

# **REMEDIACIÓN DEL AGUA DE LA CIUDAD DE LAS FLORES: ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA PARA LA SALUD PÚBLICA**

Facultad de Ingeniería

Proyecto Final de Graduación en Ingeniería Ambiental



**DIRECTOR:** Dra. María Ines Errea

**CO-DIRECTOR:** Dr. Jorge Daniel Stripeikis

**ALUMNO:** Ernestina Torres

# Agradecimientos

---

Si bien en el Proyecto Final sólo aparece mi nombre, es mucha la gente que me acompañó y ayudó a llegar a este gran logro personal.

Agradezco principalmente a mamá, papá y mi hermana por el apoyo que me brindaron, no sólo durante la carrera, sino siempre. Fueron mi sostén, motivación y palabra de aliento cuando ni yo confiaba en mí misma. Gracias también a mis abuelos, que si bien no están presentes físicamente, si lo están en mi corazón.

Agradezco a mi familia de sangre y del corazón por estar siempre presente para mí más de lo que yo esperaba.

Agradezco a mis amigas. A las de Las Flores porque siempre hacen notar su presencia a pesar de los kilómetros que nos separan, y a las de Mar del Plata porque además de acompañarme en esta etapa, me escucharon y alentaron cada vez que quería darme de baja de un parcial. Estoy muy agradecida de tenerlas en mi vida.

Agradezco a mis compañeros de clase, sin ellos este camino hubiera sido mucho más difícil y agotador. En mi corazón quedan para siempre las mañanas, tardes o noches de estudio pensando que no llegábamos a preparar una materia.

Agradezco a la Universidad FASTA, a los profesores que fueron inspiración durante este camino, a los técnicos del laboratorio del ITBA, que me dieron una mano cuando la necesitaba, y a los becarios del CIMA que me recibieron con tanta calidez e hicieron que me sienta cómoda en mi paso por el ITBA. Quiero agradecer, en especial, a mi directora de Proyecto Final, la Dra. María Inés Errea, quien me brindó su tiempo y conocimiento con gusto y predisposición. Gracias por las largas horas de Zoom compartidas. No solo fue de gran ayuda su acompañamiento, haciendo que este Proyecto no se vuelva tan solitario, sino que también me ayudó a mejorar mi pensamiento crítico. También quiero agradecerle al co-director del Proyecto el Dr. Jorge Daniel Stripeikis. Me siento privilegiada de haber compartido con él la parte de Química Analítica que correspondía a este Proyecto, me llevo muchas enseñanzas y conocimiento. De la misma manera quiero agradecerle al Dr. Ezequiel Rossi y Dr. Alejandro Ávila, por la ayuda en el diseño del Jar Test y las mediciones de arsénico, respectivamente. Por último quiero expresar mi agradecimiento al Intendente de la ciudad de Las Flores, el Ingeniero Alberto Gelené, por su amabilidad al recibirme y disposición para aclarar mis inquietudes.

Agradezco a cada una de estas personas, sin ellas hoy no sería quien soy como persona ni como futura profesional, hicieron que este camino fuera ameno y divertido. Gracias infinitas.

<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Recopilación de datos .....	2
1.2.1 Ocurrencia mundial.....	2
1.2.2 Ocurrencia en Argentina .....	4
1.3 Objetivos .....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
<b>Capítulo 2 Marco teórico</b> .....	6
2.1 El agua como recurso vital.....	6
2.2 Fuentes de agua en la naturaleza .....	6
2.2.1 Agua superficial .....	6
2.2.2 Agua subterránea .....	8
2.3 Arsénico .....	9
2.4 Los efectos del arsénico sobre la salud humana - hidroarsenicismo .....	9
<b>Capítulo 3 Caracterización socioambiental del área de estudio</b> .....	11
3.1 Área de estudio .....	11
3.2 Medio físico.....	12
3.2.1 Suelo .....	12
3.2.2 Hidrología superficial .....	13
3.3 Población .....	14
3.4 Fuentes de agua de consumo en el partido de Las Flores.....	14
3.5 Fuente de aguas de consumo en la ciudad de Las Flores .....	15
<b>Capítulo 4 Marco legal</b> .....	18
4.1. Legislación de aguas.....	18
4.1.1 Leyes y otras normas a nivel nacional .....	18
4.1.2. Leyes y otras normas a nivel de la provincia de Buenos Aires .....	22
<b>Capítulo 5 Materiales y métodos</b> .....	25
5.1 Localización de la toma de muestra .....	25

5.2 <i>Análisis físico-químico del agua</i> .....	26
5.2.1 Conductividad .....	26
5.2.2 Sólidos disueltos totales .....	27
5.2.3 Determinación del pH en agua.....	27
5.2.4 Determinación de la concentración de flúor .....	28
5.2.4 Alcalinidad .....	29
5.2.5 Cuantificación de cloruros .....	30
5.2.6 Nitratos.....	31
5.2.7 Determinación de dureza .....	31
5.2.8 Sulfatos .....	32
5.2.9 Arsénico .....	33
5.2.10 Jar Test .....	33
<b>Capítulo 6 Análisis de alternativas de remediación</b> .....	<b>36</b>
6.1 <i>Adsorción</i> .....	36
6.2 <i>Intercambio iónico</i> .....	37
6.3 <i>Ósmosis inversa</i> .....	38
6.4 <i>Coagulación/Floculación</i> .....	39
6.4.1 Coagulación .....	39
6.4.2 Floculación.....	40
6.4.3 Sedimentación.....	41
<b>Capítulo 7 Resultados, discusión y propuestas de mejora</b> .....	<b>42</b>
7.1. <i>Análisis de resultados del estudio físico químico de la muestra de agua de red de la ciudad de Las Flores</i> .....	42
7.1.1 Conductividad.....	42
7.1.2 Sólidos disueltos .....	42
7.1.3 Determinación del pH en agua.....	42
7.1.4 Determinación de la concentración de flúor .....	42
7.1.5 Alcalinidad .....	43
7.1.6 Cuantificación de cloruros .....	44
7.1.7 Nitratos.....	44
7.1.8 Determinación de dureza .....	46
7.1.9 Sulfatos .....	46
7.1.10 Arsénico .....	47

7.2 <i>Tabla resumen</i> .....	47
7.3 <i>Discusión de resultados y propuestas de mejora</i> .....	47
7.3.1 Jar Test.....	49
<b>Capítulo 8 Planta potabilizadora de agua</b> .....	<b>55</b>
8.1 <i>Planta potabilizadora</i> .....	55
8.1.2 Tanque estabilizador .....	56
8.1.3 Coagulación .....	57
8.1.4 Floculación.....	62
8.1.4 Sedimentación.....	65
8.1.5 Diagrama tecnológico .....	68
<b>Capítulo 9 Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>69</b>
9.1 <i>Conclusiones</i> .....	69
9.2 <i>Recomendaciones</i> .....	69
<b>Bibliografía</b> .....	<b>70</b>

# Capítulo 1

## Introducción

---

### 1.1 Planteamiento del problema

El arsénico (As) es un metal que se encuentra naturalmente presente en la corteza terrestre y se moviliza hacia los cursos de agua, por ejemplo, como consecuencia de la meteorización de sedimentos de cenizas originadas por las erupciones volcánicas (Curto, Plastina & Rolando, 2001), por lo que la contaminación de las aguas subterráneas con este metal es mayoritariamente de origen geológico. Lamentablemente, la Argentina es el país con mayor superficie de aguas subterráneas con niveles alarmantes de este elemento (1.000.000 de km<sup>2</sup>) con concentraciones que llegan a los 3810 µg/l (ppb) en el noroeste de la provincia de Córdoba (Curto, Plastina & Rolando, 2001).

Este valor cobra dimensión si se lo compara con el del límite permitido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establece un límite tolerable de 10 ppb, y por el Código Alimentario Argentino (CAA), el cual a través del Artículo 982 (2007) concuerda con ese valor (Macrini, Matranga & Minaverri, 2016).

La exposición al As a valores mayores de los recomendados por la OMS por un período mayor a 5 años es la causa de una enfermedad denominada Hidroarsenicismo Crónico (HACRE) (Navoni et al., 2014).

Por todo lo expuesto anteriormente, el tratamiento adecuado del agua para consumo humano es esencial, así como también, alertar a la población en los casos en los cuales el agua a la que tengan acceso contenga una concentración de arsénico que supere los valores establecidos como seguros por los organismos mencionados en el párrafo anterior.

El CAA en su capítulo XII, Artículos: 982 al 1079 establece: “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 sustancias 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”.

En la provincia de Buenos Aires, la ciudad de Las Flores se abastece del acuífero Pampeano (Borzi et al., 2014) que contiene concentraciones de arsénico superiores a las permitidas, tanto por el CAA como por la OMS. Lamentablemente, los tratamientos de agua de la red pública

de la ciudad no incluyen o no son eficientes para la remoción de arsénico, por lo que en el agua de red se han llegado a detectar concentraciones de este metal mayores a 70 ppb (dato extraído de estudio realizado en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA) y también mencionado en la entrevista personal con el actual Intendente de la ciudad de Las Flores, el Ingeniero Alberto Gelené), que, como se mencionó anteriormente, es una concentración de alto riesgo para la salud. Además, la factura de agua no aclara que no es agua apta para consumo, exacerbando de esa manera el riesgo para la población.

En este contexto, el objetivo de este Proyecto Final es presentar una alternativa de remediación del agua de red en la ciudad de Las Flores, para intentar disminuir la vulnerabilidad de la población de esa ciudad frente al consumo de agua arsenical desconociendo los riesgos a los que está expuesta.

## **1.2 Recopilación de datos**

### **1.2.1 Ocurrencia mundial**

La contaminación de aguas subterráneas con arsénico afecta a más de 296 millones de personas en más de 100 países de todo el mundo (Chakrabarti et al., 2019).

En 2006, se relevó que en el agua de consumo de 70 países se encontraron concentraciones de arsénico por encima del valor de referencia estipulado por la OMS de 10 ppb.

Si bien la OMS no recomienda el consumo de agua con valores de arsénico superiores a los 10 ppb, algunos países desarrollados establecieron valores aún menores, como Australia (7 ppb). Mientras que otros países aún no acataron la recomendación de la OMS. Actualmente, 107 países (Figura 1) en todo el mundo han informado de concentraciones moderadas a altas de arsénico en el agua subterránea (Chakrabarti et al., 2019).

En América Latina, la problemática de la contaminación del agua con arsénico es reconocida en 14 de los 20 países: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Perú y Uruguay (Bundschuh, Pérez Carrera & Litter, 2008).

Para concluir, se puede afirmar que la presencia de arsénico en el agua de consumo es un problema de salud pública a nivel mundial. Es importante destacar que la mayoría de los países aún no cuentan con regulaciones estrictas para limitar los niveles de arsénico en el agua potable, lo que representa un desafío para la salud pública y el bienestar de la población. En este sentido, mejorar la calidad del agua es una prioridad urgente y debe ser abordada de manera integral a

través de políticas públicas efectivas y programas de monitoreo y control de la calidad del agua potable.

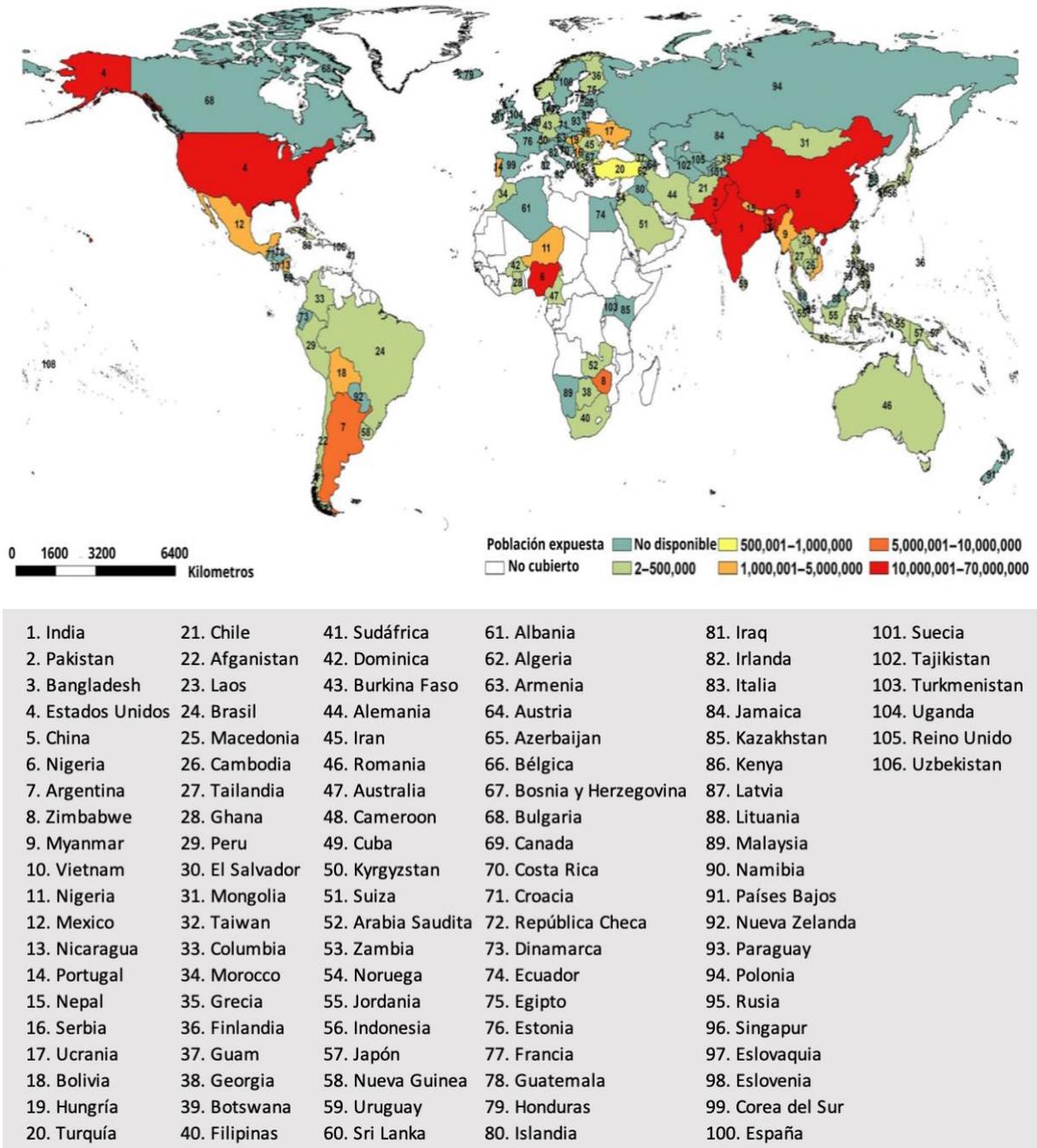


Figura 1. Situación actual de contaminación por arsénico en aguas subterráneas a nivel mundial y población potencialmente expuesta. Chakrabarti et al. (2019)

## 1.2.2 Ocurrencia en Argentina

La Figura 2 muestra un mapa realizado por el ITBA, el cual, ha elaborado el primer mapa colaborativo de contaminación del agua con arsénico en Argentina. Desde 2011, el equipo de investigación liderado por el Dr. Jorge Daniel Stripeikis ha analizado más de 400 muestras de agua para detectar la presencia de arsénico en el consumo o uso agropecuario. Los resultados indican que más de la mitad de los lugares evaluados presentan niveles de arsénico por encima del nivel guía recomendado por la OMS para prevenir el hidroarsenicismo. El mapa asigna un color (verde, amarillo o rojo) de acuerdo con el nivel de arsénico detectado en el agua. Si el agua no supera los 10 ppb, el color asignado es verde. Si supera ese nivel, el color será amarillo (10-50 ppb) o rojo (más de 50 ppb). Hasta ahora, en 122 muestras de agua de 20 provincias argentinas se detectaron niveles de arsénico mayores a los permitidos a los recomendados para el agua de consumo.

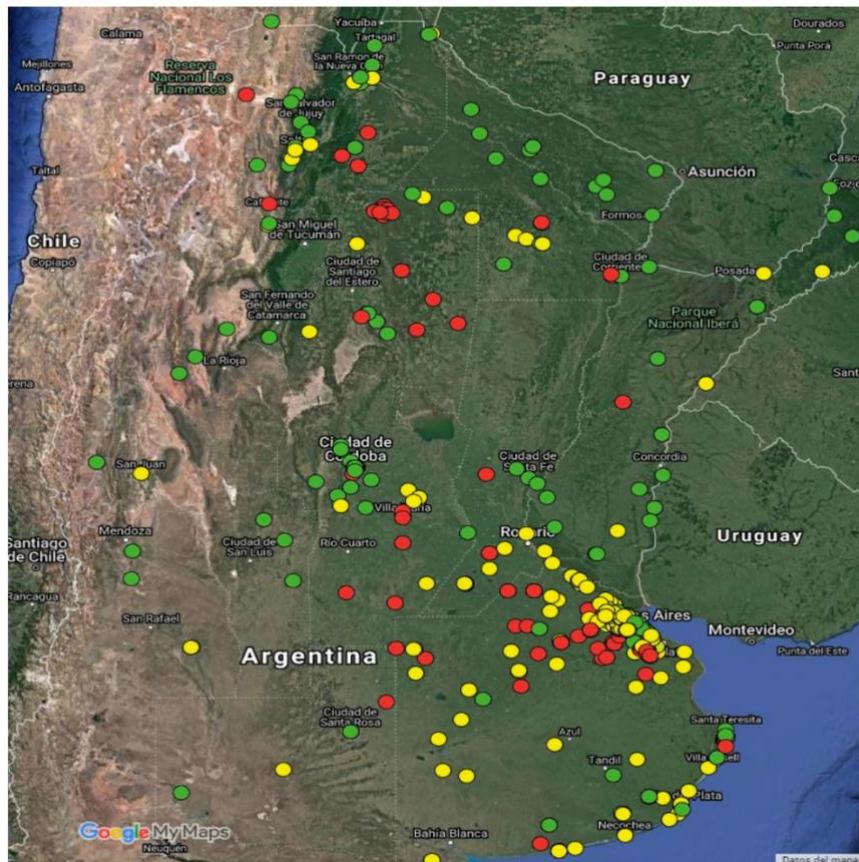


Figura 2. Mapa con los resultados de las mediciones de arsénico realizadas en el Centro de Ingeniería en Medio Ambiente (CIMA), perteneciente al ITBA, en colaboración con NutriRed.

Es de carácter alarmante la cantidad de lugares que presentan niveles peligrosos de arsénico en el agua de consumo y, por lo tanto, es necesario que se tomen medidas para reducir estos niveles y garantizar el acceso de agua segura para toda la población.

## **1.3 Objetivos**

### **Objetivo General**

Teniendo en cuenta todas las consideraciones del inciso anterior, el objetivo general de este Proyecto Final es presentar y hacer una discusión crítica de las distintas alternativas de remediación de aguas con alto contenido de arsénico que se encuentran disponibles en la bibliografía, con la finalidad de proponer una solución factible, específicamente, para la problemática de la ciudad de Las Flores.

### **Objetivos Específicos**

- Evaluar la calidad del agua de red provista por la empresa Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA) de la ciudad de Las Flores, analizando la concentración de arsénico entre otros parámetros fisicoquímicos.
- Comparar los datos de la muestra analizada con los del marco legal correspondiente.
- Proponer un tratamiento para el agua de red, contemplando los resultados de los análisis fisicoquímicos, la densidad poblacional de la ciudad de Las Flores y la infraestructura de abastecimiento que actualmente existe en esa ciudad.

### **2.1 El agua como recurso vital**

El agua es un recurso vital e imprescindible para el desarrollo y sobrevivencia de todos los organismos vivos en el planeta. Sin embargo, lamentablemente, si bien es un recurso renovable, a la vez es un recurso escaso (Agudelo, 2005).

La mayoría del agua en el planeta se encuentra en los mares, mientras que sólo un 2,5% es agua dulce. De ese 2,5%, el 79% está en forma de hielo permanente en los polos y glaciares, lo que la hace inaccesible para su uso. Por otra parte, del 21 % de agua dulce en estado líquido disponible en el planeta, el 20% se encuentra en acuíferos profundos, de difícil acceso y sólo el 1% restante es agua superficial fácilmente accesible, de la cual la mayoría de la población mundial debe abastecerse. Es decir que sólo el 0,025% del agua total disponible en el planeta, es agua dulce y fácilmente accesible (Agudelo, 2005; Greenpeace, 2015).

Si bien el acceso al agua potable es un derecho humano básico reconocido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), según un informe de la ONU de 2020, cerca de 2.200 millones de personas en el mundo no tienen acceso a agua de consumo gestionada de forma segura. Estos datos evidencian la necesidad de seguir trabajando en la gestión y acceso a la misma, y en la mejora de los sistemas de tratamiento y saneamiento para evitar la propagación de enfermedades y proteger la salud pública.

### **2.2 Fuentes de agua en la naturaleza**

#### **2.2.1 Agua superficial**

El agua superficial es aquella que se encuentra en la superficie terrestre, como ríos, lagos y lagunas, debido a la escorrentía y la precipitación. Se divide en dos tipos: agua corriente (lóticas) y agua estacionaria (lénticas). Las aguas corrientes, como los ríos y arroyos, tienen un movimiento ondulatorio y fluyen en una dirección. Por otro lado, las aguas estacionarias, como los lagos y lagunas, no tienen un flujo continuo (Ruiz de Galarreta & Rodríguez, 2015).

La contaminación de los cuerpos de agua ha ido aumentando en los últimos años a causa del crecimiento poblacional, la acelerada urbanización y el desarrollo económico. Si bien las industrias constituyen una importante fuente de contaminación, debido a que en muchos casos vierten sus residuos directamente en los cursos de agua superficiales sin el adecuado

tratamiento de efluentes, la contaminación de estos cursos de agua puede ser también consecuencia de:

- Escorrentía proveniente de la lluvia, ya que el agua que corre sobre las superficies impermeables, como calles, estacionamientos y techos, recoge contaminantes como aceites de motor, metales pesados, productos químicos y otros desechos antes de desembocar en los cuerpos de agua cercanos (Kumar & Sharma, 2020).
- Agricultura, debido a que los productos químicos utilizados en la agricultura, como pesticidas y fertilizantes, pueden ser arrastrados por el agua de lluvia y de riego y desembocar en los cuerpos de agua cercanos (Kumar & Sharma, 2020).

Si bien, tanto ríos y arroyos como lagos y lagunas, se encuentran expuestos a las fuentes de contaminación mencionadas, los últimos son más vulnerables debido a las siguientes razones:

- Flujo de agua, ya que el flujo constante de agua en los ríos y arroyos puede acelerar el transporte de contaminantes, lo que a su vez puede favorecer su dispersión en comparación con los lagos y lagunas. En los ríos y arroyos, la corriente constante arrastra rápidamente los contaminantes, lo que permite que se dispersen y se diluyan en el agua de manera más efectiva. Por otro lado, en los lagos y lagunas, el movimiento del agua es más lento, e incluso puede estancarse en algunas áreas, lo que limita la dispersión de los contaminantes y puede resultar en una mayor acumulación y concentración de los mismos en el agua (P. Venugopala Rao, 2012).
- Ecosistemas acuáticos, debido a que los lagos y lagunas a menudo albergan ecosistemas acuáticos delicados y sensibles. La presencia de contaminantes en estos cuerpos de agua puede tener un impacto significativo en la biodiversidad y en las especies que dependen de ellos. La vida acuática en lagos y lagunas puede ser más susceptible a los efectos adversos de la contaminación, lo que puede llevar a la degradación del ecosistema en general (P. Venugopala Rao, 2012).

Por otra parte, hay que tener en cuenta también, que la cercanía de los cursos de agua a áreas urbanas e industriales donde se producen más contaminantes, aumenta la probabilidad de contaminación de los mismos, ya se trate de ríos, arroyos o lagunas (Kumar & Sharma, 2020).

### 2.2.2 Agua subterránea

El agua subterránea se encuentra debajo de la superficie terrestre y es almacenada en acuíferos. Los acuíferos son estratos o formaciones geológicas que permiten el flujo de agua a través de sus poros o grietas. El agua se acumula en estos acuíferos a través de la infiltración de las precipitaciones en su área de recarga (Ruiz de Galarreta & Rodríguez, 2015). Los acuíferos pueden ser clasificados en dos tipos según su comportamiento hidráulico: libres y confinados.

Los acuíferos libres tienen una base limitada por rocas de baja permeabilidad y están delimitados por el nivel freático en la parte superior. La presión del agua en estos acuíferos es igual a la presión atmosférica y está en contacto directo con la atmósfera a través de la zona de aireación. Esto facilita su extracción, pero también los hace más vulnerables a la contaminación.

En cambio, el acuífero confinado se encuentra entre dos capas de suelo prácticamente impermeables, lo que impide que la presión atmosférica actúe sobre él. Como resultado, la presión dentro del acuífero es mayor. Estos acuíferos tienen una “zona de recarga” por donde el agua ingresa y se mueve para su recarga por lluvia y descarga en una zona específica llamada “área de descarga” (Ruiz de Galarreta y Rodríguez, 2015). El agua contenida en los acuíferos confinados es mucho más inaccesible, pero a la vez menos susceptible a la contaminación antropogénica.

Por otra parte, es importante recordar que debido a que la calidad del agua subterránea puede verse afectada por contaminantes de origen geológico (como es el caso del arsénico), independientemente de su origen, el agua siempre debe ser analizada antes de su consumo.

Es importante destacar que, si bien el agua subterránea es una fuente importante de agua para muchas comunidades en todo el mundo, la explotación de los acuíferos debe ser gestionada de manera sostenible para asegurar la disponibilidad del agua a largo plazo. La sobreexplotación de los mismos puede llevar a la disminución del nivel freático y a la intrusión de agua salada en los acuíferos costeros. Además, la extracción excesiva de agua puede causar daños en los ecosistemas terrestres y acuáticos que dependen de la disponibilidad de agua subterránea.

## 2.3 Arsénico

Como se mencionó anteriormente, la presencia de arsénico en el agua puede ser:

- Natural: por ejemplo, ascenso de fluidos magmáticos e hidrotermales, emisiones volcánicas a la atmósfera, desorción y disolución de minerales con arsénico durante la meteorización. Estudios geoquímicos de suelos y sedimentos indican que el arsénico en aguas subterráneas de Argentina proviene de los sedimentos del Cenozoico, constituyentes de los principales acuíferos, y de los fragmentos de vidrios volcánicos presentes en dichos sedimentos.
- Antropogénica: minería, procesos metalúrgicos, combustión de combustibles fósiles, uso de plaguicidas y productos químicos que se utilizan para preservar el estado de la madera como arseniato de cobre y cromo.

(Curto, Plastina & Rolando, 2001; Ferreccio et al., 2000; Cáceres, Gruttner & Contreras, 1992; Bissen & Frimmel, 2003; De Gregori et al., 2003; Cáceres, 2005).

En el agua predominan los compuestos inorgánicos de arsénico en dos posibles estados de oxidación: arsenito (III) y arseniato (V) (Auge, 2009). El estado de oxidación en el que se encuentra el arsénico presente en el agua depende del pH y del entorno redox. En lugares donde prevalecen condiciones oxidantes y el pH es neutro o tiende a la alcalinidad, predomina el arsénico en su forma de arseniato (V). En cambio, en algunas aguas subterráneas con condiciones reductoras localizadas espacialmente, el arsénico está mayoritariamente presente en su forma más tóxica, As(III) (Smedley & Kinniburgh, 2002; Bissen & Frimmel, 2003). Es importante aclarar que aunque el arsenito (III) es más tóxico que el arseniato (V), esta forma de arsenito (III) no es el estado predominante del arsénico en las aguas subterráneas en general, sino solo en algunas zonas concretas y limitadas (Argos et al., 2011).

## 2.4 Los efectos del arsénico sobre la salud humana - hidroarsenicismo

Como se mencionó en el capítulo 1 en la sección planteamiento del problema, la exposición prolongada al arsénico, en general como consecuencia del consumo de agua con niveles excesivos de este elemento, conduce al desarrollo de la enfermedad crónica HACRE, que se manifiesta principalmente por alteraciones dermatológicas (especialmente palmoplantares) y viscerales. El cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón, enfermedades cardiovasculares, problemas neurológicos y problemas reproductivos, han sido también afecciones a la salud relacionadas con la exposición crónica al arsénico (Bocanegra et al., 2002).

Dado que el hidroarsenicismo crónico es un grave problema de salud pública se debe abordar de manera proactiva, es decir mediante el monitoreo del agua de consumo, y la detección temprana brindando atención médica y apoyo a las personas afectadas.

La colaboración entre gobiernos, industrias, organizaciones de la sociedad civil y la comunidad científica es fundamental para abordar este problema de manera efectiva y garantizar el derecho humano al agua potable y a la salud.

## Caracterización socioambiental del área de estudio

### 3.1 Área de estudio

La ciudad de Las Flores es la localidad cabecera del partido de Las Flores, que se encuentra ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires (Figura 3).



Figura 3. Geolocalización de la ciudad de Las Flores. Elaboración propia (2023).

Según el Plan de Ordenamiento Territorial, el partido está dividido en áreas urbanas, complementarias y rurales. Las áreas urbanas son las de la ciudad de Las Flores y la de las localidades de Pardo, Rosas y El Trigo. Existen manzanas urbanas parceladas y parcelas de tamaño y tipo urbano en sitios no categorizados como urbanos en distintos lugares del partido, en cuyos predios se admite la localización de una vivienda unifamiliar, comercio o taller, excepto que la actividad esté prohibida en la zona o que cuente con reglamentación y afectación de uso particularizada. Las áreas complementarias se localizan en la ciudad de Las Flores y en

Rosas. El área rural es la conformada por el resto del territorio del partido, es decir la que no integra áreas urbanas o complementarias.

En la ciudad de Las Flores y en muchas otras ciudades del interior de la provincia de Buenos Aires, el agua de red es abastecida por ABSA. Esta empresa toma agua del acuífero Pampeano en diferentes puntos del partido. El agua recolectada de los diferentes pozos llega a la planta y es depositada en el tanque principal, donde se lleva a cabo el proceso de cloración. Para esto, ABSA cuenta con una bomba dosificadora de cloro, que bombea la cantidad de cloro necesaria en función del volumen de agua que haya en el tanque. Es un proceso automático y continuo (se efectúa las 24 horas del día).

## **3.2 Medio físico**

### **3.2.1 Suelo**

La ciudad de Las Flores es parte de la región de la llanura Chaco-Pampeana, en la que las aguas subterráneas presentan problemas de calidad debido a la alta salinidad y dureza, conjuntamente con la presencia de elementos potencialmente tóxicos como el arsénico, flúor, bario y vanadio (Díaz et al., 2015).

En esta región, los recursos hídricos subterráneos presentan arsénico en niveles superiores al umbral aceptado, situación particularmente preocupante en el acuífero freático el que, por su fácil acceso, es el más explotado por la población que carece de conexión a las red de ABSA (Díaz et al., 2015).

#### **3.2.1.1. Arsénico en la llanura Chaco-Pampeana**

La llanura Chaco-Pampeana es una de las regiones más grandes del mundo con contenido de arsénico en toda su extensión, tal como se puede observar en la Figura 4 (Puntoriero, Volpedo & Fernández Cirelli, 2014). Sin embargo, hay una gran heterogeneidad en las concentraciones de arsénico en el agua subterránea, por ejemplo, en el acuífero Pampeano, las concentraciones pueden encontrarse en el rango entre 10-400 ppb y en el acuífero Puelche son menores a 10 ppb. Esta heterogeneidad en la concentración de arsénico de la región, hace imperioso el estudio de los cursos de agua de cada zona en particular, para establecer políticas adecuadas para la protección de la salud pública, así como también de la flora y la fauna de la región (Puntoriero, Volpedo & Fernández Cirelli, 2014).

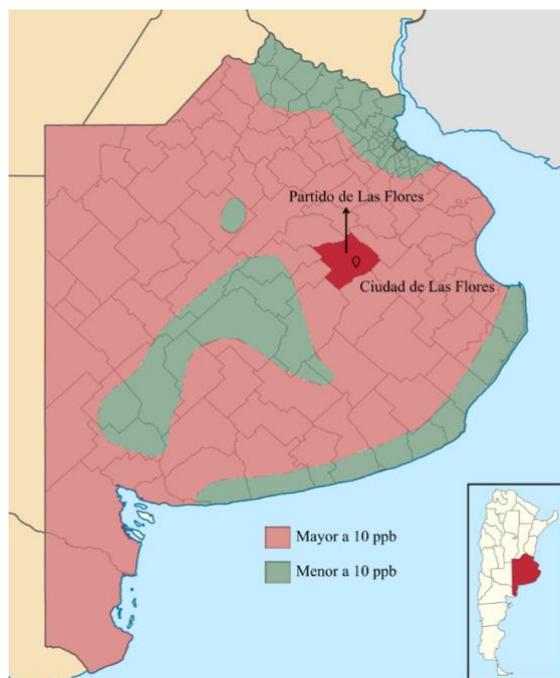


Figura 4. Distribución del arsénico en la provincia de Buenos Aires y alrededores. Elaboración propia (2023).

Esta región es de particular interés para este Proyecto Final, ya que en ella se encuentra la ciudad de Las Flores, en la que se centra este Proyecto. En particular esta ciudad se abastece del acuífero Pampeano, y se han reportado valores de arsénico en aguas subterráneas mayores a las consideradas seguras para su consumo.

### 3.2.2 Hidrología superficial

Sobre el sector septentrional de la provincia de Buenos Aires se sitúa la subcuenca del Río Salado, como se puede ver en la Figura 5, que ocupa también la parte sur de la provincia de Santa Fe y una pequeña porción de Córdoba totalizando una superficie de 87.775 km<sup>2</sup>, aproximadamente. La ciudad de Las Flores, pertenece a esta cuenca.

El Río Salado desemboca al Río de la Plata en la Ensenada de Samborombón, luego de recorrer unos 650 km desde sus nacientes situadas al sudeste de la provincia de Santa Fe y Córdoba, a una altura de 75 metros aproximadamente (Giraut et al., 2000).

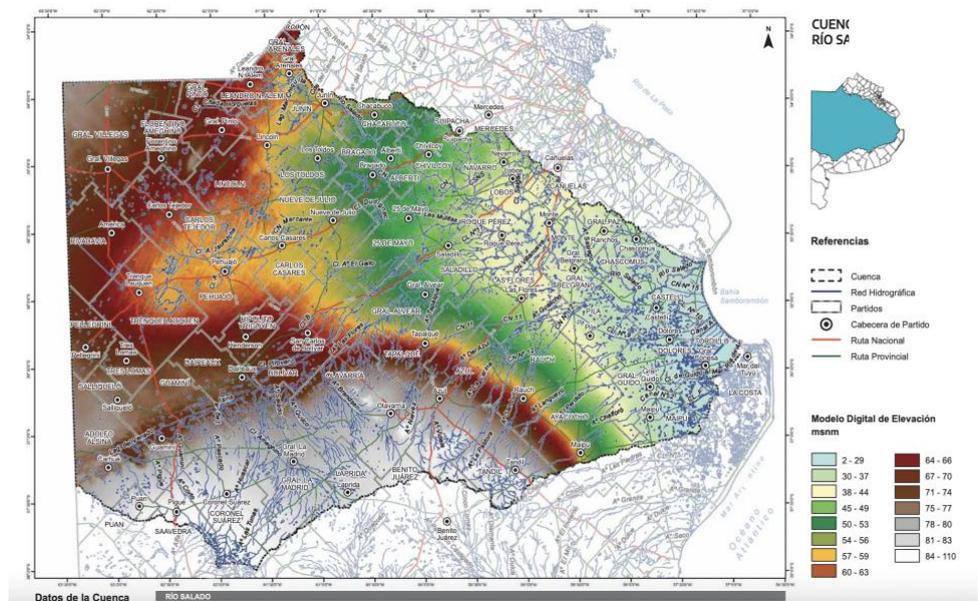


Figura 5. Cuenca hidrográfica Río Salado. Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos (2020).

La cuenca del Río Salado tiene un sistema fluvial y de drenaje natural poco desarrollado debido a su relieve plano y la falta de energía en el sistema. Esta falta de energía puede llevar a la acumulación de sedimentos y sustancias químicas, incluido el arsénico, en los cuerpos de agua.

Además, la presencia predominante de vientos en gran parte de la cuenca sugiere que el sistema aún se está adaptando a las condiciones actuales, que son más húmedas que en el pasado (Iriondo & Kröhling, 2007)

### 3.3 Población

Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (INDEC) del año 2022 el partido de Las Flores cuenta con 30.109 habitantes y la ciudad posee 26.651 habitantes (INDEC, 2022).

### 3.4 Fuentes de agua de consumo en el partido de Las Flores

A partir de los datos presentados en la Tabla 1, se puede concluir que el 10,74% de los 8.213 hogares del partido (882 hogares en total) obtienen su agua a través de pozos, perforaciones con motor o bomba, cisternas u otros medios alternativos a la red pública. Por otro lado, el 89,26% de los hogares (7.331 hogares en total) reciben agua corriente suministrada por la compañía ABSA.

<b>Provisión y procedencia de agua</b>	<b>Total de hogares</b>
Total	8.213
<b>Por cañería dentro de la vivienda</b>	<b>7.735</b>
Red pública	7.054
Perforación con bomba de motor	497
Perforación con bomba manual	58
Pozo (aljibe)	120
Transporte por cisterna	6
Agua de lluvia, río, canal o acequía	-
<b>Fuera de la vivienda pero dentro del terreno</b>	<b>420</b>
Red pública	261
Perforación con bomba de motor	38
Perforación con bomba manual	95
Pozo (aljibe)	26
Transporte por cisterna	-
Agua de lluvia, río, canal o acequía	-
<b>Fuera del terreno</b>	<b>58</b>
Red pública	16
Perforación con bomba de motor	6
Perforación con bomba manual	14
Pozo (aljibe)	16
Transporte por cisterna	1
Agua de lluvia, río, canal o acequía	5

Tabla 1. Hogares del partido por tipo de abastecimiento de agua. INDEC (2010)

### 3.5 Fuente de aguas de consumo en la ciudad de Las Flores

ABSA cuenta con 18 pozos de extracción en la ciudad (geolocalizados en Figura 7 y detallados en Tabla 2) de los cuales se encuentran en funcionamiento 17 (ABSA Las Flores, 2016). Como se mencionó anteriormente, el agua extraída de estos pozos se dirige a una torre tanque de almacenamiento en forma de cisterna (Figura 6) que se encuentra ubicada en la Avenida Francisco Carramaza 358 (señalada en azul en la Figura 7).



Figura 6. Torre tanque de almacenamiento de agua para distribución en hogares. Elaboración propia (2022)

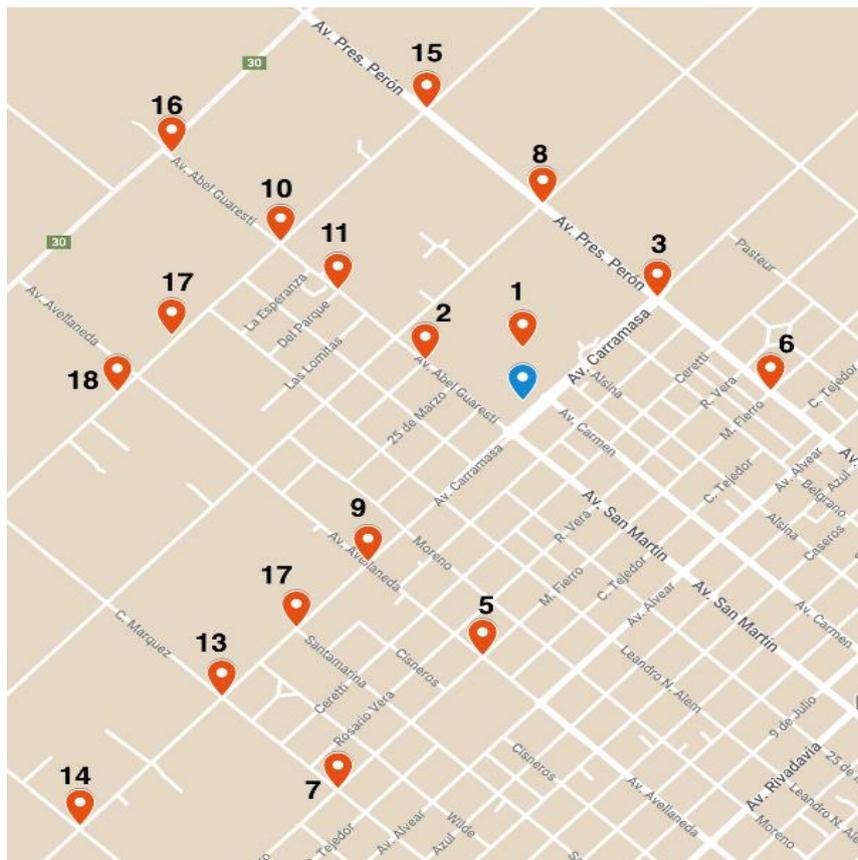


Figura 7. Plano de la ciudad de Las Flores con ubicación de pozos de abastecimiento de ABSA y torre tanque de almacenamiento señalada en azul. Elaboración propia (2023).

<b>Ubicación pozos abastecimiento ABSA</b>	
1	Carramasa y Carmen
2	Peredo y Guaresti
3	Carramasa y Perón
4	-----
5	Avellaneda y Martín Fierro
6	Perón y Martín Fierro
7	Cruz Marquez y Martín Fierro
8	Los Manzanares y Perón
9	Carramasa y Avellaneda
10	Del Oeste y Guaresti
11	Del Parque y Guaresti
12	Carramasa y Santamarina
13	Carramasa y Cruz Marquez
14	Carramasa y Lucangioli
15	Perón y Del Oeste
16	Guaresti y Ruta Provincial 30
17	Del Oeste y Moreno
18	Del Oeste y Cisneros

Tabla 2. *Ubicación de pozos de abastecimiento ABSA. Mertens Fernanda (2018)*

### **4.1. Legislación de aguas**

#### **4.1.1 Leyes y otras normas a nivel nacional**

##### **Ley 27.275, Ley de Acceso a la Información Pública**

La Ley número 27.275 establece que toda persona humana o jurídica, pública o privada, tiene derecho a solicitar y recibir información pública, no pudiendo exigirse al solicitante que motive la solicitud, que acredite derecho subjetivo o interés legítimo o que cuente con patrocinio letrado.

Dicho marco legal resulta fundamental en el contexto de la problemática en cuestión, ya que permite a la población de Las Flores exigir información sobre la calidad del agua y sus potenciales riesgos para la salud sin necesidad de exponer los motivos de su solicitud.

En este sentido, resulta también pertinente mencionar el Acuerdo de Escazú, primer acuerdo regional ambiental de América Latina y el Caribe, el cual establece disposiciones específicas sobre la protección de los derechos humanos en asuntos ambientales. Entre sus objetivos, se encuentra el garantizar el acceso a la información ambiental, la participación pública en los procesos de toma de decisiones ambientales y el acceso a la justicia en asuntos ambientales. Asimismo, el Acuerdo busca contribuir a la protección del derecho a un ambiente sano y al desarrollo sostenible de las generaciones presentes y futuras.

En el contexto de la problemática con el arsénico en Las Flores, resulta evidente que la población no cuenta con un acceso efectivo a la información sobre la calidad del agua. En este sentido, se puede afirmar que las disposiciones del Acuerdo de Escazú no están siendo plenamente aplicadas, lo que constituye una vulneración de los derechos humanos en asuntos ambientales. Es necesario, por tanto, promover la aplicación efectiva de este acuerdo en la ciudad de Las Flores, para así garantizar el derecho a la información y a un ambiente sano.

##### **Ley N° 25.688, Régimen de Gestión Ambiental de Aguas**

La Ley número 25.688 establece los presupuestos mínimos ambientales que se necesitan para lograr la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional.

La legislación nacional es quien establece los presupuestos mínimos de protección, los cuales constituyen los “umbrales básicos” sobre los cuales las provincias regularán sus

necesidades específicas mediante el dictado de las “normas complementarias” que nunca podrán estar debajo de dicho umbral.

Además, esta ley, en su segundo artículo, fundamenta que se entiende por agua a aquella que forma parte del conjunto de los cursos y cuerpos de aguas naturales o artificiales, superficiales y subterráneas, así también como a las contenidas en los acuíferos, ríos subterráneos y las atmosféricas.

Determina a las cuencas hídricas como unidades ambientales de gestión del recurso e indivisibles.

Para las cuencas interjurisdiccionales, ordena la creación de los comités de cuencas hídricas con el fin de brindar asesoramiento a la autoridad competente en materia de recursos hídricos y colaborar en la gestión ambientalmente sustentable de las cuencas hídricas.

Se entiende por utilización de las aguas a la toma y desviación de aguas superficiales; el estancamiento, modificación en el flujo o la profundización de las aguas superficiales; la toma de sustancias sólidas o en disolución de aguas superficiales, siempre que tal acción afecte el estado o calidad de las aguas o su escurrimiento; la colocación, introducción o vertido de sustancias en aguas superficiales, siempre que tal acción afecte el estado o calidad de las aguas o su escurrimiento; la colocación e introducción de sustancias en aguas costeras, siempre que tales sustancias sean colocadas o introducidas desde tierra firme, o hayan sido transportadas a aguas costeras para ser depositadas en ellas, o instalaciones que en las aguas costeras hayan sido erigidas o amarradas en forma permanente; la colocación e introducción de sustancias en aguas subterráneas; la toma de aguas subterráneas, su elevación y conducción sobre tierra, así como su desviación; el estancamiento, la profundización y la desviación de aguas subterráneas, mediante instalaciones destinadas a tales acciones o que se presten para ellas; las acciones aptas para provocar permanentemente o en una medida significativa, alteraciones de las propiedades físicas, químicas o biológicas del agua; modificar artificialmente la fase atmosférica del ciclo hidrológico.

Es de vital importancia destacar la relevancia de esta ley a la hora de establecer los presupuestos mínimos que corresponden a cada provincia para preservar, mantener y utilizar de manera racional los recursos hídricos. Además, la normativa en cuestión ofrece una definición precisa del concepto de agua y de las cuencas hídricas superficiales, así como su gestión y manejo.

Teniendo en cuenta los objetivos del presente Proyecto Final, centrados en la mejora de la salud pública en la ciudad de Las Flores en relación con el consumo de agua, resulta pertinente

mencionar la preocupación principal de la ley en cuestión, que radica en resolver problemáticas vinculadas con la preservación del recurso hídrico.

### **Ley N° 11.820**

La Ley número 11.820 regula las actividades de captación y potabilización, transporte, distribución y comercialización de agua potable, tratamiento, disposición y comercialización de desagües cloacales. Asimismo, la ley regula el sistema de concesión de los servicios sanitarios de jurisdicción provincial.

En las Tablas 3 y 4 se indica el límite tolerable de parámetros físico-químicos acorde a lo establecido por esta ley.

<b>COMPONENTES (Componentes inorgánicos)</b>	<b>LIMITE TOLERABLE (ppb)</b>
Arsénico	50
Cadmio	3
Cianuro	70
Cobre	2000
Cromo total	50
Fluor	1500
Manganeso	500
Mercurio (total)	1
Nitrato (como NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	50000
Nitrito (como NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	3000
Plomo	10
Selenio	10
Plata	50

Tabla 3. Límite tolerable de componentes inorgánicos según Ley N° 11.820.

<b>COMPONENTES</b>	<b>LIMITE TOLERABLE (ppb)</b>
Aluminio	200
Cinc	3000
Cloruro	250000
Hierro	300
Sodio	200000
Sulfato	250000
Solidos disueltos totales	1500000

Tabla 4. *Límite tolerable de parámetros físico-químicos según Ley N° 11.820.*

## **Ley N° 23.696 de Emergencia Administrativa y Privatizaciones**

Mediante esta ley, sancionada y promulgada en agosto de 1989, se declara en su Artículo 1 el estado de emergencia a la prestación de servicios públicos la ejecución de los contratos a cargo del sector público y la situación económica financiera de la Administración Pública Nacional centralizada y descentralizada, entidades autárquicas, empresas del Estado, Sociedades del Estado, Sociedades anónimas con participación Estatal Mayoritaria, Sociedades de Economía Mixta, Servicios de Cuentas Especiales, Obras Sociales del Sector Público bancos y entidades financieras oficiales, nacionales y/o municipales y todo otro ente en que el Estado Nacional o sus entes descentralizados tengan participación total o mayoritaria de capital o en la formación de las decisiones societarias.

Está ley es relevante para este proyecto, dado que da un marco de cómo en la ciudad de Las Flores se organizó la prestación de los servicios públicos. Así, es que como en ésta y otras ciudades, lo que se conocía hasta el momento como Obras Sanitarias de la Nación, pasó a constituir la empresa Azurix S.A de capital privado entre junio de 1999 y marzo de 2002 mediante un contrato de concesión el 30 de junio de 1999 entre el Poder Ejecutivo de la provincia de Buenos Aires, representado por el Gobernador de ese entonces, Eduardo Duhalde. Luego de su rescisión en mismo año y mes, mediante el decreto 517/02 asume la concesión la empresa ABSA hasta la actualidad, encargada de brindar los servicios de agua potable y desagües cloacales a 62 partidos de la provincia de Buenos Aires.

## **Artículo N° 2.340 del Código Civil de la Nación, Ley N° 340**

Establece que se considerará como bienes públicos, entre otros, a los ríos, sus cauces, las demás aguas que corren por cauces naturales y toda otra agua que tenga o adquiriera la aptitud de satisfacer usos de interés general, comprendiéndose las aguas subterráneas, sin perjuicio del ejercicio regular del derecho del propietario del fundo de extraer las aguas subterráneas en la medida de su interés y con sujeción a la reglamentación.

El Artículo 2.340 del Código Civil de la Nación establece la importancia de la regulación y control del uso de las aguas que satisfacen intereses generales, como las aguas subterráneas, para garantizar un ambiente sano para la población. Esto implica el cumplimiento de normas y pautas, como las establecidas en la Ley 11.820, para la protección de la calidad y cantidad de las aguas.

## **Artículo 200 del Código Penal de la Nación, Ley N° 11.179**

El Artículo 200 del código Penal establece que “será reprimido con reclusión o prisión de tres (3) a diez (10) años y multa de pesos diez mil (\$10.000) a pesos doscientos mil (\$200.000), el que envenenare, adulterare o falsificare de un modo peligroso para la salud, aguas potables o sustancias alimenticias o medicinales destinadas al uso público o al consumo de una colectividad de personas”.

Siguiendo con lo antes mencionado, es importante mencionar este artículo del Código Penal, porque no solo se necesitan leyes que regulen la forma de llevar a cabo los procedimientos, sino también que se pueda sancionar el mal accionar dentro del manejo de las aguas de consumo de una colectividad de personas. Esto sirve para concientizar a la población y al gobierno sobre la importancia de cuidar estos recursos.

### **4.1.2. Leyes y otras normas a nivel de la provincia de Buenos Aires**

#### **Ley N° 11.723/95 de Medio Ambiente, también llamada Ley Marco, conforme al artículo 28 de la Constitución de la provincia**

Esta ley, en conformidad con el Artículo 28 de la Constitución de la provincia de Buenos Aires, tiene por objeto “la protección, conservación, mejoramiento y restauración de los recursos naturales y del ambiente en general en el ámbito de la provincia de Buenos Aires, a fin de preservar la vida en su sentido más amplio; asegurando a las generaciones presentes y futuras la conservación de la calidad ambiental y la diversidad biológica”.

Todos los habitantes de la provincia de Buenos Aires tienen el derecho a gozar de un ambiente sano, adecuado para el desarrollo armónico de la persona; a la información vinculada

al manejo de los recursos naturales que administre el Estado y a participar de los procesos en que esté involucrado el manejo de los recursos naturales y la protección, conservación, mejoramiento y restauración del ambiente en general, de acuerdo con lo que establezca la reglamentación de la presente. Estableciendo que, para prevenir cualquier impacto ambiental derivado de las actividades humanas deberá contar todo proyecto con una declaración de impacto ambiental.

### **Ley N° 12.257, Código de Aguas**

Este código establece el régimen de protección, conservación y manejo del recurso hídrico en la provincia de Buenos Aires.

Establece la creación de la Autoridad del Agua que tiene el poder de reglamentar, supervisar y vigilar todas las actividades y obras relativas al estudio, captación, uso, conservación y evacuación del agua. Para cumplir esa función establece las especificaciones técnicas que deben satisfacer las observaciones y mediciones, la recopilación y publicación de información hídrica, las labores, las obras y la prestación de servicios a terceros. Para poder cumplir sus funciones, la Autoridad del Agua y sus agentes autorizados tienen acceso a la propiedad privada.

También la Autoridad del Agua debe promover programas de educación formal e informal sobre el uso racional del agua.

### **Ley N° 11.820/96 de la provincia de Buenos Aires**

A través del dictado del Decreto N° 613/99, establece la creación del Organismo Regulador Bonaerense de Aguas y Saneamiento (ORBAS). Más tarde, ese mismo año, mediante el Decreto N° 743/99 crea el Organismo Regulador de Aguas Bonaerense (ORAB) producto de la fusión del ORBAS y la Autoridad de Aplicación del Código de Aguas provincial, creado por la Ley N° 12.257, sumando sus respectivas competencias y funciones.

Nuevamente, y a través del Decreto N°2307/99, separa el ORAB de la Autoridad de Aplicación del Código de Aguas Provincial, creado por Ley N° 12.257. A su vez, modifica la competencia del ORAB, agregándole la regulación, el control y la fiscalización de los servicios públicos de abastecimiento de agua potable y desagües cloacales resultantes de concesiones otorgadas por la Autoridad del Agua o en virtud de las disposiciones del Código de Aguas Provincial.

Desde 1999, el ORAB fue el organismo encargado de realizar los estudios para predecir el comportamiento más probable de los requerimientos de servicios sanitarios en el mediano y

largo plazo; participar en representación de la provincia en organismos nacionales, federales y comisiones encargadas de formar políticas sectoriales; asegurar un régimen tarifario razonable y equitativo; intervenir en diferentes y dirimir conflictos que se susciten por cuestiones de servicio; participar de tareas de investigación en conjunto con universidades, institutos y otros entes para el desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, plantas de tratamiento y nuevas tecnologías de aprovechamiento; atender denuncias de los usuarios; asesorar y asistir a municipios de la provincia en cuestiones relacionadas con su actuación como Poder Concedente del Servicio Sanitario y a las Entidades Concesionarias. De manera general, debe garantizar el mantenimiento y promover la expansión del sistema de provisión de agua potable y desagües cloacales y así poder establecer un sistema normativo que garantice la calidad y continuidad del servicio público regulado para proteger la salud pública, los recursos hídricos y a la población.

Hoy en día, a partir del Decreto 878/03, el organismo encargado del control del agua es el Organismo de Control del Agua de Buenos Aires (OCABA), encargado de proteger los derechos e intereses de los usuarios de los servicios de agua y de cloacas de la provincia, atender todos los reclamos relacionados con los servicios de agua potable y de desagües cloacales y asesorar a municipios, cooperativas, empresas y demás organizaciones que están relacionadas con el tema acerca de cómo debe brindar los servicios de agua potable y desagües cloacales y la realización de acciones que promuevan el cuidado del ambiente. Para ello, también se creó mediante los decretos 878/2003, 2231/2003 y 3289/2004 el marco regulatorio para la prestación de los servicios de agua potable y desagües cloacales de la provincia de Buenos Aires. El OCABA es el encargado de hacer cumplir este marco por parte de las empresas prestadoras. En su Artículo 6, queda definido su objetivo principal: establecer los principios básicos relativos a la prestación y control de los servicios de agua y cloaca.



## 5.2 Análisis físico-químico del agua

### 5.2.1 Conductividad

Para medir la conductividad se utilizó un conductímetro Sper Scientific - 860033 Benchtop Water Quality Meter, el cual se calibró con una solución de cloruro de potasio 0,01 M, utilizando agua calidad Milli-Q, según indicaciones técnicas del equipo.

El calibrado se realizó de la siguiente manera:

- Secado del cloruro de potasio: se secó el cloruro de potasio en el horno de la Figura 9a, Vacuum Oven modelo DZF-6020 a 105°C, durante 2 horas con el fin de garantizar una mayor precisión en la calibración, ya que el cloruro de potasio es higroscópico.
- Se preparó una solución estándar de cloruro de potasio de concentración 0,01 M.
- Se limpió cuidadosamente el conductímetro (Figura 9b) con agua de calidad Milli-Q y sus electrodos según las instrucciones del fabricante.
- Se sumergió el conductímetro en la solución estándar de cloruro de potasio y se encendió el instrumento para proceder a su calibración.

Luego de la calibración se colocó la muestra de agua en un vaso de precipitado y se introdujo el electrodo en la solución para realizar la lectura correspondiente.

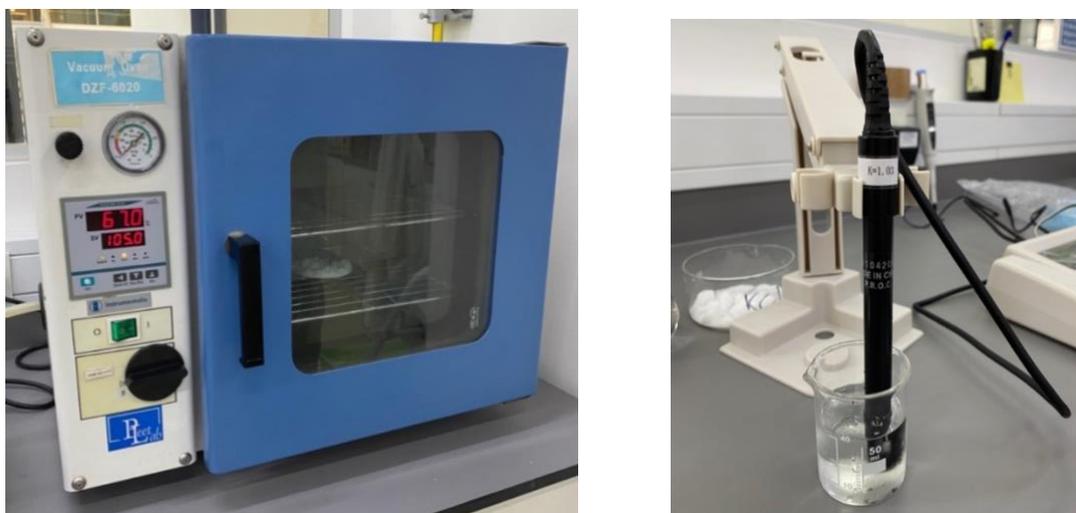


Figura 9. a) Horno Vacuum Oven modelo DZF-6020; b) Conductímetro Benchtop marca Sper Scientific.  
Elaboración propia (2022).

## 5.2.2 Sólidos disueltos totales

La conductividad eléctrica del agua se utiliza como una medida indirecta de la cantidad de iones presentes en el agua, que a su vez está relacionado con la cantidad de sólidos disueltos en la misma. Por lo tanto, se utiliza un factor de correlación para calcular la cantidad de sólidos disueltos a partir de la conductividad del agua. Se calcula la concentración de sólidos disueltos en una solución a partir del resultado de la conductividad utilizando la ecuación de Koroleff:

$$\text{TDS (mg/L)} = k * \sigma$$

Donde la constante k es un factor de conversión que depende de las unidades utilizadas en la ecuación, aunque en este caso se utilizará un valor de 0,585 que corresponde a la relación entre conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos totales. Por otro lado,  $\sigma$  corresponde a la conductividad eléctrica del agua que fue calculada anteriormente.

Vale la pena aclarar que con este factor sólo se tienen en cuenta los sólidos disueltos iónicos que se disocian y aportan cargas. No obstante, dado que la muestra se trata de agua subterránea, la presencia de material disuelto orgánico es despreciable.

## 5.2.3 Determinación del pH en agua

Para realizar la medición del pH de la muestra, se utilizó un electrodo de vidrio marca Adwa modelo AD1030, previamente calibrado con un soluciones buffer (Figura 10). Este tipo de electrodo está compuesto por un bulbo de vidrio que contiene una solución electrolítica y un electrodo de referencia. El electrodo de vidrio se sumerge en la muestra y mediante la medición de la diferencia de potencial entre el electrodo de vidrio y el de referencia, se obtiene un valor de pH.



Figura 10. *pHmetro Adwa modelo AD1030. Elaboración propia (2022)*

## 5.2.4 Determinación de la concentración de flúor

La concentración de iones fluoruro en el agua se llevó a cabo mediante una técnica electroquímica. La respuesta de un electrodo específico a los iones de fluoruro se representa mediante la ecuación siguiente:

$$E = E^* + k \cdot \log a_{f^-}$$

E es el potencial del electrodo medido en comparación con un electrodo de referencia de calomel saturado. E\* es una constante característica del sistema de medición, k es la pendiente (54-60 mV para un sistema que sigue el comportamiento de Nernst) y  $a_{f^-}$  es la actividad del ion de fluoruro en la solución. La actividad del ion de fluoruro se relaciona con la concentración de fluoruro mediante el coeficiente de actividad del fluoruro. Si se mantiene constante la fuerza iónica de las soluciones, un gráfico de E en función del logaritmo de la concentración de fluoruro debe aparecer como una línea recta dentro del rango de validez del modelo.

### Procedimiento, preparación de la curva de calibrado

A partir de una solución de 1000 ppm de fluoruro se preparó una solución de 100 ppm. A continuación, se pipetearon 0,1 (1 ppm) y 1 ml (10 ppm) de esta solución y se trasladaron a matraces de 100 ml, completando el llenado hasta el nivel con agua destilada. Se preparó otra solución con 25 ml de TISAB y 25 ml de cada una de las soluciones patrón se transfirieron a vasos precipitadores de 100 ml y se colocó un imán recubierto de plástico en el interior de cada vaso. Se colocó el vaso sobre un agitador magnético, comenzando con la solución más diluida y se introdujo el electrodo de fluoruros y el electrodo de referencia dentro de la solución, asegurándose de que no tocaran las paredes del vaso. Se dejó estabilizar la lectura y se anotó el valor del potencial en mV. Se repitió el procedimiento para el resto de las soluciones patrón.

### Preparación de la muestra

1 ml de muestra se transfirió a un matraz aforado de 100 ml y se completó hasta el enrase con agua destilada (solución A).

A 25 ml de la solución A dispuesta en un vaso de precipitados de 100 ml, se le agregaron 25 ml de TISAB y un imán cubierto de plástico. Se colocó el vaso sobre un agitador magnético marca FERCA y se introdujo el electrodo de fluoruros marca ORION modelo 720A (Figura 11) y el electrodo de referencia dentro de la solución cuidando que no toquen las paredes del vaso. Se dejó estabilizar la lectura y se anotó el valor del potencial en mV.

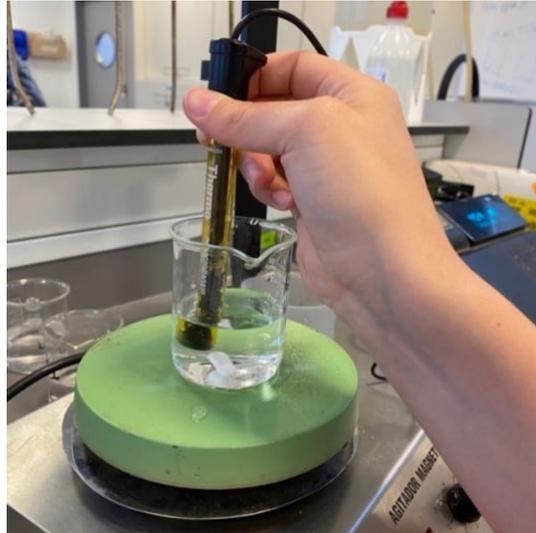


Figura 11. Electrodo marca ORION sumergido en muestra para medición de fluoruro.

*Elaboracion propia (2022).*

#### 5.2.4 Alcalinidad

La alcalinidad del agua (ocasionada por la presencia de iones hidroxilo ( $\text{HO}^-$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) se determinó por titulación potenciométrica.

En este caso, se calculó la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  ya que, en soluciones acuosas, el equilibrio químico entre  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , se ve afectado por el pH. En este caso, el valor de pH de 7,41 evidencia un desplazamiento del equilibrio hacia la formación de  $\text{HCO}_3^-$ .

La cantidad de,  $\text{HCO}_3^-$  en la muestra se determinó por titulación con  $\text{HCl}$  0,1 M, utilizando naranja de metilo como indicador. El punto final de la titulación se correlaciona con un viraje del color del indicador de amarillo a naranja claro (Figura 12).

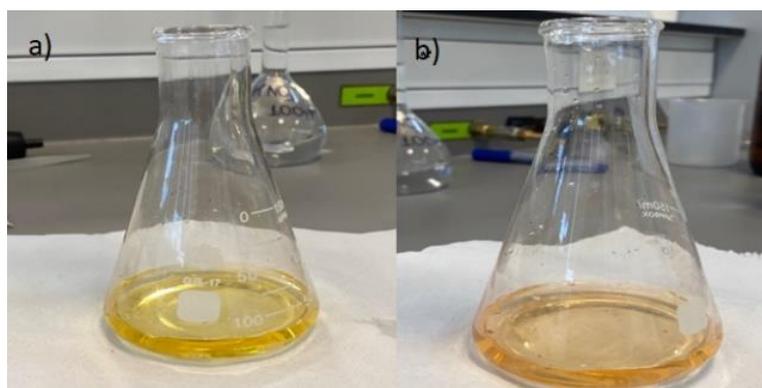


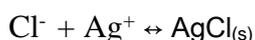
Figura 12. a) Muestra previa a la titulación; b) Muestra titulada.

*Elaboración propia (2022)*

### 5.2.5 Cuantificación de cloruros

La cuantificación de cloruros se realizó mediante volumetría de precipitación, utilizando nitrato de plata como agente titulante y cromato de potasio como indicador. La plata reacciona con los cloruros para generar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. A medida que se agotan los iones cloruro de la solución, los iones plata comienzan a reaccionar con los aniones cromato. La formación del cromato de plata se detecta por el cambio de color de la solución a anaranjado-rojizo, que se considera el punto final de la titulación.

La reacción que ocurre es la siguiente:



Para cuantificar la concentración de cloruros en una muestra, se siguió el siguiente protocolo: se tomaron 25 ml de la muestra en cuestión y se transfirieron a un erlenmeyer. Luego, se adicionaron 10 gotas de solución de cromato de potasio al 5% (m/v) y 10 ml de agua destilada.

Una vez seguido el protocolo anteriormente mencionado, se continuó con la titulación de la muestra. Para ello, se cargó una bureta con solución de nitrato de plata 0,0493 M y se enrasó para asegurar una lectura precisa. Luego, se adicionó la solución desde la bureta a la muestra en el erlenmeyer, hasta observar un cambio de color en la mezcla, específicamente, un viraje del color amarillo a un color anaranjado. Este cambio de color indica el punto final de la titulación (Figura 13).



Figura 13. a) *Muestra para cuantificar cloruros sin titular*; b) *Muestra titulada*. *Elaboración propia (2022)*

### 5.2.6 Nitratos

La concentración de nitratos se midió por espectrofotometría ultravioleta (UV) a 220 nm. Esta técnica de medición es apropiada en aguas con bajo contenido de materia orgánica.

Se realizó una curva de calibración con una muestra patrón de 100 ppm de KNO<sub>3</sub>. Se tomaron 4 alícuotas de 0,1 ml, 0,3 ml, 0,4 ml y 0,5 ml, respectivamente. Estas alícuotas fueron transferidas a matraces de 100 ml, llevando a volumen con agua destilada. Se midió la absorbancia de las soluciones patrón en celdas de cuarzo de 1 cm de paso óptico, en un espectrofotómetro UV-vis Jenway 6715 con lámpara de deuterio y se construyó la curva relacionando absorbancia con concentración de acuerdo a la ley de Lambert Beer (ecuación 1).

$$A = \varepsilon \times C \times d \text{ (ecuación 1)}$$

Donde:

- $\varepsilon$  = coeficiente de absortividad molar
- C = concentración de la sustancia en análisis
- d = distancia que recorre la luz

Se debe tener en cuenta que la técnica de monitoreo espectrofotométrico ultravioleta de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> cumple con la ley de Beer entre 0,03 y 5 mg N - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L (miligramos de nitrógeno como nitrato por litro).

Por último, se midió la absorbancia de la muestra de agua de la ciudad de Las Flores y se calculó la concentración de nitratos utilizando la curva de calibración previamente construida.

### 5.2.7 Determinación de dureza

Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales de cationes polivalentes (principalmente divalentes y específicamente los alcalinotérreos) que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. La presencia de los iones Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> es muy común en el agua natural, y sus concentraciones pueden determinarse por titulación complejométrica, utilizando una solución de EDTA de composición conocida.

La dureza del agua se expresa normalmente como cantidad equivalente de carbonato de calcio (aunque esta sal no sea la que encuentre en el agua) y se calcula a partir de la suma de las concentraciones de calcio y magnesio existentes (miligramos) por cada litro de agua; que expresa en concentraciones de CaCO<sub>3</sub>.

### 5.2.7.1 Reactivos

- Negro de Eriocromo T (NET) 1% p/p en NaCl sólido.
- Solución reguladora de pH=10. (que se prepara mezclando 67,5 g de cloruro de amonio con 570 ml de amoníaco ( $\delta = 0,91 \text{ g/cm}^3$ ) y diluyendo a un litro con agua destilada)
- Solución de EDTA 0,01 M.

### 5.2.7.2 Procedimiento

La técnica utilizada para medir la dureza del agua fue la conocida como el método de EDTA (ácido etilendiaminotetraacético). En este método, se utiliza una solución valorada de EDTA para titular la muestra de agua y determinar la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes. El indicador NET se utiliza para detectar el punto final de la titulación, cuando el color de la solución cambia de rojo a azul.

El procedimiento incluye la transferencia de 25 ml de la muestra de agua a un erlenmeyer, luego se le agrega 1 ml de solución reguladora y una punta de espátula del indicador NET. Finalmente se titula con la solución valorada de EDTA hasta que la solución cambie de coloración roja a azul. La cantidad de EDTA utilizada en la titulación se utiliza para calcular la dureza del agua en unidades ppm o mg/L.

Es importante mencionar que existen otros métodos para determinar la dureza del agua, pero el método EDTA es ampliamente utilizado debido a su precisión y facilidad de uso en el laboratorio.

### 5.2.8 Sulfatos

La medición de sulfatos se realizó por turbidimetría, por precipitación de los sulfatos presentes en la muestra como sulfato de bario, comparando la turbidez de la muestra en estudio con la de los patrones de referencia.

Se construyó una curva de calibración por diluciones de una solución madre de 100 ppm de sulfato de sodio que abarcaba el rango entre 10 y 50 ppm de sulfato. La muestra del agua de la ciudad de Las Flores se diluyó en una proporción de 1:10.

Se armó un set de tubos de ensayo con un volumen de 5 ml de cada solución patrón y 5 ml de la muestra y por último 5 ml de una solución tampón como medio acondicionador. Por último a cada uno de los tubos de ensayo se le agregó cloruro de bario para visualizar la turbidez de cada muestra y poder comparar con la de interés.

### 5.2.9 Arsénico

La técnica utilizada para la medición del arsénico es la espectroscopia de absorción atómica (EAA) en llama por generación de hidruros (Figura 14).

La concentración de arsénico se determinó por absorción atómica por llama en un equipo Thermo Scientific Modelo iCE 3000. La llama utilizada fue de acetileno-óxido nítrico. Se realizó una curva de calibración por diluciones de una solución madre de 1000 ppb de As.



Figura 14. Equipo Thermo Scientific Modelo iCEE 3000 para medición de arsénico. Elaboración propia (2022)

### 5.2.10 Jar Test

El Jar Test (Figura 15) consiste en una prueba de laboratorio que se utiliza para determinar el tratamiento óptimo de coagulación y floculación para la remoción de los contaminantes del agua. Los resultados de este test son aptos para ser escalables. En primera instancia se realizó el proceso de coagulación seguido por floculación y por último se dejó sedimentar aproximadamente 20 minutos.

Se midió la concentración de arsénico luego de filtrar el agua sedimentada con una membrana de 0,45 micrómetros de tamaño de poro. Se compararon los valores antes y después del tratamiento.

Se realizaron 4 ensayos distintos con el objetivo de determinar la mejor opción, a continuación, se describen las características de los productos químicos utilizados para la realización del test.

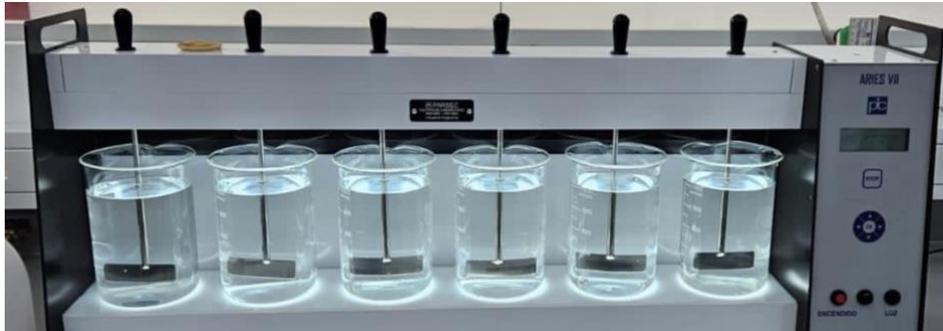


Figura 15. Equipo de Jar Test. Elaboracion propia (2023)

### Cloruro Férrico ( $\text{FeCl}_3$ )

Uno de los coagulantes que se utilizó para realizar el ensayo fue el cloruro férrico, las características del mismo se presentan en la Tabla 5.

<b>CLORURO FÉRRICO 40</b>			
Parámetro	Unidad		Rango específico
Aspecto	-	Líquido oscuro café anaranjado	-
Peso específico	$\text{g/cm}^3$	1,435	Entre [1,400/1,470]
% $\text{FeCl}_3$	% m/m	40,390	Entre [38/42]

Tabla 5. Datos de ficha técnica de Cloruro Ferrico 40.

### Policloruro de Aluminio (PAC)

El segundo coagulante que se utilizó para realizar el ensayo fue el policloruro de aluminio, las características del mismo se presentan en la Tabla 6.

<b>PAC</b>			
Parámetro	Unidad		Rango específico
Aspecto	-	Líquido color ambar	-
Peso específico	$\text{g/cm}^3$	1,37	Entre [1,36/1,38]
% PAC	% m/m	17,5	-

Tabla 6. Datos de ficha técnica de PAC.

## **Poliacrilamida aniónica**

El floculante utilizado fue el polímero poliacrilamida aniónica de nombre comercial MAX POWER FLOC AN 934 PWG, que se comercializa en forma sólida granular. Las características del mismo se presentan en la Tabla 7.

<b>Poliacrilamida Aniónica</b>			
Parámetro	Unidad		Rango específico
Aspecto	-	Sólido granular color blanco	-
Peso específico	g/ml	0,93	Entre [0,92/0,95]
% Poliacrilamida Aniónica	% m/m	90,81	-

Tabla 7. Datos de ficha técnica de Poliacrilamida Aniónica.

El floculante no puede agregarse de forma sólida, es por eso que se realizó una solución acuosa al 0,3%.

# Capítulo 6

## Análisis de alternativas de remediación

---

La eliminación del arsénico del agua de red que proviene de fuentes subterráneas presenta desafíos significativos para los sistemas de tratamiento de agua. Este problema es complejo y tiene implicaciones toxicológicas, económicas, de infraestructura y de suministro de agua, lo que puede resultar especialmente difícil en regiones del país donde el recurso es escaso. En este sentido, en un informe publicado en el año 2009, el INTI reconoció la dificultad de abordar esta problemática.

En general, se pueden considerar cuatro procesos principales de tratamiento que se aplican cuando se detectan parámetros que exceden los límites permitidos en el agua:

- Adsorción
- Intercambio iónico
- Osmosis Inversa
- Coagulación floculación

### 6.1 Adsorción

La adsorción es un proceso en el cual una sustancia se transfiere desde la fase líquida a la superficie de un sólido y se retiene debido a interacciones físicas o químicas. Dado que se trata de un fenómeno superficial, el proceso es más efectivo cuanto mayor sea la superficie del adsorbente (Benitez et al., 2012; Valiente et al., 2020).

Entre los adsorbentes que han sido descriptos como efectivos para la remoción de arsénico, se pueden mencionar: la alúmina activada, los óxidos de hierro; y otros minerales como bauxita, hematita, feldespato, laterita, minerales arcillosos, carbón de hueso, así como también material celulósico. La alúmina granular activada ha resultado altamente eficaz para la remoción de arsénico en un rango amplio de pH, permitiendo la remoción del 95% del arsénico presente, independientemente de su estado de oxidación. Sin embargo, requiere una etapa previa de acidificación y su capacidad de adsorción se reduce después de varias regeneraciones (Litter et al., 2018; Benitez et al., 2012; Ferreccio C. et al, 2000)

## 6.2 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso fisicoquímico en el cual se intercambian iones de forma reversible entre una fase líquida y una sólida, sin un cambio permanente en la estructura del sólido, éste puede observarse en la Figura 16 (Rossi, 2020).

El agua a tratar fluye a través del lecho hasta alcanzar su capacidad de retención y se produce la liberación de contaminantes. En ese momento, la resina (fase sólida) se reactiva mediante el uso de una solución de regenerante, que extrae los contaminantes retenidos para su eliminación como efluente líquido. Las resinas de intercambio iónico se fundamentan en el empleo de una estructura polimérica reticulada. Los grupos funcionales cargados se adhieren a la matriz mediante enlaces covalentes, los cuales se clasifican en ácidos fuertes, ácidos débiles, bases fuertes y bases débiles (Benitez et al., 2012; Valiente et al., 2020).

Existen resinas de intercambio iónico altamente básicas para la eliminación del arsénico en forma ionizada. Las resinas selectivas de sulfato convencionales son ampliamente utilizadas para la remoción de arseniatos. Las tecnologías más avanzadas de intercambio iónico incluyen lechos empacados con regeneración en contracorriente, lo cual ayuda a minimizar el exceso de regenerante y aumenta la eficiencia de cada ciclo de regeneración. Los nuevos avances buscan desarrollar resinas cada vez más específicas (Benitez et al., 2012; Valiente et al., 2020).

La tecnología de intercambio iónico es una opción eficiente para la eliminación del arsénico en soluciones acuosas, sin embargo, es importante destacar que este proceso solo puede eliminar la forma oxidada del arsénico, es decir, el arseniato. Esto ocurre porque generalmente en ambientes oxidantes prevalece el As (V), el cual hidroliza como ácido arsénico, ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ). Sus correspondientes productos de disociación son:  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{AsO}_4^{3-}$ . En ambientes bajo condiciones reductoras prevalece el As (III) que hidroliza como ácido arsenioso ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ). Sus correspondientes productos de disociación son:  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ,  $\text{HAsO}_3^{2-}$  y  $\text{AsO}_3^{3-}$ . En el ámbito de pH de las aguas naturales, el arsénico +5 se encuentra cargado negativamente mientras que el arsénico +3 es una especie neutra, por eso no se retiene en cromatografía de intercambio aniónico (Arias, Urbina & Alavarado Gómez, 2018). Por lo tanto, para su eliminación efectiva, se requiere una etapa previa de oxidación del arsenito a arseniato. Esta oxidación puede lograrse mediante diversos métodos, como la adición de cloro, permanganato de potasio, ozono, entre otros (Benitez et al., 2012 & Valiente et al., 2020).

El diseño debe considerar factores como el pH, la presencia de otras especies iónicas, la capacidad de intercambio, el tipo y concentración del regenerante, la cantidad de regenerante utilizada, y la posibilidad de reuso de regenerante. Es importante destacar que la competencia

de otros iones en la solución puede disminuir la eficacia del proceso de intercambio iónico para la eliminación del arsénico. Además, la posibilidad de regeneración de la resina dependerá específicamente del tipo de resina que se utilice (Benitez et al., 2012; Valiente et al., 2020).

Por otro lado, la acumulación de materia orgánica u otros materiales diferentes al objetivo del proceso de intercambio iónico puede afectar la eficiencia de la resina, pero esta es una limitación común a otros tipos de adsorbentes y no se limita a las resinas de intercambio iónico.

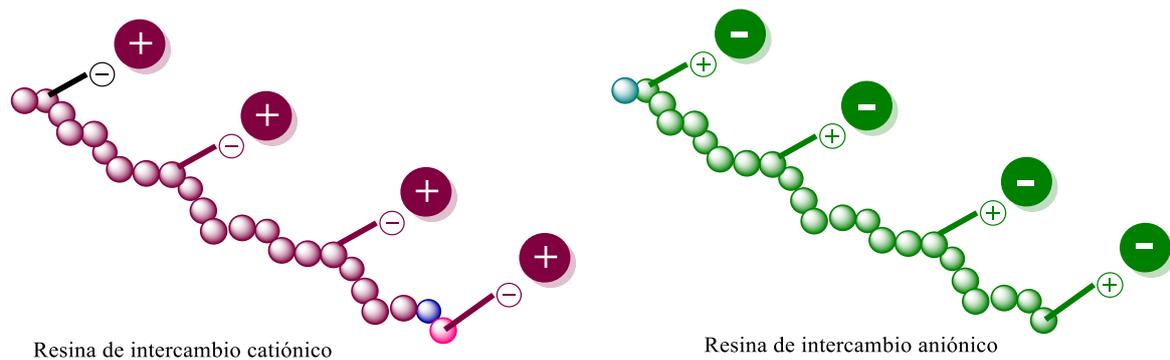


Figura 16. *Proceso de intercambio iónico. Rossi Ezequiel (2020)*

### 6.3 Ósmosis inversa

El proceso de ósmosis implica el paso del agua a través de una membrana semipermeable, de una solución menos concentrada a una más concentrada. La ósmosis inversa, en cambio, ocurre cuando se utiliza presión para invertir el flujo osmótico normal y es uno de los procesos actualmente utilizados para tratar agua con alto contenido de arsénico. La comparación de ambos procesos puede visualizarse en la Figura 17.

Entre las ventajas del proceso de ósmosis podemos mencionar:

- Es muy eficiente en la eliminación del arsénico y otros contaminantes del agua.
- El proceso no utiliza productos químicos, por lo que no generan residuos tóxicos adicionales.
- La tecnología está ampliamente disponible comercialmente y ha sido utilizada con éxito en todo el mundo.

Por otro lado, entre las desventajas podemos mencionar:

- Posee bajos porcentajes de recuperación de agua.
- Requiere una gran cantidad de energía para funcionar, lo que puede aumentar los costos de operación.

- Los costos de las membranas son relativamente altos y deben ser reemplazadas regularmente.
- No es adecuado para tratar aguas con altos niveles de materia orgánica o sólidos en suspensión, ya que esto puede obstruir las membranas y reducir su eficiencia.
- Requiere de un espacio específico para su funcionamiento, lo cual puede ser un factor limitante en algunas instalaciones.

(Benitez et al., 2012; Valiente et al., 2020).

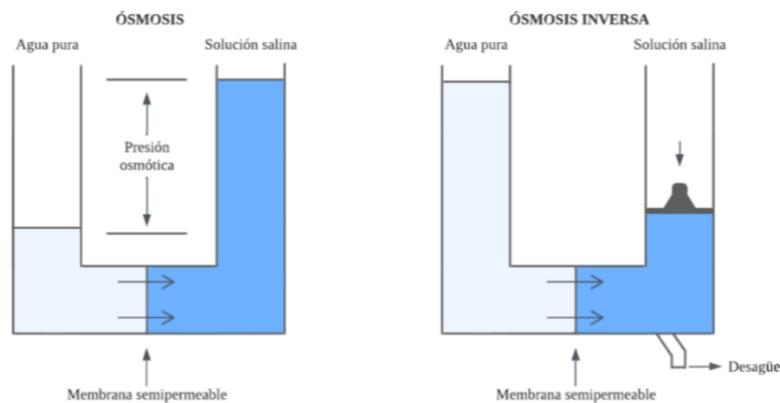


Figura 17. Comparativa entre ósmosis y ósmosis inversa. Elaboración propia (2023)

## 6.4 Coagulación/Floculación

Los procesos de coagulación y floculación permiten remover los contaminantes de una solución mediante la alteración de las propiedades físicas o químicas de los sólidos en suspensión (Benitez et al., 2012; Valiente et al., 2020).

### 6.4.1 Coagulación

En la coagulación se produce una desestabilización de las partículas coloidales causada por la adición de un reactivo químico llamado coagulante, el cual, al neutralizar sus cargas electrostáticas hace que las partículas tiendan a unirse entre sí formando coagulos (Figura 18). La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la “nube de iones” que rodean los coloides de modo que se puedan aglomerar (Gómez Puentes, 2005; Dennet et al., 1996).

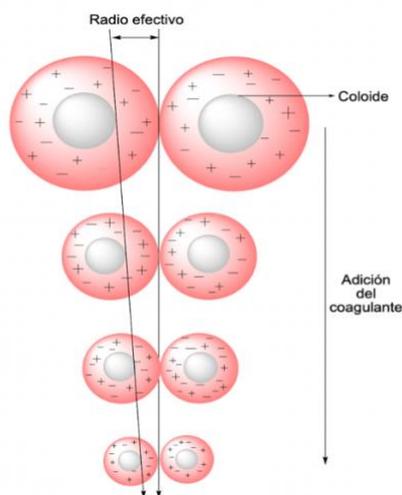


Figura 18. Esquema del fenómeno de coagulación.

Los agentes coagulantes más comúnmente utilizados son los que se nombran a continuación:

- Sulfato de Aluminio
- Sulfato férrico
- Sulfato ferroso
- Cloruro férrico
- Aluminato de Sodio
- Óxido de calcio
- Hidróxido de calcio
- Policloruro de Aluminio (PAC)
- Clorhidrato de Aluminio

En el caso particular de la remoción de arsénico en el agua, es común utilizar sales de aluminio y hierro, como el PAC y el cloruro férrico. Estos coagulantes han demostrado eficacia en la remoción de aguas contaminadas con arsénico, además de ser coagulantes ampliamente utilizados en la industria del tratamiento de agua y estar comercialmente disponibles. Es por ello que, para el caso particular de la ciudad de Las Flores, se probarán a partir del Jar Test de manera individual y combinada (Gómez Puentes, 2005; Dennet et al., 1996).

### 6.4.2 Floculación

Es el proceso que sigue a la coagulación y consiste en la agitación de la masa coagulada junto con un agente floculante con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para que los mismos puedan sedimentar con mayor facilidad. Estos floculos inicialmente pequeños, al juntarse crean aglomerados mayores que son capaces de sedimentar. La floculación tiene dos objetivos:

- Reunir los coloides desestabilizados para formar agrupaciones de partículas o flóculos con peso específico superior al del agua.
- Compactar los flóculos para disminuir su grado de hidratación y conseguir características adecuadas tales como; mayor peso y buena consistencia para su fácil remoción.

La floculación es favorecida por el mezclado lento ya que un mezclado intenso los rompe. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso.

Los agentes floculantes más utilizados incluyen los polímeros de tipo aniónico y no iónico. En el caso particular de la remoción de arsénico en el agua, es común utilizar polímeros aniónicos. Es por ello que, para el caso particular de la ciudad de Las Flores, se utilizó poliacrilamida aniónica (Gómez Puentes, 2005; Dennet et al., 1996).

### 6.4.3 Sedimentación

Después de la coagulación y floculación, se lleva a cabo la sedimentación, estos tres procesos pueden verse ilustrados en la Figura 19. En muchos casos también se lleva a cabo la filtración para remover completamente el arsénico. En primer lugar, los flóculos formados en el proceso anterior se dejan sedimentar para separarlos del agua y eliminar una gran cantidad de contaminantes (Benitez et al., 2012; Valiente et al., 2020).

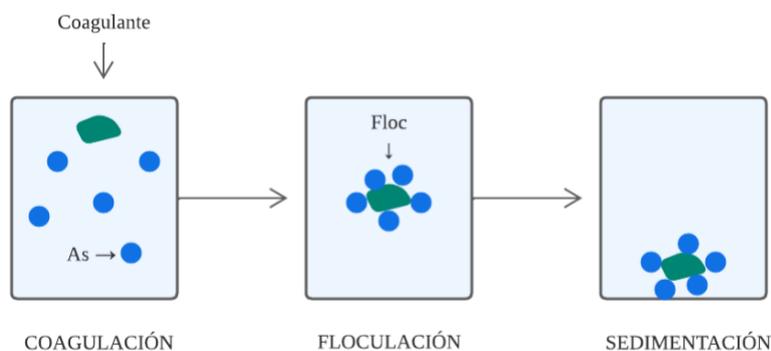


Figura 19. *Formación de floc y sedimentación del mismo. Elaboración propia (2023)*

### 7.1. Análisis de resultados del estudio físico químico de la muestra de agua de red de la ciudad de Las Flores

#### 7.1.1 Conductividad

Se obtuvo un valor de 1716  $\mu\text{S}$ .

#### 7.1.2 Sólidos disueltos

Como se mencionó en el capítulo 5, la concentración de sólidos disueltos se obtiene a partir de la ecuación de Koroleff.

Al sustituir estos valores en la ecuación, con un valor de k igual a 0,585 se obtiene:

$$\text{TDS (mg/L)} = 0,585 * 1716 \mu\text{S/cm}$$

$$\text{TDS (mg/L)} = 1003,86 \text{ mg/L}$$

#### 7.1.3 Determinación del pH en agua

En este caso, se obtuvo un valor de pH de 7,41

#### 7.1.4 Determinación de la concentración de flúor

Se graficó E vs log [ F-]. A partir de este último gráfico, se calculó la concentración de fluoruro en la solución A.

Concentración (ppm)	Log ppm	mV
1	-1	145,8
10	0	90,3

Tabla 8. Concentración de fluoruro y su medida en mV en la curva de calibrado para la determinación de flúor en muestras de agua.

Se realizó una calibración, que se muestra representada en el Gráfico 1, utilizando los datos de la Tabla 8 y un electrodo de fluoruros para medir la muestra de agua de la ciudad de Las Flores. El valor obtenido fue de 145 mV, el cual se utilizó para calcular la cantidad de fluoruros presentes en el agua. El resultado final indicó una concentración de 0,1 ppm de fluoruros en la muestra

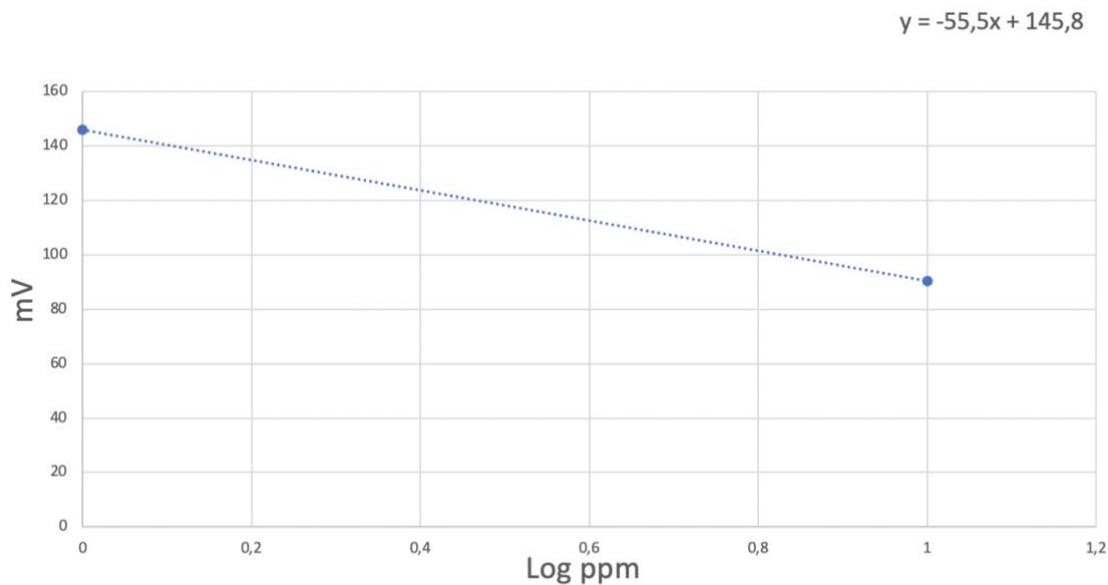


Gráfico 1. Curva de calibrado para medición de fluoruros.

Pendiente	-55,5
Ordenada	90,3
Valor medido	145,3 mV
Log ppm	-0,99
Concentración	1,02 ppm

Tabla 9. Datos de la regresión lineal para la determinación de flúor en muestras de agua.

Cabe mencionar que el valor de pendiente obtenido muestra, como corresponde, un buen comportamiento Nernstiano del electrodo.

### 7.1.5 Alcalinidad

La titulación para determinar cloruros se realizó por duplicado obteniéndose un valor promedio de 3,65 ml de consumo de HCl.

Para calcular la concentración de  $\text{mg HCO}_3^-$  se realizaron los siguientes cálculos:

$$\text{mg HCO}_3^- \times L^{-1} = M \times V \text{ HCl} \times Mm \text{ HCO}_3^- \times 1000 \text{ mg} \times \frac{1000 \text{ L}}{25 \text{ mL}}$$

$$\text{mg HCO}_3^- \times L^{-1} = 0,1 \text{ M} \times 0,0365 \text{ L} \times 61,0168 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 1000 \text{ mg} \times \frac{1000 \text{ L}}{25 \text{ mL}}$$

$$\text{mg HCO}_3^- = 890,84 \frac{\text{mg HCO}_3^-}{\text{L}}$$

El elevado valor de  $\text{HCO}_3^-$  es consistente con una agua proveniente de un acuífero compuesto de rocas sedimentarias ricas en calcio.

### 7.1.6 Cuantificación de cloruros

En la titulación realizada para la cuantificación de cloruros se consumieron 3,5 ml de nitrato de plata. Con ese dato, y realizando los cálculos que se muestran a continuación se determinó que la concentración de cloruros de la muestra analizada era de 245 ppm.

$$\text{moles } \text{Cl}^- = \text{moles } \text{Ag}^+$$

$$\frac{m \text{ Cl}}{\text{peso específico Cl}} = M \times V \text{ AgNO}_3$$

$$\frac{m \text{ Cl}}{35,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,0493 \text{ M} \times 3,5 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \times \frac{25 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}}$$

$$m \text{ Cl} = 245 \text{ mg/L}$$

### 7.1.7 Nitratos

La curva de calibración (Gráfico 2) se realizó a partir de los datos obtenidos de las mediciones que se muestran en la Tabla 10:

Concentración	Abs
0,1	0,036
0,3	0,097
0,4	0,124
0,5	0,146

Tabla 10. Curva de calibración de absorbancia vs concentración de  $\text{KNO}_3$

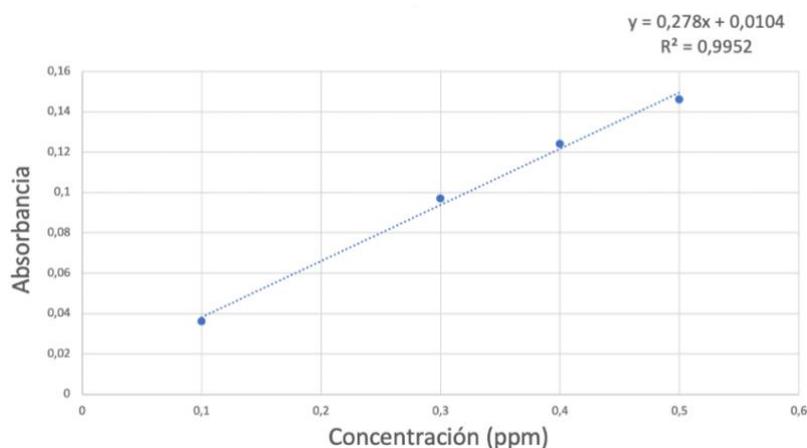


Gráfico 2. Curva de calibración para medición de nitratos

Pendiente	0,27
Ordenada	0,01
R2	0,99
Valor medido absorbancia	0,11
Concentración	0,36 ppm

Tabla 11. Datos de la regresión lineal para la determinación de nitratos en muestras de agua.

La concentración de N-NO<sub>3</sub>/L en agua de la ciudad de Las Flores es de 0,36 ppm, para obtener en mg/L realizamos el siguiente calculo:

$$mg\ N - NO_3/L = 0,36\ ppm \times \frac{100}{4}$$

$$mg\ N - NO_3/L = 9$$

Sin embargo, lo que realmente interesa en términos de la calidad del agua es la concentración de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L). Por lo tanto, es necesario convertir la concentración medida de mg N-NO<sub>3</sub>/L a mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L.

Para realizar esta conversión, se utiliza la relación estequiométrica entre el nitrógeno y el nitrato. La masa molar del nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) es 62 g/mol, mientras que la masa molar del nitrógeno (N) es 14 g/mol. Por lo tanto, la relación entre la masa del nitrato y la masa del nitrógeno expresado como nitrato es de 62/14 = 4,4.

Por lo tanto, para convertir la concentración de mg N-NO<sub>3</sub>/L a mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L, se multiplica el valor medido de mg N-NO<sub>3</sub>/L por la relación entre la masa del nitrato y la masa del nitrógeno expresado como nitrato (4,4). De esta manera, se obtiene la concentración final de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L). En este caso, la concentración de nitratos en agua es de 4,4 x 9 mg N-NO<sub>3</sub>/L = 39,6 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L.

### 7.1.8 Determinación de dureza

Se utilizó 1,4 ml de la solución titulante EDTA para el viraje de violeta a azul (Figura 20).



Figura 20. Muestra para cuantificar dureza: a) sin titular, b) titulada  
Elaboración propia (2022)

Para calcular la dureza se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{mg CaCO}_3/\text{L} = M_{\text{EDTA}} \cdot V_{\text{EDTA}} \cdot M_{\text{m CaCO}_3} \cdot 1000 \cdot \frac{1000}{50}$$

$$\text{mg CaCO}_3/\text{L} = 0,1\text{M} \cdot 0,0014 \text{ L} \cdot 100 \text{ mg/mol} \cdot 1000 \cdot \frac{1000}{50}$$

Resultado: 280 mg CaCO<sub>3</sub>/L

### 7.1.9 Sulfatos

El análisis realizado sobre la muestra de agua de la ciudad de Las Flores dio como resultado una concentración de sulfato comprendida en el rango entre 10 y 20 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> mg/L, tal como puede visualizarse en la Figura 21.

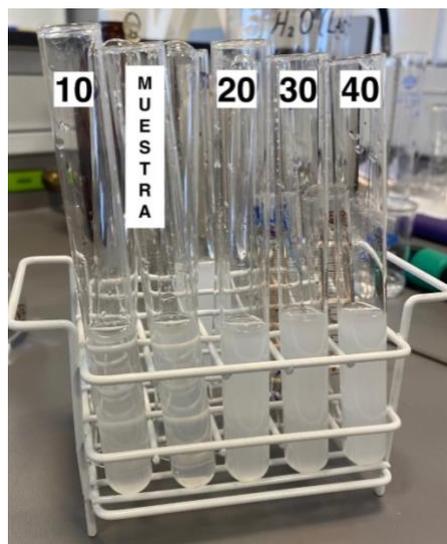


Figura 21. Comparación de set de tubos con distintas concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> para determinar sulfatos en el agua de la ciudad de Las Flores. Elaboración propia (2022)

### 7.1.10 Arsénico

La medición de arsénico, por FAAS con generación de hidruros, tal como fue descripta en la sección experimental, arrojó un resultado de 75 ppb en el agua analizada.

### 7.2 Tabla resumen

Los resultados obtenidos se pueden resumir en la Tabla 12:

Determinaciones	Resultados obtenidos	Valores permitidos (Tabla II del Anexo A, Ley 11.820)	Valores permitidos (CAA)
pH	7,41	6,5 – 8,5	6,5 – 8,5
Conductividad	1716 $\mu$ S	-	-
Sólidos disueltos	1003,95 mg/L	1500 mg/L	1500 mg/L
Dureza	280 mg/L	-	400 mg/L
Cloruros	245 mg/L	250 mg/L	350 mg/L
Alcalinidad	890,84 mg HCO <sub>3</sub> /L	-	-
Nitratos	39,6 mg/L	50 mg/L	45 mg/L
Fluoruros	0,01 ppm	1,50 mg/L	2 mg/L
Sulfatos	100 mg/L	250 mg/L	500 mg/L
Arsénico	0,75 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L

Tabla 12. Tabla resumen de los ensayos físicos-químicos realizados.

Se puede observar que todos los parámetros cumplen con los valores permitidos por el CAA, excepto el arsénico. El valor hallado para el arsénico en la muestra de agua es de 75 ppb, mientras que el valor permitido por el CAA y la Ley Provincial es de solo 10 ppb.

### 7.3 Discusión de resultados y propuestas de mejora

Si bien la caracterización del agua de la ciudad de Las Flores arrojó que el arsénico fue el único valor fuera de los valores permitidos por la legislación vigente, debemos prestar atención al valor que presentó la dureza ya que según la Tabla 13 de dureza proporcionada por OSSE, el agua de la ciudad de Las Flores es un agua dura.

<b>Dureza del agua</b>	
Denominación	mg CaCO <sub>3</sub> /L
Muy suaves	0 – 15
Suaves	16 – 75
Medias	76 – 150
Duras	150 - 300
Muy duras	< 300

Tabla 13. *Dureza del agua. OSSE (2020)*

Las aguas duras pueden generar complicaciones y problemas, tanto en el hogar como en la industria. Algunas de las complicaciones más comunes son:

- Acumulación de depósitos minerales: el calcio y el magnesio presentes en el agua dura pueden formar depósitos minerales en las tuberías, electrodomésticos, calentadores de agua y otros equipos, lo que reduce su eficiencia y vida útil (Saltos & Donald, 2018).
- Menor eficacia de los detergentes: el exceso de minerales en el agua dura puede interferir con la acción de los detergentes, lo que reduce su eficacia en la limpieza de ropa, vajilla y superficies (Sana & Fazal, 2022).
- Piel seca y cabello áspero: el agua dura puede resecar la piel y el cabello, lo que causa irritación, picazón y pérdida de brillo (Ramya, 2015).
- Mayor consumo de energía: la acumulación de depósitos minerales en los calentadores de agua y otros equipos reduce su eficiencia y aumenta el consumo de energía, lo que se traduce en mayores costos de energía (Saltos & Donald, 2018).
- Problemas de salud: aunque el consumo de agua dura no suele representar un riesgo directo para la salud, algunos estudios sugieren que puede aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares y otros problemas de salud en personas con comorbilidades (Sengupta, 2013).

Por otro lado, se realizó un Jar Test, descrito en el capítulo 5, para evaluar la factibilidad de la implementación de un proceso combinado de coagulación-floculación, para la remoción de arsénico, que cómo se mencionó anteriormente, se encuentra en concentraciones superiores a las consideradas seguras para consumo humano. La coagulación-floculación es una técnica escalable, lo que significa que se puede adaptar fácilmente a diferentes volúmenes de agua y niveles de contaminación.

Se seleccionó este proceso en vez de la ósmosis inversa por ser esta última una técnica más costosa y requerir un mayor consumo de energía, además que se recupera poca agua que es tratada. La adsorción y el intercambio iónico también son técnicas eficaces pero a menudo requieren un mayor volumen de medios adsorbentes o resinas para lograr los mismos resultados que la coagulación-floculación.

El Jar Test permite determinar cantidad de coagulante y floculante a utilizar, velocidades y tiempo en cada uno de los procesos, así como también la eficiencia del proceso en la remoción del contaminante.

### **7.3.1 Jar Test**

#### **7.3.1.1 Jar Test - Ensayo número 1**

En el ensayo número 1, se evaluaron 4 jarras distintas, cada una con 1 L de agua. La coagulación se llevó a cabo por 1 minuto a 140 rpm, en todos los casos. Como se mencionó en el capítulo 6, los coagulantes más utilizados son el Policloruro de Aluminio (PAC) y el Cloruro Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ). Por lo tanto, en el ensayo se analizó el uso de cada uno de estos coagulantes por separado, así como la combinación de ambos, variando el orden en que fueron agregados a las jarras. Las características de cada una de las jarras se detallan a continuación:

- Jarra 1: Se aplicó un régimen de dosificación secuencial de los coagulantes. Primero se agregó  $\text{FeCl}_3$  al agua de la muestra y luego se agregó PAC.
- Jarra 2: Al igual que en la Jarra 1, se aplicó un régimen de dosificación secuencial, pero se invirtió el orden de agregado de cada coagulante. Es decir, primero se dosificó PAC y luego  $\text{FeCl}_3$ .
- Jarra 3: A diferencia de las jarras anteriores, se agregó únicamente  $\text{FeCl}_3$ .
- Jarra 4: En este caso, se agregó únicamente PAC.

Con respecto a la floculación, se llevó a cabo por 20 minutos a 40 rpm (Standard Methods for the Examination of Water, 1905).

Las características de cada una de las jarras se detallan en la Tabla 14.

- pH agua cruda: 7,3
- Concentración de arsénico agua cruda: 75,67 ppb

Productos en ppm	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
	1 <sup>ero</sup> se dosificó FeCl <sub>3</sub>	1 <sup>ero</sup> se dosificó PAC		
FeCl <sub>3</sub>	50	50	100	0
PAC	50	50	0	100
Polímero aniónico	1	1	1	1
pH clarificado	6,7	6,7	6,9	6,6
Concentración Arsénico en el clarificado en (muestra filtrada)	3,96 ppb	1,57 ppb	1,38 ppb	1,48 ppb
Observaciones	En la Jarra 1, 2 y 3 la coagulación y floculación fue muy buena. En las Jarras 1 y 2, la combinación de coagulantes utilizada permitió una formación más eficiente de flocs, tanto en términos de cantidad como de tamaño, lo que resultó en una sedimentación más efectiva y completa. Por otro lado, en la Jarra 3 se obtuvieron tamaños de floc adecuados, pero se observó una menor eficiencia en la sedimentación, ya que se observaron restos de flocs en el agua tratada. En la Jarra 4, la coagulación y floculación no fueron tan efectivas como en las otras jarras, lo que resultó en flocs de menor tamaño y una sedimentación menos efectiva (Figura 22).			

Tabla 14. Características y observaciones del ensayo numero 1 de Jar Test.



Figura 22. Jarras con distintas características en el proceso de coagulación. Elaboración propia (2023)

### 7.3.1.2 Jar Test - Ensayo número 2

En el ensayo número 2, se evaluaron 6 jarras, cada una con 1 L de agua. El procedimiento consistió en agregar el primer coagulante a cada jarra y agitar durante un minuto. Posteriormente, se agregó el segundo coagulante y se agitó durante otro minuto a 140 rpm. Se utilizaron dos coagulantes ya que en el ensayo anterior se obtuvieron mejores resultados cuando se utilizaban ambos. Las características de cada una de las jarras se detallan a continuación:

- Jarra 1, 2 y 3: Se aplicó un régimen de dosificación secuencial de los coagulantes. Primero se agregó  $\text{FeCl}_3$  al agua de la muestra y luego se agregó PAC.
- Jarra 4, 5 y 6: Al igual que en la Jarra 1, 2 y 3, se aplicó un régimen de dosificación secuencial, pero se invirtió el orden de agregado de cada coagulante. Es decir, primero se dosificó PAC y luego  $\text{FeCl}_3$ .

Por otro lado, los parámetros utilizados para la floculación se mantuvieron idénticos a los del primer ensayo.

Las características de cada jarra se describen en la Tabla 15.

- pH agua cruda: 7,3
- Concentración de arsénico agua cruda: 75,67 ppb

Productos en ppm	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
	1 <sup>ero</sup> se dosificó $\text{FeCl}_3$	1 <sup>ero</sup> se dosificó $\text{FeCl}_3$	1 <sup>ero</sup> se dosificó $\text{FeCl}_3$	1 <sup>ero</sup> se dosificó PAC	1 <sup>ero</sup> se dosificó PAC	1 <sup>ero</sup> se dosificó PAC
$\text{FeCl}_3$	25	50	25	25	50	25
PAC	25	25	50	25	25	50
Polimero aniónico	1	1	1	1	1	1
pH clarificado	6,9	6,8	6,7	7	6,8	6,8
Concentración Arsénico en el clarificado en (muestra filtrada)	4,10 ppb	2,13 ppb	1,88 ppb	2,52 ppb	1,80 ppb	3,30 ppb

Observaciones	<p>Los resultados obtenidos indican que las tres primeras jarras presentaron una formación de flóculos más efectiva y una sedimentación mejorada en comparación con las últimas tres jarras. Es importante destacar que en las primeras tres jarras se aplicó una dosis inicial de cloruro férrico, mientras que en las últimas tres se utilizó primero PAC.</p> <p>Además, se observó que la concentración más baja de coagulante utilizada en la jarra 1 fue suficiente para reducir los niveles de arsénico por debajo del límite establecido por la Ley, que es de 10 ppm (Figura 23).</p>
---------------	--

Tabla 15. Características y observaciones del ensayo número 2 de Jar Test.

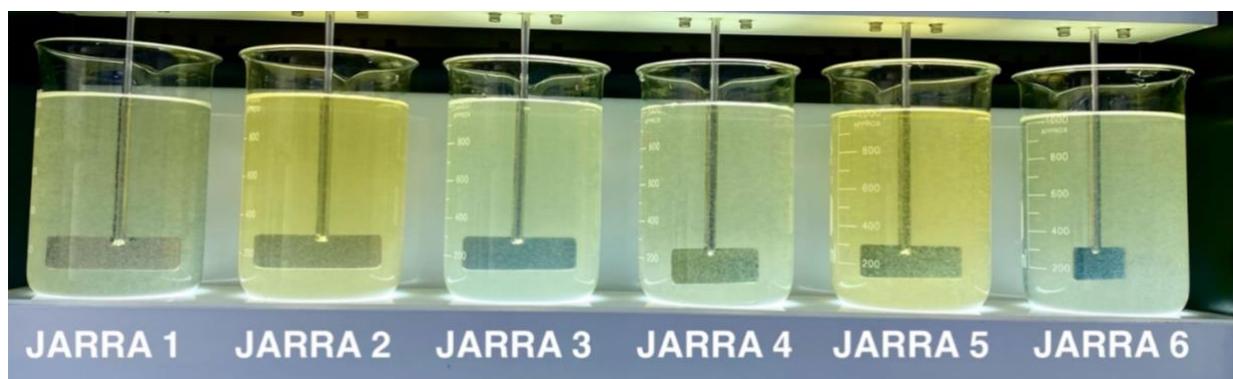


Figura 23. Jarras en proceso de coagulación. Elaboración propia (2023)

### 7.3.1.3 Jar Test - Ensayo número 3

En el tercer experimento se mantuvieron las mismas condiciones del segundo experimento, pero se introdujo una variación en el tiempo de coagulación, estableciéndolo en un minuto y medio con una separación de 30 segundos entre la adición de cada coagulante. El objetivo principal de este ensayo fue evaluar si una reducción en el intervalo de tiempo entre la aplicación de los coagulantes puede mejorar la formación de flóculos y disminuir la cantidad de residuos de los mismos durante la sedimentación.

Las características de cada jarra se describen en la Tabla 16.

- pH agua cruda: 7,3
- Concentración de arsénico agua cruda: 75,67 ppb

Productos en ppm	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
	1 <sup>ero</sup> se dosificó FeCl <sub>3</sub>	1 <sup>ero</sup> se dosificó FeCl <sub>3</sub>	1 <sup>ero</sup> se dosificó FeCl <sub>3</sub>	1 <sup>ero</sup> se dosificó PAC	1 <sup>ero</sup> se dosificó PAC	1 <sup>ero</sup> se dosificó PAC
FeCl <sub>3</sub>	25	50	25	25	50	25
PAC	25	25	50	25	25	50
Polimero aniónico	1	1	1	1	1	1
pH clarificado	6,8	6,8	6,7	6,9	6,8	6,7
Concentración Arsénico en el clarificado en (muestra filtrada)	2,95 ppb	2,01 ppb	2,03 ppb	3,32 ppb	2,40 ppb	3,23 ppb
Observaciones	El propósito del ensayo consistía en evaluar si la reducción del tiempo de coagulación puede mejorar los resultados. No obstante, los hallazgos demostraron que esta estrategia no generó mejoras significativas, dado que se observaron floculos de menor tamaño en comparación con el ensayo anterior y se registró una mayor presencia de residuos en el agua después del proceso de sedimentación como consecuencia de lo nombrado.					

Tabla 16. Características y observaciones del ensayo número 3 de Jar Test.

#### 7.3.1.4 Jar Test - Ensayo número 4

En el estudio número 4, se evaluó el efecto de la velocidad de floculación en el proceso de tratamiento de aguas residuales. En particular, se investigaron tres frecuencias distintas: 20, 40 y 60 rpm, siendo la anteúltima la empleada en ensayos previos de acuerdo con la bibliografía consultada.

Los resultados obtenidos en el ensayo número 4 indicaron que la utilización de una frecuencia de 20 rpm favoreció la formación de flocs de mayor tamaño en comparación con las otras dos frecuencias evaluadas. Cabe destacar que este resultado es de gran relevancia, ya que una mayor formación de flocs implica una mayor eficiencia en el proceso de sedimentación, lo que se traduce en una disminución de los residuos presentes en el agua.

Por otro lado, se pudo observar que la utilización de una frecuencia de 60 rpm dio lugar a la formación de flocs más pequeños, lo cual puede generar ciertas limitaciones en cuanto a la eficiencia del proceso de sedimentación y requerir de una mayor energía para lograr la misma calidad de tratamiento del agua.

La velocidad de agitación en la floculación es una variable crítica que debe ser controlada cuidadosamente para lograr una óptima formación de floculos. En general, la velocidad de agitación en plantas de tratamiento debe ser reducida gradualmente después de la etapa de coagulación para permitir que los coágulos formados crezcan y se junten en floculos más grandes.

### 8.1 Planta potabilizadora

Con el objetivo de dimensionar adecuadamente una planta potabilizadora de agua con una vida útil de 15 años (año 2037) se requiere, en principio, calcular la población futura.

Una forma común de calcular la población futura es usar la fórmula del crecimiento exponencial de la población, la cual se presenta a continuación:

$$P^t = P_0 \times (1 + r)^t$$

Donde:

- $P_t$  es la población en el tiempo  $t$  (futuro)
- $P_0$  es la población actual (presente)
- $r$  es la tasa de crecimiento anual compuesta
- $t$  es el número de años en el futuro

Esta fórmula asume que la tasa de crecimiento es constante a lo largo del tiempo, lo que puede no ser cierto en la vida real. Sin embargo, es una forma útil de hacer una estimación de la población futura.

Para calcular la tasa de crecimiento anual compuesta, primero debemos calcular el crecimiento total de la población entre los años 2010 y 2022. Eso se puede hacer restando la población de 2010 de la población de 2022:

$$\text{Crecimiento total} = 26.651 - 21.571 = 5.080$$

A continuación, podemos calcular la tasa de crecimiento anual compuesta dividiendo el crecimiento total por la población de 2010 y luego elevando el resultado a una fracción, donde el numerador es 1 y el denominador es el número de años entre 2010 y 2022:

$$r = (\text{Crecimiento total} / P_0)^{(1/t)} = (5.080 / 21.571)^{(1/12)} = 1,08\%$$

La tasa de crecimiento anual compuesta es del 1,08%.

Por último, para calcular el número de personas que habría en el 2037, podemos usar la fórmula del crecimiento exponencial de la población con los datos que tenemos:

$$P_t = P_0 * (1 + r)^t = 21.571 * (1 + 0.0108)^{(2037 - 2010)} = 37.620$$

De acuerdo con esta estimación, habría alrededor de 37.620 personas en el 2037.

Para calcular el consumo de agua por persona por día, ABSA utiliza una tasa de 300 litros por individuo.

$$\text{Consumo por día} = 37.620 \text{ habitantes} * 300 \text{ L/habitantes día}$$

$$11.286.000 \text{ L/día}$$

El caudal diario a tratar será de 11.286.000 L/día, es decir de 492,75 m<sup>3</sup>/h, por lo tanto, habrá que diseñar una planta que pueda tratar ese caudal. Por cuestiones de seguridad se realizará un diseño de planta de 600 m<sup>3</sup>/h.

La planta clarificadora propuesta constará de dos unidades modulares metálicas compactas en la cual se llevará a cabo la clarificación del agua a ser tratada para obtener un caudal de 300 m<sup>3</sup>/h por cada uno de ellos sumando un total de 600 m<sup>3</sup>/h. Se decidió realizar dos debido a varias razones que se mencionan a continuación:

- Se proporciona una redundancia en caso de que una de las unidades falle o necesite mantenimiento. Esto significa que el proceso de tratamiento no se verá interrumpido y se garantiza la continuidad del suministro de agua tratada.
- Al utilizar dos unidades modulares en lugar de una sola unidad grande se simplifica el proceso de transporte, instalación y puesta en marcha. Además, si es necesario ampliar la capacidad en el futuro, se pueden agregar más unidades modulares según sea necesario.
- Eficiencia en el proceso, ya que, al dividir el caudal en dos, se puede optimizar el proceso de tratamiento y reducir la carga hidráulica y de sólidos en cada unidad, lo que mejora la eficiencia del proceso y reduce la posibilidad de que se produzcan problemas de obstrucción y sedimentación.

Si bien cada una de las cámaras tratará un caudal de 300 m<sup>3</sup>, se diseñará cada módulo como si tuviera que tratar la totalidad del caudal, por las razones enumeradas anteriormente.

Estas unidades o trenes de tratamiento se componen por varias cámaras. Los componentes básicos de cada una de ellas son los siguientes:

### **8.1.2 Tanque estabilizador**

Es necesario que el agua que se extrae de los pozos mencionados anteriormente se dirija hacia un tanque estabilizador, debido a las siguientes razones:

- Estabilidad del caudal: Al contar con un tanque estabilizador, se puede garantizar que el caudal de agua que ingrese al coagulador sea constante y predecible, lo que permitirá ajustar la dosificación de los químicos de manera más precisa.
- Reducción de costos: Al tener un caudal constante, se puede optimizar el uso de los productos químicos y reducir los costos de tratamiento.
- Mayor eficiencia: Un tanque estabilizador permite una mejor regulación del caudal, lo que a su vez mejora la eficiencia de los procesos de tratamiento de agua.
- Protección del equipo: Al estabilizar el caudal de agua, se reduce la posibilidad de que se presenten fluctuaciones bruscas de presión que puedan dañar el equipo.

El material elegido para la construcción es acero al carbono, se debe a su alta resistencia mecánica y durabilidad, lo que garantiza la integridad del tanque y su capacidad para soportar las condiciones de operación requeridas. Además, el acero al carbono es un material comúnmente utilizado en la construcción de tanques y su costo es razonable en comparación con otros materiales más costosos como el acero inoxidable.

### **8.1.3 Coagulación**

La coagulación se encuentra compuesta por una cámara con agitación rápida tal que el tiempo de contacto sea el suficiente a modo de permitir la desestabilización de las partículas para la posterior floculación.

El tanque a utilizar responde a un modelo estándar como el que se presenta en la Figura 24. El mismo posee forma cilíndrica con eje vertical. En su parte superior es cerrado para evitar la exposición del agua a la atmósfera y así reducir el riesgo de contaminación. El fondo del tanque es redondeado para evitar la acumulación del líquido en las esquinas. Para agitar el líquido se utiliza un agitador con eje suspendido que se encuentra sostenido en la parte superior. El agitador es accionado por un motor y una caja reductora de velocidad.

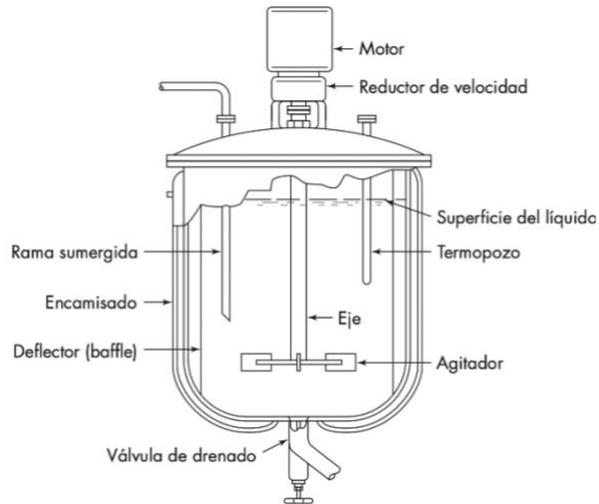


Figura 24. *Tanque típico del proceso con agitación. McCabe (2005)*

### 8.1.3.1 Tanque de mezcla rápida

Para determinar las dimensiones del tanque de mezcla rápida para un caudal de 600 m<sup>3</sup>/h, ya que como se indicó anteriormente se propone la construcción de dos unidades modulares, pero se diseñarán módulos que puedan tratar la totalidad del caudal, se deberá utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen del tanque de mezcla rápida} = Q \times t$$

Donde:

- Q = Caudal de agua a tratar (m<sup>3</sup>/h)
- t = Tiempo de mezcla (h)

Por lo tanto, el volumen del tanque de mezcla rápida, teniendo en cuenta los datos obtenidos del Jar Test:

- Q = 600 m<sup>3</sup>/h
- t = 2 min = 0,033 h

Por lo tanto:

$$\text{Volumen del tanque de mezcla rápida} = 600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 0,033 \text{ h}$$

$$\text{Volumen del tanque de mezcla rápida} = 19,8 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el volumen que debería utilizarse para el tanque de mezcla rápida es de 19,8 m<sup>3</sup>; por razones técnicas se diseñará un tanque de 20 m<sup>3</sup>.

➤ Diámetro y altura

$$D = \sqrt{\frac{4 \times V}{\pi \times h}}$$

Como la altura del tanque es igual al diámetro, podemos reemplazar h por D en la ecuación anterior:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times V}{\pi \times D}}$$
$$D^2 = \frac{4 \times 20 \text{ m}^3}{\pi \times D}$$
$$D \approx 2,9 \text{ m}$$

Por lo tanto, el diámetro del tanque sería de aproximadamente 2,9 metros y su altura sería la misma. Por cuestiones técnicas se diseñará un tanque de 3 metros.

Los materiales de la estructura del coagulador estarán contruidos con chapa de acero al carbón, ya que en primer lugar es un material que se utiliza en la construcción de tanques y estructuras de almacenamiento debido a su resistencia mecánica, durabilidad y capacidad para soportar cargas pesadas. Además, es relativamente fácil de fabricar, lo que ayuda a reducir costos de producción.

Las partes del tanque serán revestidas con pintura epoxi sin solvente con alto contenido de sólidos apta para agua potable, debido a las razones que se mencionan a continuación:

- En primer lugar, la pintura epoxi es conocida por su durabilidad, resistencia a la corrosión y a los productos químicos, lo que la hace ideal para proteger el interior de un tanque contra la corrosión y el deterioro causado por la exposición al agua y a los productos químicos que se usan en el tratamiento de agua potable.
- En segundo lugar, la pintura epoxi sin solvente tiene un bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (COV), lo que la hace segura para su uso en aplicaciones de agua potable. Además, el alto contenido de sólidos de la pintura significa que se requiere menos cantidad de pintura para cubrir la misma superficie en comparación con pinturas con menor contenido de sólidos, lo que reduce la cantidad de residuos peligrosos y el impacto ambiental.

- En tercer lugar, la pintura epoxi es fácil de limpiar y mantener, lo que puede ser una ventaja en aplicaciones de agua potable, donde se requiere una superficie limpia y sin impurezas para evitar la contaminación del agua.

### 8.1.3.2 Impulsores (agitadores)

En cuanto a los impulsores o agitadores, según bibliografía consultada, se recomienda el uso de una turbina de pala plana, tal como se muestra en la Figura 25 (McCabe et al., 2005).

Además, en el estudio del Jar Test se utilizó este tipo de paletas y arrojó resultados positivos.

Este tipo de impulsor empuja al líquido tanto de forma radial como tangencial, generando muy poco flujo vertical en comparación con otros tipos de paletas. Las corrientes generadas por el impulsor se desplazan hacia la pared del tanque y luego fluyen hacia arriba o hacia abajo. La turbina de pala plana es especialmente adecuada para procesos que se desarrollan a velocidades entre 20 y 150 rpm, ya que genera un flujo uniforme y eficiente en este rango de velocidades. En este caso se utilizará la velocidad de 140 rpm probada en el Jar tTst.

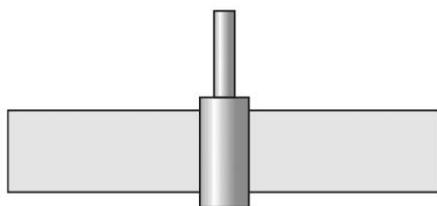


Figura 25. Turbina simple de pala recta. McCabe (2005)

Con el fin de evitar fenómenos de corrosión y dotar a la estructura del agitador del grado de robustez adecuado, éste estará fabricado de acero inoxidable AISI 304, por las razones que se enumeran a continuación:

- En primer lugar, el acero inoxidable AISI 304 es un material resistente a la corrosión, lo que lo hace ideal para su uso en aplicaciones en contacto con agua y productos químicos, como es el caso de un agitador en una planta de tratamiento de agua potable. Además, el acero inoxidable AISI 304 es un material resistente al desgaste y a la fatiga, lo que significa que puede soportar las cargas mecánicas y las vibraciones asociadas con la operación del agitador.
- En segundo lugar, el acero inoxidable AISI 304 es un material seguro para su uso en aplicaciones de agua potable, ya que no contiene materiales tóxicos ni contaminantes que puedan migrar al agua.

- En tercer lugar, el acero inoxidable AISI 304 es fácil de limpiar y mantener, lo que puede ser una ventaja en aplicaciones de agua potable, donde se requiere una superficie limpia y sin impurezas para evitar la contaminación del agua.

Por último, el acero inoxidable AISI 304 es un material duradero y resistente, lo que significa que el agitador tendrá una larga vida útil y requerirá poco mantenimiento.

### 8.1.3.3 Resumen de estructura de uno de los módulos

Cantidad de cámaras	1
Tipo	Agitado
Materiales de estructura de cámara	Construido con chapa de acero al carbono. Espesor de chapa en 6,35 mm
Revestimiento de las partes	Con pintura epoxi sin solvente con alto contenido de sólidos apta para agua potable
Tipo de Agitador	Eje vertical y palas planas
Material del agitador	Acero inoxidable AISI 304
Medio de sujeción superior	Vinculado a moto-reductor
Cantidad de Unidades	1
Variadores de velocidad	Si

Tabla 17. Características de uno de los módulos del proceso de coagulación.

### 8.1.3.4 Cantidad de coagulante a utilizar

#### 8.1.3.4.1 Cloruro férrico

Según los datos extraídos en el Jar Test se deben utilizar 25 ppm (25 mg/L) de  $FeCl_3$  para tratar 1 litro de agua y remover el arsénico. Por lo tanto, la cantidad a utilizar para tratar 600 m<sup>3</sup> en una hora será:

$$kg \text{ de } FeCl_3 = 25 \frac{mg}{L} \times 600 \frac{m^3}{h} \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1 kg}{1 \times 10^6 mg}$$

$$kg \text{ de } FeCl_3 = 15 \frac{kg}{h}$$

Por cada hora que pasa se deben utilizar 15 kg de  $FeCl_3$ .

#### 8.1.3.4.2 PAC

Según los datos obtenidos al realizar el Jar Test se deben utilizar 25 ppm (25 mg/L) de PAC para tratar 1 litro de agua y remover el arsénico, es decir, la misma cantidad que de por litro de agua. Por lo tanto, se utilizará la misma cantidad de PAC que de  $FeCl_3$  por hora, es decir 15 kg.

### 8.1.4 Floculación

Luego de la coagulación, se encuentra la floculación en la cual el agua mezclada con los químicos de coagulación ingresa a la etapa de floculación. Esta consiste en cámaras de dimensiones adecuadas que se han diseñado de acuerdo a los parámetros, Tiempo de Permanencia y Gradiente de velocidad óptimos necesarios. En este caso, se utilizarán 3 floculadores en serie para asegurar una mezcla uniforme del floculante y optimizar la formación de flocs.

Si bien en el Jar Test se probó que a una velocidad de 20 rpm se formaban mejores flocs, se debe tener en cuenta que una disminución abrupta de la velocidad, es decir pasar de 140 rpm a 20 rpm, podría causar una ruptura en los flocs y generar una disminución en la eficiencia del proceso de floculación. Es por eso que cada uno de los tanques tendrá 3 velocidades distintas, el primero de 60 rpm, el segundo de 40 rpm y el último de 20 rpm. El primer floculador con 60 rpm permite la decantación de los flocs más pequeños, el segundo floculador con 40 rpm favorece la formación de flocs de tamaño medio, mientras que el tercer floculador con 20 rpm permite la sedimentación de los flocs más grandes.

Para determinar las dimensiones de los tanques de floculación se utilizó la misma fórmula que para el diseño de tanque de mezcla rápida:

$$\text{Volumen del tanque floculador} = Q \times t$$

$$\text{Volumen del tanque floculador} = 600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 0,11 \text{ h}$$

$$\text{Volumen del tanque floculador} = 66 \text{ m}^3$$

Para calcular el volumen se tuvo en cuenta que el tiempo de floculación en el Jar Test fue de 20 minutos, teniendo en cuenta que se poseen 3 tanques floculadores en serie, se promedió que en cada tanque el agua estará 6 minutos y 66 segundos minutos (0,11 horas), es por ello que cada tanque de floculación debe poseer un volumen de 96 m<sup>3</sup>, por cuestiones técnicas se redondea a un tanque de 100 m<sup>3</sup>.

Con respecto a los materiales de estructura del tanque, revestimiento de las partes y material del agitador, se eligieron las mismas características que las del tanque de coagulación, por lo que las justificaciones se encuentran en el apartado anterior.

#### **8.1.4.1 Impulsores (agitadores)**

Se utilizará también un agitador de palas planas que, como se mencionó en el apartado anterior, fueron las que se utilizaron en el Jar Test, a esto se le suma que el proceso de floculación debe tener un flujo laminar para que los flocs no se rompan.

### 8.1.4.2 Resumen de estructura de uno de los módulos

Tipo	Agitador
Materiales de estructura de cámara	Construido con chapa de acero al carbono. Espesor de chapa en 6.35 mm
Revestimiento de las partes	Con pintura epoxi sin solvente con alto contenido de sólidos apta para agua potable
Revestimiento exterior	Anticorrosivo + poliuretano final
Tipo de Agitador	Eje vertical y palas planas
Material del agitador	Acero inoxidable AISI 304
Medio de sujeción superior	Vinculado a moto-reductor
Cantidad de Unidades	1
Variadores de velocidad	Si

Tabla 18. Características de uno de los módulos del proceso de floculación.

### 8.1.4.3 Cantidad de floculante a utilizar

La dosificación de coagulante utilizada en el Jar Test fue de 1 ppm (1 mg/L), establecida como la dosis máxima para evitar la presencia de residuos de polímero en el agua tratada, mientras que se garantiza un adecuado proceso de floculación. Esta medida se basa en criterios técnicos y consideraciones relacionadas con la calidad del agua, y es una práctica comúnmente utilizada en el tratamiento de aguas.

$$kg \text{ de polímero aniónico} = 1 \frac{mg}{L} \times 600 \frac{m^3}{h} \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1 kg}{1 \times 10^6 mg}$$

$$kg \text{ de polímero aniónico} = 0,6 \frac{kg}{h}$$

Por cada hora que pasa se deben utilizar 0,6 kg de polímero aniónico.

## 8.1.4 Sedimentación

En esta operación unitaria se produce la sedimentación de los flocs formados en la etapa anterior.

El sedimentador de alta velocidad adoptado contiene en su interior placas inclinadas de PP o PVC con protección UV que poseen una inclinación de 60°, los que facilitan y mejoran la eficiencia de la sedimentación, permitiendo, además, una importante reducción en el área de implantación.

A la sedimentación se le sumará el proceso de desinfección, necesario para evitar la proliferación de microorganismos durante el tiempo de permanencia del agua en el tanque. La sedimentación es un proceso que se realiza a baja velocidad y en un ambiente abierto, lo que puede favorecer el crecimiento de bacterias y otros microorganismos. El cloro es el agente desinfectante comúnmente utilizado en plantas de tratamiento de agua.

### 8.1.4.1 Dimensiones del sedimentador

La determinación de las dimensiones del sedimentador será una estimación, ya que para lograr una precisión exacta en el cálculo, es necesario realizar un análisis de balance de masa al secar la muestra utilizada en el ensayo de Jar Test, con el fin de conocer el caudal exacto que ingresa al sedimentador, teniendo en cuenta la adición de coagulantes y floculantes, y la retención de flocs en cada uno de los tanques del proceso.

Los datos que se poseen para las dimensiones del sedimentador son los siguientes:

- $Q = 600 \text{ m}^3/\text{h}$
- Tiempo de retención hidráulica (TRH) = 20 minutos = 0,33 horas (dato extraído del Jar Test)
- Velocidad de entrada = 20 rpm

El sedimentador tendrá una forma rectangular con una relación de aspecto 4:1 y se establece una altura de 5 metros.

En principio se calcula el volumen del mismo:

$$\begin{aligned}V &= Q \times TRH \\V &= \frac{600\text{m}^3}{\text{h}} \times 0,33 \text{ h} \\V &= 200 \text{ m}^3\end{aligned}$$

El sedimentador deberá poder tratar un volumen de 200 m<sup>3</sup>. Para tener una altura de 5 metros, se calcula el área superficial requerida del sedimentador de la siguiente manera:

$$A = V/H$$

Siendo:

- A = área
- V = volumen
- H = altura

$$A = \frac{200m^3}{5 m}$$

$$A = 40 m^2$$

Utilizando una relación de aspecto de 4:1, el ancho del sedimentador se puede calcular de la siguiente manera:

$$W = \sqrt{\frac{A}{4}}$$

Siendo:

- W = ancho
- A = área

$$W = \sqrt{\frac{40 m^2}{4}}$$

$$W = 3,16 m$$

Por lo tanto, el ancho de sedimentador para una altura de 5 metros será de 3,16 metros.

Por último, el largo del sedimentador se puede obtener utilizando la relación de aspecto, que es 4 veces el ancho:

$$L = 4 \times W$$

$$L = 4 \times 3,16 m$$

$$L = 12,64 m$$

Entonces, para tener una altura de 5 metros, puedes utilizar un sedimentador rectangular con dimensiones aproximadas de 12,64 metros de largo, 3,16 metros de ancho y 5 metros de altura.

Por último, con respecto a las tolvas de recolección de barros, están divididas en varios compartimientos, con sus cañerías de deposición individuales. La inclinación de las tolvas es de 45°, en las cuales se ubicarán las válvulas de extracción de lodos.

#### 8.1.4.2 Resumen de estructura de uno de los módulos

Tipo	Sedimentación Laminar Flujo ascendente
Cantidad de Sedimentadores	3 por modulo
Material de estructura de la cámara	Construido con chapa de acero al carbono. Espesor de chapa en 6.35 mm.
Revestimiento de las partes	Con pintura epoxi sin solvente con alto contenido de sólidos apta para agua potable
Revestimiento exterior	Anticorrosivo + poliuretano final
Tolvas	Para recolección de barros sedimentados
Purga de lodos de funcionamiento	Manuales
Tuberías de interconexión	Incluidas en el sistema

Tabla 19. Características de uno de los módulos del proceso de sedimentación.

Los materiales seleccionados para la construcción de los módulos de sedimentación son los mismos que se utilizaron en la construcción del tanque de mezcla rápida y de los floculadores, como se ha explicado en secciones anteriores.

#### 8.1.4.3 Tratamiento de lodos provenientes del sedimentador

Para el tratamiento de lodos que provienen del sedimentador se recomienda tercerizar la gestión a una empresa especializada en el tratamiento de residuos especiales.

### 8.1.5 Diagrama tecnológico

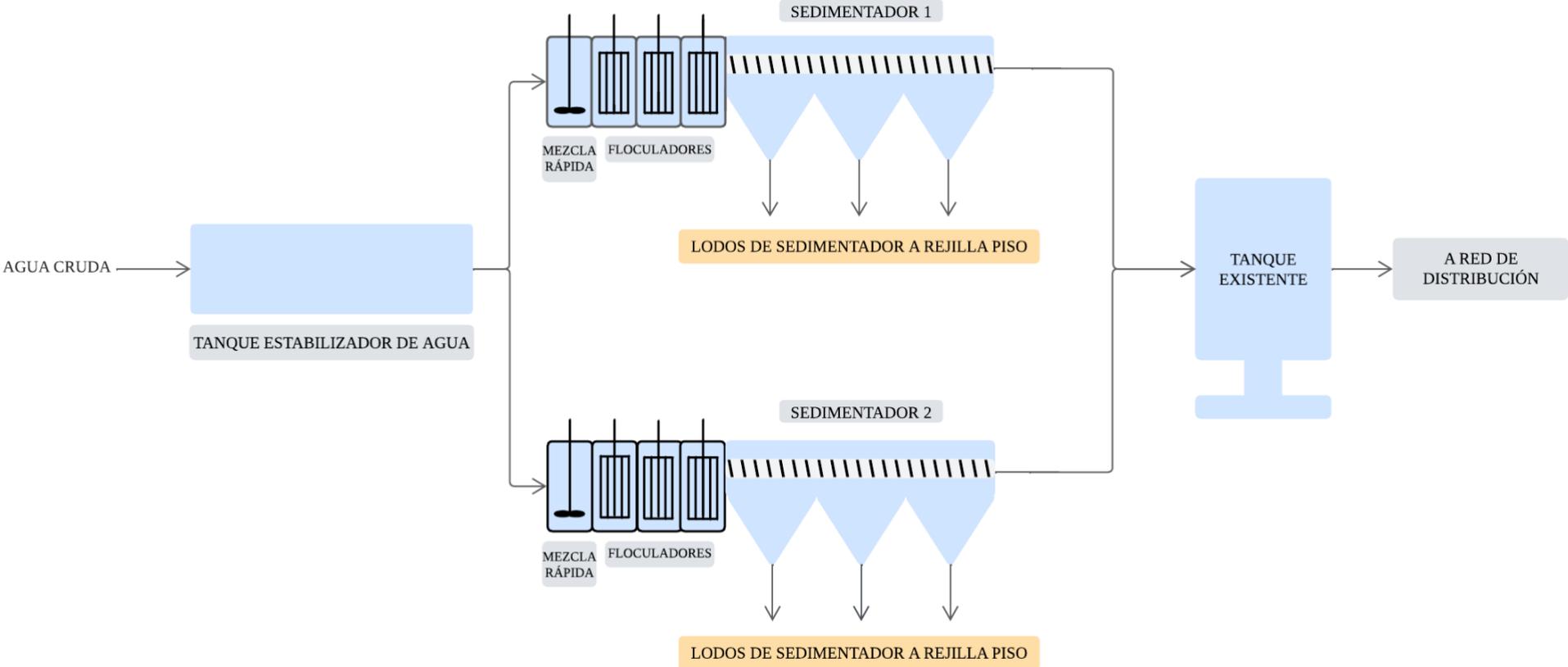


Figura 26. Diagrama tecnológico de la planta de abatimiento de arsénico para la ciudad de Las Flores. Elaboración propia (2023)

### **9.1 Conclusiones**

Se ha demostrado que los procesos de coagulación y floculación combinados son una alternativa efectiva para el abatimiento de arsénico presente en el agua de la ciudad de Las Flores. El Jar Test permitió determinar la cantidad óptima de coagulantes y floculantes a utilizar para lograr una correcta floculación y remoción de arsénico, minimizando el gasto económico en químicos y evitando que queden restos de polímero en el agua tratada.

### **9.2 Recomendaciones**

En primera instancia se recomienda considerar la recirculación de los barros que se desechan en el proceso de sedimentación. Estos barros contienen coagulante y floculante, por lo que al recircularlos se puede reducir el gasto económico de estos químicos. Además, a mayores niveles de turbiedad, se logra una mayor remoción de arsénico, por lo que sería beneficioso la recirculación de los barros.

Se podría considerar, también, la implementación de un sistema de filtros para mejorar el proceso de tratamiento de agua. Si bien el estudio se enfocó en la remoción de arsénico mediante coagulación y floculación, se sabe que la filtración, puede mejorar significativamente la calidad del agua tratada en los procesos a mayor escala. Por lo tanto, se sugiere estudiar la factibilidad de implementar un sistema de filtros en la planta de tratamiento de agua como un proceso complementario luego de la coagulación/floculación.

## Bibliografía

---

Agudelo, R. (2005). *Water strategic resource in the 21<sup>st</sup> century*. Revista Facultad Nacional Salud Pública; 25(1): p. 91-102.

Argos, M. et al. (2011). *A prospective study of arsenic exposure from drinking water and incidence of skin lesions in Bangladesh* Am J Epidemiol. American journal of Epidemiology; 174(2): p. 185-194.

Arias B.; Urbina B. & Alavarado Gómez, A. L. (2018). *Determinación de As (III) y As (V) en los pozos de las plantas de remoción de arsénico de Costa Rica*. Revista Tecnología en Marcha; 31(2): p. 136-146.

Auge, M. (2005). *Perforaciones hidrogeológicas*. Curso para perforistas de Universidad de Buenos Aires; p. 12.

Auge, M. (2004). *Regiones hidrogeológicas*. Universidad de Buenos Aires; p. 23-41.

Bissen M. & Frimmel F.H. (2003). *Arsenic - a review. Part I Occurrence, toxicity, speciation, mobility*. Acta Hydrochim Hydrobiol; 31(1): p. 9-18.

Bissen M. & Frimmel F.H. (2003). *Arsenic - a review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment*. Acta Hydrochim et hydrobiological; 31(2): p. 97-107.

Bocanegra, E. M. et al. (2002). *Groundwater and human development*. Water Science and Technology; 51(8): p. 27-37.

Benitez, R. O. et al. (2012). *Alternativas tecnológicas a tener en cuenta para la toma de decisiones frente a la problemática del arsénico en agua de bebida*. Programa Nacional de Minimización de Riesgos por Exposición a Arsénico en Agua de Consumo – Res. Ministerial 253/01; p. 12-22.

Bundschuh, A.; Pérez Carrera, M. & Litter, M.I. (2008). *Distribución del arsénico en la región Ibérica e Iberoamericana*. En Editorial Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, IBEROARSEN; p. 11.

Cáceres L.; Gruttner E. & Contreras R. (1992). *Water recycling in arid regions - Chilean case*. Ambio; 21(2): p. 138-144.

Cáceres D. D. et al. (2005). *Exposure to inorganic arsenic in drinking water and total urinary arsenic concentration in a Chilean population*. Environmental research; 98(2): p 151-159.

- Curto, S. I.; Plastina N. & Rolando Boffi R. (2001). *Arsénico en acuíferos: influencia sobre la salud de la población*. GAEA, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos; p. 21-22.
- Chakrabarti, D. et al. (2019). *Arsenic: Occurrence in Groundwater*. En J.O. Nriagu, *Encyclopedia of Environmental Health*, segunda edición; p. 153-168.
- De Gregori I. et al. (2003). *Monitoring of copper, arsenic and antimony levels in agricultural soils impacted and non-impacted by mining activities, from three regions in Chile*. *Journal of Environmental Monitoring*; 5(2): p. 287-295.
- Dennett, Keith E. et al. (1996). *Coagulation: it's effect on organic matter*. *Journal of the American Water Works Association*; 88(4): p.129-42.
- Díaz, S. L. et al. (2015). Geodisponibilidad de arsénico, hierro y sodio en suelos de la cuenca "El Divisorio". *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*; 33(2): p. 303-312.
- Ferreccio, C. et al. (2000). *Lung cancer and arsenic concentrations in drinking water in Chile*. *Fundamento del ENOHSA - Capítulo II. Estudios preliminares para el diseño de las obras*; 11(6): p. 673-678.
- Giraut, M. et al. (2001). *Cartografía Hídrica Superficial Digital de la República Argentina*. En X Congreso Nacional de Cartografía – VII Semana Nacional de Cartografía, IGM, Buenos Aires; (p. 378-387).
- Gómez Puentes, N. (2005). *Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación*. Trabajo de grado Monográfico para optar el título de Ingeniero Químico; p. 17-33.
- Iriondo, M. & Kröhling, D. (2007). *Geomorfología y sedimentología de la Cuenca Superior del Río Salado (Sur de Santa Fe y Noroeste de Buenos Aires, Argentina)*. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*; 14(1): p. 1-23.
- Kumar, S. & Sharma, S. (2020). *Water pollution in river systems and its impact on aquatic life: A review of recent scientific research*. *Journal of Environmental Management*; p. 43-62.
- Litter M. I. et al. (2018). *Arsénico en agua*. Informe de Red de Seguridad Alimentaria, CONICET; p. 78-101.
- Macrini, M.; Matranga, R. & Minaverri, C. M. (2016). *Actualización sobre la contaminación del agua por arsénico en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Implicancias jurisprudenciales*. En *Actas del 3er Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos*; p. 5.

Mc Cabe et al. (2005). *Operaciones unitarias en ingeniería química (7a edición)*. McGraw Hill; p. 259-280.

Navoni, J.A. et al (2014). *Human health risk assessment with spatial analysis: Study of a population chronically exposed to arsenic through drinking water from Argentina*. Science of the total environment 499; p. 166-174.

Puntoriero, M. L.; Volpedo, A. & Fernández Cirelli, A. (2014). *Riesgo para la población rural en zonas con alto contenido de arsénico en agua*. Acta toxicológica Argentina; 22(1): p. 15-22.

P.Ramya et al. *A study on the estimation of hardness in ground water samples by edta titrimetric method*. International Journal of Recent Scientific Research; 6 (6): p. 4505-4507.

Ruiz de Galarreta, V. A. & Rodríguez, C. I. (2018). *Conceptos básicos de Hidrología. Resolución del balance hidrológico*. Centro Científico Tecnológico Conicet. Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires; p. 164.

Sana A. & Fazal Ur Rehman M. (2018). *Hardness in Drinking-Water, its Sources, its Effects on Humans and its Household Treatment*. Artículo de Journal of Chemistry & Applications; 4(1): p. 2.

Saltos, V. & Donald, R. (2018). *Evaluación de tres tipos de tuberías usadas en tratamientos magnéticos para reducción de concentraciones de calcio y magnesio en aguas duras*. Tesis de grado de Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López; p. 8-13.

Sengupta P. (2013). *Potential Health Impacts of Hard Water*. International Journal of Preventive Medicine; 4(8): p. 866-875.

Smedley P.L. & Kinniburgh D.G. (2002). *A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters*. Applied geochemistry; 17(5): p. 517-568.

Valiente, L. et al. (2020). *Modelo de intervención para el abatimiento de Arsénico en aguas de consumo*. 1ª edición. General San Martín: INTI. Libro digital, PDF; p. 17-25.