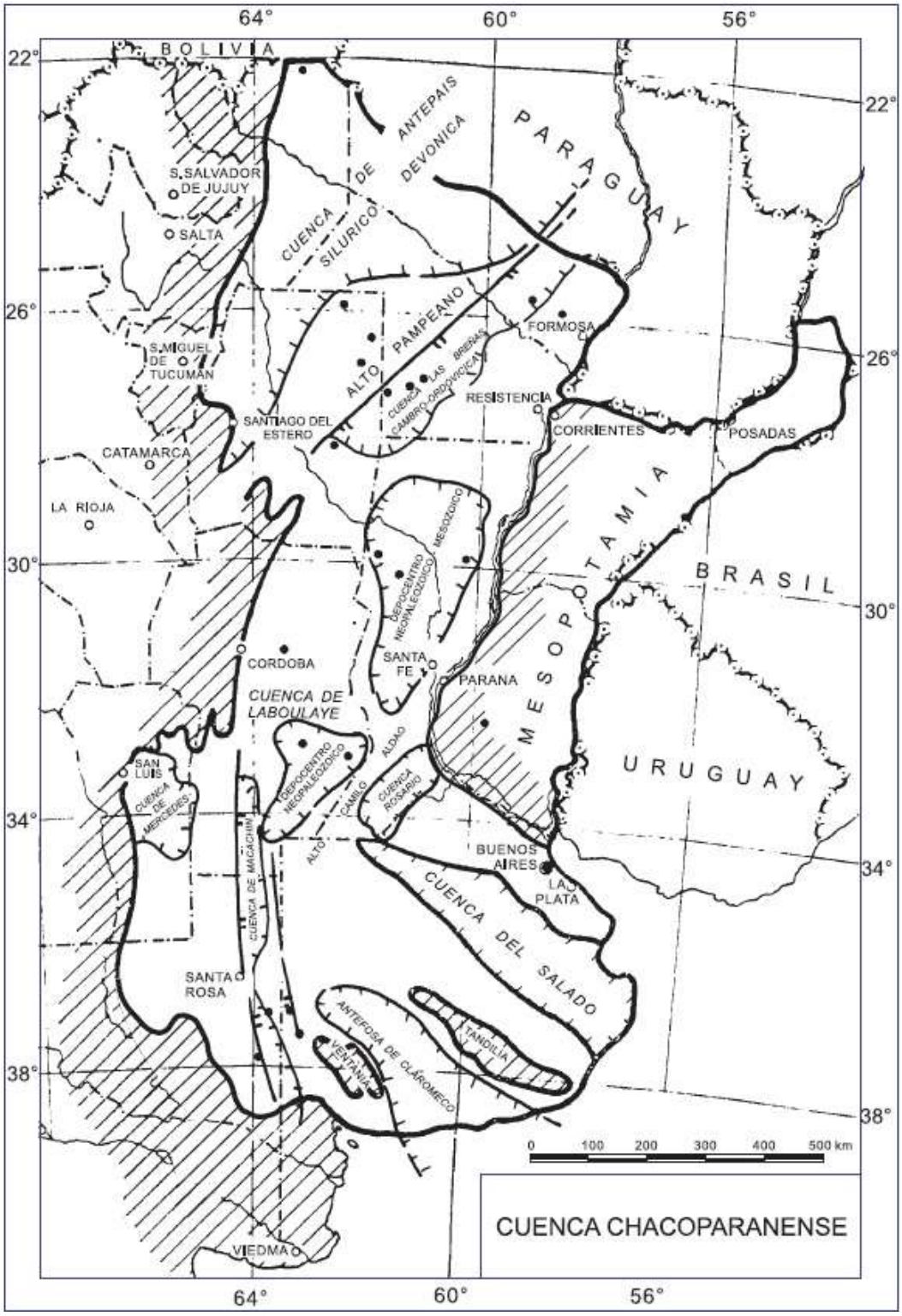


Figura 8: Mapa de la Llanura Chacopampeana, con detalle en los distintos depocentros. Tomado de Ramos, 1999.

2.2. Hidrogeología, contaminantes y problemática del agua

El área de estudio se ubica a una altura entre 115 y 130 msnm. El relieve es prácticamente llano, siguiendo una pendiente regional de NO a SE, con suaves desniveles que no modifican de manera significativa el sentido de escurrimiento a lo largo de la Provincia.

El clima en Chaco es Semitropical, con temperaturas medias anuales entre 18°C y 26°C. Las precipitaciones alcanzan un promedio máximo de 1300 mm al SE, que disminuye hacia el NO hasta alcanzar los 600 mm anuales. En particular, la localidad de Miraflores tiene un promedio de 667 mm anuales, calculado entre los años 1993 y 2010, concentrando los mayores volúmenes de caída de agua entre los meses de Septiembre y Abril (Administración Provincial del Agua, 2010). Por lo tanto, corresponde a un régimen de precipitaciones de tipo Atlántico.

La evapotranspiración es elevada, entre 700 y 1.000 mm, y en general, el déficit supera ampliamente, hasta el doble, a los excesos (Boujon et al., 2016). En base a esto, puede decirse que la región sufre de un marcado déficit hídrico.

Las lluvias son en general de tipo torrenciales, provocando, en sitios con baja, o directamente nula cobertura vegetal, una gran pérdida en la fertilidad del suelo, y procesos de erosión. Como resultado de estos procesos se observan suelos con un marcado grado de salinización e importantes inundaciones en épocas de lluvia.

Los Ríos Teuco y Bermejito, que encierran al Parque Nacional "El Impenetrable" son muy importantes tanto para la región de interfluvio como a gran escala. Sus aguas transportan un alto contenido de sedimentos, y variables niveles de salinidad, que aumentan hacia la desembocadura. En períodos de lluvia, la ineficiente infiltración propia del suelo arcillo-limoso, por su moderada permeabilidad, permite que se formen esteros y bañados (Figura 9).

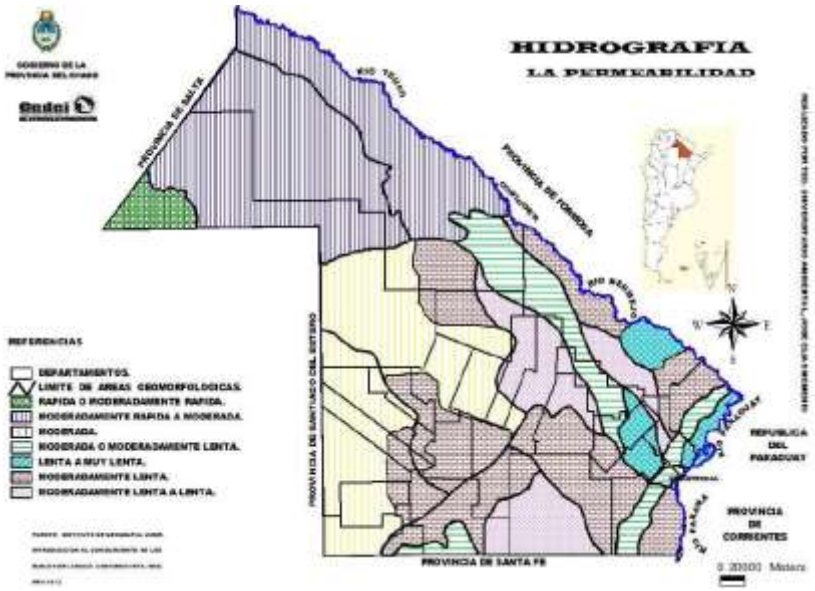


Figura 9: Mapa de Permeabilidad a gran escala de la Provincia de Chaco. Tomado de Memendi, 2011.

La zona estudiada forma parte de la Cuenca Negro-Salado (APA, 2010), y no cuenta con cursos superficiales permanentes (Figura 10). Esto sumado al régimen semiárido que lo caracteriza, limita las fuentes de agua a las que puede acceder la población a la colecta y reserva de agua de lluvia, perforaciones, pozos, represas naturales y artificiales (Blanes y Giménez, 2006).

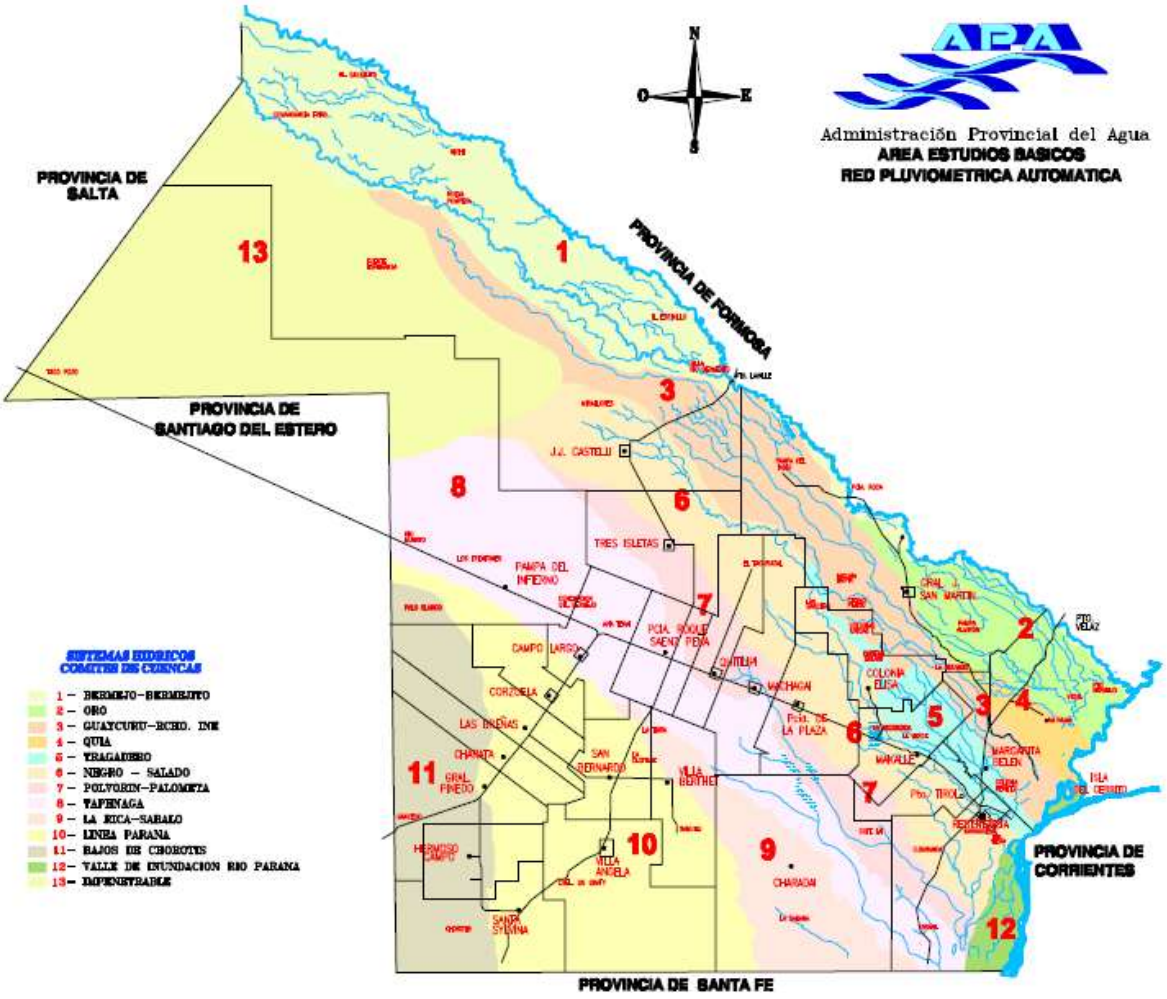


Figura 10: Mapa de Cuencas hídricas. Tomado del Anuario de Precipitaciones 1956-2010, APA.

Los pozos para extracción de agua se ubican en sitios donde, a profundidades accesibles, se encuentran cuerpos arenosos correspondientes a antiguos cursos de ríos, o paleocauces, de poco espesor y continuidad lateral. Por la disposición de sedimentos descripta anteriormente, estos cuerpos arenosos funcionan como los únicos acuíferos freáticos, que almacenan agua dulce. La recarga de estos es autóctona mediante infiltración vertical a través de los mantos de loess suprayacentes, y alóctona, de forma lateral desde el sector de piedemonte ubicado al Oeste, aguas arriba.

El desarrollo socio-económico de la llanura Chaco-Pampeana se encuentra limitado no sólo por la escasa disponibilidad de agua, sino también por la presencia de los

sedimentos limosos fácilmente erosionables que dificultan la infiltración del agua, y aportan altos niveles de salinidad y dureza. Estas particularidades determinan una baja calidad del agua para el consumo humano (Auge, 2004).

Tanto las aguas subterráneas como superficiales pueden presentar concentraciones anómalas de diferentes especies inorgánicas, elementos traza y material en suspensión que las transforman en aguas no aptas para consumo. La Organización mundial de la salud (OMS) estableció los límites máximos para especies inorgánicas como arsénico, fluoruro, nitratos y nitritos que, en cantidades anómalas se consideran tóxicos.

Uno de los elementos que puede encontrarse en el agua de esta región es el arsénico (As). La presencia de As (valor máximo tolerado en agua 0,01 mg/L o 10 µg/L), puede tener un origen natural o antropogénico y conduce a un número creciente de casos de Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (García, 2011). En nuestro país, el área afectada por esta problemática abarca gran parte de llanura Chaco-pampeana, aproximadamente unos 10^6 km^2 (Smedley and Kinninburgh, 2002). Es conocido que este elemento, caracterizado por su alta movilidad y capacidad de transformación, se asocia a sedimentos loéssicos con gran cantidad de ceniza volcánica depositados durante el Cuaternario. El As puede adsorberse y desorberse de partículas, cambiar de estado de oxidación al reaccionar con oxígeno u otras moléculas del aire, agua o suelo, así como por acción de microorganismos (Mandal and Suzuki, 2002; Smedley and Kinninburgh, 2002). Por lo tanto, la presencia de Arsénico puede ser el resultado de procesos de disolución de vidrio volcánico y/o hidrólisis y lixiviado de silicatos minerales del loess (Nicolli et al., 2010, 2012). Por otra parte, se ha encontrado una correlación positiva entre las concentraciones de As y fluoruro, que permiten inferir que la población también se encontraría expuesta a niveles anómalos de fluoruro (Osicka et al., 2002). En lo que respecta a la movilidad y transporte en el agua subterránea, queda condicionada a efectos de flujo y dilución, que dependerá del régimen hidrogeológico y paleohidrogeológico del acuífero. El tiempo de residencia en el agua es un factor crítico que afecta la concentración del oxoanión: a menor tiempo de residencia, mayor tasa de renovación, y por tanto mayor tasa de pérdida de arsénico por flujo.

En particular, en las aguas subterráneas de nuestro país prevalecen las condiciones oxidantes por lo que el arsénico se encuentra mayoritariamente disuelto en forma de especies de As (V) (Smedley and Kinniburgh, 2002; Fernández-Turiel et al., 2005; Bundschuh et al., 2012). Las aguas suelen tener alta salinidad y las concentraciones de As se correlacionan bien con la existencia de especies disueltas de B, F, V, Mo y Se. En este ambiente geoquímico, el Fe y el Mn tienden a formar especies minerales en forma de óxidos por lo que la concentración de estos elementos disueltos es baja (Smedley and Kinniburgh, 2002; Fernández-Turiel et al., 2005). El pH de las aguas es neutro o tiende a la alcalinidad predominando las especies $(H_2AsO_4)^-$ y $(HAsO_4)^{-2}$ (Fernández-Turiel et al., 2005).

En la Figura 11 pueden observarse los niveles de arsénico medidos en el agua subterránea en la Provincia de Chaco (Litter et al., 2019). En el área de estudio y sus

alrededores, los valores encontrados exceden ampliamente los máximos recomendados por la OMS y por la legislación nacional (CAA, Anexo 1).

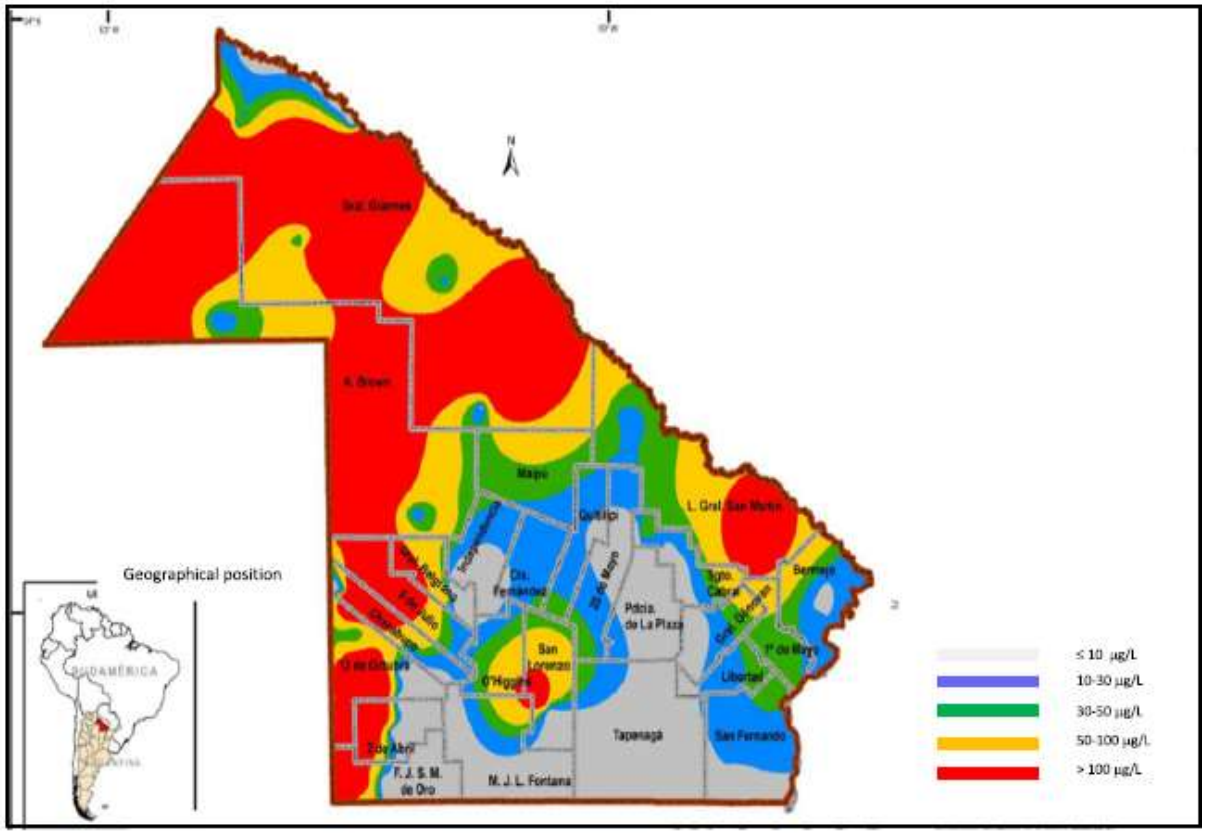


Figura 11: Mapa de niveles de As en los pozos de la provincia del Chaco, Administración Provincial del Agua, 2014. Tomado de Litter et al., 2019.

La presencia de otros contaminantes asociados al nitrógeno como el nitrato, el amonio y el nitrito son consecuencia del ciclo natural del nitrógeno. Sin embargo, un aumento en la concentración de nitratos puede ser atribuida más específicamente a causas antropogénicas como el uso de fertilizantes y/o a la presencia de pozos ciegos y excretas de animales por práctica ganadera y de granja, en especial en poblaciones precarias (Giuliano Albo y Blarasin, 2014). El amonio y el nitrito son en general trazas en aguas subterráneas, pudiendo ser elevada su concentración en medios reductores, al ser el producto final de la reducción de sustancias nitrogenadas. Estos dos compuestos son considerados como indicio de contaminación del agua de manera reciente. En el caso del amonio por crear un medio propicio para el aumento de la carga microbiana, y el nitrito por su inestabilidad y en particular por su gran toxicidad ante el consumo humano.

3. Materiales y Métodos

3.1. Muestreo

Durante las distintas campañas del proyecto, previas a la realización de este trabajo, se efectuaron determinaciones in situ de contenido de arsénico, conductividad, y temperatura en más de 60 pozos en distintos puntos de la región. Esto permitió realizar una caracterización general de la zona y definir la ubicación de los pozos con bomba manual construidos en 2017 (Tabla 1).

Tabla 1: Detalle de los pozos de explotación realizados y ubicación.

	POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 0	POZO 5	POZO 6	POZO 7	POZO 8
Paraje	Paraje Costa Rica		El Zanjón			Miraflores	Techat		San Lorenzo
Nombre	Flia. Quiroga	Escuela 903	Comunidad Toba	Colegio 1054	Molino	Flia Gomez	Comunidad Wichi	Escuela n°1074	Escuela n°186
Latitud	-25.59529	-25.595468	-25.706510	-25.701786	-25.708080	-25.695011	-25.542298	-25.551582	-25.683383
Longitud	-60.69878	-60.692501	-60.724474	-60.724627	-60.724683	-61.089335	-60.893370	-60.893349	-60.880617

En mayo de 2018, en el marco de la realización de este Trabajo Final de Licenciatura, se realizó una campaña para tomar muestras de agua de las 8 perforaciones realizadas por el proyecto y analizar su calidad, tanto en campo como en laboratorio. Por problemas funcionales de las bombas manuales instaladas (Figura 12), sólo se pudieron tomar muestras de cinco de ellos.

Figura 12: Bomba de extracción manual, Pozo 5.

En la Tabla 1 se encuentran resaltados los pozos de los que finalmente se obtuvieron las distintas muestras para analizar en este trabajo. Adicionalmente, se agrega a estos datos, las muestras de agua extraídas de un molino cercano a los pozos del Paraje de Toro, de la comunidad Toba, construido por el municipio durante el período transcurrido entre las campañas. Dicha muestra se encuentra identificada como Pozo 0 en la Tabla 1.

En la Figura 13 se muestra la localización de los pozos que fueron muestreados para la realización de este trabajo. El Pozo 1 se ubica en el Paraje Costa Rica, en las cercanías a la vivienda de la Familia Quiroga. El Pozo denominado 0 corresponde a la muestra tomada del molino, como representante de la calidad de agua en el paraje el Zanjón. El Pozo 5 se ubica en la ciudad de Miraflores en el terreno de la Familia Gómez. Los Pozos 6 y 7, ambos construidos dentro de paraje Techat, se encuentran próximos a las viviendas de la comunidad Wichí y la escuela N°1074 respectivamente. Por último, el Pozo 8 corresponde a la escuela N° 186, en el paraje San Lorenzo.

Figura 13: Mapa de la ubicación de los pozos donde se tomaron muestras de agua subterránea.

3.2. Mediciones en campo

Las muestras de agua fueron tomadas en recipientes de plástico de 1 lt debidamente rotulados, posterior a la purga de cada pozo. Se conservaron cuidadosamente en heladeras portátiles con hielo debido a la falta de corriente eléctrica, hasta su análisis en el laboratorio.

Se midieron In Situ varios parámetros fisicoquímicos con equipos portátiles provistos por el INREMI (Instituto de Recursos Minerales, FCNyM): turbidez, pH, conductividad, temperatura y contenido de arsénico.

La turbidez se determinó por el método nefelométrico mediante el empleo de un turbidímetro *Hanna HI 93703*. Las medidas se expresan en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). La calibración del equipo se realizó con patrones de turbidez conocida (0, 10 y 500 NTU). Para la realización de la medida se carga el volumen indicado en la celda, se tapa y se mide inmediatamente para evitar la decantación de la muestra (Figura 14).

Figura 14: Medición de turbidez in situ de muestra de agua.

Los valores de pH y de temperatura se midieron con un medidor de pH y termómetro portátil *Trans Instruments Senz Ph Duo*. Para su calibración se empleó una solución patrón de pH 7.

La conductividad se registró con un equipo portátil *TDS Meter 3*, que determina la cantidad de sólidos disueltos totales en agua medidos en ppm, posteriormente convertidos a μMhos/cm. Este equipo tiene una resolución de 1 ppm y un rango TDS de 0 a 9990 ppm.

Finalmente, el contenido de arsénico se determinó mediante el uso del kit *Test de Arsénico 1.17927.0001-Merckoquant* (Figura 15). Este kit determina el nivel de arsénico en una muestra mediante la coloración por formación de halogenuros mixtos de arsénico y mercurio sobre la tira analítica. La medición es semicuantitativa pues se compara visualmente el color observado en la tira de prueba con la escala incluida en el kit (Figura 16). El test determina arsénico trivalente y pentavalente. Puede emplearse para aguas potables y minerales, agua de pozo, aguas subterráneas y superficiales. De esta manera se obtiene un valor estimado o un intervalo de contenido de arsénico total en la muestra en mg/l.

Figura 15: Kit de Arsénico 1.17927.0001-Merckoquant.

Figura 16: Escala colorimétrica del Test 1.17927.0001-Merckoquant.

3.3. Determinaciones fisicoquímicas en muestras de agua

El total de 6 muestras fueron enviadas al laboratorio de análisis químicos C&D. Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos que se muestran en la Tabla 2, necesarios para determinar la calidad de agua en cada uno de los puntos. Estos valores y los datos obtenidos en el campo fueron comparados con los máximos permitidos por la normativa del Código Alimentario Argentino (CAA, 2019) de agua apta para consumo (Anexo 1), para evaluar la calidad del agua los pozos analizados.

Tabla 2: Parámetros fisicoquímicos analizados, unidades de expresión, y límites de detección según los métodos utilizados en el laboratorio.

PARÁMETROS	UNIDAD	LIMITE DETECCIÓN	MÉTODO
pH	U de pH	0 - 14	SM M 4500 H+ B Potenciometrico
Conductividad	µmhos/cm	1	SM M 2510 B - Conductimetrico
Turbiedad	NTU	3	SM M 2130 B - Turbidimetria
Color	U de Color Co -Pt	3	SM M 2120 C - Espectrofotometria UV-Vis
Olor	-	-	SM M 2150 B - Organoleptico
Aspecto	-	-	SM M 2110 - Organoleptico
Dureza	mg de CaCO3/L	1	SM M 2340 C - Titulometrico EDTA
Alcalinidad Total	mg de CaCO3/L	1	SM M 2320 B - Titulometrico
Calcio	mg/L	1	SM M 3500 Ca -D - Titulometrico
Magnesio	mg/L	1	SM M 3500-Mg -D Titulometrico
Sodio	mg/L	1	SM M 3500 Na D Fotometria de llama
Potasio	mg/L	1	SM M 3500 K D Fotometria de llama
Carbonatos	mg/L	1	SM M 2310 B - Titulometrico
Bicarbonatos	mg/L	1	SM M 2310 B - Titulometrico
Cloruros	mg/L	1	SM M 4500 Cl- B Titulometrico
Sulfatos	mg/L	1	SM M 4500 SO4-E Turbidimetrico
Nitratos	mg/L	0,5	SM M 4500 NO3- -E Espectrofotometria UV Vis
Nitritos	mg/L	0,005	SM M 4500 NO2- -B Espectrofotometria UV Vis
Fluoruros	mg/L	0,03	SM M 4500 F- D Espectrofotometria UV Vis
Arsénico	mg/L	0,003	EPA SW 846 M 7061 - EAA
Amonio	mg/L	0,1	SM M 4500 NH3 C Espectrofotometria Uv-Vis

3.4. Determinaciones en sólidos

Se recolectaron muestras representativas del material de uno de los paleocauces, denominada M1, en las cercanías al Pozo 0 (molino) en el paraje El Zanjón (-25,701786; -60724627), y de sedimentos superficiales, denominada M2, en las cercanías al Pozo 5, en el Paraje Miraflores (-25,695011; -61,089335).

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio del Instituto de Geomorfología y Suelos (IGS), donde se realizó la determinación textural de las muestras por el método Bouyoucos.

Los resultados granulométricos de las muestras del paleocauce y suelo permiten generar curvas granulométricas correspondientes a cada una de ellas. A partir de estos se podrá estimar mediante distintos métodos analíticos la porosidad y la conductividad hidráulica del acuífero y del sedimento circundante.

La porosidad es el porcentaje del volumen de espacios vacíos en un volumen total. Puede calcularse analíticamente mediante varios métodos, en este trabajo se estimará a partir de la fórmula de Wu y Wang (2006), tomando como parámetro representativo el tamaño medio de grano de la muestra (d50).

La fórmula de porosidad de Wu y Wang tiene la siguiente expresión:

$$n = 0{,}13 + \frac{0{,}21}{(d_{50} + 0{,}002)^{0{,}21}} \quad (1)$$

donde d_{50} debe expresarse en mm.

La conductividad hidráulica describe la facilidad con la que un fluido se mueve a través de un medio poroso. La ley de Darcy establece que la velocidad del fluido es igual al gradiente hidráulico multiplicado por la conductividad hidráulica. Para el cálculo de éste parámetro de forma empírica se asume como despreciable el efecto de los parámetros del agua subterránea y lo correlaciona únicamente con las propiedades del sedimento, tomando como base el estudio granulométrico del mismo y su porosidad. Existen numerosas aproximaciones dependiendo los parámetros del sedimento analizado. En este trabajo se utilizará la Fórmula de Terzaghi (Odong, 2008).

La fórmula de Terzaghi que permite calcular la conductividad hidráulica (Ks) tiene la siguiente expresión:

$$K_s[m/d] = \left(\frac{g}{v}\right) \times C_t \times \left(\frac{n-0{,}13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2 \times {d_{10}}^2 \quad (2)$$

siendo g la aceleración gravitatoria, v la viscosidad del agua, C_t el coeficiente empírico de Hazen, n la porosidad del sedimento, y d_{10} el diámetro efectivo del grano que permite un pasaje del 10% del total de la muestra por el tamiz expresado en metros.

Se considera para su cálculo una temperatura del agua de 20°C, por lo que la viscosidad cinemática toma un valor de 0,0874 m^2/d. La aceleración gravitatoria toma un valor de 9,8 m/s^2, y para el Coeficiente de clasificación de Hazen se utilizó un promedio de 8,4 x 10^{-3}.

Posteriormente fue analizada la mineralogía de los sólidos mediante difracción por rayos X (DRX) y por microscopía SEM-EDS. Los diagramas de difracción de Rayos X (DRX) fueron registrados en un difractómetro Rigaku Miniflex digitalizado (CEQUINOR-CONICET, FCE, UNLP); usando radiación Cu Kα (λ= 1,54056 Å) y filtro de Ni. Se determinaron los espectros bajo las siguientes condiciones operativas: voltaje 30 kV; corriente 10 mA; rango de barrido de 0º a 160º, velocidad de barrido 0,5-2º/minuto y rango de escala 100 a 8000 cps. Para determinar los diagramas DRX de las muestras sólidas, las muestras extraídas en el campo fueron secadas en estufa a 60 °C y se molieron aproximadamente 50 mg de muestra en un mortero de ágata hasta reducir el tamaño de partícula (~ 4 μm).

Las determinaciones SEM-EDS se realizaron en el Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA, FCE UNLP, CONICET-La Plata). El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de barrido Phillips modelo SEM 505 que tiene adicionado un sistema de microanálisis de rayos X, dispersivo en energía EDS (EDAX 9100), que procesa los espectros realizando un análisis semicuantitativo

de la superficie observada en el microscopio. Los resultados del análisis químico son expresados como % de óxidos (Figura 17).

Figura 17: Microscopio electrónico de barrido Phillips modelo SEM 505.

Las determinaciones SEM-EDS se realizaron empleando los sólidos originales obtenidos en el campo y sobre distintas fracciones separadas usando un tamiz ASTM N°270 (de 53 micrones). Para esta separación se usó el esquema de clasificación según el diámetro de las partículas propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2017). Según el esquema que se muestra en la Figura 18, las partículas se clasifican en:

Grava: mayor a 2 mm
Arenas: 2 mm - 0.05 mm
Limo: 0.05 mm - 0.002 mm
Arcilla: menor a 0.002 mm

	FINE EARTH										ROCK FRAGMENTS					
											channers			flags	stones	boulders
USDA	Clay		Silt		Sand						Gravel			Cobbles	Stones	Boulders
	fine	co.	fine	co.	v.fi.	fi.	med.	co.	v. co.		fine	medium	coarse			
millimeters:	0.0002	.002 mm		.02	.05	.1	.25	.5	1	2 mm	5	20	76	250 mm		600 mm
U.S. Standard Sieve No. *(opening)*:					300	140	60	35	18	10	4	*(3/4")*	*(3")*	*(10")*		*(25")*

Figura 18: Esquema de clasificación de partículas según su diámetro (USDA, 2017).

Según esta clasificación, empleando el tamiz N°270 se obtienen dos fracciones: una fracción gruesa o arenosa y una fracción fina o limo-arcillosa.

4. Resultados

4.1. Resultados en muestras de agua

Las primeras determinaciones in situ en los pozos censados durante la campaña 2015, previas a este trabajo, arrojaron valores de arsénico (Figura 19) y conductividad (Figura 20) de las aguas muy variados.

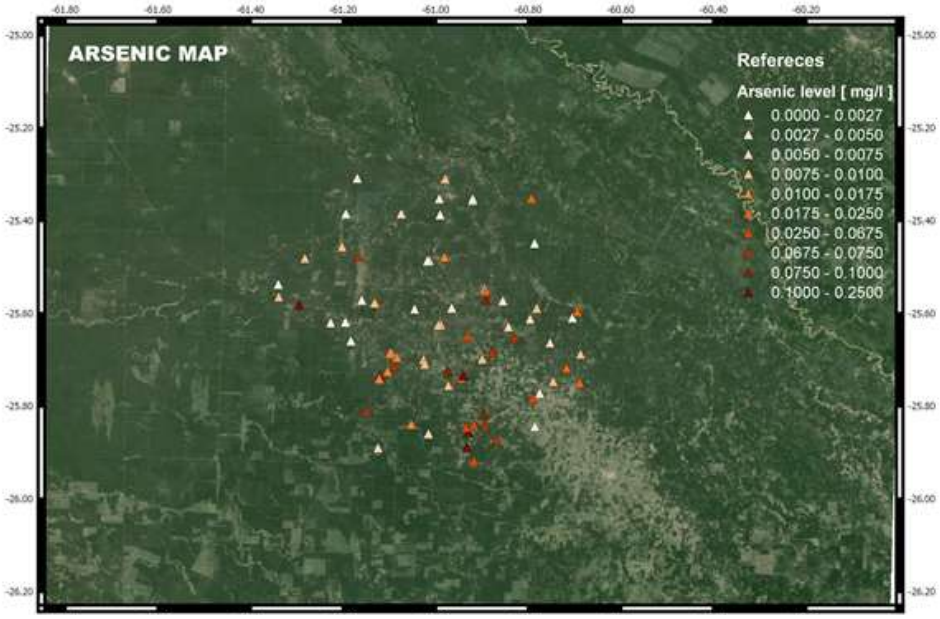


Figura 19: Mapa de niveles de Arsénico en pozos censados, campaña 2015. Extraído de Guarracino, 2017

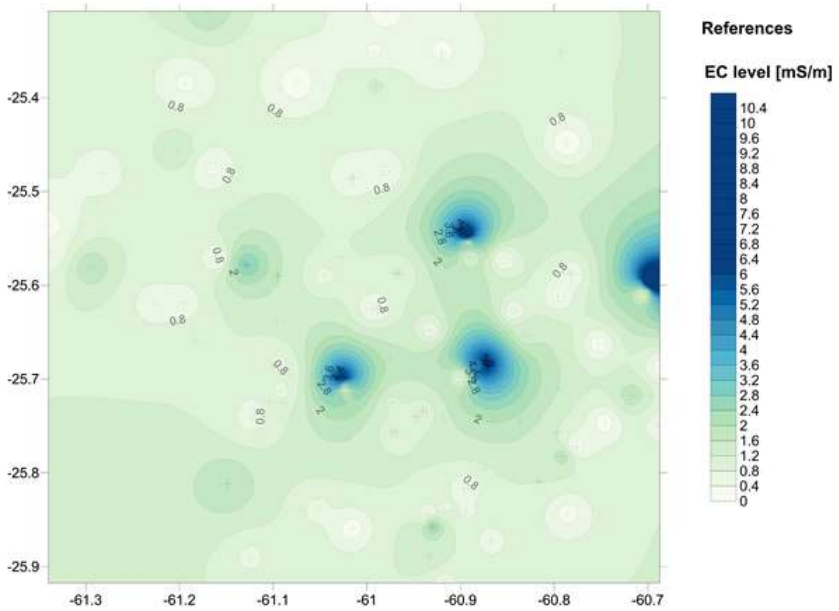


Figura 20: Mapa de Conductividades medidas en agua de pozos censados, campaña 2015. Extraído de Guarracino, 2017.

Puede observarse, que el conjunto de pozos ubicados al sur en la Figura 19, correspondiente al área de Miraflores, supera ampliamente el valor máximo de 0,01mg/l de arsénico, recomendado por la Organización Mundial de la Salud. Además, el mismo conjunto de pozos presenta una elevada conductividad, que evidencia la presencia de gran cantidad de sólidos disueltos.

Durante la campaña 2018, realizada en el marco de este trabajo, las mediciones in situ de los pozos muestreados arrojaron, en general, valores normales de pH y de arsénico por debajo del máximo permitido. Sin embargo, la mayoría de ellas presentó una elevada turbidez, color amarillento y mucho residuo sólido. En particular, el valor de conductividad y turbidez fue máximo en las muestras colectadas en el Pozo 5 y el Pozo 8, asociados a un alto grado de salinidad (Tabla 3).

Tabla 3: Resultados de los parámetros medidos in situ. Campaña 2018.

	POZO 1	POZO 0	POZO 5	POZO 6	POZO 7	POZO 8
Paraje	Paraje Costa Rica	El Zanjón	Miraflores	Techat		San Lorenzo
Nombre	Flia. Quiroga	Molino	Flia Gomez	Comunidad Wichi	Escuela n°1074	Escuela n°186
Latitud	-25.595287	-25.708080	-25.695011	-25.542298	-25.551582	-25.683383
Longitud	-60.69878	-60.724683	-61.089335	-60.893370	-60.893349	-60.880617
As	<0,01	~0,025	0,025< x <0.05	0,01< x <0,025	~0,01	<0,01
Turbidez (NTU)	27.58	6.76	215.4	72.59	89.96	200.7
PH	7.5	7.9	7.4	7.6	7.4	7.4
Conductividad (µmhos/cm)	621	576	fuera de escala	255	275	fuera de escala
Temperatura (°C)	27	25	30	23	22	26

En la Tabla 4 se pueden observar detalladamente los resultados del análisis fisicoquímico completo, aportados por el laboratorio C&D. No fue posible realizar un análisis bacteriológico de las mismas debido a la falta de corriente eléctrica para su adecuada preservación y un tiempo de traslado al laboratorio mayor al determinado por los protocolos.

Bajo un análisis más exhaustivo de los distintos parámetros fisicoquímicos en el laboratorio, se encontró que las muestras tomadas no tenían valores de arsénico que excedieran los máximos permitidos, a excepción del Pozo 5 y Pozo 0. Sin embargo sí superaban ampliamente los valores recomendados de varios parámetros como fluoruros, nitritos, amonio, cloruros, y sulfatos, cuyo consumo en altas concentraciones resulta perjudicial para la salud.

Tabla 4: Resultados de parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio. Resaltados se encuentran los valores que exceden los recomendados por la OMS.

	UNIDAD	POZO 1	POZO 0	POZO 5	POZO 6	POZO 7	POZO 8
Paraje		Costa Rica	El Zanjón	Miraflores	Techat		San Lorenzo
Nombre		Flia. Quiroga	Molino	Flia Gomez	Comunidad Wichi	Escuela n°1074	Escuela n°186
Latitud		-25.595287	-25.708080	-25.695011	-25.542298	-25.551582	-25.683383
Longitud		-60.69878	-60.724683	-61.089335	-60.893370	-60.893349	-60.880617
PH	U de pH	7.1	7.9	7.5	7.2	7	7.3
Conductividad	µmhos/cm	686	640	52490	245	295	16750
Turbiedad	NTU	2	2	2	13	15	10
Color	U de Color Co -Pt	5	<3	5	30	34	21
Olor	-	inodoro	inodoro	inodoro	inodoro	oleoso	inodoro
Aspecto	-	limpido, amarillento c/sedim pardo	limpido	limpido, amarillento c/sedim pardo	turbio, pardo amarillento c/sedim	turbio, pardo amarillo c/ sedim y pelic oleosa	turbio, pardo amarillo c/ sedim pardo naranja
Dureza	mg de CaCO3/L	397	228	5994	103	112	1191
Alcalinidad total	mg de CaCO3/L	383	342	551	100	123	580
Calcio	mg/L	52	84	579	31	30	202
Magnesio	mg/L	64	4	1091	6	9	164
Sodio	mg/L	9	65	13526	6	4	3923
Potasio	mg/L	2	4	45	13	13	16
Carbonatos	mg/L	-	-	-	-	-	-
Bicarbonatos	mg/L	467	418	672	122	150	708
Cloruros	mg/L	9	17	12651	9	9	2334
Sulfatos	mg/L	2	10	15994	9	5	4855
Nitratos	mg/L	1.5	1.1	7.3	5.2	2.2	5.6
Nitritos	mg/L	4.52	<0,005	0.009	2.18	<0,005	3.16
Fluoruros	mg/L	0.17	0.33	3.28	0.27	0.18	2.4
Arsénico	mg/L	0.002	0.015	0.04	0.006	0.003	0.002
Amonio	mg/L	0.4	<0,1	<0,1	0.4	4	2.4

Además, la mayoría de las muestras exceden el rango de valores permitidos para una calidad de agua aceptable para el consumo humano en color, turbidez, dureza y la cantidad de residuos sólidos.

La muestra de agua extraída del Pozo 1, correspondiente al Paraje Costa Rica, ubicado cerca de la Familia Quiroga, presenta niveles aceptables de todos los parámetros analizados, a excepción de los nitritos y amonio.

La muestra del Pozo 0, del molino, sólo supera mínimamente el valor máximo permitido de arsénico, contemplado en la modificación del artículo n°982 del CAA (Anexo 1).

El Pozo 5 en el terreno de la Familia Quiroga excede ampliamente los valores recomendados de arsénico, cloruros, sulfatos y fluoruros, además de presentar una gran conductividad y elevada dureza.

Los Pozos 6 y 7 arrojaron resultados similares, siendo las muestras de agua bastante turbias, de color amarillento, con cantidades peligrosas de fluoruros, y amonio. El Pozo 6 además contiene gran cantidad de nitritos.

Finalmente, las muestras de agua del Pozo 8 de la escuela n°186, en el Paraje San Lorenzo, supera los máximos permitidos de dureza, cloruros, sulfatos, nitritos, fluoruros, y amonio.

En la Figura 21 se analizan los parámetros más relevantes comparando los valores resultantes de cada pozo, con el valor máximo indicado por el CAA, representado en los gráficos por la recta de color rojo.

Se puede advertir entonces, que los Pozos 5 y 8 contienen agua con grandes cantidades de cloruros, sulfatos, y fluoruros. Los Pozos 1, 6, y 8 superan ampliamente los niveles máximos permitidos de nitritos, mientras que los de arsénico sólo se superan en los Pozos 0 y 5.

Con las medidas tomadas de determinados cationes y aniones, se evaluó el tipo de agua subterránea de cada pozo para clasificarlos químicamente. Para esto se introdujo la composición de cada muestra en el diagrama de PIPER, en donde se aplica la clasificación de Langelier & Ludwig (1942).

En la Figura 22 se grafican los contenidos porcentuales de magnesio, calcio y sodio más potasio por un lado, y de sulfatos, bicarbonatos y cloruros por otro. Al unir estos datos, se obtiene que los Pozos 1, 0, 6, y 7 contienen agua de tipo bicarbonatada cálcica, mientras que la extraída de los Pozos 5 y 8 es de tipo sulfatada sódica. La salinidad es mayor en los pozos al suroeste de la zona estudiada.

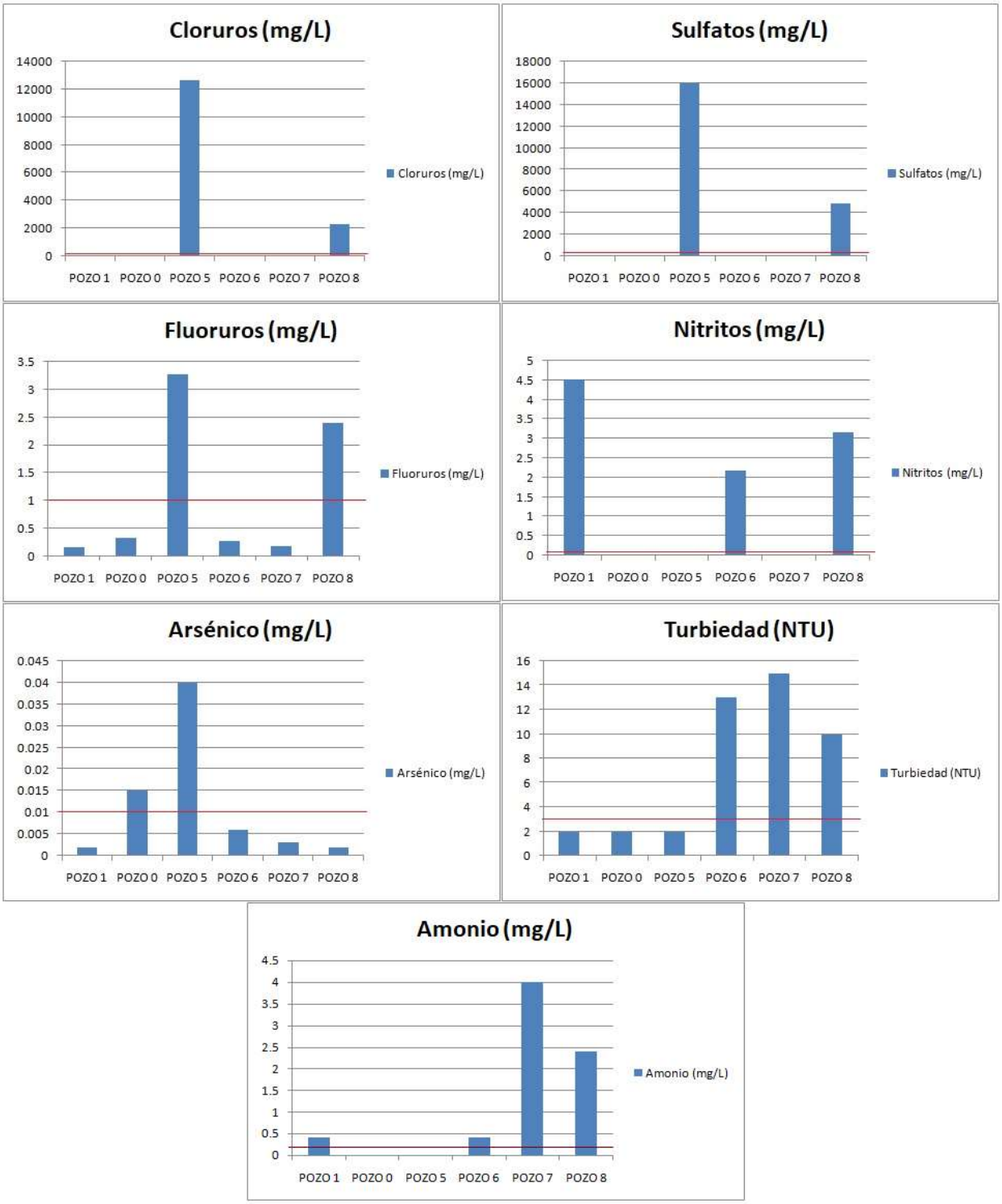


Figura 21: Diagramas comparativos de las concentraciones en agua de distintos parámetros en cada uno de los pozos.

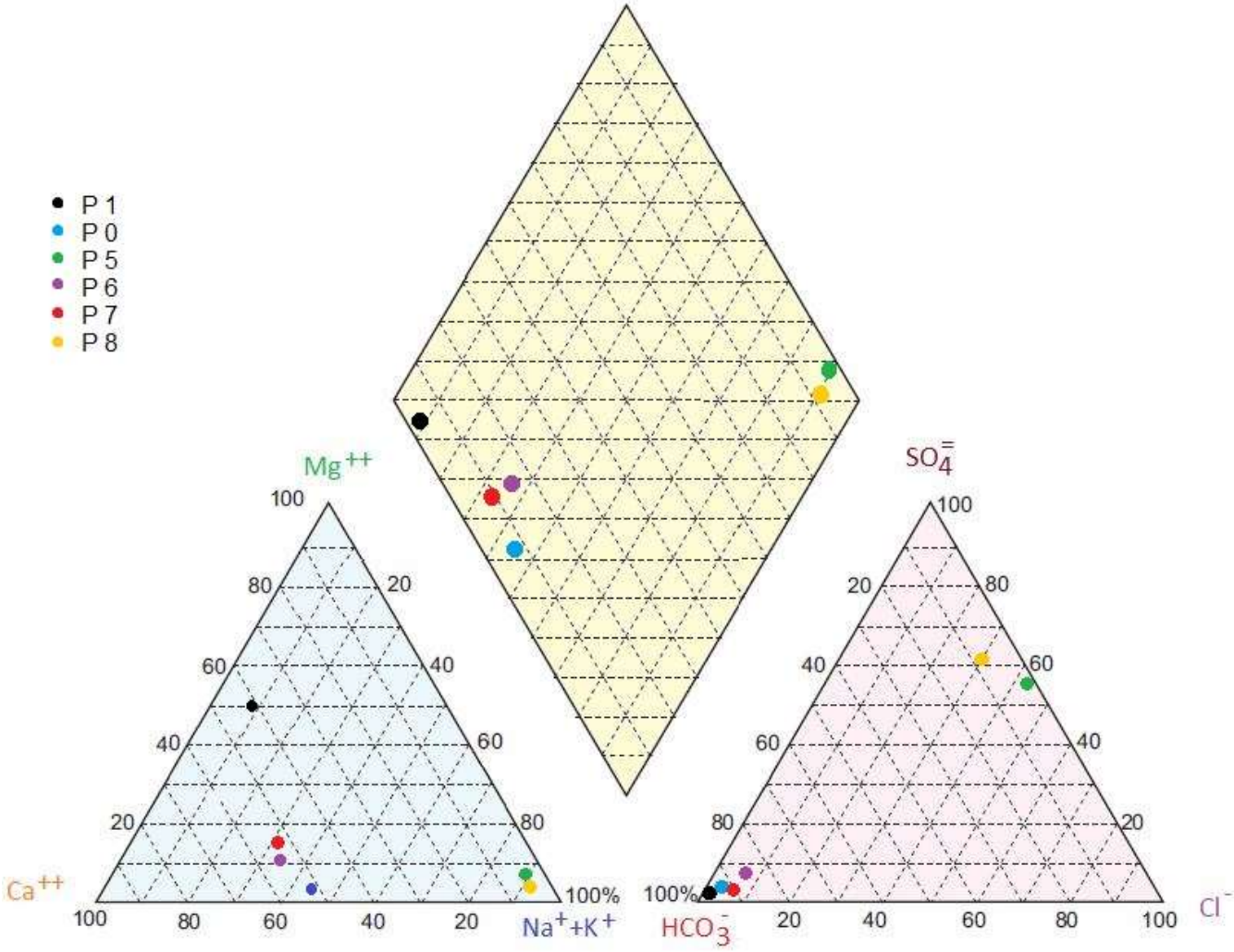


Figura 22: Diagrama de Piper-Hill-Langellier para las muestras de agua de cada uno de los pozos.

4.2. Resultados en muestras de sedimentos

4.2.1. Caracterización textural

Se aplica el método de Bouyoucos (Tabla 5) a las muestras recolectadas, lo que permitió la caracterización de los sedimentos. A la muestra denominada **M1**, se la identificó entonces en base a la proporción de las diferentes texturas o tamaño de partícula como una Arena (88,4% arena, 3,87% limo y 7,73% arcilla), según la clasificación USDA (Figura 23) o una arena arcillosa según la clasificación de Folk. La muestra superficial, denominada **M2** en cambio, resultó franco arcillo arenosa (USDA), o arena fangosa (FOLK).

Tabla 5: Resultados del análisis de sedimentos por el método de Bouyoucos de las muestras.

Muestra	Textura	Valor Phi	Diametro (µm)	Peso (gr)	% total en muestra	Clasificación Textural	
						USDA	FOLK
1	Arena	0	1,000	0.02	88.4	ARENA	ARENA ARCILLOSA
		1	500	0.05			
		2	250	0.72			
		3	125	27.16			
		4	63	17.76			
	Limo	5	31	1.00	3.87		
		6	15.6	0.50			
		7	7.8	0.50			
		8	3.9	0.00			
	Arcilla	9	2.0	0.50	7.73		
		10	menor a 2.0	3.50			
		Total		51.71	100		
2	Arena	0	1,000	0.04	52.16	FRANCO ARCILLO ARENOSA	ARENA FANGOSA
		1	500	0.19			
		2	250	1.20			
		3	125	11.54			
		4	63	9.38			
	Limo	5	31	1.50	17.5		
		6	15.6	1.00			
		7	7.8	2.50			
		8	3.9	2.50			
	Arcilla	9	2.0	1.00	30.34		
		10	menor a 2.0	12.00			
		Total		42.85	100		

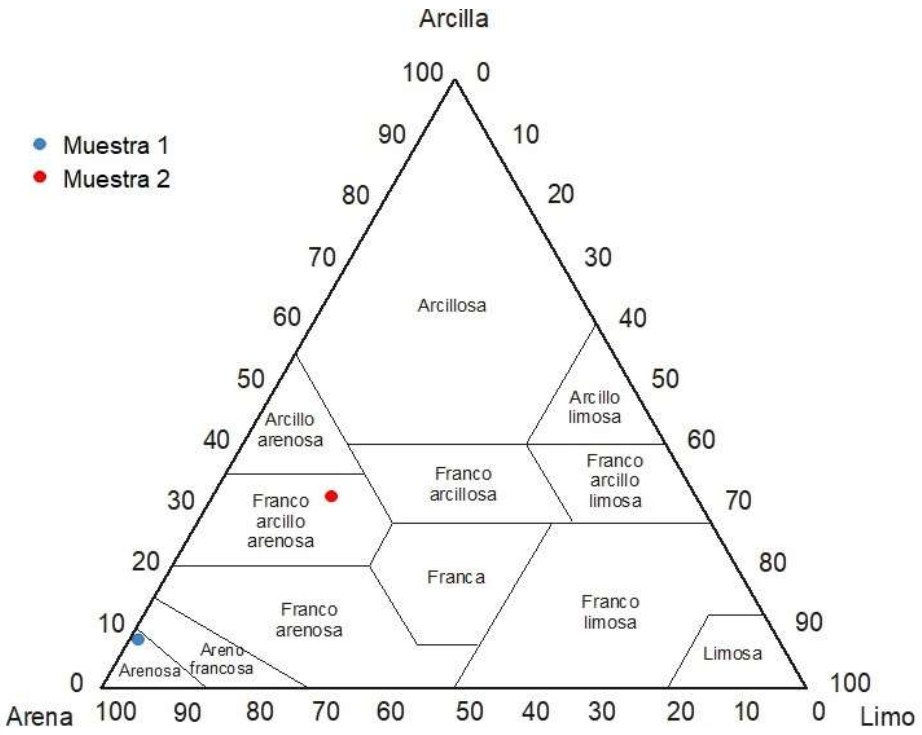


Figura 23: Textura resultante de las muestras de sedimentos según el triángulo de clasificación USDA de suelos y sedimentos.

La curva granulométrica generada a partir de los datos cuantitativos de las diferentes texturas para la muestra del paleocauce (M1) es la que puede observarse en la Figura 24, mientras que la correspondiente a la muestra superficial de suelo (M2) se observa en la Figura 25. Las curvas muestran el porcentaje de la muestra que pasa por un determinado tamiz en función del tamaño del grano.

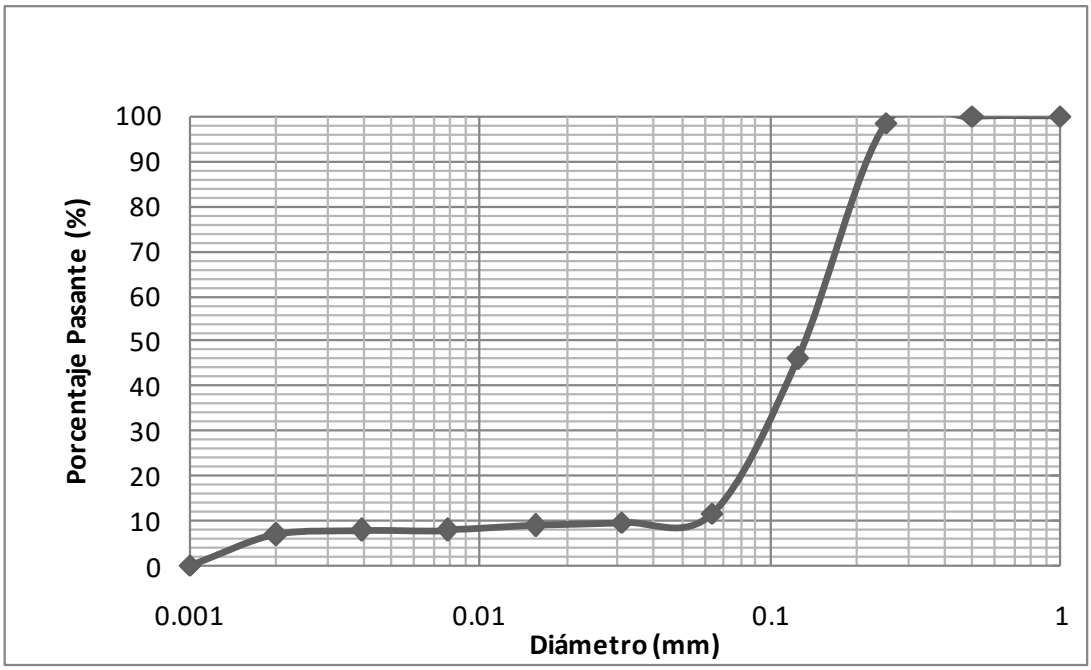


Figura 24: Curva granulométrica de la muestra M1, tomada del paleocauce.

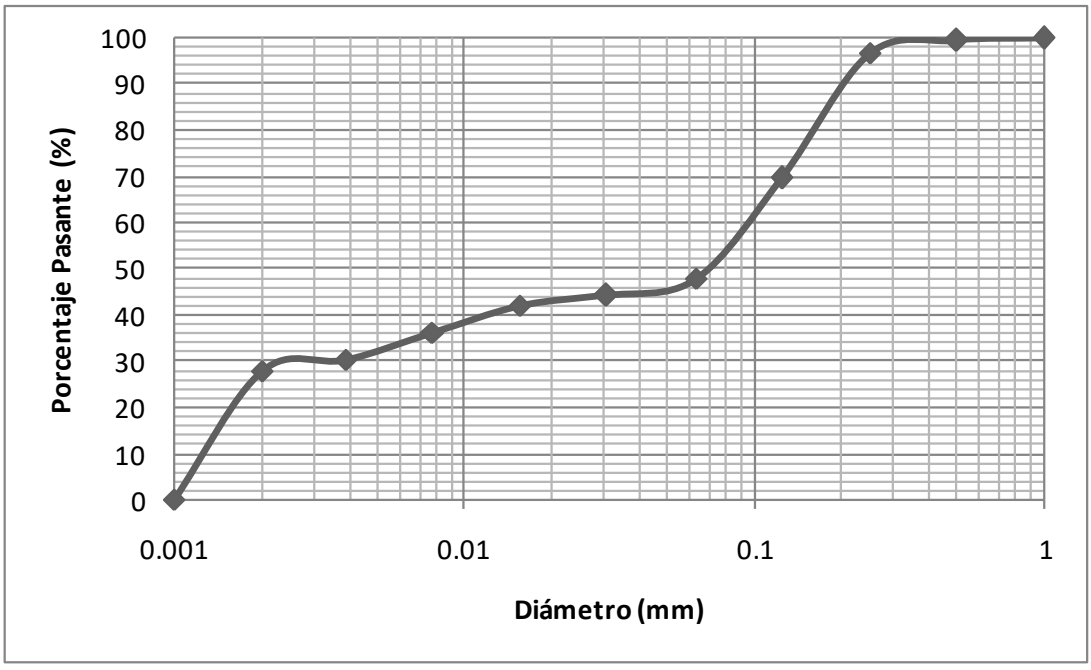


Figura 25: Curva granulométrica de la muestra M2, de suelo superficial.

4.2.2. Cálculo de Porosidad y Conductividad hidráulica

En esta sección se estimarán las porosidades y conductividades hidráulicas de las texturas correspondientes al paleocauce y sedimento circundante utilizando los datos de granulometría calculados.

En base al valor medio de grano (d_{50}) determinados para ambas muestras, que también pueden observarse en las curvas granulométricas expuestas anteriormente (Figuras 24 y 25), se estimaron los valores de porosidad mediante la fórmula de Wu y Wang (Ecuación 1).

Para la muestra M1 (perteneciente al paleocauce) el d50 es igual a 0,139 mm, por lo que se obtiene un valor de porosidad n de 0,447. Para M2 (muestra de suelo superficial) se determinó un d_{50} igual a 0,07 mm, por lo que n resulta igual a 0,49 (Tabla 6).

Luego, para la muestra de arena se obtiene una porosidad del 45%, mientras que para la muestra franco arcillo arenosa es de 49%.

Es importante remarcar que si bien la muestra de sedimentos más finos tiene mayor porosidad que la muestra de textura arenosa, esto no implica una mayor permeabilidad del suelo. Esto se debe a que en los sedimentos finos los espacios entre los granos son menores y por lo tanto resultan mayores las fuerzas capilares que retienen el agua. Como consecuencia la velocidad del agua disminuye a través del medio dando lugar a valores menores de conductividad hidráulica.

Tabla 6: Resultados de porosidad calculados mediante la fórmula de Wu y Wang (2006).

	d50 (mm)	n	Porosidad
M1	0.139	0.447	45%
M2	0.070	0.495	49%

Con los datos de porosidad calculados, puede obtenerse un valor estimado de la conductividad hidráulica del paleocauce y del suelo superficial.

De los múltiples métodos existentes, se utiliza la fórmula empírica de Terzaghi (Ecuación 2), ya que puede aplicarse a ambas muestras, M1 y M2.

Para realizar el cálculo se toma para un valor promedio del coeficiente de Hazen C_t=8,4x10^{-3}, un valor de gravedad g=9,8 m/s^2, y viscosidad cinemática del agua v=0,0874 m^2/d, considerando una temperatura del agua de 20°C. El diámetro de grano d10, correspondiente al 10% de la muestra pasante por el tamiz, se extrapola de los los valores de las curvas granulométricas de las figuras 24 y 25. El valor de d_{10} para la muestra M1 es 3,7x10^{-5}m mientras que el valor correspondiente a la muestra M2 es 2x10^{-7}m.

Reemplazando los valores anteriores en la Ecuación 2 se obtienen los siguientes resultados:

$$M1: \ K_s = 1{,}43 \ m/d$$
$$M2: \ K_s = 5{,}89 \times 10^{-4} \ m/d$$

Los valores obtenidos nos dan una idea entonces de la permeabilidad de los sedimentos, siendo la muestra 1, perteneciente al paleocauce, un sedimento arenoso con alta conductividad hidráulica. La muestra 2, por otro lado, resulta poco permeable.

4.2.3. Resultados DRX y SEM-EDS

4.2.3.1. Muestra M1

El estudio estructural mediante difracción de Rayos X (DRX) se muestra en la Figura 26, en la que se observa el diagrama de difracción de la muestra de sedimento perteneciente al paleocauce o M1 total.

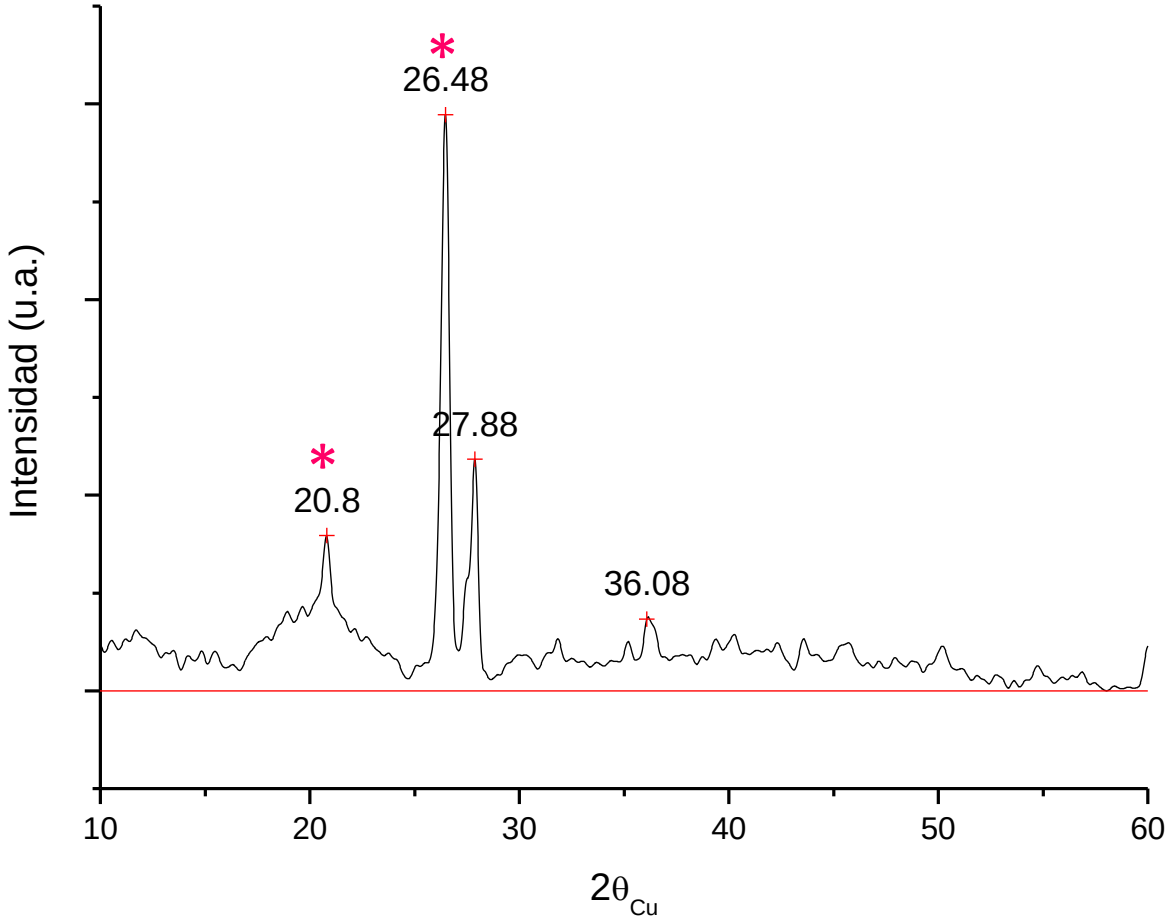


Figura 26: Diagrama DRX de la muestra M1 total.

Se observan reflexiones que se destacan por su intensidad de un gran número de pequeñas señales de muy baja resolución y consecuentemente de difícil asignación. Los valores de 2θ indicados con un asterisco en rosa, cuyos máximos se localizan en 26, 48 y 20,8, corresponden a los patrones de difracción del SiO_2 (forma alfa del cuarzo, PDF 89-8936), que concuerda con el alto porcentaje de arena encontrado en el

análisis realizado por el método de Bouyoucos. La señal en la proximidad de 28° de 2θ (27,88), así como la presencia de otros picos de menor intensidad hasta 50° de 2θ, y la superposición con la línea del cuarzo en la zona de 20° de 2θ, todas ellas comparativamente de menor intensidad respecto al cuarzo, corresponden a variedades de feldespatos (PDF 89-8573 para la especie ortoclasa $KAlSi_3O_8$). Las plagioclasas presentan señales importantes en la zona de 21°-23° y 27°-28° de 2θ. Las señales en la zona inferior a 2θ =15°, típicas de minerales de arcilla son muy débiles y de muy baja resolución, sugiriendo un sedimento de tipo arena-limosa/arena-arcillosa.

En la Figura 27 se muestran las micrografías SEM obtenidas para la muestra M1 total a distinta magnificación, a 50 y 100 aumentos.

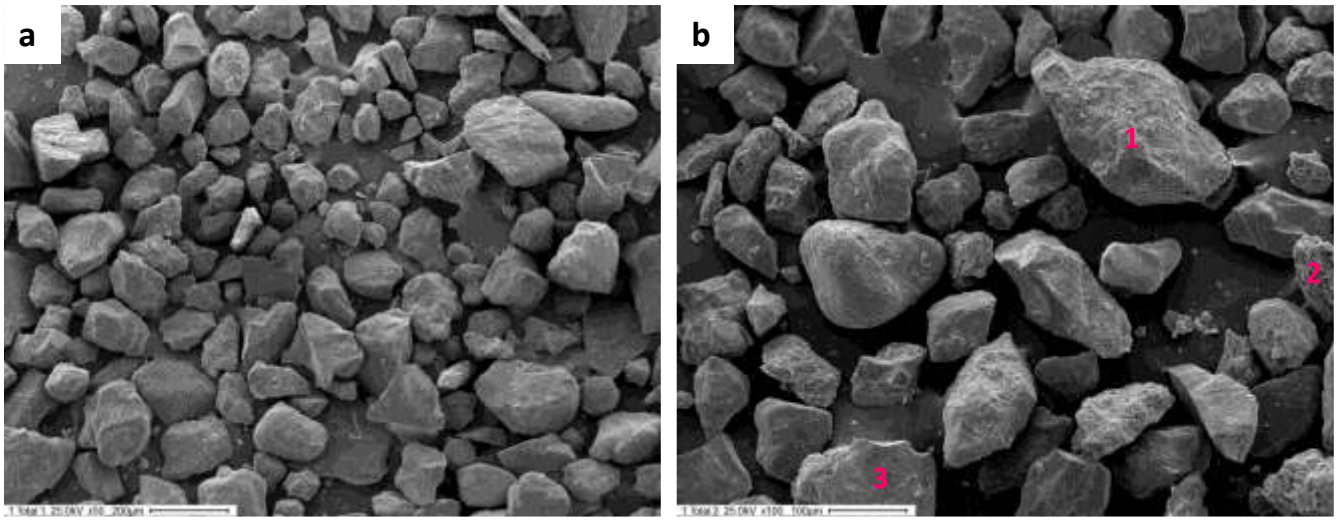
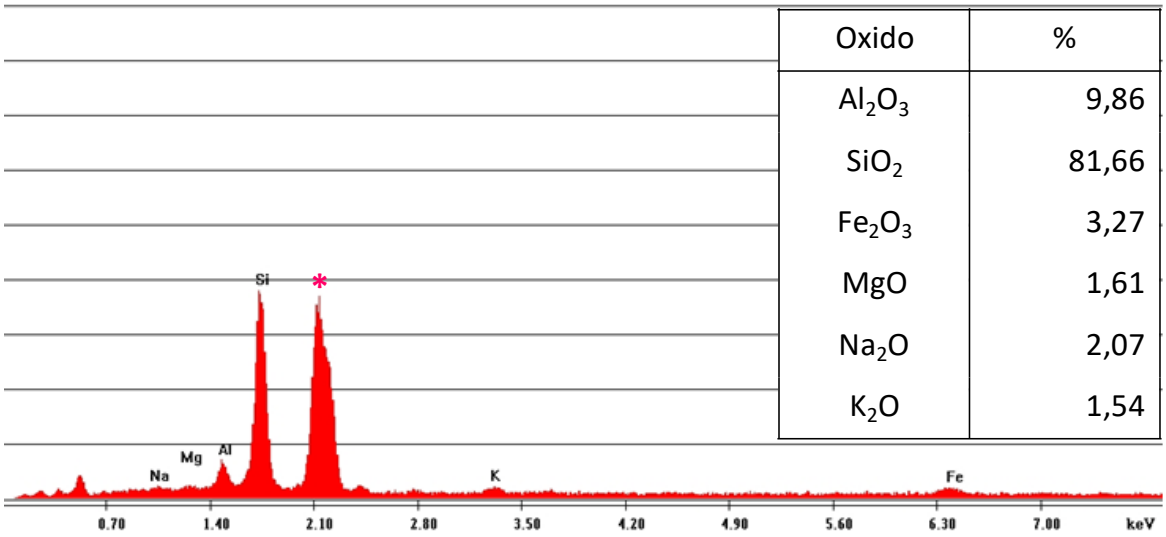


Figura 27: SEM de M1 total a escalas de diferente magnificación. a) 50X. b) 100X.

La Figura 28 corresponde al espectro EDS del material de la Figura 27, donde se observa un contenido en SiO_2 del 78,99%, dato que se encuentra en aceptable coincidencia con los estudios físicos y fisicoquímicos realizados, evidenciados por la presencia dominante de cuarzo en el diagrama de DRX. Asimismo, la presencia de otros óxidos por ejemplo de Al y de elementos alcalinos y alcalino-térreos, así como de hierro se puede atribuir a la presencia de fases de aluminosilicatos asociadas que no se llegan a detectar por rayos X, excepto feldespatos. Cabe destacar que los datos EDS para los óxidos minoritarios son inferiores al 2% excepto el Al_2O_3 (del orden de 10%). Éste valor puede asociarse a la facilidad de reemplazo Al-Si (en coordinación tetraédrica), así como a la posibilidad de coordinación octaédrica del Al en la red mineral (de acuerdo a las reglas de coordinación y relación de radios catión/oxígeno) para conformar el esqueleto tridimensional del aluminosilicato.



Oxido	%
Al_2O_3	9,86
SiO_2	81,66
Fe_2O_3	3,27
MgO	1,61
Na_2O	2,07
K_2O	1,54

Figura 28: Espectro EDS global correspondiente a la micrografía de la figura 27.a.
(* Au empleado en la metalización de la muestra).

En la Tabla 7 se observan los valores del análisis químico por EDS correspondiente a los puntos indicados en la micrografía de la Figura 27.b. En general la relación SiO_2/Al_2O_3 es del orden de 9.

Tabla 7: Datos EDS correspondientes a la micrografía de la Figura 27.b.

Oxido	1	2	3
Al_2O_3	3,88	12,23	16,63
SiO_2	93,17	69,74	61,77
Fe_2O_3	1,72	11,48	9,47
MgO	-	-	8,67
K_2O	1,23	6,55	3,46

Es evidente la presencia de diferente tipo de especies minerales, por los valores de SiO_2 variables entre 61 y 93 %. Además, a mayor valor de SiO_2 menor es el valor de Al_2O_3, por lo que puede decirse que a mayor cantidad de Cuarzo, menor es la presencia de aluminosilicatos asociados al K y Mg, como feldespatos y arcilla. El contenido en hierro no parece responder a ningún patrón, sugiriendo la presencia de óxidos libres.

Tomando en cuenta la clasificación según el diámetro de las partículas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), que se comentó anteriormente, se separaron las fracciones finas y gruesas de la muestra M1 empleando un tamiz ASTM N° 270. Se denominó MG1 a la fracción arenosa y MF1 a la fracción limo-arcillosa de la misma.

4.2.3.1.1. MG1: Fracción Gruesa de M1

La Figura 29 corresponde al SEM de MG1. Se aprecia claramente una mayor homogeneidad respecto a las fotografías SEM de la Figura 27, correspondientes a la muestra 1 total. El correspondiente análisis EDS de la superficie total y de los puntos seleccionados en la Figura 29.b se indican en la Figura 30 y en la Tabla 8.

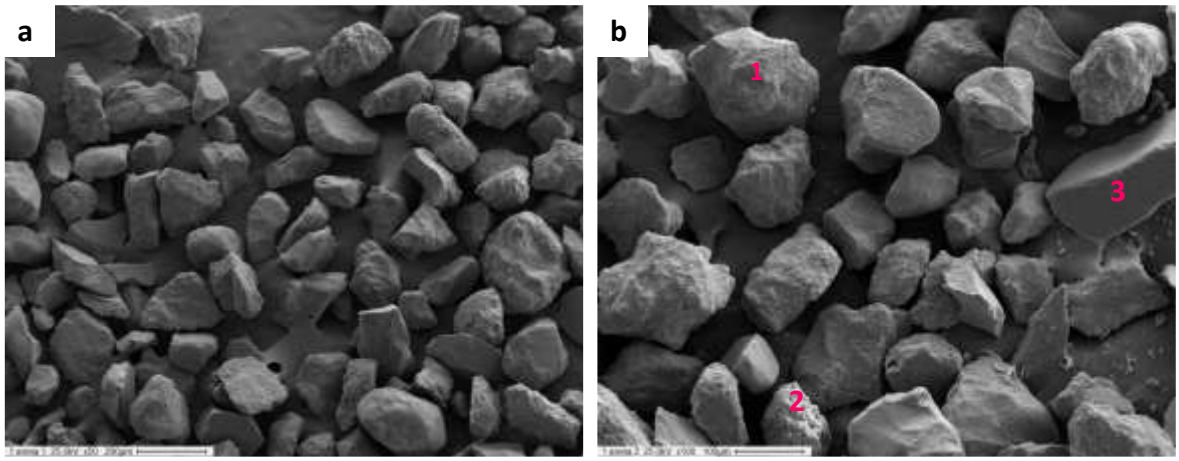
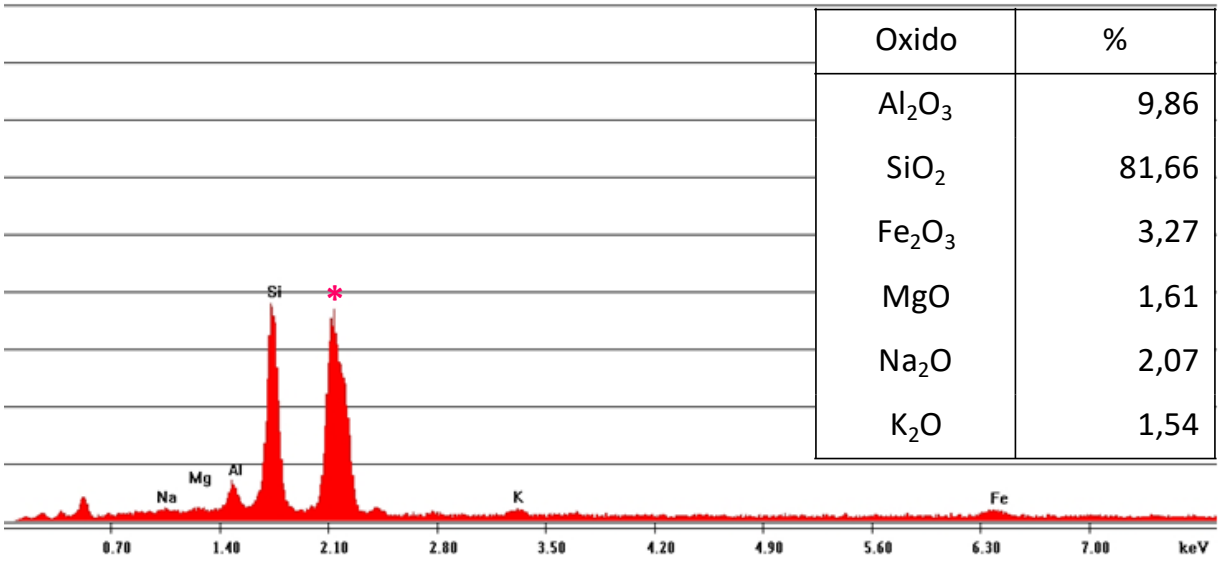


Figura 29: SEM de MG1 (fracción gruesa o arenosa de M1). Magnificación a 50x y 100 x respectivamente.

Los resultados muestran claramente la prevalencia del contenido de sílice, concordante con la presencia de arena y una proporción muy baja de alúminosilicatos tridimensionales (tipo feldespatos). Además se sugiere alguna forma oxídica de hierro, en base al porcentaje obtenido.



Oxido	%
Al_2O_3	9,86
SiO_2	81,66
Fe_2O_3	3,27
MgO	1,61
Na_2O	2,07
K_2O	1,54

Figura 30: Datos EDS de MG1.

Tabla 8: Valores de los puntos indicados en la Figura 29.b

Oxido	1	2	3
Al_2O_3	6,91	8,15	2,57
SiO_2	83,30	87,57	97,43
Fe_2O_3	8,37	2,77	-
CaO	-	0,74	-
K_2O	1,42	0,77	-

4.2.3.1.2. MF1: Fracción Fina de M1

La Figura 31 muestra las micrografías SEM de MF1, la fracción fina del sedimento, registradas a diferente magnificación. Los resultados químicos por EDS se indican en la Figura 32. Se observa que en promedio el valor de SiO_2 es comparativamente menor al observado en el material grueso, guardando una relación SiO_2/Al_2O_3 del orden de 3, típica de los aluminosilicatos laminares.

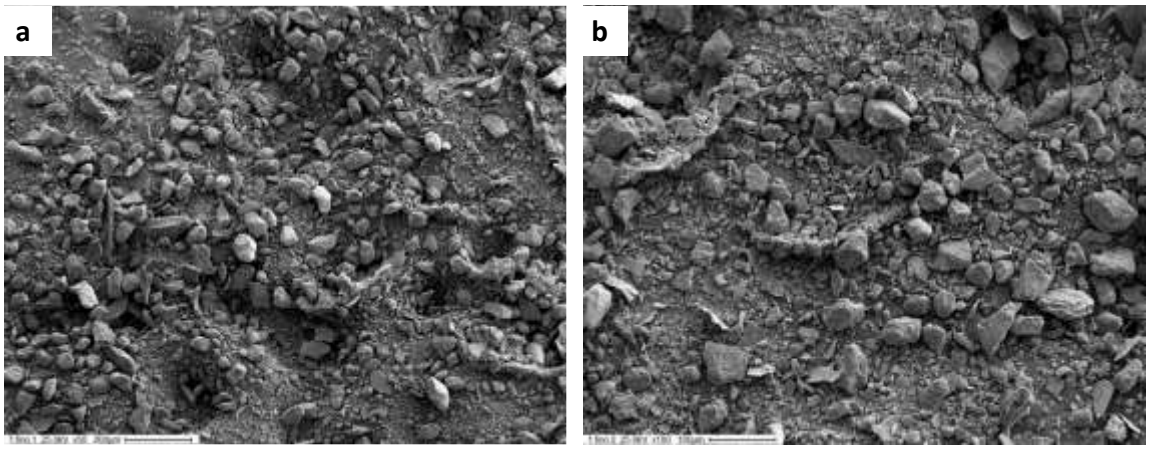
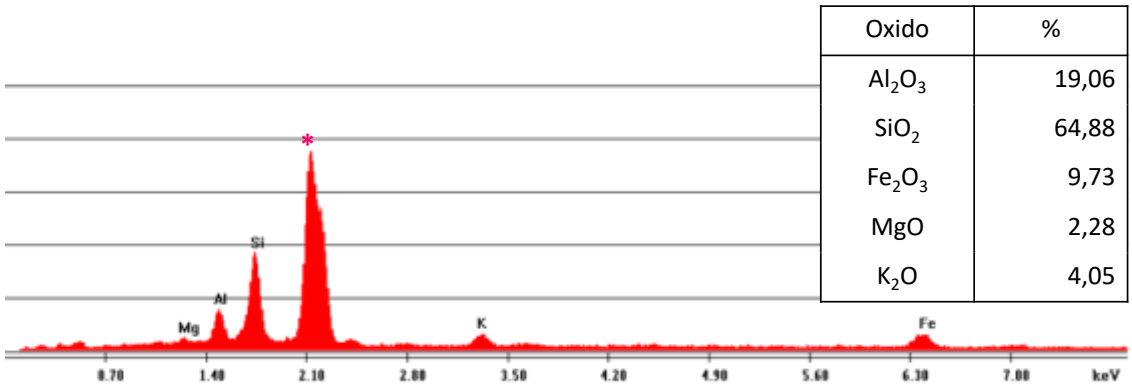


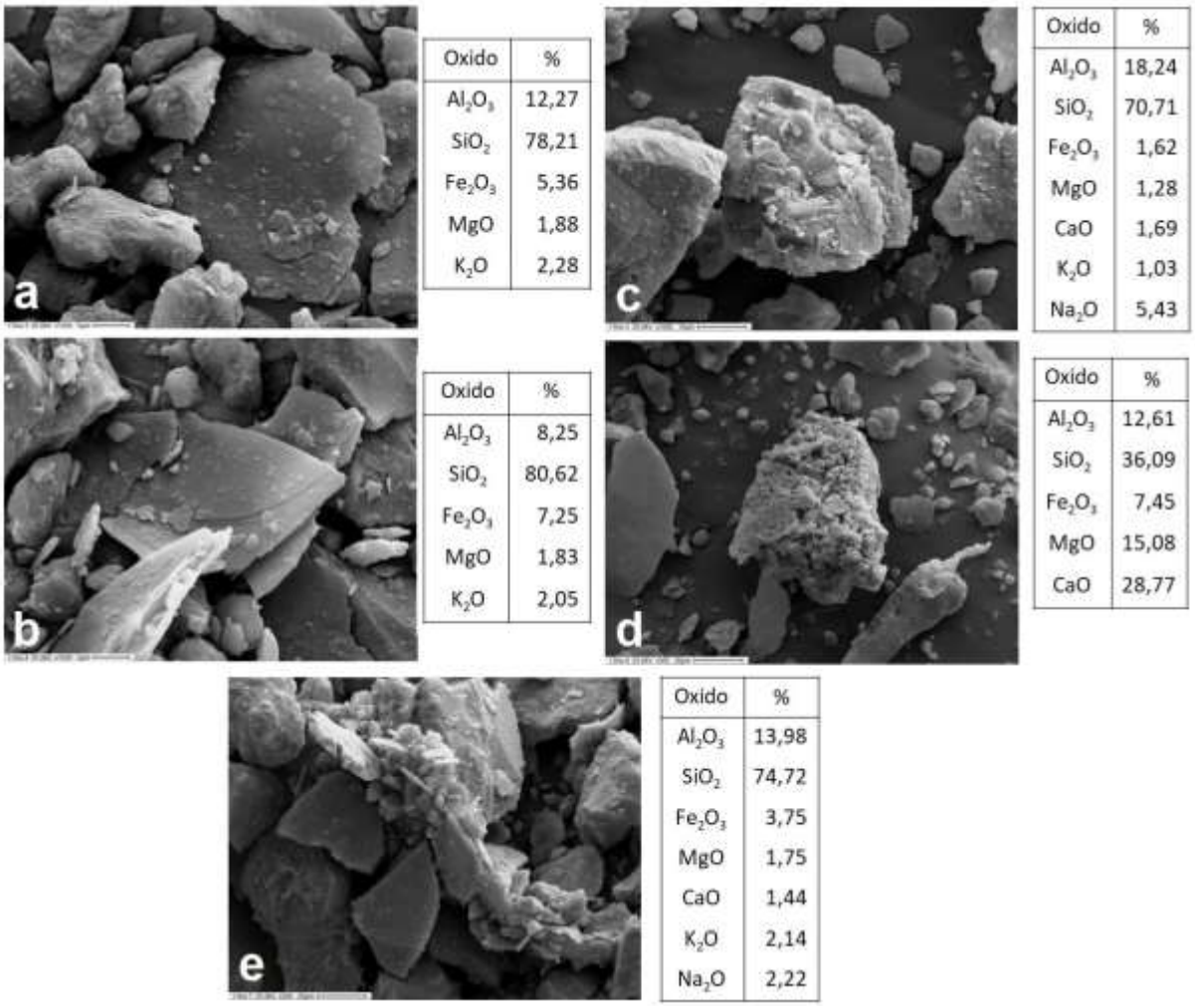
Figura 31: SEM de la fracción fina del sedimento 1 (MF1) a diferente magnificación. A) 50x. b) 100 x.



Oxido	%
Al_2O_3	19,06
SiO_2	64,88
Fe_2O_3	9,73
MgO	2,28
K_2O	4,05

Figura 32: Datos EDS de la fracción fina de la muestra 1 (MF1).

Debido a la variación en el tamaño y textura del material de la fracción fina se analizaron diferentes micrografías a mayor magnificación, comprendida entre 500 y 1500x, que se muestran en las micrografías de la Figura 33. Cada figura se acompaña del correspondiente análisis de EDS. Se observan datos químicos y texturales muy dispares, desde láminas, partículas no estratificadas, en algunos casos elevados contenidos de alcalino-térreos (sugiriendo la presencia de calizas o feldespatos sódico-cálcicos).



Oxido	%
Al_2O_3	12,27
SiO_2	78,21
Fe_2O_3	5,36
MgO	1,88
K_2O	2,28

Oxido	%
Al_2O_3	18,24
SiO_2	70,71
Fe_2O_3	1,62
MgO	1,28
CaO	1,69
K_2O	1,03
Na_2O	5,43

Oxido	%
Al_2O_3	8,25
SiO_2	80,62
Fe_2O_3	7,25
MgO	1,83
K_2O	2,05

Oxido	%
Al_2O_3	12,61
SiO_2	36,09
Fe_2O_3	7,45
MgO	15,08
CaO	28,77

Oxido	%
Al_2O_3	13,98
SiO_2	74,72
Fe_2O_3	3,75
MgO	1,75
CaO	1,44
K_2O	2,14
Na_2O	2,22

Figura 33: Datos SEM-EDS de MF1 a magnificaciones superiores a 500 x.

En relación a la función del sólido M1 como sedimento del paleocauce el estudio fisicoquímico permite establecer el predominio de un material arenoso con una muy baja presencia de mineral de arcilla, factores que facilitan la circulación del agua, la elevada formación de macroporos, minimizando los procesos de compactación.

4.2.3.2. Muestra M2

En forma similar a la empleada en el estudio del solido M1, se procedió a la caracterización estructural del sedimento denominado M2, identificado granulométricamente como franco arcillo arenosa (USDA), con la siguiente composición: 52,16% tamaño arena, 17,5% limo y 30,34% arcilla.

Al someter a la muestra M2 a la técnica de DRX se obtuvo el diagrama de difracción indicado en la Figura 34. Las líneas de difracción de mayor resolución en 20°, 26° y 50° son las correspondientes al SiO_2 (alfa cuarzo, PDF89-8936) y feldespato (PDF 89-8573) también indicadas en el estudio del solido M1. Puede sugerirse la superposición con algunas líneas de especies minerales del grupo de las bentonitas (Illita-Montmorillonita, por ej. PDF 35-0652, cuyo máximo se halla en 26,75° de 2θ).

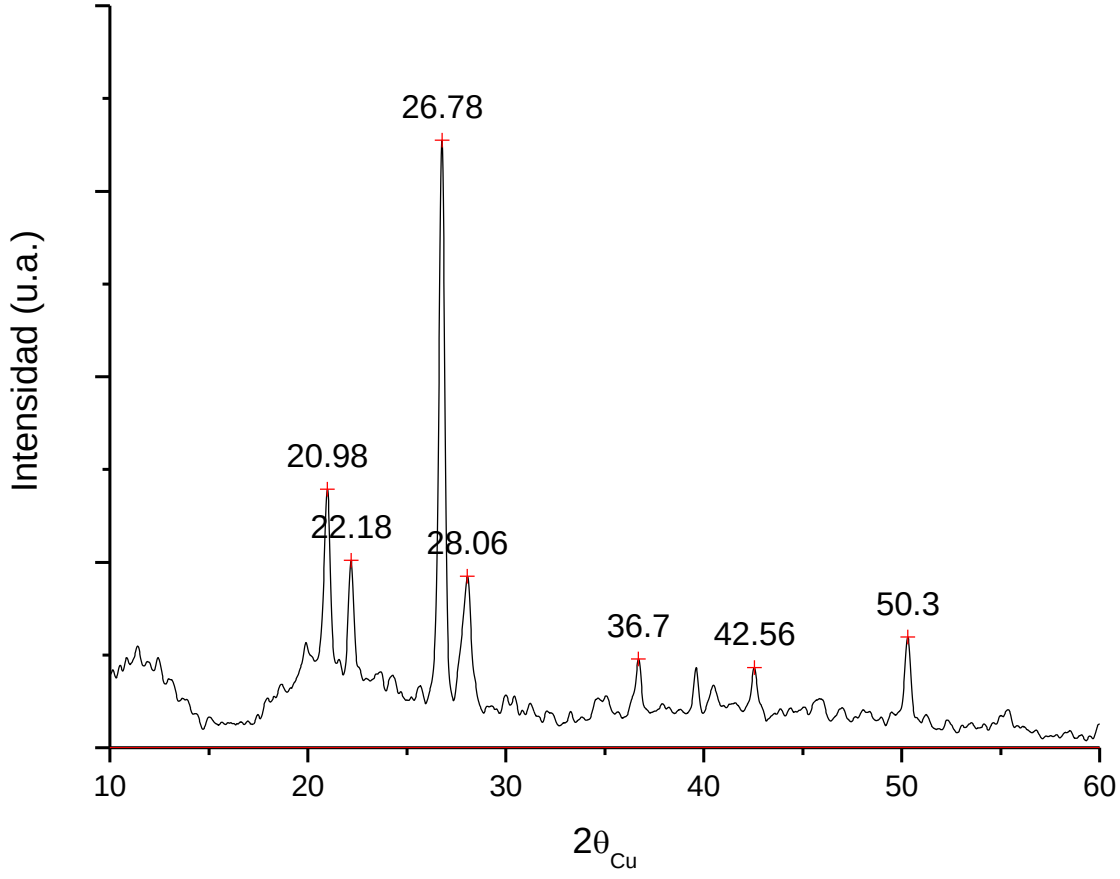


Figura 34: Diagrama DRX de la muestra de M2 total.

Por otra parte, la Figura 35 corresponde a la caracterización del material por microscopía SEM registrando las micrografías a dos magnificaciones diferentes (a. 50x y b.100 x), como se procedió en el estudio del sólido M1, a fin de observar con mayor detalle la textura y tamaños relativos de las partículas constituyentes del sólido.

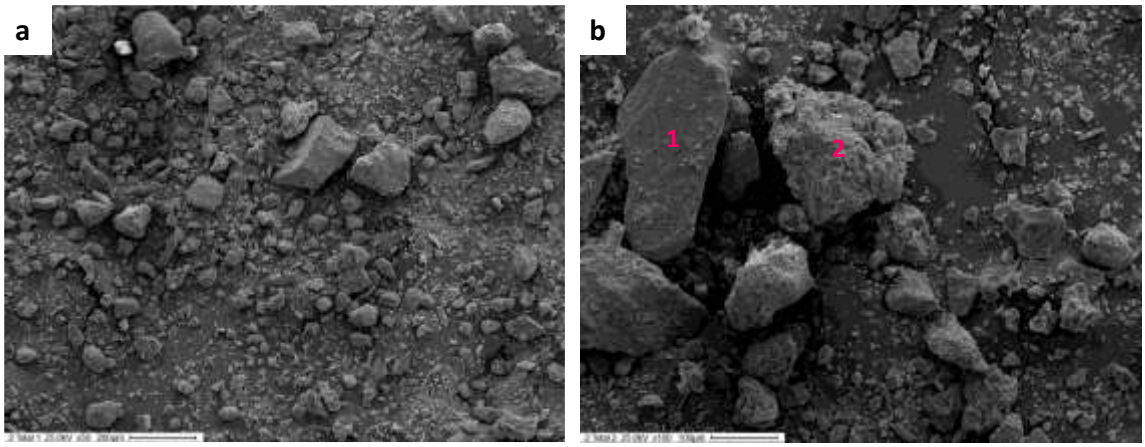
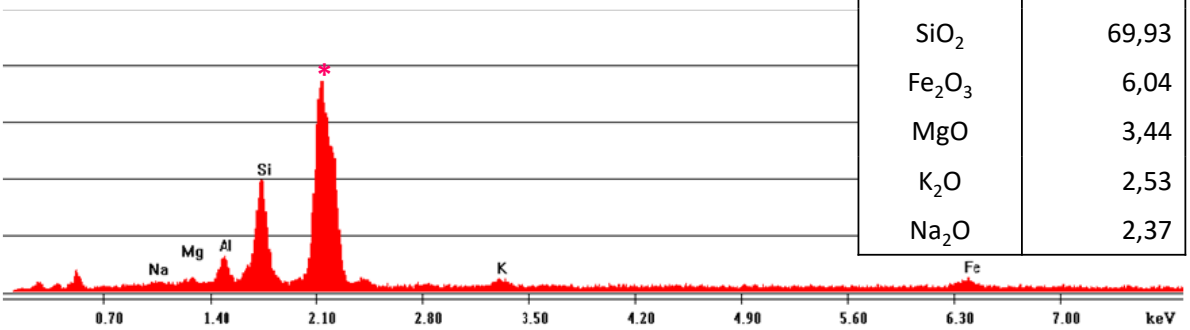


Figura 35: SEM de M2 total a escalas de diferente magnificación. a) 50X. b) 100X.

A diferencia de lo obtenido en el caso del sólido M1, la muestra no es homogénea, pudiendo observar claramente el predominio de partículas de tamaño fino. Estas se encuentran sueltas pero también en forma de conglomerados o recubriendo otras partículas de mayor tamaño, del orden de 100 micrones (Figura 35.b.1), diferenciándose así en su forma y textura de las observadas por microscopia SEM en el estudio del sólido M1, en el que el material predominante presenta bordes y superficies limpias de material particulado.

La Figura 36 presenta el espectro EDS del sedimento y los datos químicos de la superficie del material global. En relación al sólido M1 en iguales condiciones, el contenido de SiO_2 es comparativamente menor (~10 % inferior), en tanto que el contenido de Al_2O_3 aumenta en el orden del 5 - 6 %, como se indica en la tabla de la Figura 36. De este modo la relación SiO_2/Al_2O_3 apenas supera el valor de 4 (en tanto que para el sólido M1 es del orden de 9). Además, es apreciable el incremento de los contenidos de Magnesio, Sodio, y Potasio, expresados como óxidos en la tabla de la Figura 36, lo que sumado a la baja relación SiO_2/Al_2O_3, sugiere la presencia de arcillas como Montmorillonita o Illita , y Feldespatos o Plagioclasas.



Oxido	%
Al_2O_3	15,69
SiO_2	69,93
Fe_2O_3	6,04
MgO	3,44
K_2O	2,53
Na_2O	2,37

Figura 36: Espectro EDS del sedimento mostrado en la figura 35.b

La Tabla 9 presenta los valores del análisis químico superficial por EDS correspondiente a los puntos indicados en la micrografía de la Figura 35.b.

Tabla 9: EDS de partículas identificadas como 1 y 2 en la Figura 35.b.

Oxido	1	2
Al_2O_3	16,69	18,16
SiO_2	52,98	71,10
Fe_2O_3	28,29	5,26
MgO	-	2,18
CaO	-	1,07
K_2O	2,04	2,23

Resulta evidente la diferencia textural, química y estructural entre los sólidos identificados en los puntos 1 y 2, debido a que si bien las señales de difracción por RX de la fase SiO_2 y en menor proporción las del feldespato, resultan las de mejor resolución e intensidad, este hecho puede ser atribuido a la elevada cristalinidad de esas especies pero no a su abundancia relativa en la mezcla mineral respecto a especies silícicas de mayor complejidad estructural y química (que se presentan como fases amorfas o de muy baja cristalinidad). Además, no se descarta la presencia de especies óxidicas de hierro eventualmente aluminosilicatos conteniendo hierro como resulta del análisis de la partícula 1. En ambos puntos la relación SiO_2/Al_2O_3 oscila entre 3 y 3,9, más cercana a la observada en minerales de arcilla (di y trioctaédricas), con valores de la relación del orden de 2 Ej. Caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Al respecto cabe mencionar que la formación de filosilicatos por alteración o hidrólisis de aluminosilicatos (feldespatos) por acción de aguas ligeramente acidas es observado claramente en climas subtropicales en los procesos de edafización.

4.2.3.2.1. MG2: Fracción gruesa de M2

Como en el caso del sólido M1 se procedió a tamizar el material, siguiendo los lineamientos del sistema unificado de clasificación de suelos, a fin de separar el material grueso del fino utilizando tamiz n°270. La Figura 37 corresponde al SEM de la fracción gruesa del sedimento M2.

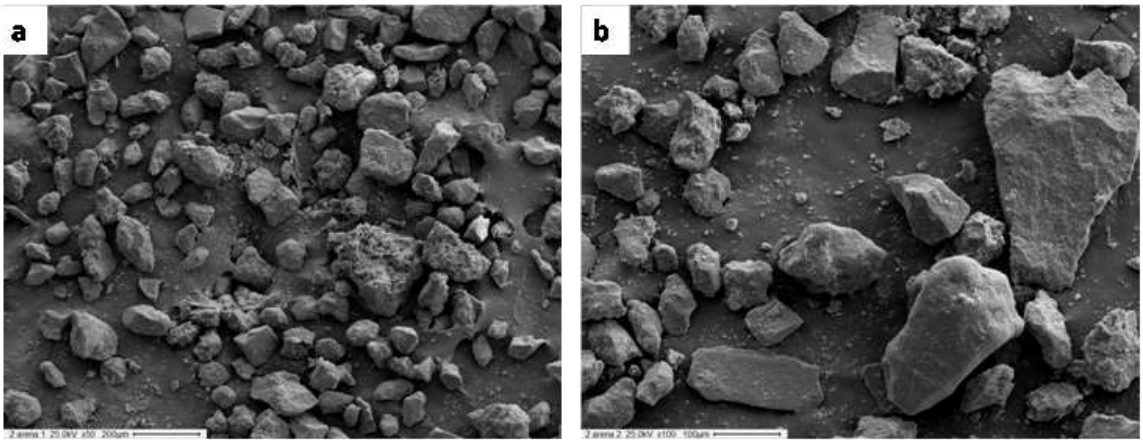
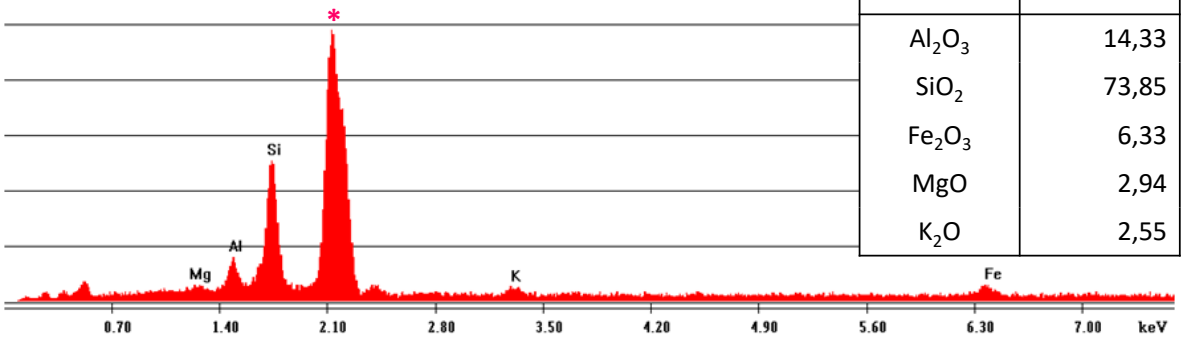


Figura 37: SEM de la fracción gruesa del sedimento 2 (magnificación 50 y 100 x respectivamente).

Se aprecia claramente una mayor homogeneidad del material respecto a las fotografías SEM del material sin tamizar (Figura 35). Por otra parte el tamaño promedio de las partículas es mayoritariamente superior a los 50 µm. A mayor magnificación se aprecia mejor la presencia de un contenido minoritario de especies de partículas de tamaño mayor y eventualmente diferente textura.

El correspondiente análisis químico por EDS de la fracción gruesa se presenta en la Figura 38. De la relación SiO_2/Al_2O_3 del orden de 5, resulta evidente que el material clasificado como tamaño arena se encuentra constituido por una mezcla donde predominan los aluminosilicatos ricos en potasio y magnesio (posiblemente feldespatos) y de cuarzo así como abundantes minerales de arcilla, que como agregados de especies consolidadas son responsables de una baja proporción de la especie mineral SiO_2 (destacada en DRX por su elevada cristalinidad).



Oxido	%
Al_2O_3	14,33
SiO_2	73,85
Fe_2O_3	6,33
MgO	2,94
K_2O	2,55

Figura 38: EDS del material grueso de MG2.

Con fines aclaratorios se complementó el estudio con el análisis SEM-EDS de partículas a mayor magnificación acompañadas por su análisis composicional (Figura 39 a-d).

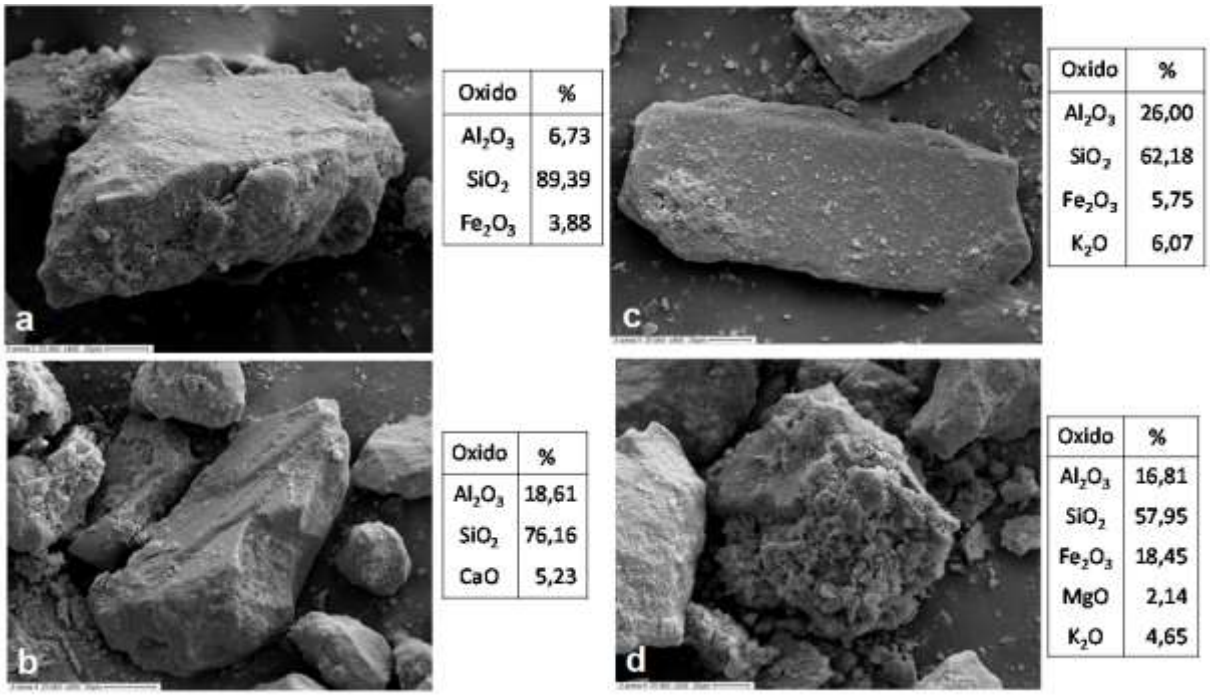


Figura 39: Análisis SEM-EDS de partículas de MG2 a mayor significación.

Se observan datos químicos y texturales muy dispares, con relaciones SiO_2/Al_2O_3 que van desde 13 en el caso de la muestra 39.a hasta valores de 4 o inferiores en las restantes muestras, revelando un apreciable contenido de aluminosilicatos constituyentes como fracción gruesa. En el último caso (39.d), caracterizada por una relación 3,4, es de destacar el elevado contenido de hierro.

4.2.3.2.2. MF2: Fracción fina de M2

La Figura 40.a y 40.b corresponden a las micrografías del material en estudio de la fracción fina, registradas a diferente magnificación. Por otra parte, la Figura 41 muestra el espectro EDS del material de la fracción fina y su cuantificación química, expresada en porcentaje de óxidos. Tanto la relación SiO_2/Al_2O_3 (del orden de 5) como los porcentajes de elementos de menor potencial iónico y de hierro se asemejan a los reportados para las muestras de material grueso, por lo que resultan válidas las mismas consideraciones dadas para la fracción gruesa en cuanto a la composición mineralógica: mezcla de minerales de arcilla enriquecidas con sílice microcristalina.

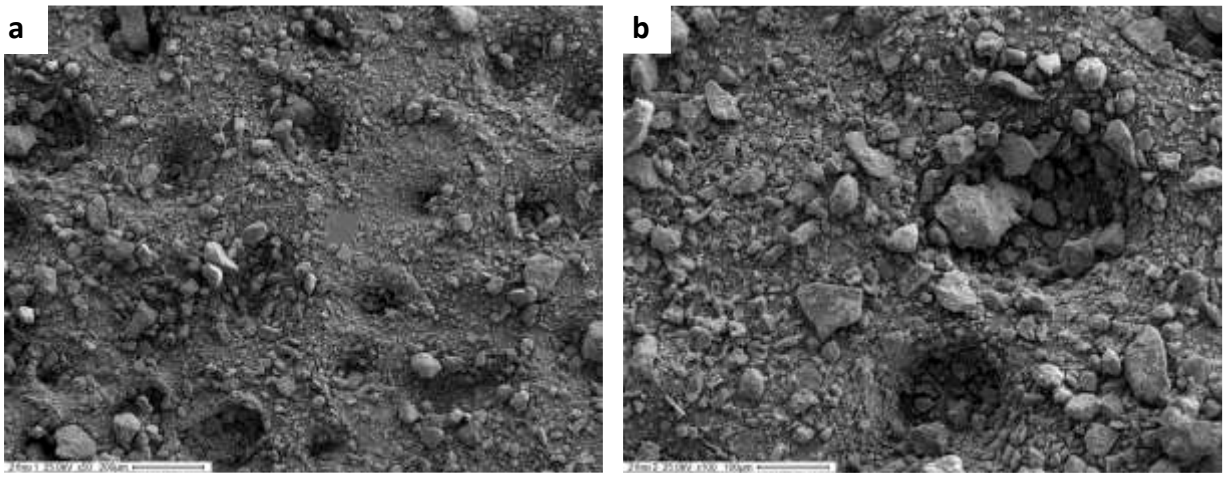
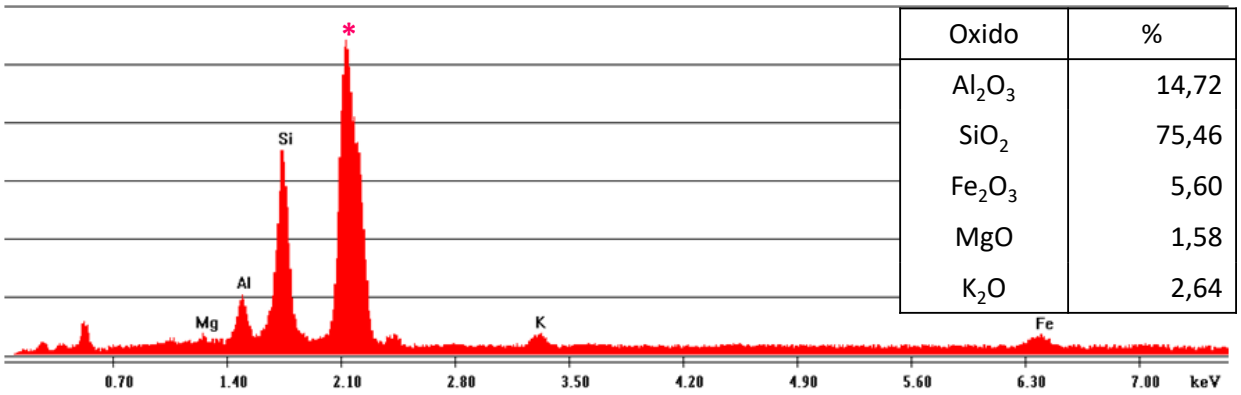


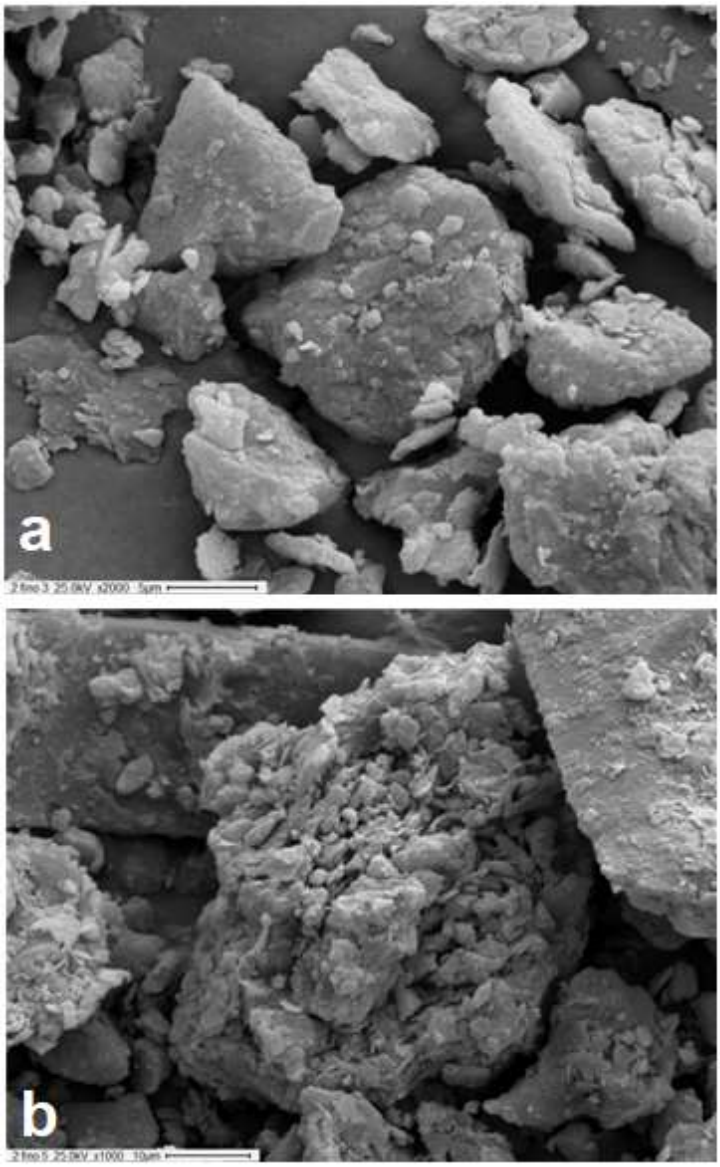
Figura 40: SEM de MF2 a 50x y 100x respectivamente.



Oxido	%
Al_2O_3	14,72
SiO_2	75,46
Fe_2O_3	5,60
MgO	1,58
K_2O	2,64

Figura 41: EDS de MF2.

La Figura 42 corresponde a partículas analizadas por la técnica SEM-EDS a elevada magnificación (1000-2000 x) revelando una textura que sugiere la prevalencia de agregados de partículas aun más finas, del orden del micrón, manteniendo una relación SiO_2/Al_2O_3 ligeramente superior a 4. Además, se observa un contenido variable de hierro.



Oxido	%
Al_2O_3	17,18
SiO_2	71,43
Fe_2O_3	5,58
MgO	1,94
K_2O	1,91
Na_2O	1,96

Oxido	%
Al_2O_3	15,13
SiO_2	69,62
Fe_2O_3	10,52
MgO	1,85
K_2O	2,88

Figura 42: SEM-EDS de partículas de MF2 a magnificación 2000x y 1000x.

En relación a la función del sólido M2 como material del sedimento superficial se concluye que el estudio mediante técnicas fisicoquímicas permite establecer escasa presencia de fase cuarcítica con una elevada proporción de minerales de arcilla, pudiendo llegar a sugerir también la presencia de especies expandibles. La muestra 2 resulta ser comparativamente la más rica en productos de alteración de rocas donde la presencia de cuarzo de origen detrítico contribuye a definir un tamaño predominantemente tipo limo. La abundancia de mineral arcilloso de baja cristalinidad contribuye a la formación de suspensiones, afectando eventualmente la calidad del agua.

5. Conclusiones

Los resultados del análisis granulométrico junto con las estimaciones de la porosidad, la conductividad hidráulica y los análisis fisicoquímicos de los sólidos permitieron realizar una mejor caracterización del paleocauce y los sedimentos circundantes, en la zona del Paraje El Zanjón y Paraje Miraflores respectivamente.

En primer lugar, el análisis textural de la muestra del paleocauce permitió asociarla a una arena de acuerdo con la clasificación USDA o a una arena arcillosa según la clasificación de FOLK. La muestra del sedimento superficial en cambio, es franco arcillo arenosa (USDA) o arena fangosa (FOLK).

La estimación de las porosidades con la fórmula de Wu y Wang (2006) arrojó valores altos para ambas muestras (45 y 49%). La elevada porosidad del sedimento superficial se asocia a la arcillosidad de la muestra, lo que queda en evidencia al calcular la conductividad hidráulica. La fórmula de Terzaghi estima un valor de la conductividad hidráulica para el paleocauce de 1,43 m/d y de 5,89 10^{-4} m/d para el sedimento circundante.

Estos resultados muestran que los paleocauces constituyen buenos acuíferos, a pesar de sus reducidas dimensiones, ya que tienen una gran capacidad para almacenar agua debido a su alta porosidad. Esto sumado a una alta conductividad hidráulica facilita su extracción con bombas manuales. Las dimensiones de estos cuerpos sólo permiten un caudal de bombeo limitado, pero suficiente para proveer de agua a los habitantes próximos a los pozos construidos.

Los sedimentos de granulometría fina dominante por encima de estos cuerpos permeables, de tipo limo arcillosos, dificultan la infiltración del agua de lluvia en épocas húmedas. Sin embargo, los paleocauces pueden aflorar parcialmente lo que facilita su recarga. Por otra parte, la presencia de arcillas expansibles en épocas de sequía generan grietas de desecación, observadas en el campo, que permiten el rápido descenso del agua disponible al acuífero.

La mineralogía, la microscopía y la química de los materiales muestreados reflejan una composición rica en sílice, revelando claramente fases cristalinas de alfa cuarzo y feldespato en proporciones variables tanto en el material del paleocauce M1 como en el sedimento circundante M2, sugiriendo el predominio de minerales de arcilla en este último. En este sedimento también se observó un aumento de la cantidad de óxidos de hierro que podría relacionarse con un mayor contenido de arsénico en el agua. Este efecto podría atribuirse a la suspensión de oxihidróxidos de hierro de tipo coloidal donde se adsorbe el As. La presencia de estos oxihidróxidos de hierro en suspensión también sería responsable de los valores altos de turbidez medidos en estas muestras de agua.

El agua subterránea en toda esta zona suele ser salobre pudiendo presentar eventualmente concentraciones relativamente elevadas de arsénico, contaminación asociada probablemente a las características de los sedimentos loessicos. En este contexto cabe también considerar el importante rol que juega el paleocauce en la preservación de la calidad del agua. En efecto, su composición constituida

mayoritariamente por sílice y un bajo contenido de material fino, sugiere una reducción en el contenido de sales y arsénico.

Los resultados de las muestras de agua de los pozos realizados tanto in situ como en el laboratorio arrojaron niveles superiores a los establecidos por el Código Alimentario Argentino (CAA) en uno o más de los parámetros determinados. A pesar de no haber podido realizar un estudio bacteriológico de las mismas, el elevado contenido de amonio en varias de ellas podría ser indicio de contaminación orgánica. Además, la presencia de otros compuestos nitrogenados como el nitrito y el amonio, derivados del ciclo natural del nitrógeno permite suponer un origen antropogénico y/o relativo a la producción agropecuaria local.

De la totalidad de las muestras recolectadas, la única que resulta apta para consumo humano es la extraída del molino cercana a los Pozos 3 y 4. A pesar de contener un valor de arsénico por encima del recomendado por la OMS, el valor medido se encuentra contemplado en la modificación del CAA para el 2019, hasta 0,5 mg/l. Las muestras tanto del Pozo 8 como del Pozo 5 ubicadas ambas al SO de la zona de estudio son las de menor calidad, presentando niveles de salinidad evidenciados en primera instancia por su sabor y elevada conductividad, y luego confirmados por el elevado contenido de iones como cloruros y sulfatos. Además el Pozo 5 arrojó resultados de arsénico potencialmente perjudiciales, mientras que el Pozo 8 presentó niveles de compuestos nitrogenados muy por encima de los aceptables.

A pesar de no ser aptas para el consumo humano, las muestras cumplen con los valores estipulados para ser utilizada para bebida del ganado (Fernández Cirelli et al., 2010), a excepción de las muestras de agua extraídas del Pozo 5 y del Pozo 8 por las razones expuestas anteriormente, principalmente por su alto tenor salino. Sin embargo el agua de estos pozos podría utilizarse para cualquier otra necesidad que no implique su consumo (uso sanitario, ganadería, fabricación de ladrillos, etc). Resulta importante destacar que los habitantes del Impenetrable consumen el agua de los pozos que construyen sin conocer su calidad.

Cabe destacar que a diferencia de las primeras medidas tomadas en campañas previas al desarrollo de este trabajo, realizadas en diferentes épocas del año, no se encontraron cantidades significativas de Arsénico en el agua, salvo para el pozo 5 ubicado en el Paraje Miraflores. Este efecto podría responder a una variación estacional relacionada con el patrón de precipitaciones.

A futuro se considera necesario volver a medir los pozos evaluados en épocas de sequía, para comparar los niveles de arsénico y de compuestos nitrogenados, así como tomar las muestras correspondientes en los pozos que no pudieron adecuadamente por el mal funcionamiento de las bombas. Además se sugiere un estudio con mayor profundidad de los sedimentos tanto de los paleocauces intervenidos como de los sedimentos suprayacentes, para comprender con mayor detalle la relación entre los acuíferos y la zona no saturada.

6. Referencias Bibliográficas

- Amaya M., 2018. *Identificación y caracterización de paleocauces mediante tomografías de resistividad eléctrica en Miraflores, Chaco.* Tesis de grado en Geofísica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.
- Administración Provincial del Agua (APA), 2010. *Anuario de precipitaciones provincia del Chaco 1956-2010*.
- Auge M., 2004. *Regiones hidrogeológicas de la República Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires, Argentina.
- Auge M., 2008. *Métodos Geoeléctricos para la prospección de Agua Subterránea*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires, Argentina.
- Blanes P. y Giménez M., 2006. *Evaluación de los niveles de Hierro y Arsénico en Aguas Naturales Subterráneas de la Región Centro-Oeste de la Provincia del Chaco-Argentina*. Información Tecnológica, 17 (3): 3-8.
- Boujon P., Fernández D. S., Trevisiol S., Pereyra F.X. y Gambandé L., 2016. *Hidrogeología de la región chaqueña de la República Argentina*. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea. Catamarca, Argentina.
- Bundschuh J., Litter M., Parvez F., Román-Ross G., Nicolli H., Jean J., Liu J., López D., Armienta M., Guilherme L., Gomez Cuevas A., Cornejo L., Cumbal L. y Toujaguez R., 2012. *One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries*. Science of the Total Environment, 429: 2-35.
- Código Alimentario Argentino (CAA), 2019. Capítulo XII. Bebidas hídricas, agua y gasificada. En: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/caa_capitulo_xii_aguas_actualiz_2019-11.pdf
- Fernández Cirelli A., Schenone N., Pérez Carrera A., Volpedo A., 2010. *Calidad de agua para la producción de especies animales tradicionales y no tradicionales en Argentina.* AUGMDOMUS, 1: 45-66.
- Fernández-Turiel J.L.; Galindo G.; Parada M.A.; Gimeno D.; García-Vallés M. y Saavedra J., 2005. *Estado actual del conocimiento sobre el arsénico en el agua de Argentina y Chile: origen, movilidad y tratamiento*. En: Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento. Ed.: G. Galindo, Fernández Turiel, M. Parada y D. Torrente. IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto, Argentina. 1-22.
- García S., 2011. *Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico HACRE: Módulo de Capacitación.* Ministerio de Salud de la Nación, 60 p., ISBN 978-950-38-0108-7.
- Giuliano Albo M.J. y Blarasin M.T., 2014. *Hidrogeoquímica y estimación del fondo natural de nitratos del agua subterránea en un agroecosistema del pedemonte de la Sierra de Comechingones*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 71 (3): 378-392

- Guarracino L., 2017. *Status report project "Groundwater resources for small rural and aboriginal communities in Chaco Province, Argentina"*, GWB-SEG, 16 páginas.
- INDEC, Censo 2010. https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135.
- INTA, 2007. *Los Suelos del Departamento General Güemes, Primera Etapa*. Carta de Suelos del INTA.
- Litter M., Ingallinella A.M., Olmos V., Savio M., Difeo G., Botto L., Farfán Torres E., Taylor S., FrangieS., HerkovitsJ., Schalamukc I., González M.J., Berardozzi E., García Einschlag F., Bhattacharya P., Ahmado A., 2019. *Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination.* Science of the Total Environment, 676: 756-766.
- Langelier W. y Ludwing H., 1942. *Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters.* J. Am. Water Ass., 34:335-352.
- Loke M.H., 2016. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.
- Mandal B. y Suzuki K., 2002. *Arsenic round the world: a review*. Talanta, 58: 201-235.
- Martínez D. E. y Osterrieth M., 2013. *Hidrogeoquímica y efectos de la contaminación en un acuífero en sedimentos loéssicos cuaternarios en el área de rellenos sanitarios de Mar del Plata, Argentina*. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, 66: 9-23.
- Memendi J.E., 2011. *Recopilación de textos y mapas de la provincia del Chaco. Sistemas fluviales y normas legislativas ambientales.* CEDEI, Ministerio de producción y ambiente gobierno de la provincia del Chaco.
- Nicolli H.B., Bundschuh J., García J.W., Falcón C.M., Jean J.S., 2010. *Sources and controls for the mobility of arsenic in oxidizing groundwaters from loess-type sediments in arid/semi-arid dry climates – evidence from the Chaco–Pampean plain*, *Argentina*. Water Res; 44(19):5589–5604.
- Nicolli H.B., Bundschuh J., Blanco M.C., Tujchneider OC., Panarello H.O., Dapeña C., Rusansky J.E., 2012. *Arsenic and associated trace-elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina*: Results from 100 years of research. Science of the Total Environment, 429: 36–56.
- Odong, J. 2008. *Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis*. J. Am. Sci., (3): 1–6.
- Osicka R.M., Agulló N.S., Herrera Aguad C.E., Jimenez M.C., 2002. *Evaluación de las concentraciones de fluoruro y arsénico en las aguas subterráneas del domo Central de la Provincia del Chaco*. http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2002/08-Exactas/E-049.pdf
- PROSAP-UTF, 2015. Informe: *Desarrollo Institucional para la Inversión*. Estudio de ampliación del potencial de irrigación en Argentina, Riego Complementario. Marzo, 2015.
- Ramos V. A., 1999. *Las provincias geológicas del territorio argentino*. Geología Argentina, 29 (3): 41-96.

- Russo, A., Ferello, R. y Chebeli, G., 1979. *Llanura Chaco Pampeana*. En: Geología Regional Argentina. IIº Simposio Academia Nacional Ciencias, 1: 139-183, Córdoba.
- Smedley P., y Kinninburgh, 2002. A review of the source, distribution and behavior of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry, 17: 517-568.
- Society of exploration geophysicists (SEG), https://seg.org/
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th edition. USDA, Natural Resources Conservation Service.
- Tiddi R., Heinonen S., Quiroga V., y López L., 2014. *Parque Nacional El Impenetrable*.http://www.impenetrableparquenacional.org/descargas/Parque_Nacional_El_Impenetrable.pdf.
- U.S. Department of Agriculture, 2017. *SoilSurvey Manual*. Agriculture Handbook 18, pp. 120.
- Wu W. y Wang S. S., 2006. *Formulas for sediment porosity and settling velocity.* J. Hydraul. Eng., 132(8):858-862, doi: 10.1061/(ASCE) 0733-9429(2006)132:8(858).

ANEXO 1

CODIGO ALIMENTARIO ARGENTINO

CAPÍTULO XII

BEBIDAS HÍDRICAS, AGUA Y AGUA GASIFICADA

AGUA POTABLE

Artículo 982 - (Resolución Conjunta SRYGR y SAB N° 34/2019)

"Con las denominaciones de Agua potable de suministro público y Agua potable de uso domiciliario, se entiende la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener substancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente. El agua potable de uso domiciliario es el agua proveniente de un suministro público, de un pozo o de otra fuente, ubicada en los reservorios o depósitos domiciliarios. Ambas deberán cumplir con las características físicas, químicas y microbiológicas siguientes:

Características físicas

Turbiedad: máx. 3 NTU
Color: máx. 5 escala Pt-Co
Olor: sin olores extraños

Características químicas

pH: 6,5 - 8,5
pH sat.: pH ± 0,2

Substancias inorgánicas

Amoníaco ($NH4^+$) máx.: 0,20 mg L^{-1}
Antimonio máx.: 0,02 mg L^{-1}
Aluminio residual (Al) máx.: 0,20 mg L^{-1}
Arsénico (As) máx.: 0,01 mg L^{-1}
Boro (B) máx.: 0,5 mg L^{-1}
Bromato máx.: 0,01 mg L^{-1}
Cadmio (Cd) máx.: 0,005 mg L^{-1}
Cianuro (CN^-) máx.: 0,10 mg L^{-1}
Cinc (Zn) máx.: 5,0 mg L^{-1}
Cloruro (Cl^-) máx.: 350 mg L^{-1}
Cobre (Cu) máx.: 1,00 mg L^{-1}
Cromo (Cr) máx.: 0,05 mg L^{-1}
Dureza total ($CaCO_3$) máx.: 400 mg L^{-1}

Fluoruro (F^-): para los fluoruros la cantidad máxima se da en función de la temperatura promedio de la zona, teniendo en cuenta el consumo diario del agua de bebida:
- Temperatura media y máxima del año (°C) 10,0 - 12,0, contenido límite recomendado de Flúor (mg L^{-1}), límite inferior: 0,9: límite superior: 1, 7
- Temperatura media y máxima del año (°C) 12,1 - 14,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg L^{-1}), límite inferior: 0,8: límite superior: 1,5
- Temperatura media y máxima del año (°C) 14,7 - 17,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg L^{-1}), límite inferior: 0,8: límite superior: 1,3
- Temperatura media y máxima del año (°C) 17,7 - 21,4, contenido límite recomendado de Flúor (mg L^{-1}), Límite inferior: 0,7: límite superior: 1,2
- Temperatura media y máxima del año (°C) 21,5 - 26,2, contenido límite recomendado de Flúor (mg L^{-1}), límite inferior: 0,7: límite superior: 1,0
- Temperatura media y máxima del año (°C) 26,3 - 32,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg L^{-1}), límite inferior: 0,6; límite superior: 0,8

Hierro total (Fe) máx.: 0,30 mg L^{-1}
Manganeso (Mn) máx.: 0,10 mg L^{-1}
Mercurio (Hg) máx.: 0,001 mg L^{-1}
Níquel (Ni) máx.: 0,02 mg L^{-1}
Nitrato (NO_3^-) máx.: 45 mg L^{-1}
Nitrito (NO_2^-) máx.: 0,10 mg L^{-1}
Plata (Ag) máx.: 0,05 mg L^{-1}
Plomo (Pb) máx.: 0,05 mg L^{-1}
Selenio (Se) máx.: 0,01 mg L^{-1}
Sólidos disueltos totales, máx.: 1500 mg L^{-1}
Sulfatos ($SO_4^=$) máx.: 400 mg L^{-1}
Cloro activo residual (Cl) mín.: 0,2 mg L^{-1}

La autoridad sanitaria competente podrá admitir valores distintos si la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario. En aquellas regiones del país con suelos de alto contenido de arsénico, la autoridad sanitaria competente podrá admitir valores mayores a 0,01 mg/l con un **límite máximo de 0,05 mg/l** cuando la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario; ello hasta contar con los resultados del estudio "Hidroarsenicismo y Saneamiento Básico en la República Argentina – Estudios básicos para el establecimiento de criterios y prioridades sanitarias en cobertura y calidad de aguas", cuyos términos fueron elaborados por la Coordinación Políticas Socioambientales de la Secretaría de Gobierno de Salud del Ministerio de Salud y Desarrollo Social y Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. La Comisión Nacional de Alimentos deberá recomendar el límite máximo admitido para dichas regiones del país en base a los estudios antes referidos.