



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO DE PROYECTOS PARA PLANTAS POTABILIZADORAS
PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO A PIE DE POZOS

INFORME PARA TITULACIÓN POR TRABAJO PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JORGE ARTURO ISLAS BAEZ

ASESOR: DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA



MÉXICO, 2015



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/083/15

Señor
JORGE ARTURO ISLAS BAEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento que ha sido aprobado el tema que usted propuso, mismo que será asesorado por la profesora DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA para ser desarrollado como informe escrito, conforme a la opción VI. "Titulación mediante trabajo profesional" para obtener su título de INGENIERO CIVIL.

"DESARROLLO DE PROYECTOS PARA PLANTAS POTABILIZADORAS PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO A PIE DE POZOS"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. METODOLOGÍA Y BASES DE DISEÑO
- III. RESULTADOS
- IV. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA
- ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 25 de agosto del 2015.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar

DEDICATORIA

A mis padres, que me han brindado las lecciones más importantes de mi vida y muchos de mis momentos más felices.

A mi hermana, que vivió un sinuoso camino antes que yo y usó su experiencia para ayudarme, más que cualquier otra persona, en mi propio sendero de contratiempos.

A mi Alma, porque su paciencia, su compañía y su amor en todo momento y durante este tiempo particularmente difícil, hicieron posible que llegara a este punto.

A mi Vic, porque es mi fuerza, mi diversión y la motivación más grande.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Petia Mijaylova Nacheva por sus consejos y su apoyo durante este proceso y en especial por regalarme parte de su tiempo a pesar de las grandes cagas de trabajo.

Al M. Fernando Pozo, M. Arturo Gonzalez y Dr. Martín Piña por su comprensión y soporte para la elaboración del trabajo y los trámites.

A mi familia, porque aun sin darse cuenta cada uno me sostuvo en algún punto y me permitieron intentar hasta concretarlo con este trabajo.

CONTENIDO

Resumen	VII
Abstract.....	VIII
Introducción.....	1
1 Antecedentes	6
1.1 Problemática general	6
1.2 Alternativas de tratamiento.....	8
1.2.1 Procesos con membranas.....	9
1.2.2 Intercambio iónico	13
1.2.3 Coagulación.....	15
1.3 Sistema de filtración directa	22
1.3.1 Tipos de filtración	23
2 Metodología y bases de diseño	27
2.1 Datos principales para el desarrollo de los cuatro proyectos	28
2.1.1 Proyecto 1	28
2.1.2 Proyecto 2	31
2.1.3 Proyecto 3	33
2.1.4 Proyecto 4	35
2.1.5 Levantamientos Topográficos.....	38
2.2 Esquema general de tratamiento	43
2.3 Cálculos y dimensionamiento de la planta	47
2.3.1 Filtros y tanque de almacenamiento	47

2.3.2 Tratamiento de lodos.....	51
2.3.3 Líneas de conducción y arreglo general	56
2.3.4 Pérdidas de energía	59
2.3.5 Cargas requeridas para alimentación y retrolavado de la planta	64
2.3.6 Consumo de reactivos	66
3 Resultados.....	68
3.1 Filtros y tanque de almacenamiento	68
3.2 Tratamiento de lodos.....	73
3.3 Líneas de conducción y arreglo general	78
3.4 Pérdidas de energía	88
3.5 Cargas requeridas para alimentación y retrolavado de la planta	97
3.6 Consumo de reactivos.....	102
3.7 Modelos de simulación	105
4 Conclusiones	112
Bibliografía	116
Anexo A.....	118
Anexo B	121
Anexo C	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites permisibles de características químicas, Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, 2000	2
Tabla 2 Reducción alcanzable de concentración de sustancias de origen natural, OMS (2006).....	8
Tabla 3 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 1.....	30
Tabla 4 Datos principales del proyecto 1.....	30
Tabla 5 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 2.....	32
Tabla 6 Datos principales del proyecto 2.....	33
Tabla 7 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 3.....	34
Tabla 8 Datos principales del proyecto 3.....	35
Tabla 9 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 4.....	36
Tabla 10 Datos principales del proyecto 4.....	37
Tabla 11 Datos principales del terreno del proyecto 1	39
Tabla 12 Datos principales del levantamiento al terreno del proyecto 2	40
Tabla 13 Datos principales del levantamiento al terreno del proyecto 3	41
Tabla 14 Datos principales del levantamiento al terreno del proyecto 4	42
Tabla 15 Potencia y eficiencias en equipos del proyecto 4	43
Tabla 16 Características de medios filtrantes.....	48
Tabla 17 Valores G y T para número de Reynolds.	60
Tabla 18 Características principales del funcionamiento de los filtros	70
Tabla 19 Espesores de placas para filtros de los cuatro proyectos	71
Tabla 20 Volumen mínimo requerido en tanques de almacenamiento.....	72

Tabla 21 Dimensiones propuestas para sedimentador	75
Tabla 22 Características de tuberías principales de retrolavado y alimentación a un filtro	82
Tabla 23 Características en tuberías principales de derivación y múltiple de alimentación	83
Tabla 24 Pérdidas por fricción durante la filtración (proyecto 1).	89
Tabla 25 Pérdidas por fricción durante retrolavado (proyecto 1).....	90
Tabla 26 Pérdidas locales durante filtración (proyecto 1).....	91
Tabla 27 Pérdidas locales durante retrolavado (proyecto 1).	92
Tabla 28 Pérdida en medios filtrantes durante filtración (proyecto 1).....	94
Tabla 29 Pérdida en medios filtrantes durante retrolavado (proyecto 1).	95
Tabla 30 Pérdidas en medio de soporte durante retrolavado (proyecto 1).	96
Tabla 31 Pérdidas en procesos de filtración y retrolavado de la planta	97
Tabla 32 Consumo de NaClO para 1.5 mg/l de cloro residual.....	103
Tabla 33 Consumo de cloruro férrico	105
Tabla 34 Coeficiente de pérdidas acumulado para simulación de proyecto 1	107
Tabla 35 Coeficiente de pérdidas acumulado para simulación de proyecto 2	110
Tabla 36 Capacidad y flujos resultantes por proyecto	113
Tabla 37 Capacidad y flujos resultantes por proyecto	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Flujos y configuración de vasija con membranas en espiral. (Fuente: www.acsmedioambiente.com).....	12
Ilustración 2 Acercamiento a resina de intercambio iónico. (Fuente: www.desmineralizadores.com).....	15
Ilustración 3 Tren de tratamiento común de ablandamiento por precipitación. (Fuente: www2.epa.gov/science-and-technology/water-science)	17
Ilustración 4 Disociación del Arsenito [As(III)].	20
Ilustración 5 Disociación del Arsenato [As(V)]......	21
Ilustración 6 Arena sílica (izquierda) y Antracita (derecha).....	22
Ilustración 7 Diagrama de flujo de sistema de filtración directa.....	25
Ilustración 8 Topografía en terreno para proyecto 1	39
Ilustración 9 Topografía en terreno para proyecto 2	40
Ilustración 10 Topografía en terreno para proyecto 3	41
Ilustración 11 Topografía en terreno para proyecto 4	42
Ilustración 12 Diagrama de flujo para proyecto 1	46
Ilustración 13 Diagrama de flujo para proyectos 2 y 3	46
Ilustración 14 Diagrama de flujo para proyecto 4	47
Ilustración 15 Esquema de sedimentador y tanque de lodos	52
Ilustración 16 Esquema general de filtro a presión	68
Ilustración 17 Arreglo general de proyecto 1	84
Ilustración 18 Arreglo general de proyecto 2	85
Ilustración 19 Arreglo general de proyecto 3	86

Ilustración 20 Arreglo general de proyecto 4	87
Ilustración 21 Simulación de presiones y caudales en planta de proyecto 1.....	108
Ilustración 22 Simulación de pérdidas y caudales en planta de proyecto 2	111

Resumen

El presente informe se desarrolló a partir de 4 proyectos de plantas para remoción de arsénico en el agua realizados en el área de Potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, los cuales responden a la creciente problemática de las altas concentraciones de contaminantes en el líquido que se suministra a algunas localidades en nuestro país. De acuerdo con esto, el propósito de este documento es integrar y desarrollar los aspectos principales involucrados en el diseño y cálculo de estos sistemas, validando el uso adecuado de los conocimientos implicados y demostrando a su vez la orientación de los mismos a mejorar la calidad de vida de la población, al aplicarlos para contribuir a la creación de sistemas potabilizadores que mejoren las características del agua que se distribuye. El trabajo aborda el proceso seguido a lo largo del proyecto al comenzar con el planteamiento de la problemática existente; presentar brevemente algunas de las tecnologías aplicables para la remoción de arsénico en el agua y los criterios utilizados para la selección del tren de tratamiento; seguir inmediatamente con el acopio y análisis de los datos requeridos para aplicar la tecnología seleccionada; detallar la metodología y cálculos necesarios para obtener como resultado el dimensionamiento y propuesta general de cada planta para remoción de arsénico; derivando finalmente en un conjunto de datos comparables entre sí, que proporcionan una base sobre los aspectos principales a considerar para la licitación y construcción de este tipo de sistemas.

Abstract

This report was developed based on 4 projects of water arsenic removal plants made in the Drinking Water Area of the Mexican Institute of Water Technology, which responds to the growing problem of high concentrations of contaminants in the fluid supplied to some locations in our country. Accordingly, the purpose of this document is to integrate and develop the main aspects involved in the design and calculation of these systems, validating the proper use of the knowledge involved and demonstrating at the same time their orientation to improve the quality of life of the population, when applied to contribute in the creation of purifying systems that improve the characteristics of the water distributed. The document deals with the process followed throughout the project by starting with the approach of the current problematics; briefly introduce some of the technologies for the removal of arsenic in water and the criteria used for the selection of the treatment train; follow immediately with the collection and analysis of the data required to apply the selected technology; then detail the methodology and calculations necessary to obtain the sizing and general proposal of each arsenic removal plant; finally resulting in a set of comparable data that provide a base for the main aspects to consider for bidding and construction of such systems.

Introducción

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2013), actualmente más del 90% de la población en México tiene acceso a agua potable. Este valor estadístico además de ser sumamente incluyente con la población al considerar a personas con acceso a través de una casa alemana, lo es también con el término “potable”; ya que en muchos lugares contemplados dentro de las estadísticas, el agua distribuida por la red de agua potable nacional tiene características que le impiden alcanzar este calificativo. Un porcentaje elevado del agua para consumo en México es de origen subterráneo y a pesar de que el método de obtención del recurso puede otorgar agua con una calidad adecuada, esta última suele variar a lo largo del tiempo e independientemente de las condiciones del agua cruda, los equipos de los pozos y el sistema de distribución deben seguir operando en muchas ocasiones incluso durante las 24 horas del día, por lo que es importante llevar un monitoreo constante de estas fuentes de abastecimiento.

La necesidad de proporcionar agua a las localidades de nuestro país y la falta de conciencia al utilizar este recurso han derivado en el crecimiento desmedido de los sistemas de abastecimiento, en algunos casos la sobre explotación de pozos y el abatimiento de los niveles freáticos en las zonas alemanas. Desafortunadamente el control de calidad del agua no ha crecido al mismo ritmo y en algunos casos, principalmente en las regiones rurales, el agua que se suministra es sumamente deficiente. Como respuesta a esta problemática de nuestro sistema de distribución de agua potable, existe la iniciativa de construcción de plantas que permitan mejorar la calidad del agua suministrada. De esta forma, el proyecto que da origen a este trabajo aborda el análisis de diversos pozos de distribución de agua, contaminados principalmente con arsénico, y el desarrollo de los proyectos de sistemas que permitan ofrecer mayor calidad en el agua al remover este elemento. En México la “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.” vigente desde el año 2000, regula entre otras cosas, las concentraciones

máximas de contaminantes químicos en el agua que se utiliza y consume en México (Tabla 1); sin embargo, esta normatividad es sumamente permisiva con algunos contaminantes, entre ellos el arsénico, si se le compara con los valores de referencia internacionales.

Tabla 1 Límites permisibles de características químicas, Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, 2000

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE (mg/l)
Aluminio	0,20
<u>Arsénico*</u>	<u>0,025</u>
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN-)	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl-)	250,00
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO ₃)	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,30
Fluoruros (como F-)	1,50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10,00
Etilbenceno	300,00
Tolueno	700,00
Xileno (tres isómeros)	500,00
Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6,5-8,5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,20
DDT (total de isómeros)	1,00
Gamma-HCH (lindano)	2,00

Hexaclorobenceno	1,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Metoxicloro	20,00
2,4 – D	30,00
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO ₄ =)	400,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,50
Trihalometanos totales	0,20
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5,00

* Concentración máxima fijada en el año 2005.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2006) el arsénico es uno de los contaminantes químicos a los que se debe dar prioridad de remoción, debido a diferentes estudios que han demostrado el alto potencial cancerígeno que tiene este elemento al ser ingerido por el ser humano y a los diversos efectos que puede provocar la intoxicación con el mismo. Al respecto Echevarría y Bournod (2010) mencionan entre las afecciones más comunes:

- Daño severo gastrointestinal.
- Vasodilatación, caída de presión sanguínea.
- Daño renal.
- Parálisis respiratoria. Causa frecuente de muerte.
- Contracciones musculares.
- Anormalidades cardíacas.
- Alteraciones en la piel como oscurecimiento y callosidades.

Por esta razón, en 1993 la ONU adoptó el límite práctico de cuantificación de aquella época, correspondiente a 0.01 mg/l, como la concentración máxima permisible de arsénico en el agua. Dicho valor, que no se ha movido hasta la fecha, es desde aquel entonces inferior al límite actual marcado dentro de la normatividad mexicana, a pesar de que en la última

modificación realizada a la NOM-127 en el año 2000 se realizó un ajuste que proponía una disminución gradual del valor máximo permisible, el cual terminaría por establecerse en 0.025mg/l a partir del año 2005 (ver tabla 1). Desafortunadamente, este elemento es sumamente común en la corteza terrestre por lo que el agua que proviene del subsuelo, puede obtenerlo en mayor o menor medida al disolver los minerales que encuentra a su paso. El humano por su parte también ha generado fuentes de contaminación por arsénico debido a actividades de tipo industrial y minera; sin embargo los focos de contaminación más frecuentes son de origen natural e incluso pueden variar con el tiempo debido a que las fuentes de agua para consumo, el origen y recorrido del agua que recarga los acuíferos pueden alterarse significativamente por causas naturales o por la actividad humana.

El objetivo de este trabajo es integrar parte de los trabajos realizados durante el periodo laboral y representar de esta forma algunos de los conocimientos adquiridos, así como validar otros obtenidos dentro de la formación académica recibida por parte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y comprobar que dicha preparación o experiencia es utilizada para contribuir de alguna forma a la solventación de retos y conflictos en nuestro país. En el presente informe se resumen parte de las actividades realizadas en cuatro de los proyectos en los que se colaboró y cuyo propósito de proporcionar un soporte teórico y técnico para la licitación de proyectos ejecutivos y construcción de sistemas para remoción de arsénico en el agua de fuentes de abastecimiento de agua potable.

Debido a las características físicas y presupuestales de cada uno, los proyectos difieren entre sí por incluir sólo algunos de los siguientes componentes: la propuesta del sistema de tratamiento basada en análisis de la calidad del agua de cada lugar; el diseño de la planta incluyendo el dimensionamiento de las estructuras requeridas, los levantamientos de los terrenos, el cálculo de los elementos hidráulicos y la elaboración de los planos necesarios; la generación del catálogo de materiales y presupuestación de la obra; así como la preparación de informes y proyectos ejecutivos. En el primer capítulo se resumen aspectos importantes sobre la selección de estos proyectos, como se encuentran involucrados en la problemática que

representa el arsénico en fuentes de agua potable y las principales tecnologías disponibles para enfrentar el reto que representa el suministro de agua y la presencia de este tipo de contaminantes en el agua. La segunda parte del documento se enfoca en la metodología a seguir, presentando los aspectos principales de cada proyecto y la teoría respecto a la selección del tren de tratamiento y el dimensionamiento de los elementos que componen cada planta. Dentro del tercer capítulo se condensan los resultados directos del diseño, que permiten conocer más sobre el funcionamiento y requerimientos de los sistemas; así como la modelación computacional de los aspectos hidráulicos de algunos proyectos sirvió para complementar el proyecto y solventar dudas respecto a su diseño.

1 Antecedentes

1.1 Problemática general

La creciente demanda de agua y la consecuente sobreexplotación de los acuíferos derivada de la creación constante de pozos para extracción de agua potable, es un proceso regular en nuestro país. En muchas localidades, como las que se incluyen en este proyecto, se ha provocado entre otros problemas, el abatimiento del nivel del agua y una extracción del líquido con características distintas a las registradas previamente en el mismo sitio o en los alrededores. Desafortunadamente este cambio en la calidad del fluido ha sido negativo en muchos casos y dada la presión sobre las autoridades al no poder suspender la distribución del líquido, el agua suministrada actualmente a estos sitios carece de características aceptables para considerarse potable de acuerdo con las normas vigentes en nuestro país. En estas localidades los datos obtenidos por el organismo operador y por CONAGUA, generados a partir del monitoreo reciente de las fuentes de agua, han permitido señalar al arsénico como uno de los contaminantes más nocivos presentes en concentraciones importantes, por lo que las acciones correctivas a implementar incluyen la instalación de las plantas para remoción de arsénico para los sistemas de agua potable involucrados.

A pesar de que no fue posible hacer un análisis extensivo en todas las localidades implicadas en estos proyectos para verificar la calidad del agua a lo largo del año y observar sus variaciones, la información obtenida de los estudios realizados y de los informes disponibles en cada uno de los sitios, arrojó de manera general que la fuente del arsénico en el agua de estos pozos es completamente natural; sin embargo, como se mencionó previamente en algunos de ellos el problema se ha agravado al no permitir la recarga de los acuíferos debido a la creciente demanda del líquido. Por otro lado los datos de los monitoreos existentes y los análisis realizados por el IMTA se utilizaron para establecer las variables de entrada para el diseño de los sistemas de potabilización.

A lo largo del documento se contemplan únicamente cuatro de los casos que se establecieron como prioritarios correspondientes a aquellos pozos de extracción de agua con concentraciones de arsénico mayores al límite permisible y con disponibilidad de terreno para la instalación de las plantas potabilizadoras. De manera puntual durante este periodo de tiempo se concentró la atención primero en los pozos donde sólo se requiriera la remoción de arsénico, debido a que es uno de los contaminantes más dañinos y que puede ser removido o controlado con métodos económicos y sencillos. Estos sistemas de baja inversión permiten distribuir el presupuesto destinado a esta área, en diversos proyectos que beneficien a distintas comunidades. De manera adicional en algunos pozos se encontraron otros contaminantes como un alto contenido de sólidos, dureza y fluoruros; sin embargo, a pesar de que en este momento se trabaja en el tratamiento del agua de estos pozos, dichos proyectos no serán abordados en este informe debido a que el tren de tratamiento es distinto o más complejo.

En cada caso se hicieron levantamientos, muestreos y mediciones de las características del agua y las condiciones electromecánicas del pozo, de tal forma que estos datos permitieron establecer el tratamiento adecuado para cada lugar. El muestreo realizado sirvió únicamente como control y corroboración de los datos proporcionados por la CONAGUA; sin embargo las mediciones de flujo realizadas con un medidor ultrasónico se tomarán como base para el dimensionamiento de los elementos hidráulicos. La verificación de las características electromecánicas de los pozos se utilizó para determinar el estado en que se encontraban las instalaciones de los pozos y que modificaciones se requerirían para el correcto funcionamiento de la planta y la posterior distribución del agua. Así mismo, el levantamiento de los terrenos de los pozos brindo un panorama general de las instalaciones, la ubicación específica del pozo, la configuración y el espacio disponible dentro del terreno. Este último fue uno de los principales obstáculos en estos proyectos, ya que las dimensiones de los elementos que componen la planta dependen directamente del gasto a tratar; por lo tanto en algunos de los proyectos donde los predios de los pozos no fueron suficientemente grandes, fue necesario ubicar la planta en algún terreno cercano.

1.2 Alternativas de tratamiento

Como se menciona previamente los proyectos englobados en este documento se enfocan principalmente en la remoción de arsénico en el agua para uso y consumo humano, obtenida de pozos en diversas localidades de México. Este objetivo, es alcanzable por diversas técnicas de tratamiento del agua las cuales difieren en muchos sentidos (Ver Tabla 2), por ejemplo: el aspecto económico tanto en construcción como en operación, las áreas requeridas para la instalación de los elementos de la planta, la cantidad de energía utilizada en el proceso, los residuos generados como resultado del tratamiento, la complejidad de la operación, la calidad del efluente de la planta y otros aspectos que deben ser considerados antes de la selección del tren de tratamiento que llevará la planta. Para la selección de la tecnología a aplicar es necesario conocer los aspectos principales de cada una para determinar cuál es el proceso que más se adecúa a las características del agua bruta y las necesidades de la localidad.

Tabla 2 Reducción alcanzable de concentración de sustancias de origen natural, OMS (2006)

	Cloración	Coagulación	Intercambio de iones	Ablandamiento por precipitación	Alúmina activada	Carbón activado	Ozonización	Membranas
Arsénico		+++ <0.005	+++ <0.005	+++ <0.005	+++ <0.005			+++ <0.005
Fluoruro		++			+++ <1			+++ <1
Manganeso	+++ <0.05	++					+++ <0.05	+++ <0.05
Selenio		++	+++ <0.01		+++ <0.01			+++ <0.01
Uranio		++	+++ <0.001	++	+++ <0.001			

El significado de los símbolos es el siguiente:

++ : 50% o más de reducción de la concentración.

+++ : 80% o más de reducción de la concentración.

Se incluyen en el cuadro únicamente las sustancias químicas de las que se dispone de datos sobre tratamientos. La ausencia de dato implica que el proceso es ineficaz o que no se cuenta con datos de su eficacia. Para los datos más eficaces, el cuadro indica la concentración de la sustancia en mg/l, que debería poderse alcanzar.

Como se puede observar en la Tabla 2 existen métodos probados para la remoción de arsénico en el agua y todos con un alto grado de reducción del contaminante; sin embargo, la factibilidad del tratamiento depende, entre otras cosas, de la metodología, la complejidad del proceso, el costo y las características del agua a tratar. Por esta razón para tomar la decisión adecuada en la selección de un tren de tratamiento, es fundamental conocer las características de cada tecnología y como se diferencia de las demás. En este caso el tipo de tratamiento principal para la remoción de arsénico se seleccionó considerando los aspectos previamente mencionados en cada una de las siguientes tecnologías:

- Intercambio Iónico.
- Procesos con membranas.
- Ablandamiento por precipitación.
- Coagulación y filtración.

1.2.1 Procesos con membranas

Aunque son similares, estos sistemas a base de membranas tienen diferencias que pueden cambiar significativamente su eficiencia y costo por metro cúbico de agua. Este tipo de procesos son sumamente efectivos en una gran cantidad de situaciones, pero suelen derivar en altos costos de instalación y operación. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2006), los procesos de membranas más comunes e importantes, que comenzaron como tratamientos regulares dentro de la industria y que hoy su utilización se ha adaptado para la eliminación de contaminantes en el agua para consumo humano, se dividen en dos grupos: procesos de alta presión y baja presión; esto de acuerdo con la cantidad de carga que requieren para funcionar adecuadamente. En ambos campos el principio de funcionamiento se basa en la inducción del paso del agua a través de una membrana semipermeable al generar un diferencial de presión entre los dos lados de la membrana. La magnitud de este diferencial es lo que divide a los sistemas en procesos de alta presión como la ósmosis inversa o la nanofiltración y procesos de baja presión conocidos como ultrafiltración y microfiltración.

Como es de esperarse, los sistemas que requieren presiones más elevadas para realizar el permeado del agua son aquellos en los que el tamaño de los poros en la membrana es más pequeño y por lo tanto las partículas que pueden retener son de menor diámetro. De acuerdo con esto, dentro de los sistemas de baja presión, el proceso más sencillo es el conocido como microfiltración y suele considerarse como una variante de la filtración común ya que únicamente puede retener materia en suspensión que se encuentre en el agua; esto es partículas con diámetro mayor a $0.05 \mu\text{m}$ debido a que el poro promedio de las membranas utilizadas tiene dimensiones entre 0.01 y $12 \mu\text{m}$. Para lograr esta retención usualmente se emplean diferenciales de presión entre 1 y 2 bar. El otro proceso incluido dentro de este campo de bajas presiones es la ultrafiltración que esencialmente difiere del anterior por utilizar membranas con poros menores, entre 0.002 y $0.03 \mu\text{m}$, lo que les permite retener partículas de menor tamaño, incluyendo moléculas grandes, pero utilizando presiones ligeramente superiores que pueden estar alrededor de los 4 bar. Los diferenciales de presión que se emplean en estos dos métodos suelen considerarse relativamente bajos y de hecho dependiendo de las condiciones del proyecto, se pueden llegar a operar generando el gradiente de presión por medio de un incremento en la carga de llegada del agua o una presión de vacío en el otro lado de la membrana. Cualquiera que sea el sistema elegido el funcionamiento es esencialmente el mismo y la eficiencia también. Cuando el agua es forzada por la diferencia de presiones a pasar a través de la membrana, las partículas con un tamaño mayor al de los poros son retenidas. Este sistema requiere de un método de limpieza, utilizando agua filtrada para hacerla pasar en sentido contrario y remover de esta forma todo lo que quedó retenido por la membrana. A este proceso inverso se le conoce como retrolavado y en los sistemas donde la calidad del agua lo permite un porcentaje del mismo suele ser recirculado al afluente del agua para lograr un alto índice de recuperación al aprovechar la mayor parte del agua que llega. En buena medida se pueden lograr índices de recuperación elevados; sin embargo, en todos los casos otra fracción del agua termina como desecho que de manera regular se descarga a la red de drenaje sanitario si cumple con la normatividad existente. El agua que logra atravesar las membranas se conoce frecuentemente como volumen recuperado o permeado, mientras que la

fracción que no atraviesa las membranas se convierte en un caudal de alta concentración de contaminantes conocido como volumen de rechazo.

Tanto la ultrafiltración como la microfiltración tienen la ventaja de poder trabajar con un alto grado de efectividad bajo un amplio rango de pH, el cual puede ir desde 2 hasta 13 sin modificar las características del efluente. Desafortunadamente no todas las características del agua pasan así de inadvertidas por estos procesos; ya que tanto la calidad del agua, como la temperatura, pueden afectar notablemente la eficiencia de la filtración. En el caso de la calidad su importancia es evidente ya que con un alto grado de contaminantes y materia suspendida, la membrana quedaría rápidamente obstruida; sin embargo la temperatura se vuelve relevante en estos procesos ya que tanto la densidad del agua, como su viscosidad se ven afectadas de manera directa con las variaciones de este parámetro y desafortunadamente aunque las variaciones parecen minúsculas, a esta escala las perturbaciones en estos parámetros impactan en la presión que se requiere para forzar el agua a través de la membrana y la energía suministrada al sistema.

Como se mencionó previamente existen procesos que requieren presiones elevadas para su funcionamiento. Este tipo de sistemas parten del concepto conocido como ósmosis, pero trabajándolo de manera inversa a la natural, de manera que el agua contaminada es la solución más concentrada y al inducirle una presión superior a la osmótica se le obliga a atravesar la membrana hacia el lado con menor concentración. El primero de estos procesos es la nanofiltración que es un sistema que trabaja regularmente con cargas de 5 bar o más, lo que la coloca justo por encima de la ultrafiltración y como es de esperarse el diámetro estándar de los poros es menor al de este último al encontrarse entre los 0.001 y 0.01 μm . Estos valores tan pequeños permiten a las membranas de nanofiltración retener moléculas con peso molecular mayor a 200, así como iones divalentes. Un proceso muy similar, pero con una capacidad de retención superior, es el conocido como ósmosis inversa y aunque puede retener partículas muy pequeñas como iones monovalentes, las presiones requeridas para atravesar la membrana se

ubican entre los 15 y 50 bar como consecuencia del reducido diámetro de los poros, ya que este es menor a los $0.002 \mu\text{m}$.

Debido a las altas presiones se requieren de contenedores construidos generalmente como cilindros largos y con diámetros alrededor de las ocho pulgadas, conocidos como vasijas; las cuales llevan en su interior algún arreglo de membranas el cual depende principalmente del tipo de proceso a utilizar. En los contenedores de membranas el arreglo interno más común es el de espiral, que conecta diversas de ellas a lo largo de un tubo para maximizar el volumen recuperado, forzando al flujo a pasar de una membrana a otra mientras, una fracción del mismo es permeada y separada del flujo principal. De esta forma el rechazo de la primera membrana se convierte en la alimentación de la segunda y así sucesivamente dentro de toda la vasija de presión, generando como producto dos caudales separados a la salida, uno de agua permeada y otro de la rechazada. En la Ilustración 1 se presenta la configuración de la vasija con membranas en espiral.

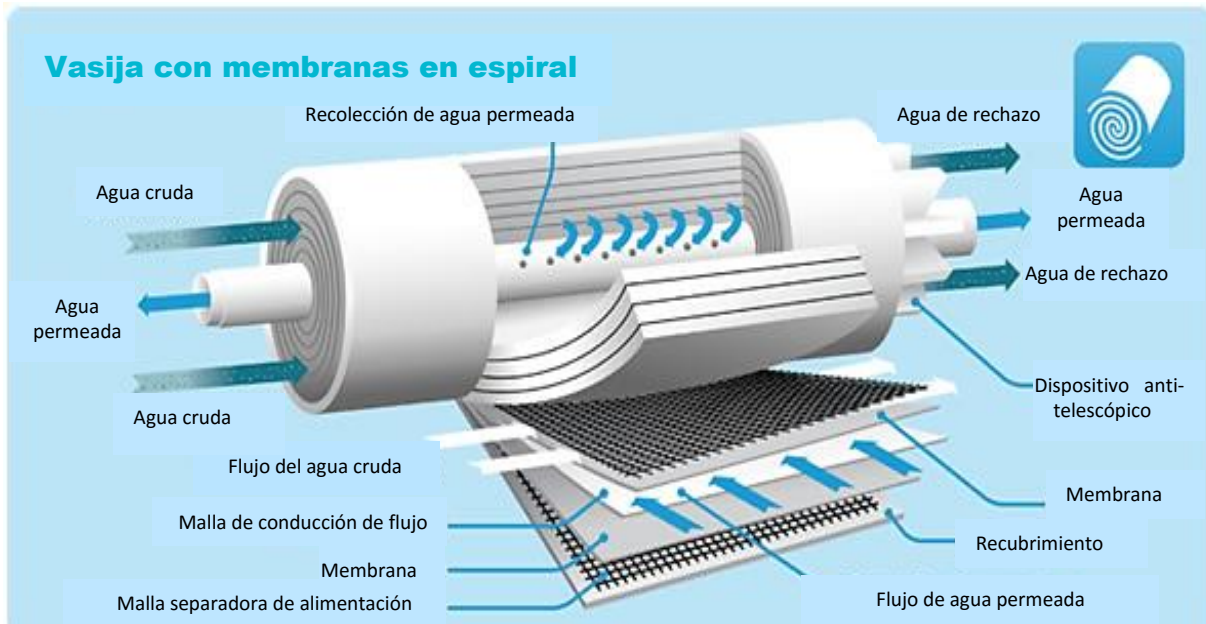


Ilustración 1 Flujos y configuración de vasija con membranas en espiral. (Fuente: www.acsmedioambiente.com)

En general para incrementar el índice de recuperación, estos sistemas suelen mandar el rechazo de una o más vasijas hacia otra y repetir este proceso dejando un caudal de rechazo pequeño pero con gran cantidad de contaminantes. Al sistema se le divide en etapas o pasos, de tal forma que el conjunto de vasijas que reciben el agua cruda, conforma el paso 1, las que toman el agua de rechazo de las primeras integran el paso 2 y así sucesivamente.

A pesar de que los procesos de alta presión son muy efectivos; su costo, en especial el de la ósmosis inversa, es sumamente alto debido a la inversión inicial y a la cantidad de energía requerida para generar las cargas de trabajo necesarias ya que aunque un número elevado de pasos otorga mayor recuperación del agua, también requiere de mayor carga para superar las pérdidas y lograr que el agua pase la membrana en los últimos pasos. Así mismo la saturación de las membranas se puede alcanzar rápidamente requiriendo en algunos casos, la colocación de un pretratamiento para disminuir la carga contaminante, así como la instalación de un sistema de mantenimiento y lavado de membranas compuestos por equipos de bombeo, tanques de almacenamiento de agua y en ocasiones un sistema de inyección de aire o para lavado químico que ayude a eliminar los contaminantes atrapados en las membranas y alargar su vida útil. Otra desventaja importante de estos sistemas es que remueven partículas de acuerdo con su tamaño de manera indistinta, por lo que en la búsqueda de eliminar algún contaminante se pueden retener algunos minerales necesarios en el agua. Esta debilidad se puede contrarrestar en algunos casos al tratar una fracción del agua y combinar agua cruda con el efluente permeado para obtener la calidad deseada.

1.2.2 Intercambio iónico

Como su nombre lo dice, el intercambio iónico es un proceso químico que consiste en el traspaso mutuo de iones entre una fase líquida y una sólida, de tal forma que es posible aprovecharlo en diversas aplicaciones dentro de la remoción de contaminantes en el agua. Al poner en contacto al líquido con un sólido con características especiales, se puede propiciar este intercambio y obligar al agua a ceder partículas nocivas a la fase sólida y recibir un número igual de otras no perjudiciales en su lugar. Las partículas transferidas son aniones o cationes y el

material sólido utilizado en estos sistemas se conoce como intercambiador iónico; el cual consiste regularmente en resinas insolubles con una gran cantidad de iones permutables en toda su estructura. El intercambio sólo se realiza entre partículas con la misma carga, por lo que una resina catiónica (con cationes en su estructura) puede recibir únicamente cationes de la fase líquida, de la misma forma que una resina aniónica intercambia sólo iones de signo negativo.

Como se puede intuir, el proceso tiene un límite establecido por el número de iones permutables en la resina de intercambio, una vez que la estructura de la misma se satura de los iones contaminantes al haber cedido todos los que tenía disponibles, el lecho sólido deja de trabajar. Afortunadamente el material de intercambio iónico es reutilizable gracias a su capacidad para deshacerse de los contaminantes retenidos y regenerar su estructura a su estado original al ponerse en contacto con una solución saturada de iones de intercambio. La solución utilizada depende directamente de la resina seleccionada para el tratamiento; la cual a su vez, es elegida en función del tipo de contaminantes que se desea remover.

Las resinas son englobadas en dos grupos y a su vez dos subdivisiones como fuertes y débiles dependiendo de la potencia de la solución regeneradora. Las catiónicas se restauran generalmente mediante ácidos y pueden ser de ácidos fuertes; estas resinas tienen la ventaja de trabajar adecuadamente bajo cualquier condición de pH en el agua. Las resinas catiónicas se utilizan de manera regular para la remoción de dureza y en general cationes como potasio, magnesio o calcio a través de intercambio con hidrógeno o sodio. Las de ácido débil por su parte, tienen una menor capacidad de intercambio y no soportan muy bien las condiciones de acidez extrema; sin embargo, sus requerimientos de solución regenerante son significativamente menores, por lo que en la práctica suelen regenerarlas con el ácido desechado de las resinas de ácido fuerte. De la misma forma, las resinas de base débil necesitan una cantidad menor de sosa para su regeneración que las de base fuerte, desafortunadamente no funcionan bajo valores de pH elevados lo que limita un poco su uso o requiere de tratamientos previos. Estas últimas tienen capacidad de remover algunos metales pesados,

nitratos y con una alta eficiencia el selenio y arsénico, aunque este último debe encontrarse como As^{+5} para lograr el efecto esperado, por lo que es muy común encontrar sistemas de oxidación previos al tratamiento con intercambio iónico.

Las resinas en general se forman por pequeñas esferas de polímeros sintéticos que poseen un tamaño entre 0.2 y 1 mm aproximadamente (Ilustración 2). Estas esferas a pesar de ser regenerables, poseen un límite en su capacidad de regeneración debido a que su estructura sufre pequeñas modificaciones que disminuyen progresivamente su capacidad de intercambio; por lo que en algún punto deben ser reemplazadas por una resina nueva para mantener la eficiencia de remoción. El periodo de vida útil de un material de intercambio iónico no depende tanto del tiempo si no de la frecuencia de uso y de las características del agua a tratar. El fabricante de estos materiales suele estimar una vida útil en términos del volumen de líquido que traten bajo condiciones óptimas de la calidad del agua.



Ilustración 2 Acercamiento a resina de intercambio iónico. (Fuente: www.desmineralizadores.com)

1.2.3 Coagulación

De manera sencilla Delphos y Letterman (2012) definen a la coagulación como “el proceso en el cual se añaden químicos al agua para reducir las fuerzas que tienden a mantener las partículas separadas”. Este método en sí, no proporciona un tratamiento completo para la remoción de arsénico; sin embargo, como el agua de estas fuentes de alimentación no suele crear flóculos de manera natural, la formación de estos, derivada del proceso de coagulación, puede ser aprovechada para eliminar arsénico y otros contaminantes a través de diversas

tecnologías como la sedimentación, la filtración o la combinación de ambas. Basados en lo anterior, existen algunos sistemas que implementan coagulantes como parte inicial del tratamiento tales como el ablandamiento por precipitación y la coagulación-filtración.

a) Ablandamiento por precipitación

A pesar de ser un tratamiento enfocado en la remoción de otro contaminante como lo es la dureza, el ablandamiento por precipitación es un proceso que funciona muy bien en la remoción de arsénico y con alto grado de efectividad si se lleva a cabo adecuadamente. El ablandamiento es esencialmente un proceso de remoción de minerales como el calcio y magnesio que se encuentran en el agua. Las sales de Ca y Mg constituyen la dureza del agua; la cual, aunque no está considerada como un contaminante peligroso para los humanos, debido a la poca o nula evidencia de sus efectos dañinos en los mismos, suele ser causa de diversos problemas para la población e incluso para el sistema de distribución del agua; ya que concentraciones altas de minerales en el agua, pueden provocar incrustaciones en las tuberías caseras, en la red de distribución o en los equipos de bombeo del agua. Al mismo tiempo el agua dura suele causar molestia entre los usuarios al dificultarles tareas simples como el lavado de ropa, trastes o manos debido a su baja capacidad para remover jabón y detergente.

Existen muchos métodos de ablandamiento del agua; sin embargo los más utilizados en la potabilización de aguas suelen ser el ablandamiento por precipitación con cal, cal/sosa y sosa cáustica. El uso simple de cal es más común cuando las concentraciones de calcio y magnesio son relativamente bajas; así mismo la adición de cal/sosa suele plantearse para la reducción de concentraciones medias de estos minerales y finalmente la sosa cáustica se aplica en aguas con alto contenido de los mismos. Este último proceso es obviamente el más costoso de los tres, pero tiene la ventaja de producir cantidades de lodos mucho menores que los dos anteriores. El tren de tratamiento, que se puede observar en la Ilustración 3, es similar en todas las modalidades y se compone regularmente por los siguientes elementos: adición de cal o sosa, un

sistema de mezclado rápido seguido de floculación, tanque de sedimentación, recarbonatación para bajar el pH y filtración para clarificar y eliminar los flóculos remanentes en el agua.

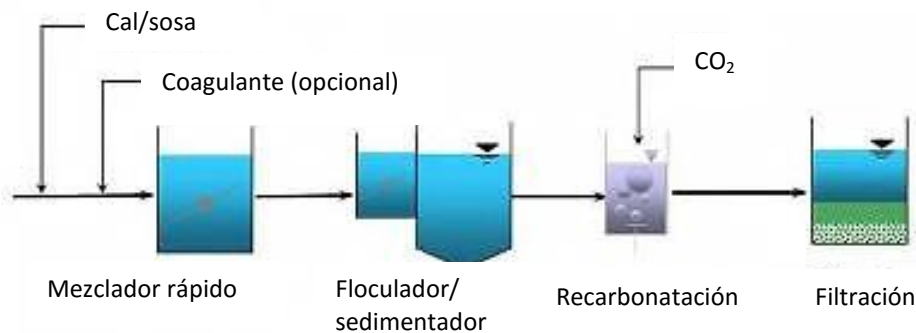


Ilustración 3 Tren de tratamiento común de ablandamiento por precipitación. (Fuente: www2.epa.gov/science-and-technology/water-science)

De manera similar a la coagulación química la eliminación del arsénico se realiza por medio de la formación de flóculos que el proceso llevado a cabo con cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ forma a partir de carbonatos de calcio que funcionan como adsorbente del arsénico. Al igual que otros procesos, este tratamiento tiene la desventaja de depender ampliamente del valor de pH en el agua, el cual debe mantenerse por encima de 10 para considerarse aceptable dentro de este proceso. La eficiencia de remoción con valores inferiores a 10 puede considerarse relativamente baja, ya que difícilmente se obtendría un 70% de eficiencia como máximo en estas condiciones. De acuerdo con Bournod, Cabezas y Pérez (2010), dentro de un rango de pH entre 10 y 12 la remoción, al menos de arsenatos, puede llegar hasta un 95%; sin embargo, la eliminación de arsenitos es deficiente en comparación y en general es necesaria la inclusión de otro tratamiento para reducir el arsénico a menos de 0.01 mg/l.

Este sistema, si bien cumple el doble propósito del ablandamiento y la remoción de arsénico no es recomendable para el tratamiento de caudales menores debido al alto costo que puede representar en comparación con otros procesos. Así mismo es importante considerar que el ablandamiento con cal genera una gran cantidad de lodos de desecho cuyo tratamiento contribuye a la inflación de los costos de tratamiento; ya que a grandes caudales, podrían

parecer excesivos los requerimientos de espacio dentro de la planta para el sistema de tratamiento de lodos, incluyendo su secado y espacio para almacenarlo previo a su transporte hasta el sitio final de disposición de los mismos.

b) Coagulación y filtración

Los procesos de coagulación y filtración son en sí dos tecnologías y procesos diferentes e independientes entre sí, por lo que pueden utilizarse individualmente bajo ciertas condiciones y son parte fundamental de muchos sistemas de tratamiento del agua. La combinación de ambos ha demostrado ser sumamente eficaz en la remoción de arsénico y otros contaminantes del agua debido a que se complementan adecuadamente, siempre y cuando la dosis del coagulante y el pH se encuentren en los valores correctos. Para llevar a cabo este tipo de tratamiento es primordial que se utilice un sistema de dosificación de un coagulante químico, que generalmente consiste en sales de aluminio, de hierro o un polímero, que pueden inducir la formación de flóculos donde el arsénico quede atrapado, al eliminar las cargas que provocan que las partículas se repelan entre sí. La dosificación permitirá suministrar al agua la cantidad de coagulante que se requiere de acuerdo con la concentración de arsénico presente en el afluente. De manera común esta cantidad suele encontrarse entre 2 y 5 mg/l para las sales de aluminio y va de 4 a 10 mg/l para las de hierro; sin embargo los valores específicos dependen como ya se mencionó, de las características del agua por tratar. Independientemente del químico a utilizar la tecnología se ha probado ya un sinnúmero de veces y esto ha permitido a los especialistas identificar aquellos que resultaron más efectivos, de los cuales, hoy en día los más comunes son los siguientes:

- Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio es el químico más utilizado en los sistemas de potabilización regulares debido a que su producción es relativamente sencilla y se encuentra altamente distribuido en todo el mundo. Adicionalmente su costo es accesible, aunque depende del nivel de pureza requerido ya que se puede encontrar con un alto contenido de hierro residual o como

un producto prácticamente libre de hierro. Este coagulante, a pesar de ser muy utilizado, suele tener problemas con el aluminio residual en el agua si no se cuida el proceso detalladamente y es necesario también verificar las variaciones en el pH del afluente para mantener la eficiencia.

- Cloruro de aluminio

Este químico puede trabajar a pH un poco más alto que el sulfato de aluminio y es capaz de formar flóculos de una manera más rápida aun cuando se tienen bajas temperaturas en el agua. Las dosis suelen ser menores a las del sulfato y suele encontrarse con relativa facilidad en estado sólido y líquido; sin embargo no suele ser la mejor opción en casos específicos como la remoción de materia orgánica y el costo por kg de cloruro de aluminio suele ser alto comparado con otros coagulantes similares.

- Sulfatos de hierro

A pesar de ser menos utilizado que los dos químicos mencionados previamente; esta sal de hierro es un buen coagulante, con una alta eficiencia de remoción e incluso bajo las condiciones adecuadas una mayor eficiencia que la del sulfato de aluminio. Su pH de trabajo ideal suele ser alto para la remoción de metales y bajo cuando se trata de contaminantes de origen orgánico. Elimina los conflictos generados por el aluminio residual característicos de los químicos que emplean este elemento, pero genera mayor desconfianza debido a que el tipo de flóculos que genera son de color oscuro.

- Cloruro férrico

Este químico es una sal de base débil que en su forma comercial se encuentra como una solución en concentraciones alrededor del 40% y que debe mantenerse ligeramente ácida para evitar la precipitación. Al igual que el sulfato de hierro, la eficiencia de remoción de este químico es sumamente buena y su rango de trabajo del pH puede ir desde 3.7 a 7.0 o de 8 a 9.5, aunque presenta eficiencias adecuadas con valores ligeramente fuera de estos rangos lo que lo convierte en un buen candidato para el tratamiento de aguas con variaciones de este parámetro. Debido a esto es sumamente utilizado en la eliminación de arsénico en el agua de

pozos, ya que adicionalmente tiene un costo muy accesible y bajo en comparación con otros coagulantes a pesar de requerir generalmente dosis más elevadas que las de las sales de aluminio. Por otro lado la velocidad de reacción de este químico es alta y el peso molecular de los iones que genera es relativamente grande lo que facilita su uso en sistemas de remoción a pie de pozos y procesos de filtración directa.

Es importante resaltar que el arsénico en el agua suele presentarse de diversas formas, pero en las aguas subterráneas obtenidas en los pozos, se encuentra principalmente como arsenito (As^{+3}) y en menor medida como arsenato (As^{+5}). Estos iones y su cantidad en el agua influyen directamente en la eficiencia del tratamiento y en el caso del cloruro férrico, pueden reducirla a menos del 20% si se intenta remover directamente el arsénico de agua con presencia mayormente de arsenito. Como se puede observar en las ilustraciones 4 y 5, este cambio sustancial se debe a que generalmente bajo condiciones de pH entre 4 y 10, el As^{+5} presenta una carga negativa facilitando su remoción en comparación con el As^{+3} , que bajo las mismas condiciones no posee esta carga. En estas circunstancias la coagulación no es un tratamiento adecuado; sin embargo es posible provocar la oxidación química de los arsenitos para obtener arsenatos si se utiliza un compuesto oxidante. En la práctica es común utilizar oxidantes que puedan además aprovecharse en alguna otra parte del proceso de tratamiento del agua, como por ejemplo la desinfección. Para esta fase suele utilizarse cloro en forma de hipoclorito de sodio o de calcio, que si es dosificado correctamente permite realizar la desinfección y oxidación manteniendo una baja concentración de cloro residual en el efluente.

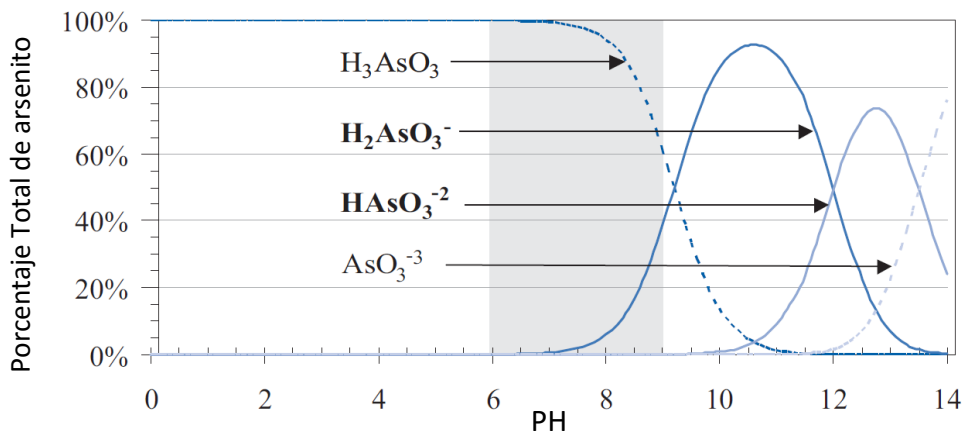


Ilustración 4 Disociación del Arsenito [As(III)].

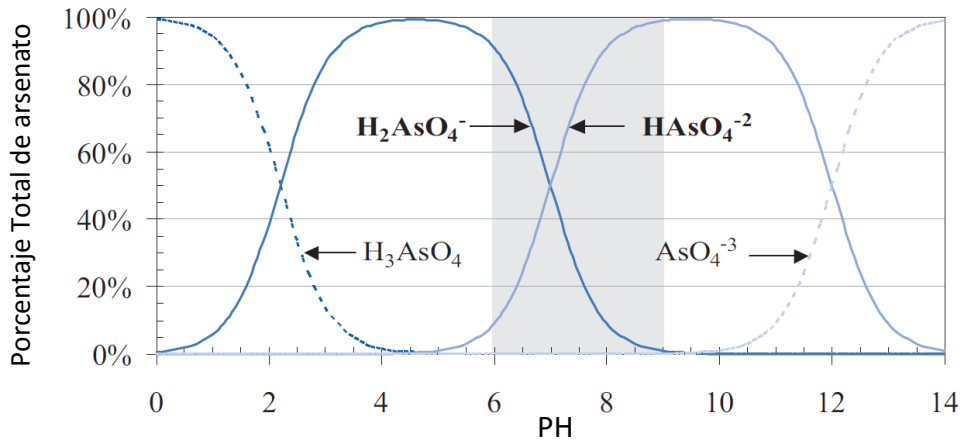


Ilustración 5 Disociación del Arsenato [As(V)].

En la remoción de arsénico existen algunas variantes que incluyen a la filtración, siendo el más común el tren de tratamiento convencional compuesto por las etapas de coagulación, mezclado-floculación, sedimentación y filtración. Este sistema es altamente efectivo incluso con concentraciones muy altas de arsénico, ya que en las primeras dos unidades se logra la separación de un porcentaje elevado del contaminante al retenerlo en el sedimentador en forma de flóculos. De esta forma el agua clarificada que ingresa a los filtros posee cantidades relativamente bajas de arsénico, que pueden ser removidas con un alto grado de efectividad en estas unidades sin requerir procesos adicionales, tasas de filtración bajas o de retrolavados constantes para evitar la constante saturación de los lechos y formación de cortos circuitos del flujo. Los tanques de filtración utilizados pueden estar compuestos de uno o varios medios filtrantes dependiendo de las características del agua; sin embargo, es más común utilizar al menos dos lechos de tal forma que los intersticios en cada uno retienen partículas de diferente tamaño evitando la rápida saturación del filtro y prolongando las carreras de filtración. Existen muchos materiales que se utilizan como medio filtrante y diversas combinaciones de los mismos dentro de las cuales, la composición más frecuente debido a su efectividad de remoción, periodos aceptables entre retrolavados y diferencia de densidades, es el lecho dual integrado por antracita y arena sílica (Ilustración 6), cuyas densidades relativas son 1.5 y 2.5 respectivamente, con un soporte de grava. La densidad es uno de los aspectos principales para

la selección de los medios, esto debido a que durante los procesos de retrolavado el acomodo de los lechos se pierde y sólo una diferencia importante de densidades permite la reincorporación ordenada de las capas por la diferencia en la velocidad de sedimentación de los medios.



Ilustración 6 Arena sílica (izquierda) y Antracita (derecha)

1.3 Sistema de filtración directa

Con el mismo principio que sigue el método convencional con coagulación, mezclado-floculación, sedimentación y filtración, pero como alternativa más compacta y económica se encuentra el sistema de filtración directa; el cual, como su nombre lo dice, consiste en hacer pasar el agua directo de la fuente de abastecimiento hacia los filtros, aprovechando accesorios como los mezcladores estáticos que pueden ser colocados sobre la línea de conducción para mezclar el agua con el coagulante, al provocar cambios bruscos en la dirección y velocidad del flujo, propiciando de esta forma la coagulación y formación de flóculos antes de llegar a la batería de filtros. Este proceso tiene las desventajas de requerir tasas de filtración menores para lograr una alta eficiencia de remoción aún con concentraciones bajas o medias de arsénico y suele no ser suficiente para el tratamiento de aguas con alto contenido del contaminante. Por otro lado, los filtros demandan una frecuente limpieza de los lechos para mantener la calidad

deseada del agua, que suele mermar en proporción a la concentración de arsénico en el afluente y a la saturación de los medios filtrantes.

1.3.1 Tipos de filtración

Dentro de los sistemas de filtración con uno o más lechos se tienen los sistemas lentos y rápidos. Los primeros poseen una alta eficiencia de remoción pero tasas de filtración bajas y suelen ocupar áreas sumamente grandes; por otro lado los sistemas de filtración rápida poseen una eficiencia menor, pero al mismo tiempo otorgan mayor versatilidad debido a su tamaño. Dentro de esta última modalidad encontramos además las dos variantes más populares actualmente:

- a) Los filtros a gravedad operan bajo la presión atmosférica y pueden presentar alguna de las siguientes modalidades:
 - Tasa constante. Que se caracteriza por una descarga libre sobre el lecho, una repartición equitativa del caudal entre los filtros y niveles independientes entre los tanques.
 - Tasa declinante. Conformada por una descarga sumergida, carreras de filtración largas, caudal variable de un filtro a otro y nivel de agua constante.
 - Tasa y nivel constantes. Esta modalidad requiere de equipos de control generan una cierta pérdida de carga en el flujo, la cual disminuye a medida que aumenta la pérdida dentro del filtro, manteniendo de esta forma el nivel constante en el tanque. Su desventaja principal respecto a los dos anteriores es el costo de los equipos y la operación.

- b) La filtración a presión se diferencia de los sistemas a gravedad por la particularidad de componerse de tanques cerrados que trabajan bajo una presión distinta a la atmosférica. Esta variante tiene la ventaja de requerir áreas de construcción menores en comparación con los filtros a gravedad; al menos para plantas de menos de 120 l/s, debido a que los tanques suelen ser de acero o materiales similares que no poseen espesores grandes en comparación con los muros de concreto utilizados en filtros por

gravedad. Su desventaja suele ser el requerimiento de equipos de bombeo para alcanzar las cargas de operación superiores a 1 kg/cm^2 y para el control o monitoreo del funcionamiento interno de los filtros.

Los sistemas de filtros a presión deben poseer para su correcta operación un conjunto de válvulas manuales o automáticas, elementos de distribución y recolección de agua, lechos filtrantes, un medio de soporte y acceso para el mantenimiento de los tanques como se muestra en la Ilustración 7.

Este tipo de filtros pueden operar bajo diversas tasas de operación dependiendo del tipo de contaminantes que se deseen remover y en el caso particular del arsénico, el IMTA (2010) obtuvo como resultado de diversas pruebas para un lecho dual de arena y antracita, que la tasa de filtración más adecuada se encuentra entre 5 y 7.5 m/h, mientras que la de retrolavado con agua filtrada debe ser alrededor de 60 m/h con una duración del proceso de 8 a 10 minutos. Dentro de este mismo estudio y corroborado posteriormente en 2011, el IMTA encontró que la eficiencia de remoción para este sistema, operando en las condiciones descritas y con carreras de filtración de alrededor de 24 a 48 h se encuentra por encima del 81%.

El esquema general de tratamiento en sistemas de filtración directa se puede integrar de los siguientes componentes o de algunos elementos alternativos que cumplan el mismo fin:

- Bomba de alimentación a la planta.
- Medidor de flujo.
- Dosificación de reactivos de desinfección, oxidación y coagulante.
- Sistema de mezclado rápido.
- Eliminación de exceso de sólidos.
- Línea de alimentación muy larga o elemento integrado a esta para propiciar la floculación.
- Filtros.
- Almacenamiento de agua tratada.

- Sistema de retrolavado.
- Tratamiento de lodos o desecho de lodos.

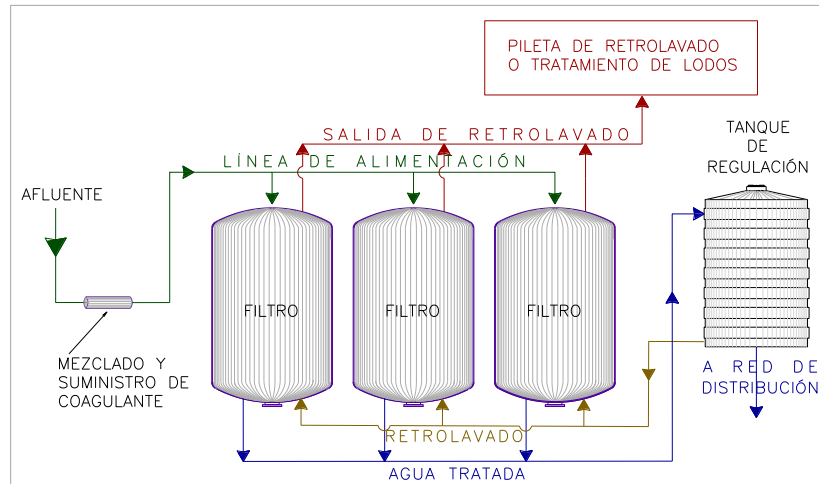


Ilustración 7 Diagrama de flujo de sistema de filtración directa

De manera regular el proceso a seguir en estos trenes de tratamiento para remoción de arsénico empieza con la alimentación a las plantas por medio de un sistema de bombeo, ya sea directo de la fuente de agua o desde un cárcamo existente. Más adelante la línea de alimentación cuenta con un mezclador estático o sistema de mezcla rápida, donde se adicionan los reactivos y se realiza su mezclado con el flujo del agua para propiciar la oxidación del arsenito a arsenato, la coagulación y floculación. Posteriormente se coloca un filtro malla de alrededor de $300 \mu\text{m}$ que tiene la doble función de retener partículas de arena y favorecer la formación de flóculos a lo largo del resto de la línea y sus derivaciones hasta los filtros a presión, los cuales en la modalidad de flujo descendente, son alimentados por la parte superior y descargarán por la zona baja donde la línea de agua filtrada toma el agua de todos los filtros y la llevará con la carga restante hasta el tanque designado para su almacenamiento y posterior distribución. Con el objetivo de mantener la tasa de filtración, además de la eficiencia de remoción, se recomienda realizar los retrolavados máximo cada 48 h de trabajo, de tal forma que también es importante cuidar que el número de filtros en la planta no sea tan grande y permita este tipo de operación.

Un aspecto muy importante del sistema de coagulación y filtración es el funcionamiento y la composición interna de los filtros, esta última conformada principalmente por el medio de distribución de agua, las camas filtrantes y el bajo dren o arreglo de recolección de agua para su salida de los tanques. El proceso es relativamente simple, ya que una vez que el agua llega al filtro un cabezal principal lo lleva dentro del tanque donde es dispersado por medio de los tubos laterales de distribución de agua, este flujo baja atravesando las camas de filtración y el soporte de las mismas hasta llegar al sistema de recolección que conduce el flujo fuera del filtro nuevamente. El retrolavado aprovecha estos elementos pero forzando el flujo de manera inversa, de tal forma que al cerrar la válvula de alimentación de un solo filtro y abrir el retrolavado, un flujo mucho mayor al de alimentación entra por la parte baja del filtro expandiendo los lechos en su camino hasta la parte superior, donde los laterales recolectan el agua y sacan el flujo llevándolo hacia la tubería de salida del retrolavado. Esta etapa debe utilizar agua filtrada proveniente del tanque de almacenamiento con que cuente cada proyecto y deberá asegurarse que este último tenga la capacidad para suministrar del caudal requerido para lograr la expansión de los lechos y al mismo tiempo alimentar a la red de distribución.

Dentro del filtro, los medios y la tasa de filtración son los factores que más influyen en el tratamiento, ya que los lechos son los encargados de remover los contaminantes del agua. Si se considera un lecho dual de arena y antracita como materiales filtrantes y una cama extra de grava como medio de soporte es posible prolongar la carrera de los filtros al otorgarle a estos la capacidad de distribuir los contaminantes removidos a lo largo de ambos lechos, siendo la antracita la que remueve las partículas de mayor tamaño y la arena sílica la que impide el paso de los flóculos de menor tamaño. La altura y composición de los medios filtrantes, puede variarse dependiendo de las necesidades del proceso, siempre y cuando se considere la diferencia en la densidad de los medios para lograr mantener la configuración de las camas aún después de los retrolavados.

2 Metodología y bases de diseño

El desarrollo de estos proyectos tuvo como objetivo principal brindar asistencia técnica al elaborar propuestas a nivel funcional y ejecutivo para los sistemas de remoción de arsénico en distintas fuentes de abastecimiento a nivel nacional, con el fin de extender el beneficio del agua potable de buena calidad a la población de diversas zonas y contribuir de esta forma en la prevención de enfermedades ocasionadas por el contacto o ingesta de agua con alto contenido de este contaminante.

Con este fin de unificar el criterio y procedimiento para asegurar la calidad del diseño, se aplicó durante el desarrollo de cada proyecto la siguiente metodología:

- Acopio de la información disponible relativa a las fuentes de abastecimiento, como la topografía del predio, el área disponible, calidad de agua del agua en cuestión, equipo electromecánico del sistema de obtención del líquido, tanques de almacenamiento, líneas de conducción, etc. Durante este proceso también se solicita la realización de actividades para corroboración y apoyo como es el caso de una nueva caracterización del agua para confirmar los datos existentes, un levantamiento topográfico para situar con precisión los elementos dentro del predio y estudios de eficiencias electromecánicas, donde hagan falta para establecer la factibilidad de utilizar el equipamiento existente.
- Selección del tren de tratamiento con un diseño adecuado para el sistema, el cual depende de muchos factores que deben ser considerados y jerarquizados para proporcionar una solución óptima. En estos proyectos se consideró como puntos principales: la calidad del agua original, el factor económico, la operación de la planta y el terreno disponible. De acuerdo con estas nociones, se analizó como punto principal la concentración de contaminantes y se propuso un sistema de tratamiento verificando en segundo lugar el terreno disponible con las adecuaciones necesarias, posteriormente con estos dos elementos se observó el factor económico de manera muy superficial sólo

para confirmar que el proyecto fuera factible en este aspecto para el organismo interesado, finalmente se consideró la operación de la planta de acuerdo con el aspecto económico y fijando con este último punto el esquema básico de cada proyecto.

- Dimensionamiento de los elementos de la planta y obtención de aspectos relevantes como la disposición de los componentes dentro de cada predio y el consumo de los reactivos utilizados. Los parámetros básicos de este proceso son la calidad del agua y el flujo de entrada a la planta; ya que con estos puntos se pueden obtener los filtros y tuberías requeridos, que proporcionan el resto de la información para dimensionar las estructuras, los reactivos requeridos y determinar las pérdidas de energía y cargas demandadas por el sistema.

2.1 Datos principales para el desarrollo de los cuatro proyectos

2.1.1 Proyecto 1

Durante este proyecto se colaboró de manera directa en: el acopio de información, el levantamiento del área de los terrenos, estructuras y equipamientos existentes, la propuesta, cálculo y diseño de la planta de acuerdo con los resultados de calidad del agua reportados, los aforos de caudal, el despiece y generación de volúmenes de obra, la elaboración del presupuesto e informes de avance. Como resultado de esta participación directa en diversas partes del proyecto, se obtuvo información adicional sobre la localidad y el funcionamiento del sistema de aguas que sirvió como base para el diseño de la planta.

Esta fuente de agua se encuentra situada a unos 1140 msnm, en las afueras de una pequeña localidad y abastece únicamente a esta. Dentro de esta comunidad existen 109 hogares y una población de 363 ciudadanos de los cuales 198 son mayores de 18 años y 26 de ellos tienen 60 años o más de edad. Los habitantes de esta localidad tienen un grado promedio de escolaridad menor a 6 años y un 25% de la población mayor a 15 años es analfabeta. Este tipo de datos fueron importantes para el acercamiento a la población ya que el principal obstáculo del caso fue el desconocimiento de la gente de la localidad, principalmente el del

personal del organismo operador de los pozos y encargado del sistema de aguas que carecía de conocimientos sobre los procesos a implementar para la remoción de arsénico y los efectos adversos que este elemento podía provocar en su población, por lo que consideraban al proyecto como una inversión innecesaria que incrementaría el costo del agua. Como consecuencia de esta inexperiencia por parte del personal encargado, se solicitó al IMTA el diseño más sencillo posible.

Posterior a la investigación y recopilación de datos de la localidad se realizaron visitas para corroborar información y recabar los datos faltantes sobre el sistema de aguas local, donde se observó por ejemplo, cómo se recolecta el agua no de un pozo como se nos había informado, sino de un manantial cercano a la comunidad, cuyo flujo ha sido entubado para llevarlo por una línea de conducción hasta el cárcamo de bombeo situado en el punto más bajo de la región. Desafortunadamente en este punto casi un sesenta por ciento del caudal conducido es desechado antes de llegar al cárcamo, lo que resulta sumamente incongruente ya que la distribución de agua en la localidad se realiza mediante tandeo y suministrando un caudal insuficiente con un equipo de bombeo que envía el agua hasta un tanque elevado desde donde se distribuye a la población.

Originalmente el organismo operador sugería la colocación de la planta en el área contigua al cárcamo de bombeo; sin embargo, al revisar la zona e investigar con la gente de la localidad se determinó que este lugar es propenso a inundarse y puede volverse inaccesible en tiempo de lluvias. Por esta razón se solicitó otro sitio al organismo operador, el cual finalmente propuso el área disponible en el predio del tanque elevado donde se encuentran dos tanques de almacenamiento con uno de ellos fuera de servicio, pero en condiciones adecuadas para ser utilizado. De esta forma el sistema de remoción de arsénico se proyectó en el predio a un costado del tanque fuera de servicio, donde se encuentra la mayor parte del área disponible, la cual comprende alrededor de 162 m² y por lo tanto es suficiente para la colocación de la planta requerida de acuerdo con el caudal y contaminación registrados. Durante el aforo y muestreo realizados previamente a la aprobación de este proyecto, se obtuvieron los valores de caudal y

los de calidad del agua mostrados en la Tabla 3 y utilizados para realizar el diseño, cabe mencionar que estos parámetros pueden verse afectados a lo largo del año por las diferentes condiciones climatológicas, ya que la concentración de contaminantes puede variar dependiendo de fenómenos como la lluvia. Los valores mostrados de aluminio, coliformes fecales y totales se obtuvieron posteriormente a partir de muestras obtenidas durante el aforo para la verificación del caudal de diseño.

Tabla 3 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 1

Dureza Total mg/l	Coliformes Fecales NMP/100 mL	Coliformes Totales NMP/100 mL	Arsénico mg/l	Aluminio mg/l
252	4.3*10 ³	4.6*10 ⁴	0.027	0.05

La medición del caudal se realizó con ayuda de un medidor electromagnético colocado sobre la tubería que alimenta al cárcamo de bombeo y que proviene directamente del manantial. El gasto resultante de 9.2 l/s corresponde a la media de las 21 lecturas realizadas. Desafortunadamente de acuerdo a la información proporcionada por el Sistema de Aguas local, el flujo proporcionado por el equipo en el cárcamo de bombeo es de sólo 3 l/s; sin embargo para evitar el tandeo y de acuerdo con el tamaño de la población, la localidad requiere de 5 ó 6 l/s para no interrumpir el suministro. Con esto en mente la planta de tratamiento se ha diseñado para trabajar con un gasto de 4 l/s lo que le permite funcionar adecuadamente con 3 l/s y al mismo tiempo tener la facultad para expandir su capacidad a 6 l/s en caso de que se desee cambiar el sistema de suministro de agua. Los principales datos para el diseño del sistema en el proyecto 1 se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Datos principales del proyecto 1

Proyecto	Caudal (l/s)	Equipo de bombeo (HP)	Presión de descarga (m.c.a.)	Diámetro de descarga (plg.)	Área disponible (m ²)	Concentración de Arsénico (mg/l)	Temperatura del agua (°C)
1	4*	7	32	2.5	157	0.027	22.0

*Gasto de diseño (mayor al gasto de bombeo)

Observaciones en campo:

- El agua que sale del manantial es enviada por gravedad hasta el cárcamo de bombeo.
- Los 2 tanques de regulación se encuentra aproximadamente a 1151 msnm.
- La línea del manantial al cárcamo de bombeo es de 4" y la línea del cárcamo a tanques es de 2.5".
- El cárcamo existente cuenta con sistema de cloración a base de hipoclorito de sodio.
- El lugar cuenta con delimitación del terreno pero no con vigilancia (se recomiendan ambos).
- El equipo de bombeo del cárcamo se opera sólo 6 h por día.
- Uno de los tanques de almacenamiento no está operando.

2.1.2 Proyecto 2

El desarrollo de este proyecto requirió una participación más puntual, involucrando únicamente el cálculo y diseño de los aspectos hidráulicos y de proceso de la planta de acuerdo con los resultados de calidad del agua reportados. Así mismo, debido al conocimiento de los aspectos básicos del proyecto se colaboró en el seguimiento de todos los componentes del proyecto ejecutivo; tales como la revisión de planos mecánicos, arquitectónicos y eléctricos.

El pozo se ubica justo en el límite del conjunto habitacional al que alimenta, el cual se encuentra a una altura de 1202 msnm. En este caso los datos registrados de la operación del pozo eran insuficientes, por lo que se llevaron a cabo muestreos y aforos para establecer las condiciones en que trabajaba el sistema y los requerimientos mínimos de la planta a instalar. Para el suministro de agua potable el conjunto habitacional cuenta con un sistema de alimentación que lleva el agua desde el pozo hasta la línea de alimentación o, de manera preferente, a una cisterna de almacenamiento donde posteriormente es bombeada a un tanque elevado que permite regular el flujo y suministrar la presión adecuada a la red de distribución. En este proyecto se planteó la complementación del sistema con una planta potabilizadora a base de filtración directa por medio de un arreglo de filtros a presión.

La ubicación de la planta presentó el principal obstáculo para el diseño ya que al pertenecer a un conjunto habitacional los terrenos ya estaban destinados a áreas verdes, vialidades o vivienda y por lo tanto no se contaba con el terreno para la instalación de una planta potabilizadora; sin embargo, esta problemática se resolvió al autorizarse el uso del espacio ocupado por una glorieta en donde se encuentra el tanque elevado y la cisterna. Aunque el área disponible en este punto no permitía un arreglo compacto se adaptó el diseño para lograr la colocación de los elementos de la planta dentro del predio sin necesidad de reforzar la loza de la cisterna ni utilizar espacio adicional al ocupado por la circunferencia de la glorieta, cabe mencionar que el área total de la misma es de aproximadamente 678 m² y la cisterna, que sobresale al menos 40 cm del nivel de piso, ocupa alrededor de 320 m² dejando un espacio disponible de sólo 358 m². Durante el aforo y muestreo realizados previamente a la aprobación de este proyecto, se obtuvieron los valores de caudal, y los de calidad del agua mostrados en la Tabla 5 y utilizados para realizar el diseño, cabe mencionar que estos parámetros pueden verse afectados a lo largo del año por las diferentes condiciones climatológicas, ya que la concentración de contaminantes puede variar dependiendo de fenómenos como la lluvia.

Tabla 5 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 2

Dureza Total mg/l	Cloruros mg/l	Sulfatos mg/l	Arsénico mg/l	Fluoruros mg/l
250	17.7	ND	0.041	0.59

La determinación del caudal se realizó con un medidor ultrasónico colocado sobre la tubería de descarga del pozo previa a la cisterna donde descarga. El gasto resultante de 29.6 l/s corresponde a la media de las lecturas realizadas en el análisis de campo donde también se registraron algunos de los parámetros importantes para el diseño de la planta, como la presión de descarga que es de 31 mca. Este último dato resultó sumamente relevante para el arreglo final, ya que dada la cercanía entre la cisterna y el pozo, la carga con que el agua llega al terreno permite la alimentación de la planta de remoción de arsénico directamente con el equipo del

pozo eliminando así la necesidad de colocar equipos de bombeo adicionales. Los datos principales para el diseño del sistema de tratamiento del proyecto 2 se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Datos principales del proyecto 2

Proyecto	Caudal (l/s)	Equipo de bombeo (HP)	Presión de descarga (m.c.a.)	Diámetro de descarga (pulg.)	Área disponible (m ²)	Concentración de Arsénico (mg/l)	Temperatura del agua (°C)
2	29.6	60	31	6	358	0.041	21.1

Observaciones:

- La distancia entre el pozo y la cisterna es aproximadamente 97m.
- El terreno se encuentra 2m por debajo del nivel de descarga del pozo.
- La línea de descarga del pozo y la de distribución del agua son de 6”.
- El pozo cuenta con sistema de cloración a base de hipoclorito de sodio.
- El lugar posee delimitación del terreno con malla ciclónica.
- Existen dos equipos de bombeo para la alimentación a tanque elevado.

2.1.3 Proyecto 3

Al igual que en el anterior, el proyecto 3 se desarrolló como una colaboración y por lo tanto los aspectos que se abarcaron corresponden sólo al cálculo y diseño de los aspectos hidráulicos y funcionales de la planta de acuerdo con los resultados de calidad del agua reportados y el proceso seleccionado. Este proyecto se llevó a cabo en paralelo con el 2, ya que poseía similitudes en las características del lugar, el funcionamiento de su sistema de aguas y los aspectos requeridos. En la parte sur-este del conjunto habitacional del proyecto 3, a unos 1090 msnm, se ubica un terreno grande destinado al sistema de suministro de agua local, este predio cuenta con un pozo equipado con bomba vertical, una línea que descarga en una cisterna de almacenamiento contigua y un tanque elevado encima de la misma para regular el flujo y proporcionar la carga requerida. Dada la ubicación de los elementos instalados, el sitio es ideal para la colocación de la planta, ya que facilita la interconexión de los elementos existentes con

los nuevos y proporciona un acceso único a todo el sistema de suministro de agua del conjunto habitacional. Al igual que en el proyecto 2 los datos registrados de la operación del pozo eran insuficientes, por lo que se llevaron a cabo muestreos y aforos para establecer las condiciones en que trabajaba el sistema y los requerimientos mínimos de la planta a instalar.

Como se mencionó previamente el terreno designado es muy amplio ya que el área ocupada es de menos de 185 m² y el predio cuenta en total con 1190 m², lo que deja un área disponible ya sin vialidades, de 880 m² aproximadamente. Este terreno, dada la calidad del agua obtenida en el muestreo y el caudal registrado durante el aforo, es más que suficiente para la instalación de los elementos de la planta requerida. Durante el aforo y muestreo realizados previamente se obtuvieron los valores de caudal y los de calidad del agua, algunos mostrados en la tabla anterior, utilizados para realizar el diseño (Tabla 7). Cabe mencionar que a pesar de que en el análisis de calidad el valor de arsénico resulto estar dentro de norma, en análisis previos se obtuvo un promedio de 0.029 mg/l, por lo que es posible que este parámetro esté variando severamente y por lo tanto es recomendable realizar un monitoreo constante a lo largo del año para observar el comportamiento de este y otros contaminantes y determinar si es conveniente la instalación de la planta o no. Considerando lo anterior, se realizó el diseño del sistema sólo de remoción de arsénico con el fin de minimizar los recursos utilizados en el proyecto y posteriormente ejecutarlo en caso de que el presupuesto lo permita. De esta forma se asegura el suministro de agua de la mejor calidad posible a la comunidad, al eliminar al menos el contaminante más dañino.

Tabla 7 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 3

Dureza Total mg/l	Cloruros mg/l	Sulfatos mg/l	Arsénico mg/l	Fluoruros mg/l
675	24.1	ND	0.02	0.61

El gasto resultante de 26.18 l/s corresponde a la media de las lecturas realizadas en el análisis de campo donde también se registraron algunos de los parámetros importantes para el

diseño de la planta, como la presión de descarga que es de 19 mca. Este último dato resultó sumamente relevante para el arreglo final, ya que dada la cercanía entre la cisterna y el pozo, la carga con que el agua sale del pozo permite la alimentación de la planta de remoción de arsénico directamente con el equipo del pozo eliminando así la necesidad de colocar equipos de bombeo adicionales. En la Tabla 8 se presentan los datos principales para el diseño del sistema de tratamiento.

Tabla 8 Datos principales del proyecto 3

Proyecto	Caudal (l/s)	Equipo de bombeo (HP)	Presión de descarga (m.c.a.)	Diámetro de descarga (plg.)	Área disponible (m ²)	Concentración de Arsénico (mg/l)	Temperatura del agua (°C)
3	26.18	--	19	6	880	0.02	21.9

Observaciones en campo:

- El pozo y la cisterna se encuentran en el mismo predio.
- La losa tapa de la cisterna termina 1.3 m sobre el nivel del terreno.
- La línea de descarga del pozo y la de distribución del agua son de 6”.
- El pozo no cuenta con sistema de cloración.
- El lugar se encuentra delimitado con malla ciclónica.
- El tanque elevado tiene 13.3 m de altura.

2.1.4 Proyecto 4

Los trabajos involucrados en el proyecto 4 se limitaron al desarrollo de la ingeniería básica necesaria para la ejecución de un sistema de remoción de arsénico a pie de pozo con el fin de otorgar el soporte técnico requerido para la planeación y el diseño ejecutivo de esta planta. Aunado a este desarrollo se solicitó un estudio de eficiencias electromecánicas que proporcionara un panorama general del funcionamiento de los equipos de bombeo instalados en cada pozo y determinar con esto, si el sistema tenía la capacidad de alimentar una planta potabilizadora manteniendo una eficiencia adecuada.

Este proyecto contempla el tratamiento del agua que abastece sólo a una fracción de la población de una ciudad con una altitud de 1107 msnm. Dentro del sistema se encuentra una red distribución que es alimentada por un tanque de almacenamiento de 4 metros de profundidad y un área de 670 m²; este a su vez recibe el agua directamente desde dos fuentes distintas: el “pozo A” que se encuentra en el terreno contiguo y el “pozo B” ubicado a una cuadra del tanque. Dadas estas características fue necesaria la revisión de ambos pozos para conocer con certeza tanto el caudal proveniente, como la calidad del agua y las condiciones de operación de cada pozo con el objetivo que generar el mejor diseño para la planta de remoción de arsénico. Con los resultados obtenidos y los datos recabados de monitoreos previos se observó que dada la concentración de arsénico en cada uno (Tabla 9) y el flujo correspondiente, la mejor opción era el tratamiento de todo el caudal debido a que la presencia del contaminante mostraba un ligero incremento en años recientes.

Tabla 9 Concentración de algunos contaminantes en agua del proyecto 4

Pozo	Dureza Total mg/l	Cloruros mg/l	Sulfatos mg/l	Arsénico mg/l	Fluoruros mg/l
A	205	27.5	212	0.043	0.88
B	205	21.4	192	0.0337	0.868
A y B	205	24.22	201	0.038	0.874

La ubicación de la planta presentó un obstáculo al no existir mucho espacio dentro de los predios que ocupan los pozos; sin embargo el organismo operador sugirió el uso del espacio ocupado por el tanque y la colocación de toda la planta sobre la losa del mismo. Esta propuesta sin embargo; no era económicamente factible debido al costo que representaba la estructura requerida como soporte y bajo esta consideración se sugirió la reubicación de los elementos dentro del terreno del “pozo A” para colocar un arreglo que aprovechara el espacio libre conjunto del pozo y el tanque de almacenamiento. Con esta propuesta el área disponible en este predio es 420 m², mismos que resultan adecuados para la colocación de la planta.

Durante el aforo y muestreo realizados se obtuvieron los valores de caudal, y los de calidad del agua, algunos mostrados en la Tabla 9, utilizados para realizar el diseño de la planta y que como se mencionó previamente pueden variar a lo largo del año dependiendo de la cantidad de lluvia y otros fenómenos, por lo que siempre es recomendable el monitoreo constante para observar el comportamiento de estos pozos y poder ajustar el tratamiento en caso de ser necesario. El gasto obtenido en el aforo fue de 23.4 l/s para el “pozo A” y 27.3 l/s para el “pozo B”; por lo que el caudal conjunto y de diseño para la planta es de 50.7 l/s. Estos datos se obtuvieron del análisis de eficiencias electromecánicas, donde también se registraron algunos de los parámetros importantes para el diseño de la planta, como la presión de descarga que en ambos casos es de 5 mca. Este último dato resultó sumamente relevante para el arreglo final, ya que la carga mínima recomendada para ingresar a la planta es de 16 mca, por lo que se recomendó un equipo de bombeo adicional. En la Tabla 10 se resumen los datos principales para el diseño del sistema de tratamiento.

Tabla 10 Datos principales del proyecto 4

Proyecto	Caudal (l/s)	Equipo de bombeo (HP)	Presión de descarga (m.c.a.)	Diámetro de descarga (plg.)	Área disponible (m ²)	Concentración de Arsénico (mg/l)	Temperatura del agua (°C)
4	50.7	--	5	8	420	0.038	23.8

Observaciones en campo:

- Ambos pozos llegan a una línea común que descarga en el tanque.
- La losa tapa de la cisterna termina 3.6 m sobre el nivel del terreno.
- Se requiere la recolocación de elementos como casetas y árboles para instalar la planta.
- Los dos pozos cuentan con sistema de cloración bastante descuidado.
- El lugar se encuentra delimitado con malla ciclónica.
- El equipo de ambos pozos opera las 24 h del día.
- La distancia del tanque al pozo “B” es de 315 m.

- El organismo operador notificó problemas en el funcionamiento del sistema de drenaje local.

2.1.5 Levantamientos Topográficos

Además de la recopilación de datos, análisis previos y las observaciones en campo, es necesario conocer las características topográficas como elevación, ubicación, desniveles y dimensiones de los terrenos seleccionados para la construcción de las plantas. Con esto en mente se solicitó a un tercero la ejecución de los levantamientos topográficos, con el fin de tener la información suficiente de los terrenos para establecer adecuadamente el arreglo general de la planta dentro de estos predios. Este proceso también incluyó la descripción y representación de los aspectos físicos principales de los sitios, como por ejemplo: los diámetros de las tuberías que se encontraron en el lugar, la ubicación de equipos de bombeo, instalaciones eléctricas, y estructuras existentes. Los particulares encargados de realizar estos trabajos obtuvieron las variables topográficas principales con ayuda de una estación total y posteriormente representaron los resultados obtenidos en un plano topográfico que se utilizó como base para el diseño y acomodo de los elementos de la planta. A continuación se presentan los terrenos levantados junto con fotografías meramente ilustrativas y las características más relevantes de cada predio.

Levantamiento 1. En la Tabla 11 se presentan los datos del terreno para la planta de tratamiento del proyecto 1 y en la Ilustración 8 la topografía de este terreno.

Tabla 11 Datos principales del terreno del proyecto 1



País:	México
Altitud:	1151 msnm
Área levantada:	482 m ²
Área disponible:	162 m ²
Desnivel medio:	0.2 m
Estructuras existentes:	Dos Tanques de almacenamiento de 120 y 130 m ³

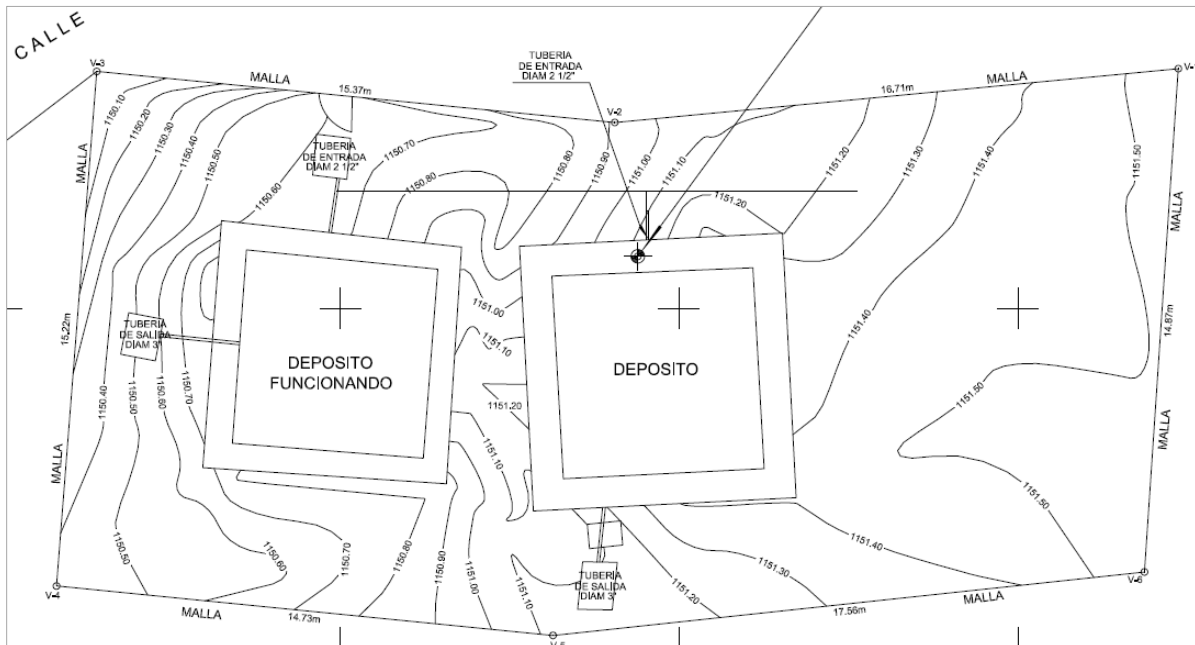


Ilustración 8 Topografía en terreno para proyecto 1

Levantamiento 2. En la Tabla 12 se presentan los datos del terreno para la planta de tratamiento del proyecto 2 y en la Ilustración 9 la topografía de este terreno.

Tabla 12 Datos principales del levantamiento al terreno del proyecto 2



País:	México
Altitud:	1202.2 msnm
Área levantada:	884 m ²
Área disponible:	358 m ²
Desnivel promedio:	0.2 m
Estructuras existentes:	Cisterna de almacenamiento y tanque elevado

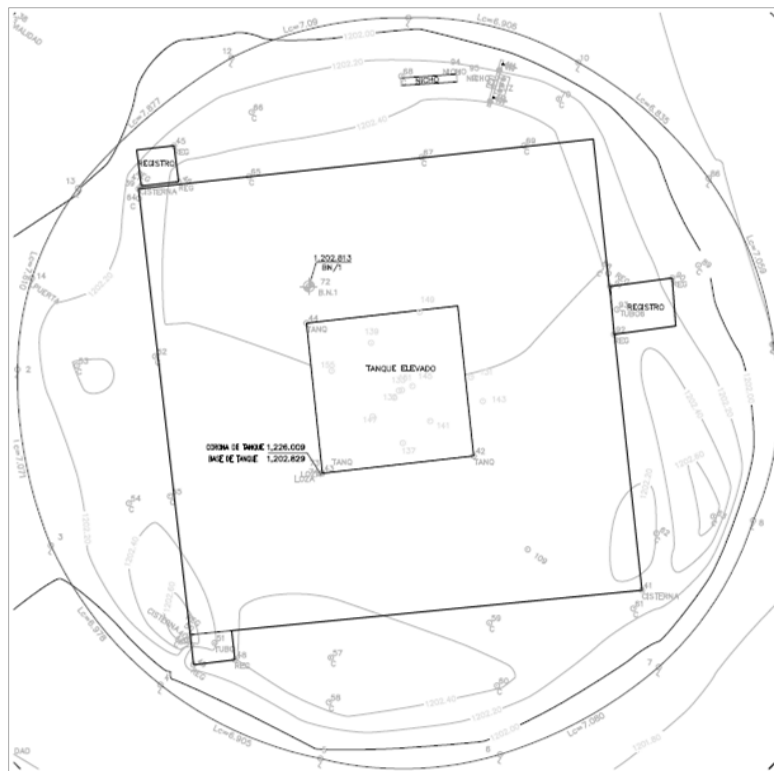


Ilustración 9 Topografía en terreno para proyecto 2

Levantamiento 3. En la Tabla 13 se presentan los datos del terreno para la planta de tratamiento del proyecto 3 y en la Ilustración 10 la topografía de este terreno.

Tabla 13 Datos principales del levantamiento al terreno del proyecto 3



País:	México
Altitud:	1090 msnm
Área levantada:	1190 m ²
Área disponible:	880 m ²
Desnivel promedio:	0.6 m

Estructuras existentes: Tanque elevado, cisterna y caseta de control.

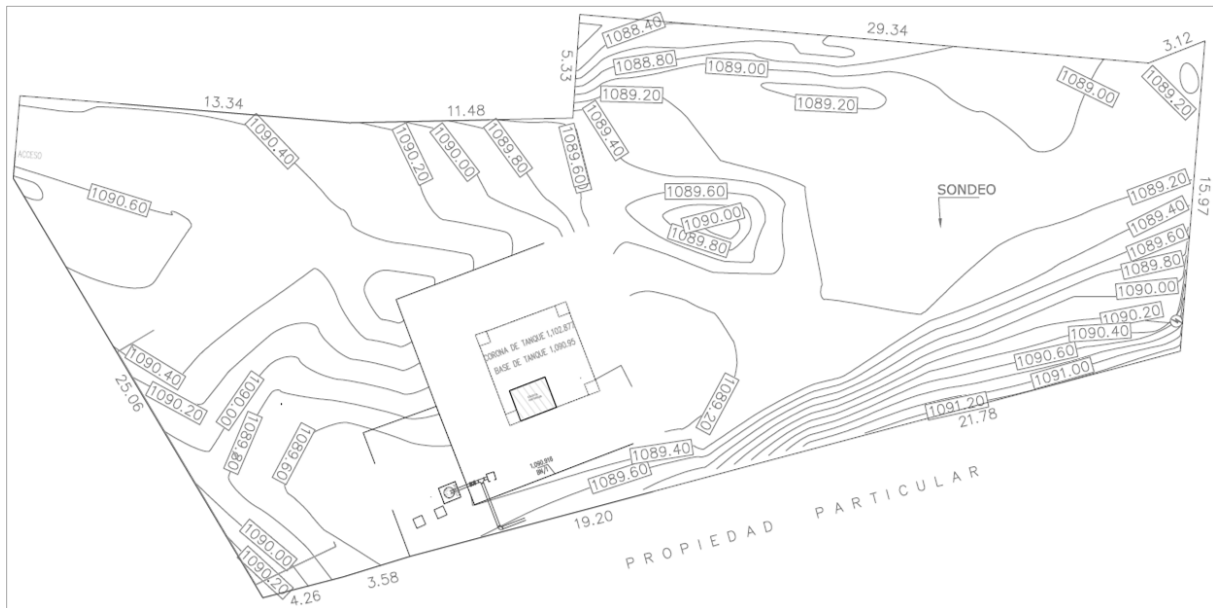


Ilustración 10 Topografía en terreno para proyecto 3

Levantamiento 4. En la Tabla 14 se presentan los datos del terreno para la planta de tratamiento del proyecto 4 y en la Ilustración 11 la topografía de este terreno.

Tabla 14 Datos principales del levantamiento al terreno del proyecto 4



País:	México
Altitud:	1107.8 msnm
Área levantada:	1800 m ²
Área disponible:	420 m ²
Desnivel promedio:	0.1 m
Estructuras existentes:	Casetas de cloración y motores, tanque de almacenamiento, rampa de acceso

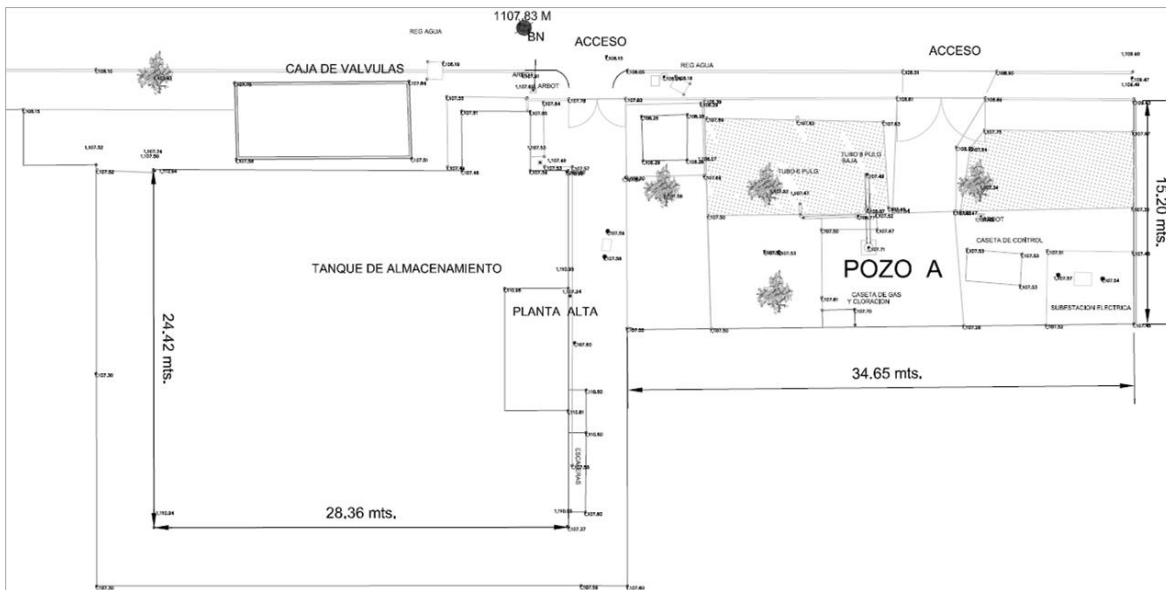


Ilustración 11 Topografía en terreno para proyecto 4

Como se indicó previamente, para el proyecto 4 se requirió de manera adicional un estudio de eficiencias electromecánicas a petición del organismo operador, para que se estableciera con este las condiciones en que trabajaban sus equipos y determinar si estos eran adecuados para alimentar directamente a la planta de remoción de arsénico. La solicitud se hizo basada en la sospecha por parte del organismo, de que sus pozos se encontraban en malas condiciones y como se puede comprobar en la Tabla 15 el estudio permitió confirmar que el equipamiento de ambos pozos carecía del mantenimiento requerido y de la eficiencia mínima para equipos de bombeo de pozo profundo. Los resultados del estudio se muestran en el Anexo A.

Tabla 15 Potencia y eficiencias en equipos del proyecto 4

Pozo	Potencia [hp]	Eficiencia de trabajo [%]	Eficiencia recomendada* [%]
A	125	49.95	60
B	250	45.56	64

*NOM-006-ENER-1995

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de los resultados del estudio de eficiencias electromecánicas, los equipos de bombeo no fueron aptos para la alimentación directa a la planta ya que su eficiencia se encontraba muy por debajo de los valores recomendables. Se hizo evidente que ambos equipos requerían de mantenimiento; sin embargo es muy probable que aún después de este servicio los dispositivos no cumplan con los requerimientos mínimos al alimentar la planta. La recomendación general que se dio fue que se realizara el cambio de los equipos con el compromiso por parte del organismo operador, para brindar el mantenimiento requerido por el sistema y evitar el deterioro irreversible de los nuevos elementos.

2.2 Esquema general de tratamiento

La selección del tren de tratamiento consideró inicialmente la caracterización realizada por el Área de Calidad del Agua del IMTA, la cual confirmó la información recopilada previamente sobre las concentraciones de contaminantes, donde en los cuatro casos el elemento más dañino presente en cantidades importantes resulto ser el arsénico. Como se

mencionó previamente las tecnologías aplicables para la remoción de este contaminante son muy variadas; sin embargo pocas cumplen el segundo punto importante en este proyecto. El factor económico juega en contra de procesos como el intercambio iónico y los procesos a base de membranas y por otro lado la operación de la planta o cantidad de terreno requerido suelen ser considerables en los procedimientos de ablandamiento por precipitación e incluso en aquellos a base de coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

Finalmente como resultado del análisis de las tecnologías disponibles y considerando que las concentraciones encontradas de arsénico no resultaron ser muy grandes, se optó por la variante más sencilla de la coagulación-filtración, que como se vio previamente consiste en la filtración directa por medio de filtros a presión, incluyendo estos últimos elementos para garantizar un sistema compacto. El arreglo interno elegido para los filtros se integra por un sistema de filtración dual compuesto por arena sílica y antracita con un soporte de grava, esto debido a las bondades que ofrece la combinación de los elementos mencionados tal como se vio en los subcapítulos 1.2 y 1.3 de este documento.

Los sistemas de filtración directa contemplados en estos proyectos contarán con un funcionamiento similar entre sí y estarán integrados por los siguientes elementos:

- Equipo de bombeo de alimentación a la planta.
- Medidor de flujo ultrasónico.
- Tanques de hipoclorito de sodio, cloruro férrico y bombas dosificadoras.
- Mezclador estático integrado a tubería (servirá también como punto de dosificación).
- Filtro malla para eliminar algunos sólidos y propiciar floculación.
- Batería de filtros a presión integrados por lecho dual de arena y antracita.
- Cisterna o tanque de almacenamiento de agua filtrada con equipo para bombeo a red de distribución o tanque elevado.
- Bomba para retrolavado con agua de tanque de agua filtrada.
- Pileta de retrolavado para descargar agua a drenaje existente.

Debido a las características del drenaje local el proyecto 4 contará con un sistema de tratamiento de lodos:

- Sedimentador de agua de retrolavado.
- Cárcamo de bombeo y bomba de lodos sedimentados.
- Equipo de bombeo para retorno de agua clarificada.
- Filtro prensa para la deshidratación de los lodos.

Es importante destacar que una vez instalado el sistema se deberá operar diariamente junto con el equipo de distribución de agua potable, asegurando así la calidad del agua suministrada. A este respecto se considera que la línea de alimentación contará con una derivación directa al tanque de regulación existente, que será abierta únicamente para no interrumpir el suministro de agua a la población en caso de algún mantenimiento o conflicto en la planta.

En las Ilustraciones 12,13 y 14 se muestran los diagramas de flujo, con sus principales elementos, resultante de la incorporación del sistema de filtración directa a cada proyecto.

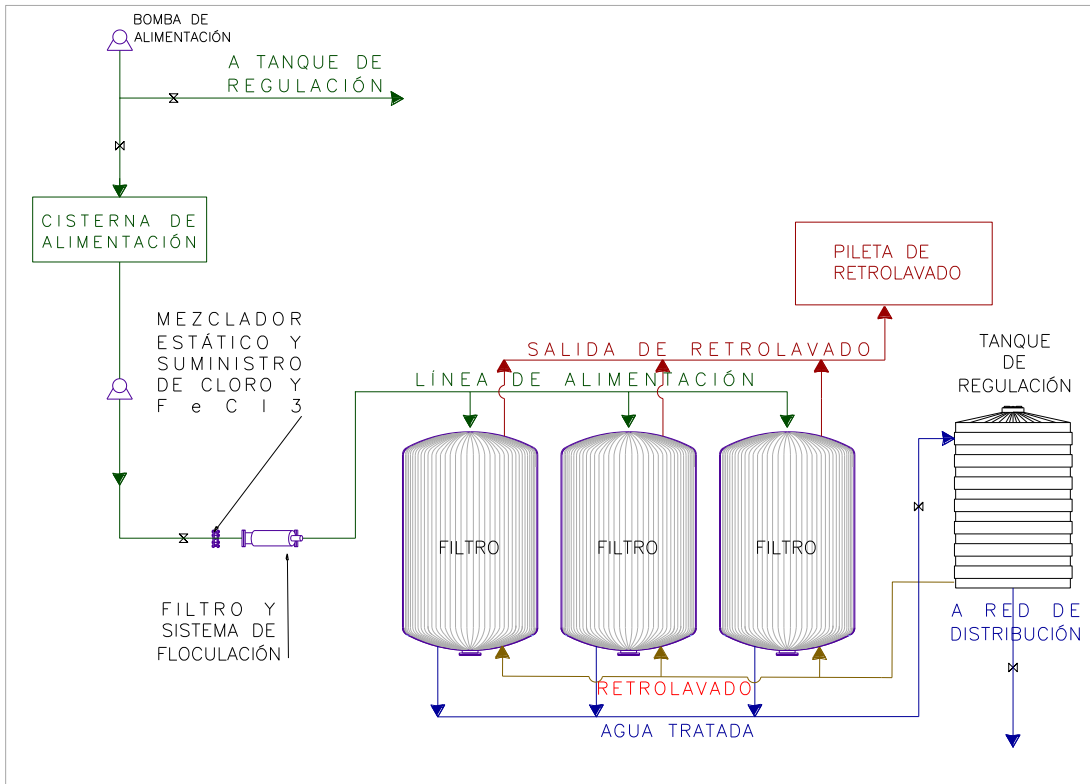


Ilustración 12 Diagrama de flujo para proyecto 1

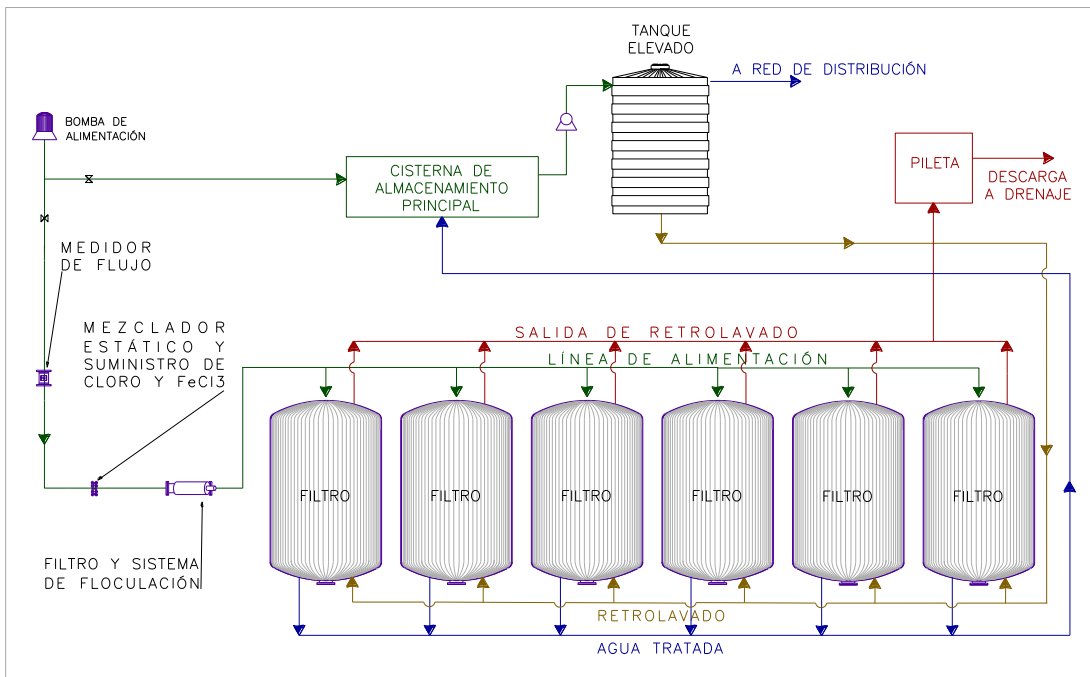


Ilustración 13 Diagrama de flujo para proyectos 2 y 3

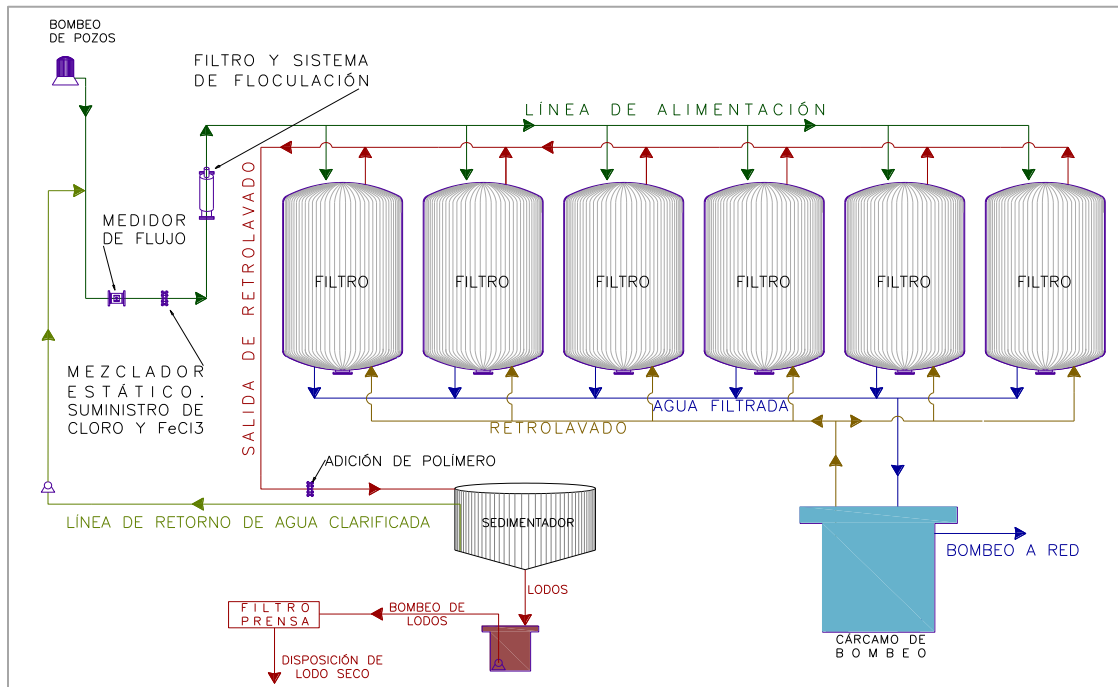


Ilustración 14 Diagrama de flujo para proyecto 4

2.3 Cálculos y dimensionamiento de la planta

2.3.1 Filtros y tanque de almacenamiento

En el diseño de los filtros el primer paso es la selección del espesor de cada cama de filtración y en este caso las alturas de los medios han sido fijados de acuerdo con un estudio previo realizado en el IMTA (2010), en el que se buscó el funcionamiento más adecuado para este tipo de sistemas con distintas tasas de filtración, retrolavado y altura de camas. Como parte de los resultados se obtuvo una configuración interna que inicia en el fondo con un soporte de al menos 30 cm de grava y cubre el tubo recolector, posteriormente se coloca la cama de arena de sílice como principal medio filtrante con un espesor de 70 cm, seguido de 30 cm de antracita conformando la cama superior. Esta configuración permite obtener carreras de filtración de hasta 48 h con una alta eficiencia de remoción de arsénico. Las características de los medios filtrantes se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16 Características de medios filtrantes

Medio filtrante	Densidad relativa	Espesor (cm)	Diámetro efectivo (mm)	Coefficiente de Uniformidad (CU)
Arena	2.5	70	0.33	1.6
Antracita	1.5	30	0.60	1.65

a) Dimensionamiento de filtros

Como se mencionó en párrafos anteriores, la tasa de filtración a utilizar se basa en los resultados de pruebas de laboratorio realizadas previamente en el IMTA (2010). De acuerdo con estos estudios se buscará que la tasa media de filtración esté alrededor de $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ y la tasa para el proceso de retrolavado sea $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. La propuesta del número de filtros se realiza considerando las dimensiones y características del terreno, pero manteniendo como referencia que por cuestiones de practicidad no es factible colocar más de 10 filtros para una misma planta ya que esto dificultaría su retrolavado y la recirculación del agua clarificada; así mismo, es importante tratar de obtener en todos los proyectos un mínimo de 3 filtros, con el fin de no variar demasiado la tasa de filtración al realizar los retrolavados. Los datos anteriores y el gasto particular de entrada a cada planta, hacen posible determinar los primeros detalles del sistema de filtración.

Área de filtración requerida por filtro =

$$A_{frf} = \frac{Qt}{Tf * Nf}$$

Donde:

Qt = gasto total, en m^3/h

Tf = tasa de filtración teórica = $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$

Nf = número de filtros propuesto

Al seleccionar un diámetro y área comercial de filtros se busca acercarse lo más posible al área teórica y obtener la tasa de filtración ajustada, así como los caudales de filtración y retrolavado.

Tasa de filtración ajustada =

$$Tfa = \frac{Qt}{Nf * Acf}$$

Donde:

Acf = área comercial de filtros, en m^2

$$\text{Caudal de filtración por filtro} = Qf = \frac{Qt}{Nf} \quad \text{Caudal de retrolavado} = Qr = Tr * Acf$$

Donde:

Tr = tasa de retrolavado = $60 m^3/m^2h$

Adicionalmente es necesario conocer cómo afectará el proceso de retrolavado de un filtro, al funcionamiento de los demás; por lo tanto se debe obtener la tasa de filtración que tendrán los tanques en operación, durante el retrolavado de uno de los filtros.

Tasa de filtración durante retrolavado a un filtro =

$$Tfr = \frac{Qt}{(Nf - 1) * Acf}$$

b) Espesor de placa para filtros

Es importante determinar los espesores mínimos para las placas de acero que componen los filtros a presión, de tal forma que puedan ser utilizados como guía y punto de comparación al seleccionar o fabricar los filtros definitivos. El acero para la construcción de los tanques a presión será A 285 grado C y cada uno de los componentes de los filtros deberá cumplir lo requerido por las Normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) en lo referente a la Sección VIII, Div 1 subsección B, Parte UW (Requirements For Pressure Vessels Fabricated By Welding) y el Código de Soldadura de ASME Sección IX; por lo que el cálculo se obtendrá de la siguiente forma.

Espesor de cuerpo cilíndrico (esfuerzos longitudinales) =

$$t_{cc} = \frac{PR}{SE - 0.6P} + Epc$$

Espesor de tapa toriesférica =

$$t_{tt} = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} + Epc$$

Donde:

Pt = Presión de trabajo en psi.

P* = Presión de diseño = Pt + 30, en psi.

* Incremento para presión de diseño = El mayor de 30 psi o 10% de la presión de trabajo.

S = Esfuerzo máximo de tensión Acero A 285 c. = 13,800, en psi.

R = Radio interno del tanque, en plg.

E** = Eficiencia de la junta, adimensional = 0.85.

** En función del tipo de soldadura (tabla UW-12, código ASME 2013).

Epc = espesor adicional recomendado por corrosión, código ASME (2013) = 0.0625 plg.

L = radio interior de la tapa toriesférica = diámetro del tanque, en m.

c) Tanque de almacenamiento de agua filtrada

En todos los proyectos abordados se tienen tanques de almacenamiento en donde actualmente se descarga el líquido extraído de las fuentes de agua previo a su distribución a la población. Para aprovechar estos elementos se requiere un análisis simple para corroborar que la infraestructura existente tiene la capacidad suficiente para almacenar mínimo el volumen correspondiente a 1 hora de agua filtrada más el volumen requerido para el retrolavado.

$$\text{Volumen de almacenamiento de 1 h de agua filtrada} = Vaf = Qt * tf$$

$$\text{Volumen de agua generado en 10 min de retrolavado} = Vr = Qr * tr$$

$$\text{Volumen de almacenamiento requerido} = Var = Vaf + Vr > \text{Vol. de tanque existente.}$$

Donde:

Q_t = gasto total de entrada a la planta, en m^3/s .

t_f = tiempo de agua filtrada almacenada = 1 hora, en s.

Q_r = gasto de retrolavado, en m^3/s .

t_r = tiempo que dura el retrolavado = 10 min, en s.

2.3.2 Tratamiento de lodos

Para los tres primeros proyectos, por cuestiones presupuestales, el sistema de retrolavado descargará el flujo directamente en una pileta construida específicamente para este propósito. Este elemento servirá únicamente como regulador del flujo, ya que el lodo será descargado finalmente en el drenaje local sin alterar el funcionamiento de la tubería y cumpliendo en todo momento con la NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece que el límite en la concentración de arsénico para descargas al sistema de alcantarillado es de 0.05 mg/l como promedio mensual y de 0.075 mg/l como promedio diario.

A diferencia de los otros proyectos, en el cuarto el organismo operador solicitó específicamente no descargar al drenaje ya que estaban teniendo problemas con este y una descarga más podría agravar el conflicto. Como solución se propuso un sistema de tratamiento de lodos compuesto por un sedimentador para separar el lodo del agua, una línea de recirculación de agua clarificada, un cárcamo de bombeo de lodos y un filtro prensa.

a) Sedimentador (proyecto 4)

Por cuestiones de funcionalidad y practicidad se propuso un sedimentador circular con una tolva en la parte inferior, que puede ser fabricado en concreto reforzado, placa de acero estructural o plástico reforzado con fibra de vidrio. Cada material presenta diferentes cualidades que deberán ser consideradas por el contratista en la elección del tipo de estructura a utilizar. Dadas las características del tanque, este permite el desalojo de los lodos sedimentados a través de la diferencia entre la carga hidráulica del sedimentador y la del cárcamo de lodos (Ilustración 15). La operación del sedimentador deberá ser por lotes

comenzando por el llenado con toda el agua producida en un retrolavado, seguido de la sedimentación, extracción de lodo y finalmente la extracción del agua clarificada, permitiendo la dosificación de la misma al bombearla directamente a la línea de alimentación principal de la planta. Este último procedimiento fue considerado para no afectar de manera importante el caudal o la concentración de contaminante en el afluente.

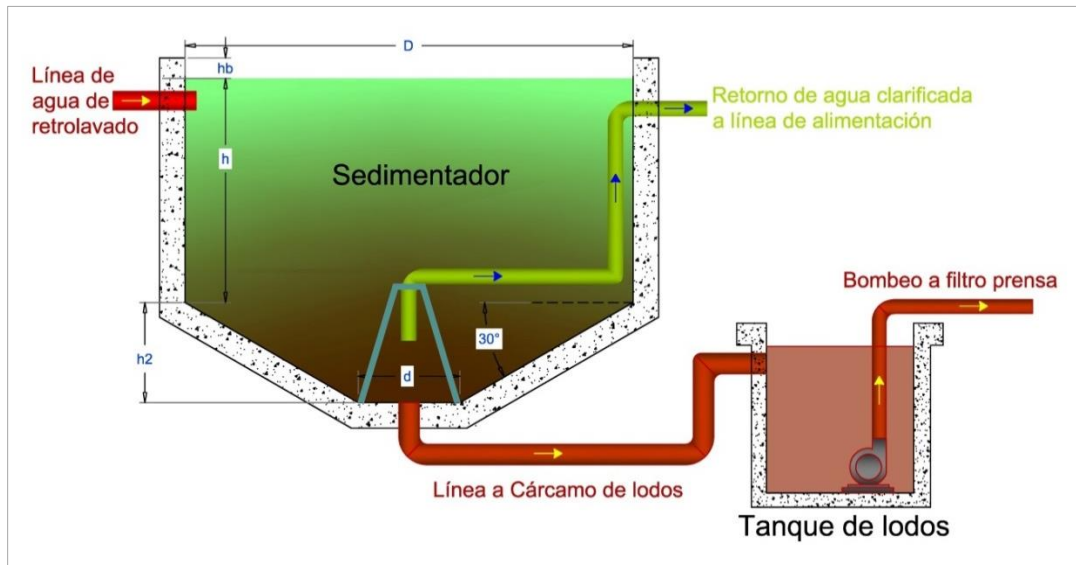


Ilustración 15 Esquema de sedimentador y tanque de lodos

El volumen del sedimentador depende únicamente del tamaño de un filtro y no del caudal total de la planta debido a que este elemento ha sido considerado para el agua de retrolavado de un solo filtro a la vez. En este caso, como el tiempo de retención recomendado varía de acuerdo con la experiencia de cada autor, se tomaron como referente principal las recomendaciones de la Comisión Nacional del Agua 2007, donde se establecen como adecuados tiempos de retención de alrededor de 2 h para este tipo de sistemas. Por otro lado se realizaron pruebas de floculación-sedimentación agregando un polímero que favoreciera la floculación en el agua de retrolavado de filtros de prueba, de esta forma el IMTA obtuvo de manera empírica el lapso mínimo requerido para lograr una sedimentación y compactación de lodos aceptable. En estas pruebas se encontró que es necesario tener un tiempo de retención de al menos 2 h en el sedimentador para lograr que la capa compactada de lodos llegue a ser entre el 1 y 3 % del

volumen total y que la concentración de sólidos en el lodo compactado se encuentre alrededor del 2.85 % para que pueda ser enviada al filtro prensa. Por otro lado la concentración de As detectada en la recirculación fue de 0.09 mg/l lo que permitirá una recirculación sin afectar de manera significativa la concentración de As en el agua cruda. Actualmente se trabaja en el cálculo exacto del sistema de dosificación de polímero y el desarrollo de todo el tratamiento de lodos.

Con las consideraciones anteriores las características del sedimentador dependen únicamente de la capacidad requerida para almacenar el retrolavado. Al calcular el volumen requerido es posible proponer una altura del sedimentador, diámetro de fondo y ángulo de la zona cónica y obtener el diámetro requerido para proporcionar el volumen buscado.

Volumen requerido en sedimentador =

$$V_{sed} = tr * Qr$$

Diámetro aproximado de sedimentador =

$$D_{sed} = \sqrt{4 * V_{sed} / \pi * h}$$

Este valor estimado del diámetro será mayor al diámetro requerido al no considerar la zona cónica y funcionará como punto de referencia para obtener el diámetro real.

Volumen útil de la parte cilíndrica =

$$V_{ci} = h * \pi * \frac{D^2}{4}$$

Altura de la parte cónica =

$$h_2 = \frac{D - d}{2} * \tan 30^\circ$$

Volumen de la parte cónica =

$$V_{co} = \cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{1}{2} (\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2} (\alpha - \beta) h_2 * \frac{\pi * (D^2 + D * d + d^2)}{12}$$

Volumen útil del sedimentador =

$$V_{us} = V_{ci} + V_{co} \geq V_{sed}$$

Donde:

h = altura útil de la parte cilíndrica, en m.

D = diámetro de la parte cilíndrica, en m.

h₂ = altura de la zona cónica, en m.

d = diámetro del fondo de la zona cónica, en m.

b) Recirculación de agua (proyecto 4)

El retorno del agua clarificada en el sedimentador posterior al drenado de los lodos, implica diversos aspectos de operación y diseño que deben ser contemplados para lograr un recirculado adecuado. Este proceso debe ser realizado dentro del tiempo disponible entre dos retrolavados, el cual se encuentra limitado por el número de filtros y el lapso de 12 horas en que se encontrará un operador en la planta por día. Un factor importante para este cálculo es el volumen de la capa de lodos generada, ya que el caudal recirculado depende también de la cantidad que sea desechada; la cual como se mencionó previamente, será menor al 3% del volumen total de acuerdo con las pruebas efectuadas.

Al considerar todo esto se obtienen los datos básicos del sistema de recirculación de la siguiente forma:

Tiempo disponible entre dos retrolavados =

$$t_{2r} = \frac{t_0}{N_f / 2}$$

Tiempo libre para recircular =

$$t_{dr} = t_{2r} - t_{sed} - t_r$$

Caudal de recirculación =

$$Q_{rec} = \frac{Vr - Vgl}{t_{dr}}$$

Porcentaje recirculado respecto al caudal total de la planta =

$$\%rec = \frac{Q_{rec}}{Qt} * 100$$

Donde:

t_o = tiempo en el cual estará presente un operador, en h

N_f = número de filtros propuesto

t_{sed} = tiempo destinado a proceso de sedimentación de lodo, en h

t_r = tiempo que dura el retrolavado, en h

V_r = volumen de agua generado en 10 min de retrolavado, en m^3

V_{gl} = volumen generado de lodos en sedimentador (por un retrolavado), en m^3

Q_t = caudal total que alimenta a la planta, en l/s

c) Cárcamo de lodos y filtro prensa (proyecto 4)

Una vez que los lodos del sedimentador lleguen al cárcamo, en el equipo de bombeo instalado en este último se inyectará un polímero auxiliar para la deshidratación del lodo acumulado mientras el fango es bobeado hasta el filtro prensa. El cárcamo deberá proyectarse para almacenar varios retrolavados y permitir que el operador disponga de tiempo suficiente para realizar las acciones necesarias del desecho de los lodos, tales como el deshidratado, almacenamiento y su disposición en rellenos sanitarios. Al conocer la cantidad de los lodos generados y el número de retrolavados a almacenar en el cárcamo, se pueden obtener las dimensiones necesarias de la siguiente manera:

Volumen requerido en cárcamo =

$$V_{rc} = V_{gl} * N_{ra}$$

Donde:

N_f = número de retrolavados a almacenar en cárcamo.

Vgl = volumen generado de lodos en sedimentador (por un retrolavado), en m³.

Con la cantidad de lodos generada y la concentración de sólidos esperada de al menos 28,500 mg/l se sugirió la deshidratación por medio de un filtro prensa y se estima la capacidad requerida de este elemento corroborándola con un proveedor especializado. El sistema sugerido consiste en un filtro prensa de placas paralelas con capacidad de filtración para 3 a 5 m³ por día, con un contenido de sólidos de hasta 50,000 ppm.

2.3.3 Líneas de conducción y arreglo general

a) Líneas de conducción

Para el diseño hidráulico del sistema de filtración, se toma como base el diseño de los filtros a presión, en el cual se ha determinado el diámetro y número de filtros de acuerdo al caudal de tratamiento y la tasa de filtración. Con estos datos es posible estimar la distribución del flujo y establecer los diámetros requeridos en las tuberías principales para la conducción de los caudales de diseño. La velocidad máxima en tuberías de acero para evitar la erosión se encuentra alrededor de los 5 m/s; sin embargo este valor no es recomendable como velocidad media de trabajo y para evitar problemas por pérdidas elevadas de energía en los equipos o los conductos, el límite establecido para esta variable en las tuberías se fijó en 2.5 m/s. Por otro lado, el valor mínimo de la velocidad en los conductos principales debe ser suficiente para evitar la sedimentación de los flóculos; sin embargo se buscará obtener aproximadamente 1 m/s en la mayoría de ellas, ya que el límite inferior recomendable es de sólo 0.3 m/s. En este caso el valor del diámetro se encontrará al calcular el caudal que pasa por una sección específica, proponer una velocidad de flujo dentro del rango establecido y determinar el área de la sección transversal requerida para obtener dicha velocidad junto con su diámetro asociado. Con este procedimiento se obtiene un diámetro teórico de las tuberías principales, el cual debe ajustarse a un valor comercial.

Caudal en múltiple de alimentación = caudal total en afluente

$$Q_{ma} = Qt$$

Área transversal para velocidad propuesta =

$$A_{tvp} = Q_{ma} / V_p$$

Donde:

V_p = velocidad propuesta para el flujo en una tubería, en m/s.

Diámetro teórico y diámetro comercial (en plg.) =

$$D_t = \sqrt{\frac{A_{tvp} * 4}{\pi}} * \frac{100}{2.54} \Rightarrow D_c$$

Área transversal con diámetro comercial =

$$A_{tc} = \pi * D_c^2 / 4$$

Velocidad para diámetro comercial en múltiple de alimentación =

$$V_c = Q_{ma} / A_{tc}$$

La velocidad obtenida representa una aproximación a la velocidad promedio dentro del tubo y puede utilizarse para el cálculo de las pérdidas en la tubería.

Para el resto de las tuberías también se obtienen los caudales estimados pero considerando tanto en las tuberías de derivaciones, como en la línea de alimentación a un filtro, el funcionamiento normal con todos los filtros en operación y la modalidad con uno en retrolavado. Esta última proporcionará el caso más desfavorable al tener un mayor flujo y velocidades superiores.

Caudal estimado en tubería de derivaciones

(Operación normal) =

$$Q_{td} = \frac{Qt}{N_f} * N_{fd}$$

(Con un retrolavado) =

$$Q_{tdr} = \frac{Qt}{Nf - 1} * Nf_d$$

Si Nf_d es 1, se obtiene el caudal en línea de alimentación a un filtro

(Operación normal) =

$$Q_{tu} = \frac{Qt}{Nf}$$

(Con un retrolavado) =

$$Q_{tur} = \frac{Qt}{Nf - 1}$$

Donde:

Qt = gasto total de alimentación a la planta, en m^3/s

Nf = número de filtros propuesto

Nf_d = número de filtros que alimenta la derivación

Con el mismo procedimiento utilizado para obtener el diámetro comercial en el múltiple, se calculan los valores correspondientes para la línea de derivaciones y la de alimentación a un filtro. Finalmente para las tuberías de retrolavado el flujo es constante a lo largo de las líneas de entrada y salida; por lo que el diámetro calculado con este caudal se aplica para toda la conducción.

b) Arreglo general

Con los datos generados respecto al dimensionamiento de las unidades de tratamiento y del sistema de tuberías requerido, es posible proponer el arreglo general del sistema dentro del predio y de esta forma ubicar todos los elementos que conforman la planta de remoción de arsénico. Este punto es sumamente importante para términos de entrega y presentación, debido a que sólo hasta esta etapa se puede apreciar de manera fehaciente si los elementos calculados son adecuados en dimensiones respecto del tamaño del predio y en caso de que lo sean se debe buscar la distribución más sencilla posible que permita la operación y movilidad

dentro de la planta así como el ahorro de tubería, accesorios y cableado requerido. Dado lo anterior el proceso a seguir para evitar conflictos y agilizar el trabajo, es el siguiente: Se generan esquemas del arreglo general utilizando las dimensiones reales pero sin detalle, tubería o accesorios; con el esquema aprobado se elabora el plano de vista de planta del arreglo general y finalmente en base a esta última versión aprobada se dibujan los planos derivados como por ejemplo: cortes, vistas, mecánicos, etc.

2.3.4 Pérdidas de energía

La propuesta inicial de los diámetros, como se vio anteriormente depende únicamente de los caudales; sin embargo, la trayectoria de las líneas de conducción y los accesorios se proponen posteriormente para producir un arreglo funcional que genere una cantidad de pérdidas aceptable en el sistema. Este valor no se encuentra definido pero en este caso específico se puede definir como pérdida aceptable aquellas que bajo las condiciones de trabajo permitan el funcionamiento adecuado del sistema sin requerir de equipos adicionales a los contemplados. En caso de que el funcionamiento teórico no sea el adecuado o presente un alto índice de pérdidas de energía con los diámetros propuestos, es posible la modificación de los mismos, del arreglo y los accesorios, siempre y cuando se respeten los límites máximos de velocidades y presiones que puede soportar la tubería.

En este caso, para la obtención de las mermas en la carga se busca la situación más desfavorable para el sistema, siendo esta el caso en el que se trabaja con un filtro en retrolavado, distribuyendo el caudal en los tanques restantes, de esta manera se tiene el caudal máximo en las tuberías y también el valor más alto de pérdidas locales y por fricción:

a) Pérdidas por fricción

La determinación de la energía diezmada por fricción en tuberías se realizará por medio de la fórmula de Darcy-Weisback.

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2 * g}$$

Donde:

L = longitud de la tubería, en m

V = velocidad en la tubería, en m/s. Obtenida a partir del caudal y diámetro de la sección como se indicó previamente:

$$\text{Velocidad} = V = Q / A_{tc} \qquad \text{Área transversal} = A_{tc} = \pi * D_c^2 / 4$$

D = diámetro de la tubería, en m

g = aceleración de la gravedad, en m/s^2

f = coeficiente de fricción (Guerrero, Oscar) y se calcula de la siguiente manera:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.71} + \frac{G}{Re^T} \right) \right]^2}$$

Para esta ecuación se tiene que:

ε = rugosidad = 0.0001 m

G y T = coeficientes empíricos.

El Reynolds se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática a 20°C = 1.01E-6 m^2/s

G y T , son tomados directamente del libro Datos Básicos, MAPAS, CONAGUA, 1994 (Tabla 17).

Tabla 17 Valores G y T para número de Reynolds.

Re	G	T
4,000 - 10^5	4.555	0.8764
10^5 - 3×10^6	6.732	0.9104
3×10^6 - 10^8	8.982	0.93

Es importante resaltar que este cálculo se debe realizar por secciones ya que depende del caudal y la velocidad de flujo asociada al diámetro de la tubería, de esta forma cada cambio en alguna de estas dos variables forma una sección hasta el siguiente cambio y cada tramo requiere de un cálculo adicional.

b) Pérdidas por accesorios o locales

En las pérdidas locales, que son ocasionadas por codos, válvulas o cambios de diámetro en las tuberías, el cálculo se puede realizar al aprovechar los coeficientes de pérdidas ligados a cada tipo de accesorio, que se ven afectados a su vez por el diámetro. Estos valores, que han sido determinados experimentalmente, se encuentran especificados en libros como el Crane o Sotelo y se pueden observar en el Anexo B de este documento. La fórmula empleada permite conocer la energía disipada en accesorios al asociar este coeficiente con la energía correspondiente a la velocidad del flujo de la siguiente forma.

$$H_L = K \frac{(V)^2}{2g} \qquad H_L = K_{ft} \frac{(V)^2}{2g}$$

Donde:

V = velocidad de flujo que depende del caudal y del diámetro del accesorio. Obtenida de la misma forma que en las pérdidas por fricción.

K_{ft} = valor adimensional compuesto por el coeficiente "K", que varía de acuerdo al tipo de accesorio y por el factor "ft" que afecta directamente a este coeficiente y que depende únicamente del diámetro de la pieza.

K = coeficiente de pérdidas asociado al tipo de accesorio (Anexo B), excepto para ampliaciones y reducciones donde hay que considerar que el diámetro en la sección no es constante y por lo tanto "K" se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Para ampliaciones } K = \frac{\left(1 - \left(\frac{dc}{dg}\right)^2\right)^2}{\left(\frac{dc}{dg}\right)^4}$$

$$\text{Para reducciones } K = \frac{1}{2} * \left[\frac{1 - \left(\frac{dc}{dg}\right)^2 * \sqrt{\sin \frac{0.33 * \pi}{2}}}{\left(\frac{dc}{dg}\right)^4} \right]$$

dc = diámetro menor, en plg.

dg = diámetro mayor, en plg.

c) Pérdidas en los medios filtrantes

Proceso de filtración

Para estimar la reducción de carga producida por el medio filtrante limpio es importante considerar aspectos como la velocidad del flujo, la esfericidad de los medios filtrantes seleccionados, el espesor, la viscosidad cinemática e incluso la porosidad, de tal forma que el resultado obtenido represente de la mejor manera el funcionamiento interno del filtro. Es por esta razón que de acuerdo con Piña, Calderón y González (2011), los cálculos de pérdida ocasionada por los lechos del filtro se obtienen de la siguiente forma:

$$Hf = 150(L)(V_F) \frac{\gamma (1 - \epsilon_0)^2}{g (\epsilon_0)^3} \frac{1}{(Ce)^2} \Sigma \frac{Pi}{(di)^2}$$

Donde:

Hf = pérdidas de carga en el medio filtrante, en cm.

L = espesor del lecho, en cm.

V_F = velocidad de filtración, en cm/s

γ = viscosidad cinemática del agua a 20°C, en cm²/s.

g = aceleración de la gravedad, cm/s².

ϵ_0 = porosidad del medio filtrante.

C_e = coeficiente de esfericidad.

p_i = fracciones en peso del material filtrante retenido entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica, g.

d_i = media aritmética de las aberturas de las mallas en el análisis granulométrico, cm.

Proceso de retrolavado

Para estimar las pérdidas de carga del medio filtrante en condiciones de retrolavado se considera la altura del lecho, el peso específico de los medios, y la porosidad del lecho expandido, debido a que durante esta etapa la mayor pérdida se genera por expandir las camas. Este último valor, con la tasa utilizada, se estima alrededor de 40% de expansión para la arena y 30% para la antracita.

$$h = l_e [(\rho_m - 1)(1 - f_e)]$$

Donde:

l_e = altura del lecho expandido (cm)

f_e = porosidad del lecho expandido

h = pérdida de carga (cm)

ρ_m = peso específico del medio (g/cm³) arena = 2.65, antracita = 1.65

Pérdida por soporte de grava

Adicionalmente se debe considerar la pérdida ocasionada por el medio de soporte (grava) que durante el proceso de filtrado es despreciable debido a que la velocidad del agua es muy baja, sin embargo durante el retrolavado este valor es más grande y por lo tanto la pérdida ocasionada ya puede ser considerable.

$$H_{fs} = 150(L)(V_F) \frac{\gamma}{g} \frac{(1 - \epsilon_0)^2}{(\epsilon_0)^3} \left(\frac{S_v}{6} \right)^2 + 1.75 \frac{(1 - \epsilon_0)}{\epsilon_0^3} \frac{S_v}{6} \frac{V_F^2}{g}$$

Donde:

H_{fs} = pérdidas de carga en el medio de soporte, en m

L = espesor del lecho, en m

V_F = velocidad de filtración, en m/s

γ = viscosidad cinemática del agua a 20°C, en m²/s

g = aceleración de la gravedad, m/s²

ϵ_0 = porosidad del medio filtrante

$$S_v = \frac{1}{\sqrt{d_1 * d_2 * c_e}}$$

d_1 y d_2 = tamaño máximo y mínimo de la grava en una capa de entre 5 y 10 cm, en m

C_e = coeficiente de esfericidad

Finalmente con los resultados parciales obtenidos en cada sección de tubería respecto a las pérdidas por fricción, locales y en los lechos se encuentra el valor total de la pérdida para cada tipo y con la suma de estos resultados se calcula la pérdida total en el sistema.

2.3.5 Cargas requeridas para alimentación y retrolavado de la planta

El conjunto de todas las mermas de carga provocadas en el sistema de tuberías y medios filtrantes, brindan una estimación de la cantidad de energía que se pierde cuando el agua atraviese la planta. Este valor sin embargo, debe ser afectado por el desnivel de los elementos y por la carga recomendada para el funcionamiento adecuado tanto de la filtración como del retrolavado. De acuerdo con la experiencia del IMTA, se desea que la presión dentro de filtros sea al menos 10 mca para realizar la filtración, al saturarse los medios filtrantes pueden provocar alrededor de 5 mca de pérdida adicional, dejando una presión de trabajo mínima de 15 mca si consideramos por seguridad que los 10 mca se deben tener a la salida del filtro. Con estos datos aunados al cálculo de pérdida total, se estima la carga demandada en el sistema para alimentar los filtros, con la cual es posible buscar un equipo de bombeo adecuado. En caso de que se pretenda utilizar el equipo existente, es necesario revisar comparar la carga

disponible, con la presión inyectada por la bomba, verificar que la presión residual al llegar al punto de descarga, sea mayor a la elevación de este último y finalmente revisar que el equipo pueda trabajar bajo este punto de operación con una eficiencia adecuada.

La relación de las cargas para los sistemas contemplados en este informe se representa a continuación. Es importante destacar que esta ecuación otorga un valor de carga superior al requerido en realidad, debido a que la carga mínima requerida real sería aquella que proporcionara al filtro 15 mca, más las pérdidas previas a este y que a su vez permitiera la descarga de agua filtrada en el tanque destinado. Esta fórmula; sin embargo, considera que todas las pérdidas se tienen antes de llegar al filtro y permite compensar la carga requerida por la altura de los filtros.

$$H_{T\text{ fil}} = Pt + \sum hf + \sum hl + hmf$$

Donde:

$H_{T\text{ filtración}}$ = Suma de cargas requeridas para proceso de filtración

Pt = Presión de trabajo mínima en filtros, en mca

$\sum hf$ = Pérdidas por fricción, en mca

$\sum hl$ = Pérdidas locales, en mca

hmf = Pérdidas en el filtro por el material filtrante (arena + antracita), en mca

Para los procesos de retrolavado la carga mínima es 1 kg/cm^2 , pero se recomienda 1.5 o 2 kg/cm^2 para asegurar la expansión adecuada de los lechos y la remoción de los flóculos atrapados. La ecuación que relaciona estas cargas es esencialmente la misma pero aplicada al flujo de retrolavado. En este cálculo es importante recordar que la pérdida por el medio de soporte puede impactar el resultado y debe tomarse en cuenta. Debido a que el retrolavado se realiza con los lechos semisaturados se considera una carga extra de 2 m como pérdida en los medios filtrantes.

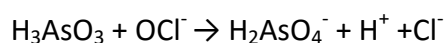
2.3.6 Consumo de reactivos

Como se mencionó previamente el sistema propuesto en estos proyectos requiere de dos reactivos y específicamente se ha seleccionado el hipoclorito de sodio para propiciar la oxidación del arsenato y el cloruro férrico para favorecer la coagulación y formación de flóculos. La dosificación de estos químicos se realizará en el afluente de la planta antes de la recirculación en caso del proyecto 4 y previa a la entrada a filtros para los demás casos. El dispositivo de incorporación será un mezclador estático incorporado a la tubería principal y el filtro malla instalado aguas abajo contribuirá a la generación de los flóculos requeridos para la remoción en filtros. Por otro lado la dosificación adecuada se puede lograr utilizando bombas dosificadoras de diafragma con control automático que tomarán la cantidad de las soluciones, directamente de los recipientes contemplados para este propósito.

El cálculo de la cantidad de reactivos requerida se obtiene a partir de los siguientes planteamientos:

- Dosificación de Hipoclorito de sodio

La dosis estequiométrica para oxidar el arsénico III a arsénico V es de 0.95 partes de Cl₂ por una parte de As:



La EPA (2003) recomienda que se dosifique en exceso 3 veces la dosis estequiométrica para oxidar el arsénico III a arsénico V en 42 segundos y que la equivalencia con el NaClO es prácticamente uno a uno; sin embargo por seguridad se utiliza una relación de 1.0501 de acuerdo a su peso molecular.

Para el cálculo de la demanda total de cloro se reconoce que en el agua existen otras sustancias que demandan cloro como el hierro y manganeso (0.64 mg de Cl₂/mg de Fe; 1.29 mg de Cl₂/mg de Mn) y que el cloro residual puede variar de 0.5 a 1.5 mg/l. Por lo tanto este valor se obtiene como sigue:

$$D = \frac{[(0.95_{mgNaClO} * X) * 3 + 0.64_{mgNaClO} * Y + 1.29_{mgNaClO} * Z + RE] * Q_D * \frac{3,600}{1,000,000}}{\frac{13}{100}}$$

Donde:

D = consumo (flujo másico) de NaClO, en kg/h

X = Concentración de As, en mg/l

Y = Concentración de Fe, en mg/l

Z = Concentración de Mn, en mg/l

RE = Concentración de cloro residual en el efluente, en mg/l

Q_D = Caudal de diseño de agua cruda, en l/s

- Dosificación de cloruro férrico

El cloruro férrico (FeCl₃) se dosificará en forma líquida y comercialmente se presenta con una concentración del 40%. Para el cálculo inicial de la demanda de hierro para la adsorción del arsénico se puede tomar como base lo que establece el estudio de la EPA (2003) que es 20:1 (20 mg Fe: 1 mg As) más un 25% como factor de seguridad; sin embargo el IMTA (2011), de acuerdo a su experiencia en el arranque y evaluación de plantas de filtración directa, ha encontrado que es necesario considerar un factor de seguridad y eficiencia de 2.0, de esta forma la cantidad de reactivo requerido se calcularía de la siguiente forma:

$$W = C \times Q \times D$$

Donde:

W = consumo de FeCl₃ al 40%, en mg/s

Q = caudal de agua cruda a tratar, en l/s

C = contenido de As en el agua cruda, en mg/l

D = dosis de FeCl₃ al 40%, en mg/mg de As

3 Resultados

3.1 Filtros y tanque de almacenamiento

a) Dimensionamiento de filtros

En la Ilustración 16 se presenta el esquema general de un filtro a presión. Con el espesor de las camas se estableció la altura útil dentro de los filtros como se muestra a continuación:

Espacio interior libre para las tuberías de salida:	0.20 m
Expansión del lecho filtrante (dato experimental): (70%)	$0.70(0.7 + 0.3) = 0.70$ m
Espesor de antracita:	0.30 m
Espesor de arena:	0.70 m
Material de soporte:	0.35 m de grava
ALTURA ÚTIL:	2.25 m

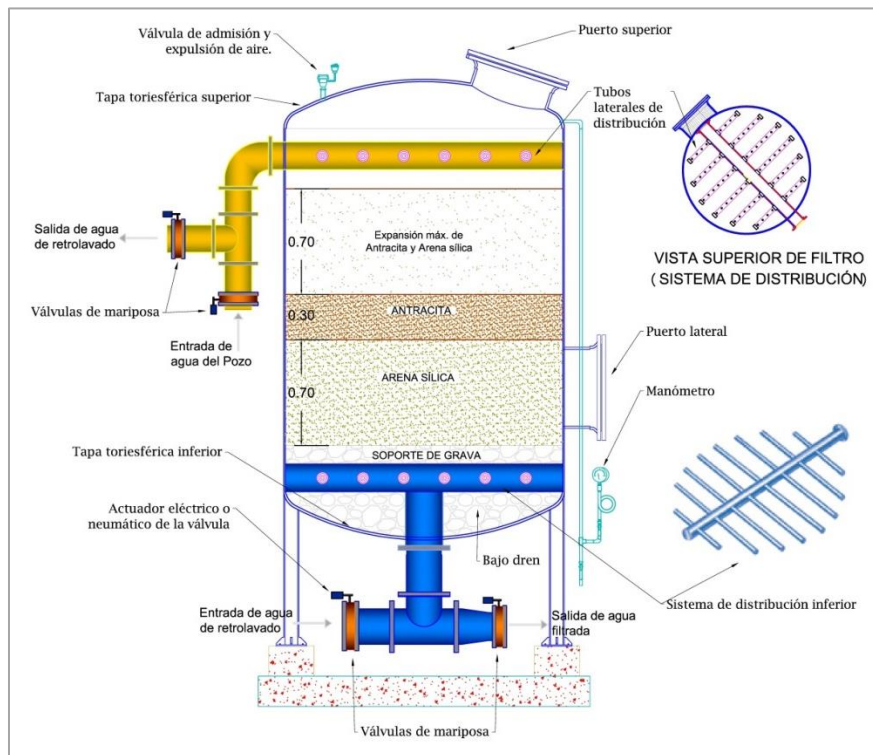


Ilustración 16 Esquema general de filtro a presión

De acuerdo con las consideraciones expuestas previamente en la metodología respecto a las tasas de filtración y cantidad adecuada de filtros, se elige el número de filtros y el diámetro comercial que mejor se ajuste al obtenido por cálculos. Con estos datos finalmente se obtienen los datos principales para el sistema de filtros.

Proyecto 1

Área de filtración requerida por filtro =

$$A_{frrf} = \frac{Qt}{Tf * Nf} = \frac{14.4 \frac{m^3}{h}}{6 \frac{m^3}{m^2h} * 3} = 0.8 m^2$$

De donde:

$$Qt = \text{gasto total} = 14.4 m^3/h$$

$$Tf = \text{tasa de filtración teórica} = 6 m^3/m^2h$$

$$Nf = \text{número de filtros propuesto} = 3$$

Tasa de filtración ajustada =

$$Tfa = \frac{Qt}{Nf * Acf} = \frac{14.4 \frac{m^3}{h}}{3 * 0.894m^2} = 5.37 \frac{m}{h}$$

De donde:

$$Acf = \text{área comercial de filtros} = 0.894 m^2$$

Caudal de filtración por filtro =

$$Qf = \frac{Qt}{Nf} = \frac{14.4 \frac{m^3}{h}}{3} = 4.8 \frac{m^3}{h}$$

Caudal de retrolavado =

$$Qr = Tr * Acf = 60 \frac{m^3}{m^2h} * 0.894m^2 = 53.64 \frac{m^3}{h}$$

De donde:

$Tr = \text{tasa de retrolavado} = 60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$

Tasa de filtración durante retrolavado de un filtro:

$$Tfr = \frac{Qt}{(Nf - 1) * Acf} = \frac{14.4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{2 * 0.894\text{m}^2} = 8.05 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

De manera análoga al proceso realizado para el proyecto 1 se obtienen los datos para el resto de los proyectos; los cuales han sido resumidos en la Tabla 18.

Tabla 18 Características principales del funcionamiento de los filtros

Proyecto	Gasto (l/s)	Área de filtración requerida (m ²)	Numero de filtros	Diámetro comercial del filtro (in)	Área comercial del filtro (m ²)	Tasa de filtración ajustada (m/h)	Caudal por filtro (l/s)	Gasto de retrolavado (l/s)	Tasa de filtración durante el retrolavado (m/h)
1	4.0	2.4	3	42	0.894	5.37	1.33	14.9	8.05
2	29.6	17.8	6	78	3.083	5.76	4.94	51.4	6.92
3	26.2	15.7	6	72	2.627	5.99	4.37	43.8	7.18
4	50.7	30.4	6	96	4.7	6.5	8.5	77.8	7.8

b) Espesor de placa para tanques de acero

Proyecto 1

De acuerdo con las especificaciones del código ASME mostradas previamente se tendrá para el primer proyecto los siguientes espesores:

Espesor del cuerpo cilíndrico =

$$t_{cc} = \frac{PR}{SE - 0.6P} + Epc = \frac{58.45 \text{ psi} * 21 \text{ plg}}{13,800\text{psi} * 0.85 - 0.6 * 58.45\text{psi}} + 0.0625 = 0.167 \text{ plg}$$

Espesor de la tapa toriesférica =

$$t_{tt} = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} + Epc = \frac{0.885 * 58.45\text{psi} * 42\text{plg}}{13,800\text{psi} * 0.85 - 0.1 * 58.45\text{psi}} + 0.0625 = 0.248 \text{ plg}$$

De donde:

Pt = Presión de trabajo = 28.45 psi

P = Presión de diseño = 28.45 + 30 psi = 58.45psi

S = Esfuerzo máximo de tensión Acero A 285 c. = 13,800 psi

R = Radio interno del tanque = 21 plg

E** = eficiencia de la junta = 0.85

** En función del tipo de soldadura (ver tabla UW-12, código ASME)

Epc = espesor adicional recomendado por corrosión, ASME (2013) = 0.0625 plg

L = radio interior de la tapa toriesférica = diámetro del tanque =42 plg

Los espesores obtenidos para el proyecto 1 a partir de las fórmulas mostradas, son los mínimos considerando la corrosión; sin embargo en la tabla 19 se recomiendan los espesores comerciales inmediatamente superiores a los calculados para todos los proyectos.

Tabla 19 Espesores de placas para filtros de los cuatro proyectos

Proyecto	Presión de trabajo		Diámetro del tanque		Espesores de la placa	
	(kg/cm ²)	(psi)	(m)	(in)	Cuerpo cilíndrico (in)	Tapa toriesférica (in)
1	2.0	28.45	1.07	42	1/4	1/4
2	2.7	37.66	1.98	78	5/16	1/2
3	1.9	27.02	1.83	72	1/4	3/8
4	2.0	28.45	2.44	96	5/16	1/2

c) Tanque de almacenamiento de agua filtrada

Proyecto 1

Volumen de almacenamiento de 1 h de agua filtrada

$$V_{af} = Q_t * t_f = 0.004 \frac{m^3}{s} * 3,600s = 14.4m^3$$

Volumen de agua generado en 10 min de retrolavado

$$V_r = Q_r * t_r = 0.0149 \frac{m^3}{s} * 600s = 8.94m^3$$

Volumen de almacenamiento requerido

$$V_{ar} = V_{af} + V_r = 14.4m^3 + 8.94m^3 = 23.3m^3 < a \text{ los } 120.6m^3 \text{ disponibles}$$

Donde:

Q_t = gasto total de entrada a la planta, en m^3/s

t_f = tiempo agua filtrada almacenada = 1hora, en s

Q_r = gasto de retrolavado, en m^3/s

t_r = tiempo que dura el retrolavado = 10 min, en s

En la Tabla 20 se presentan los resultados de los cálculos para los cuatro proyectos.

Tabla 20 Volumen mínimo requerido en tanques de almacenamiento

Proyecto	Caudal filtrado (l/s)	Tiempo de filtrado [1 h] (s)	Volumen de agua filtrada (m^3)	Caudal de retrolavado (l/s)	Tiempo de retro [10 min] (s)	Volumen para retrolavado (m^3)	Volumen total requerido (m^3)	Volumen aproximado en tanque existente (m^3)
1	4.0	3,600.0	14.4	14.9	600.0	8.94	23.3	120.6
2	29.6	3,600.0	106.6	51.4	600.0	30.83	137.4	783.3
3	26.2	3,600.0	94.32	43.8	600.0	26.27	120.6	311
4	50.7	3,600.0	182.52	77.8	600.0	46.70	229.2	2077

3.2 Tratamiento de lodos

Proyecto 4

a) Sedimentador

En el caso del proyecto 4 para el cual se requiere un sistema de tratamiento de lodos, el volumen requerido en el sedimentador se obtuvo de la siguiente ecuación:

Volumen requerido en sedimentador =

$$V_{sed} = tr * Qr = 600 * 0.0778 \frac{m^3}{s} = 46.7m^3$$

Se propuso una altura de 2.5 m para la parte cilíndrica del sedimentador, considerando 20 cm de bordo libre para evitar así una estructura demasiado alta; ya que el tanque contará con una zona cónica tipo tolva en el fondo del mismo, con un ángulo de 30° para evitar el acumulamiento de lodo en las orillas y que implica una profundidad adicional h2.

Diámetro aproximado de sedimentador =

$$D_{sed} = \sqrt{4 * V_{sed} / \pi * h} = \sqrt{4 * 46.7m^3 / \pi * 2.5m} = 5.08 m$$

Este valor estimado del diámetro será mayor al diámetro requerido al no considerar la zona cónica y funcionará como punto de referencia para obtener el diámetro real.

Finalmente se propuso el diámetro interno del fondo del cono de 0.5 m y se procedió a encontrar el diámetro de la zona cilíndrica que brindara la capacidad requerida. Como se mencionó previamente, en las pruebas de floculación-sedimentación realizadas por el IMTA se buscó reducir el tiempo requerido de sedimentación, obtener una compactación aceptable y permitir de esta forma que se tenga más tiempo disponible para la recirculación. Los resultados obtenidos en estas pruebas se muestran a continuación y serán utilizados como base para el sistema de tratamiento de lodos:

t_{sed} = tiempo requerido para sedimentación de lodo = 2 h

x_s = concentración de sólidos alcanzada en la capa sedimentada = al menos 28,500 mg/l

Vgl = volumen generado de lodo = 1 a 3% del volumen de retrolavado

Como el volumen requerido en el sedimentador es 46.7 m^3 se busca un diámetro menor a los 5.08 m estimados, que proporcione entre el volumen de la parte cónica y la cilíndrica una capacidad de almacenamiento ligeramente mayor. Dado lo anterior, el diámetro y las dimensiones propuestas son los siguientes:

Volumen útil de la parte cilíndrica:

$$V_{ci} = h * \pi * \frac{D^2}{4} = 2.3m * 3.1416 * \frac{4.7m^2}{4} = 39.9m^3$$

Altura de la parte cónica =

$$h_2 = \frac{D - d}{2} * \tan 30^\circ = \frac{4.7m - 0.5m}{2} * \tan 30^\circ = 1.21 m$$

Volumen de la parte cónica =

$$V_{co} = h_2 * \frac{\pi * (D^2 + D * d + d^2)}{12} = 1.21m * \frac{\pi * (4.7m^2 + 4.7m * 0.5m + 0.5m^2)}{12} = 7.8m^3$$

Volumen útil total del sedimentador =

$$V_{us} = V_{ci} + V_{co} = 39.9m^3 + 7.8m^3 = 47.7m^3$$

Donde:

h = altura útil de la parte cilíndrica = 2.3 m

D = diámetro de la parte cilíndrica = 4.7 m

d = diámetro del fondo de la zona cónica = 0.5 m

Con estas características es posible ajustar la operación para obtener un tiempo de retención de 2h

En la Tabla 21 se resumen las dimensiones del sedimentador.

Tabla 21 Dimensiones propuestas para sedimentador

Proyecto	Altura total de la parte cilíndrica (m)	Bordo libre (m)	Volumen de retrolavado (m ³)	Diámetro del sedimentador (m)	Volumen de la parte cilíndrica (m ³)	Volumen de zona cónica (m ³)	Volumen útil del sedimentador (m ³)
4	2.50	0.2	46.70	4.7	39.9	7.84	47.7

b) Recirculación de agua clarificada y purga de lodos

Al lograr un porcentaje de recirculación al rededor del 10% se asegura que el sistema será capaz de absorber la variación del caudal con incrementos ligeros en las tasas de filtración y en las velocidades del flujo, que no impactarán de manera perceptible el desempeño de la planta. De acuerdo a la experiencia del IMTA y las pruebas realizadas con la adición de un floculante, la generación de lodos esperada en este proceso para el tren de tratamiento propuesto es entre el 1 y el 3% del caudal de retrolavado y se tomará el más alto para fines de cálculo; sin embargo este valor deberá ajustarse en campo para obtener la cantidad real del lodo.

Integrando las consideraciones anteriores se pueden obtener las características del proceso de recirculación.

Tiempo disponible entre dos retrolavados =

$$t_{2r} = \frac{t_o}{Nf/2} = \frac{12h}{6/2} = 4 h$$

Tiempo libre para recircular =

$$t_{dr} = t_{2r} - t_{sed} - t_r = 4h - 2h - 0.167h = 1.83 h$$

Volumen generado de lodo en la sedimentación de un retrolavado=

$$V_{gl} = 0.03 * V_r = 0.03 * 46.70m^3 = 1.4 m^3$$

Caudal de recirculación =

$$Q_{rec} = \frac{V_r - V_{gl}}{t_{dr}} = \frac{46.7m^3 - 1.4m^3}{1.83h} = 24.71 \frac{m^3}{h} = 6.86 l/s$$

Recirculación respecto al caudal total =

$$\%_{rec} = \frac{Q_{rec}}{Q_t} * 100 = \frac{6.86 l/s}{50.7 l/s} * 100 = 13.54\%$$

Donde:

t_o = tiempo en el cual estará presente un operador = 12 h.

$N_f/2$ = número de filtros a lavar en un día.

t_{sed} = tiempo destinado a proceso de sedimentación de lodo = 2 h.

t_r = tiempo que dura el retrolavado = 0.167 h.

V_r = volumen de agua generado en 10 min de retrolavado = 46.7 m³.

Q_t = caudal total que alimentación a la planta = 50.7 l/s.

c) Cárcamo de lodos y filtro prensa

El cárcamo está proyectado para permitir el almacenamiento del lodo producido por 3 retrolavados en un día, considerando que la producción de lodos durante cada lavado es del 3% del volumen total del agua generada en este último proceso. Al conocer el volumen de los lodos generados y la capacidad en número de retrolavados sólo se requiere obtener las dimensiones de la siguiente manera:

Volumen requerido en cárcamo =

$$V_{rc} = V_{gl} * N_{ra} = 1.4m^3 * 3 = 4.2 m^3$$

Donde:

N_{ra} = número de retrolavados a almacenar en cárcamo

V_{gl} = volumen generado de lodos en sedimentador (por un retrolavado) = 1.4 m³

Ya que en este proyecto se contemplan 6 filtros a presión, el vaciado del cárcamo y la operación del filtro prensa se realizarían una vez al día al tener la capacidad de soportar 3

retrolavados. Como resultado se propone un espacio de 1.6x1.5x1.8 m, más 20 cm adicionales de altura como bordo libre.

Con los datos obtenidos de los cálculos anteriores y basados en las pruebas para el sistema de sedimentación realizadas por el IMTA, se sugirió la deshidratación por medio de un filtro prensa cuya capacidad se determinó de la siguiente forma.

Los datos de entrada para la selección del filtro son los siguientes:

Vgl = Volumen de lodos producido por día =	4.2 m ³
x _s = Concentración de solidos =	28,500 mg/l
T = Temperatura =	24°
Origen de los lodos =	Potabilización (Remoción de arsénico)

Volumen de lodos deshidratados por día =

$$V_{sp} = \frac{V_{gl} * x_s}{p_{bs}} =$$

Donde

P_{bs} = peso volumétrico de la base seca de lodo (lodos deshidratados), de acuerdo con el proveedor de filtro prensa = 25 lb

$$V_{sp} = \frac{4,200 \frac{l}{día} * 28,500 \frac{mg}{l} * (0.000001 \frac{kg}{mg} * 2.2046 \frac{lb}{kg})}{25 \text{ lb/ft}^3} = 10.55 \frac{ft^3}{día}$$

Con estos datos el sistema sugerido consiste en un filtro prensa de placas paralelas para un afluente de 3 a 5 m³ por día, con un contenido de sólidos de 28,500 ppm, procesando alrededor de 10.55 ft³ por día de sólidos y las siguientes características:

- Volumen de sólidos 298.74 l
- Área de filtración 18.5 m²
- Número de cámaras 21

- Placas intermedias 20
- Placas cabezales 2
- Medida de placas 470 x 470 mm
- Material de placas polipropileno
- Tipo de placas Biconcavas, selladas
- Largo total 129"

El lodo ya deshidratado, que será almacenado temporalmente en contenedores especiales dentro de la planta previo a su disposición final, poseerá concentraciones de arsénico elevadas, por lo que debe ser revisado bajo las condiciones dictadas por la NOM-004-SEMARNAT-2002 para determinar si puede disponerse en un relleno sanitario o si entra en la categoría de residuos peligrosos.

3.3 Líneas de conducción y arreglo general

a) Líneas de conducción

Considerando el rango de velocidades establecido de 2.5 a 1 m/s se calculan los diámetros adecuados para el sistema de tuberías al proponer la rapidez del flujo.

Proyecto 1

Múltiple de alimentación

Caudal en múltiple de alimentación =

$$Q_{ma} = 0.004m^3/s$$

Área transversal para velocidad propuesta =

$$A_{tvp} = Q_{ma}/V_p = \frac{0.004m^3/s}{1 m/s} = 0.004m^2$$

Donde:

V_p = velocidad propuesta para el flujo = 1 m/s.

Diámetro teórico (D_t) y diámetro comercial (D_c)

$$D_t = \sqrt{\frac{A_{tvp} * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = \sqrt{\frac{0.004m^2 * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = 2.81 \text{ plg} \Rightarrow D_c = 3$$

$$\text{plg} = 0.0762 \text{ m}$$

Área transversal con diámetro comercial:

$$A_{tc} = \pi * D_c^2 / 4 = \pi * 0.0762^2 / 4 = 0.005m^2$$

Velocidad para diámetro comercial en múltiple de alimentación:

$$V_c = \frac{Q_{ma}}{A_{tc}} = \frac{0.004 \frac{m^3}{s}}{0.005m^2} = 0.88 \text{ m/s}$$

Para el resto de las tuberías, considerando tanto el funcionamiento normal con todos los filtros en operación y la modalidad con uno en retrolavado, se tiene que:

Tubería de derivaciones

Caudal estimado en tubería de derivaciones (Operación normal) = Q_{td}

$$Q_{td} = \frac{Q_t}{N_f} * N_{fd} = \frac{0.004 \text{ m}^3/\text{s}}{3} * 2 = 0.0027 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

Q_t = gasto total de alimentación a la planta, en m^3/s .

N_f = número de filtros propuesto.

N_{fd} = número de filtros que alimenta la derivación.

Área transversal para velocidad propuesta:

$$A_{tvp} = Q_{td} / V_p = \frac{0.0027m^3/s}{2 \text{ m/s}} = 0.0013m^2$$

Donde:

V_p = velocidad propuesta para el flujo = 2 m/s.

Diámetro teórico (D_t) y diámetro comercial (D_c)

$$D_t = \sqrt{\frac{A_{tvp} * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = \sqrt{\frac{0.0013m^2 * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = 1.62 \text{ plg} \Rightarrow D_c = 2 \text{ plg} = 0.0508 \text{ m}$$

Área transversal con diámetro comercial:

$$A_{tc} = \pi * D_c^2 / 4 = \pi * 0.0508^2 / 4 = 0.00203m^2$$

Velocidad para diámetro comercial en múltiple de alimentación:

$$V_c = \frac{Q_{td}}{A_{tc}} = \frac{0.0027 \text{ m}^3/s}{0.002m^2} = 1.32 \text{ m/s}$$

Caudal estimado en tubería de derivaciones (Operación con un filtro en retrolavado) = Q_{tdr}

$$Q_{tdr} = \frac{Q_t}{N_f - 1} * N_{fd} = \frac{0.004 \text{ m}^3/s}{2} * 2 = 0.004 \text{ m}^3/s$$

Y con el diámetro seleccionado en el paso anterior, se obtiene la velocidad en tubo comercial:

$$V_c = \frac{Q_{tdr}}{A_{tc}} = \frac{0.004 \frac{m^3}{s}}{0.00203m^2} = 1.97 \text{ m/s}$$

Alimentación a un filtro

Caudal en línea de alimentación a un filtro, lo que implica que N_{fd} es 1. (Operación normal) =

$$Q_{tu} = \frac{Q_t}{N_f} = \frac{0.004 \text{ m}^3/s}{3} = 0.0013 \text{ m}^3/s$$

Donde:

Q_t = gasto total de alimentación a la planta, en m^3/s .

N_f = número de filtros propuesto.

N_{fd} = número de filtros que alimenta la derivación.

Área transversal para velocidad propuesta =

$$A_{tvp} = Q_{tu}/V_p = \frac{0.0013m^3/s}{1 m/s} = 0.0013m^2$$

Donde:

V_p = velocidad propuesta para el flujo = 1 m/s.

Diámetro teórico (D_t) y diámetro comercial (D_c)

$$D_t = \sqrt{\frac{A_{tvp} * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = \sqrt{\frac{0.0013m^2 * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = 1.62 \text{ plg} \Rightarrow D_c = 2 \text{ plg} = 0.0508 \text{ m}$$

Área transversal con diámetro comercial =

$$A_{tc} = \pi * D_c^2 / 4 = \pi * 0.0508^2 / 4 = 0.00203m^2$$

Velocidad para diámetro comercial en múltiple de alimentación:

$$V_c = \frac{Q_{tur}}{A_{tc}} = \frac{0.0013 \frac{m^3}{s}}{0.00203m^2} = 0.66 \text{ m/s}$$

Caudal en línea de alimentación a un filtro, lo que implica que Nf_d es 1. (Con un retrolavado) =

$$Q_{tur} = \frac{Qt}{Nf - 1} = \frac{0.004 m^3/s}{2} = 0.002 m^3/s$$

Y con el diámetro seleccionado en el paso anterior, se obtiene la velocidad:

$$V_c = \frac{Q_{tur}}{A_{tc}} = \frac{0.002 \frac{m^3}{s}}{0.00203m^2} = 0.99 \text{ m/s}$$

Finalmente para las tuberías de retrolavado el flujo es constante a lo largo de las líneas de entrada y salida; por lo que el diámetro calculado con este caudal se aplica para toda la conducción.

Líneas de retrolavado

Caudal de retrolavado =

$$Q_r = 0.004m^3/s$$

Área transversal para velocidad propuesta =

$$A_{tvp} = Q_{ma} / V_p = \frac{0.0149 m^3/s}{2 m/s} = 0.007 m^2$$

Donde:

V_p = velocidad propuesta para el flujo = 2 m/s.

Diámetro teórico (D_t) y diámetro comercial (D_c)

$$D_t = \sqrt{\frac{A_{tvp} * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = \sqrt{\frac{0.007 m^2 * 4}{\pi} * \frac{100}{2.54}} = 3.83 \text{ plg} \Rightarrow D_c = 4 \text{ plg} = 0.1016 \text{ m}$$

Área transversal con diámetro comercial:

$$A_{tc} = \pi * D_c^2 / 4 = \pi * 0.1016^2 / 4 = 0.008 m^2$$

Velocidad para diámetro comercial en múltiple de alimentación:

$$V_c = \frac{Q_{ma}}{A_{tc}} = \frac{0.004 \frac{m^3}{s}}{0.005 m^2} = 1.84 m/s$$

Siguiendo el mismo procedimiento se obtuvieron todos los diámetros para cada proyecto y en las Tablas 22 y 23 se muestran los resultados para las tuberías principales de las plantas abordadas en este documento.

Tabla 22 Características de tuberías principales de retrolavado y alimentación a un filtro

Proyecto	Tubería para retrolavado				Tubería para alimentación a un filtro			
	Caudal (m ³ /s)	Diámetro (plg)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Diámetro (plg)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)
1	0.0149	4.0	0.008	1.84	0.0020	2.0	0.002	0.99
2	0.0514	8.0	0.032	1.58	0.0059	4.0	0.008	0.73
3	0.0438	6.0	0.018	2.40	0.0052	4.0	0.008	0.65
4	0.0778	8.0	0.032	2.40	0.0101	4.0	0.008	1.25

Tabla 23 Características en tuberías principales de derivación y múltiple de alimentación

Proyecto	Tubería de derivaciones				Múltiple de alimentación a filtros			
	Caudal (m ³ /s)	Diámetro (plg)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Diámetro (plg)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)
1	0.004	2.0	0.002	1.97	0.004	3.0	0.005	0.88
2	0.018	4.0	0.008	2.19	0.0296	6.0	0.018	1.62
3	0.016	4.0	0.008	1.94	0.0262	6.0	0.018	1.44
4	0.030	6.0	0.018	1.67	0.0507	8.0	0.032	1.56

b) Arreglo general

El resultado principal de esta propuesta es la representación gráfica en un plano, que permite además conocer las distancias entre los componentes, las longitudes de las tuberías utilizadas y los accesorios de interconexión u operación requeridos.

Proyecto 1

El arreglo general de este proyecto (Ilustración 17) contempla que el sitio de la planta y los tanques elevados se encuentran a una distancia de 400 m en línea recta y a casi 600 m por los caminos existentes, por lo que la operación de estos dos puntos de manera simultánea es sumamente complicada considerando que el organismo operador solicitó un sistema de operación manual para disminuir el consumo de energía. Durante la propuesta, para dar solución a este conflicto del arreglo, se llegó a la conclusión de que el funcionamiento más adecuado del sistema se lograría al utilizar el depósito 2 como tanque de almacenamiento de agua de alimentación y el otro como un tanque de almacenamiento y regulación del agua ya filtrada, de esta forma se lograría cierta independencia de la planta respecto a la bomba del cárcamo y no sería necesaria la construcción de una cisterna adicional ni de sincronizar la

operación de estos dos elementos. Por otro lado al perder la carga de llegada del agua, la planta requiere de un equipo de bombeo adicional para alimentar los filtros y llevar el agua filtrada al depósito 1 con la carga restante. Al iniciar un retrolavado los equipos de bombeo para este propósito, tomarán el agua filtrada con la que se lavará un filtro a la vez en flujo inverso al de trabajo normal. El caudal de salida llegará a la pileta de retrolavado donde se regulará su descarga al drenaje.

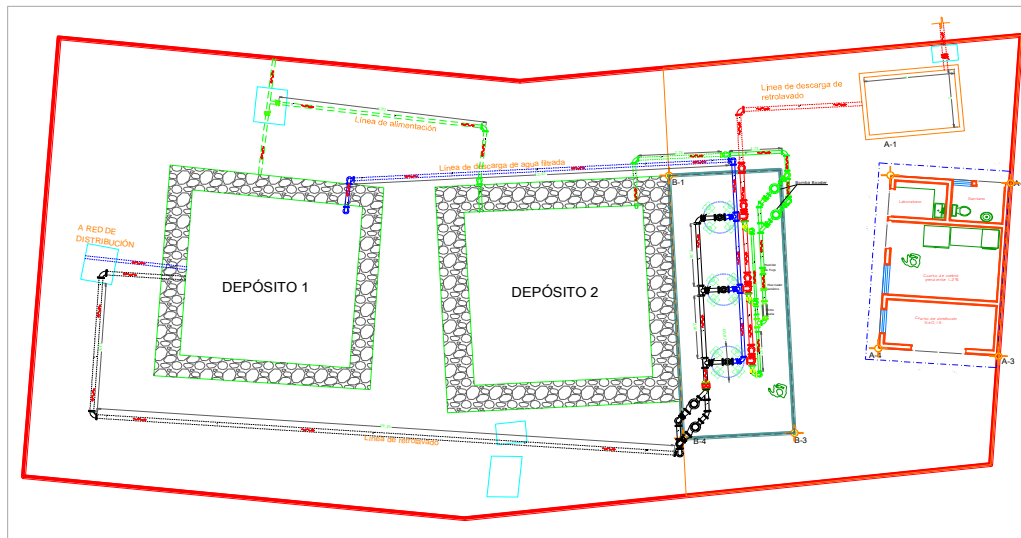


Ilustración 17 Arreglo general de proyecto 1

Proyecto 2

Este proyecto presentó la ventaja de poseer una presión suficiente en la línea de descarga del pozo, de tal forma que la alimentación a la planta se realizará directamente de la línea del pozo, la cual contará con un bypass para desconectar los filtros y pasar el agua directamente al tanque de almacenamiento en caso de alguna falla o mantenimiento en todos los tanques. El caudal filtrado será descargado en esta misma cisterna y de este punto en adelante el funcionamiento del sistema será idéntico al que se tiene ya que la cisterna cuenta actualmente con dos equipos de bombeo que elevan el agua hasta el tanque elevado colocado sobre la glorieta. De este último se tomará el agua para realizar los retrolavados aprovechando la carga estática del agua para llevar el agua a través de los filtros y descargarla en la pileta de regulación

previa al sistema de drenaje. El arreglo, como se puede observar en la Ilustración 18, se distribuyó en los costados de la cisterna para evitar modificaciones a la estructura existente lo que provocó un sistema con longitudes relativamente grandes en las tuberías de interconexión.

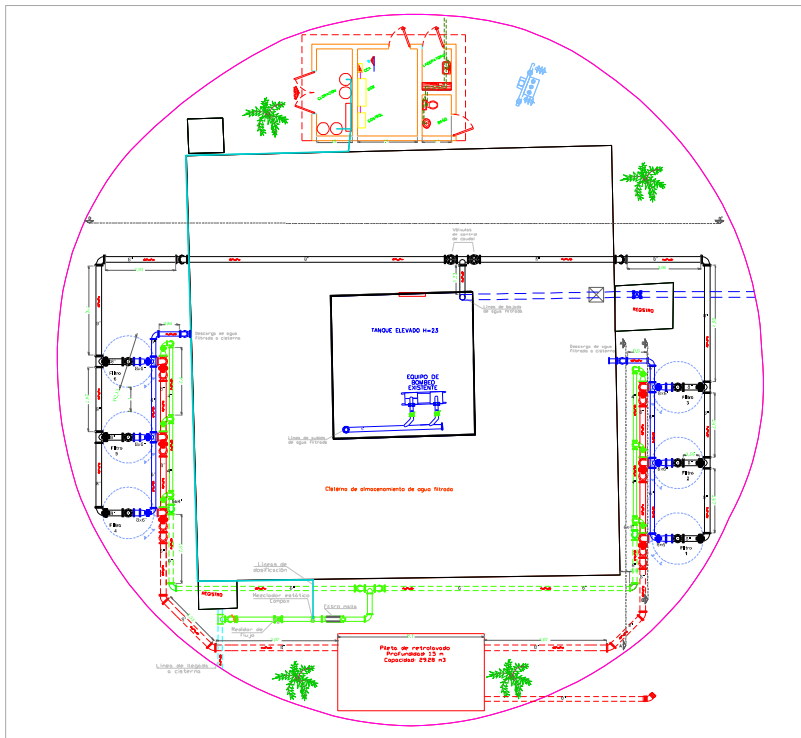


Ilustración 18 Arreglo general de proyecto 2

Proyecto 3

Como se comentó previamente, el espacio disponible en este proyecto no presentó un obstáculo; sin embargo se buscó aprovechar una esquina contigua al pozo sin obstruir el acceso a este. El funcionamiento del sistema se basa en la carga que pueden proporcionar los elementos existentes, ya que el pozo puede proporcionar la presión requerida por la planta para el proceso de filtración y en el caso del retrolavado, se solicitó un arreglo similar al anterior donde el tanque elevado alimentará la línea de retrolavado de filtros. Respecto a este último requisito se propuso el arreglo del sistema como se solicitó, sin embargo el análisis detallado de las pérdidas de presión indica que la instalación de un equipo auxiliar es necesaria para llevar a

cabo el retrolavado de manera apropiada. El arreglo general de la planta se presenta en la Ilustración 19.

Respecto al funcionamiento original, se sabe que el sistema alimenta también a un tanque de almacenamiento ubicado en un terreno cercano con menor altitud, por lo que se proyectaron derivaciones tanto en la línea de alimentación como en la de agua filtrada que permiten el envío de agua a la cisterna alternativa aprovechando la carga disponible.

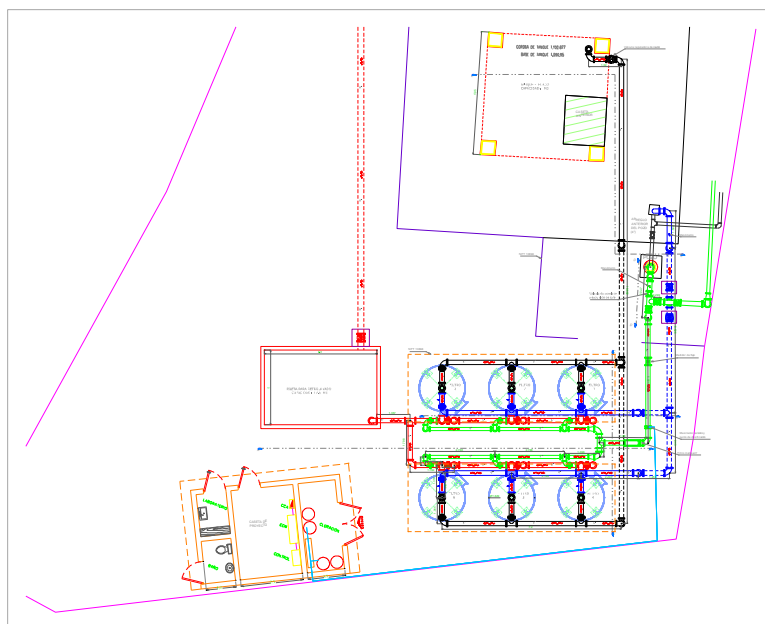


Ilustración 19 Arreglo general de proyecto 3

Proyecto 4

Al ser un sistema alimentado por dos pozos en cada uno de ellos se dejó una derivación a su línea original que llega directamente al tanque de almacenamiento; sin embargo durante la operación normal de la planta ambos pozos bombearán hasta un punto en común donde una sola línea conducirá el flujo total hasta la batería de filtros los cuales descargarán en la línea de agua filtrada que llevará el flujo al tanque de almacenamiento contiguo (Ilustración 20). En este caso el sistema de retrolavado alimentado por el tanque de almacenamiento descargará en un sedimentador de lodos después de salir del filtro lavado. Una vez separado el lodo, este será

descargado por diferencia de cargas dentro del tanque de lodos que bombeará el lodo acumulado de 3 retrolavados al filtro prensa donde será deshidratado y preparado para su disposición final. Por otro lado el volumen de agua clarificada se recirculará a la línea de alimentación justo antes del rebombeo y la dosificación, pero después de la unión del caudal de ambos pozos.

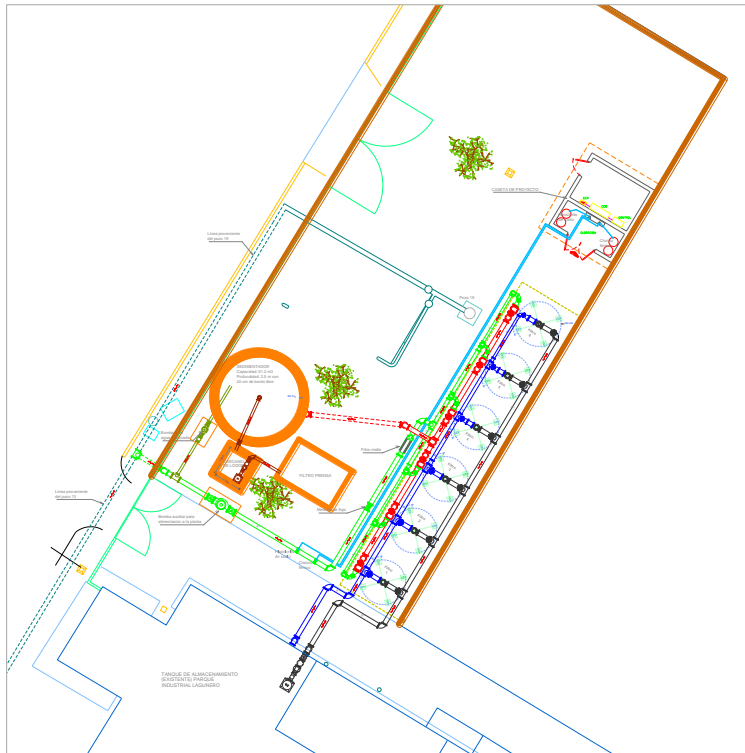


Ilustración 20 Arreglo general de proyecto 4

Como se puede observar en los arreglos, en cada caso se buscó que la configuración se adaptara a las características del terreno y al espacio disponible, de tal forma que a pesar de estar basados en la misma tecnología la disposición de los elementos es diferente e influye directamente en la longitud de las tuberías y las pérdidas de energía generadas por el sistema.

3.4 Pérdidas de energía

Proyecto 1

a) Pérdidas por fricción

Proceso de filtración

La determinación de la energía diezmada por fricción en tuberías se realizará por medio de la fórmula de Darcy-Weisback tal como se muestra a continuación para el primer tramo de la línea de filtración:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2 * g} = \frac{0.0244 * 10.83m * (0.877m/s)^2}{0.0762m * 2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.136m$$

Donde:

L = longitud de la tubería = 10.83 m.

V = velocidad en la tubería, en m/s. Obtenida a partir del caudal y diámetro de la sección:

Velocidad =

$$V = Q / A_{tc} = 0.004 \frac{m^3}{s} / 0.0046m^2 = 0.877m/s$$

Área transversal =

$$A_{tc} = \pi * D_c^2 / 4 = \pi * (0.0762m)^2 / 4 = 0.0046m^2$$

D = diámetro de la tubería = 0.0762 m.

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s².

f = coeficiente de fricción =

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{G}{Re^T} \right]^2} = \frac{0.25}{\left[\log \frac{0.0001/0.0762}{3.71} + \frac{4.555}{66165.7^{0.8764}} \right]^2} = 0.0244$$

ε = rugosidad = 0.0001 m

Re = número de Reynolds

$$Re = \frac{V * D}{\nu} = \frac{0.877m/s * 0.0762m}{1.01E - 6 m^2/s} = 66165.7$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática a 20°C = 1.01E-6 m²/s

G y T, son tomados directamente del libro Datos Básicos del MAPAS, CONAGUA, 1994 (Tabla 17).

De esta forma al aplicar la fórmula de Darcy-Weisback, caudal y número de Reynolds a todas las líneas de alimentación y salida de agua filtrada se obtuvieron las pérdidas por cada sección de la tubería dependiendo del diámetro. Los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 25, desglosa dos para cada tramo de tubería:

Tabla 24 Pérdidas por fricción durante la filtración (proyecto 1).

Tramo	Q (l/s)	Diámetro (m)	Área (m ²)	Vel. (m/s)	Re	F	L (m)	hf (m)
Depósito a rebombeo	4.00	0.0762	0.0046	0.877	6.62E+04	0.0244	10.83	0.136
Rebombeo a derivación	4.00	0.0762	0.0046	0.877	6.62E+04	0.0244	3.41	0.043
Derivación a Filtro 2	4.00	0.0508	0.0020	1.974	9.93E+04	0.0253	0.71	0.070
Filtro 2 a Filtro 1	2.00	0.0508	0.0020	0.987	4.96E+04	0.0268	3.23	0.084
Filtro 1	2.00	0.1016	0.0081	0.247	2.48E+04	0.0270	4.00	0.003
Pérdida total hasta el filtro								0.201
Filtro 1 - Tee de Filtro 1 (4")	2.00	0.1016	0.0081	0.247	2.84E+04	0.0270	0.55	0.000
Tee de Filtro 1 - Tanque (3")	4.00	0.0762	0.0046	0.877	6.62E+04	0.0244	17.79	0.223
Pérdida total de filtro a salida								0.223
Pérdida por fricción en filtración								0.424

Proceso de retrolavado

De igual manera se aplican las fórmulas en las líneas de retrolavado para obtener la disminución de carga durante este proceso. Los resultados de los cálculos por tramo de tubería se resumen en la Tabla 26. El funcionamiento más desfavorable corresponde generalmente al retrolavado del filtro que requiera un mayor recorrido del agua en la tubería; sin embargo en el proyecto 1 por ejemplo, se puede observar que al tener la entrada y salida de agua en sitios opuestos el funcionamiento es similar sin importar el filtro en turno.

Tabla 25 Pérdidas por fricción durante retrolavado (proyecto 1).

Tramo	Q (l/s)	Diámetro (m)	Área (m ²)	Vel. (m/s)	Re	F	L (m)	hf (m)
Bomba - filtro 1 (4")	14.897	0.1016	0.0081	1.838	1.85E+05	0.0213	7.3	0.263
Filtro 1 - Tee F1 (4")	14.897	0.1016	0.0081	1.838	1.85E+05	0.0213	4.4	0.158
Filtro 1 - pileta (4")	14.897	0.1016	0.0081	1.838	1.85E+05	0.0213	8.5	0.305
Tubos secund (2")	2.48	0.1016	0.0081	0.306	3.08E+04	0.0260	0.9	0.000
Pérdida por fricción en retrolavado								0.727

b) Pérdidas locales

Proceso de filtración

Al determinar las pérdidas por accesorios en la planta se utilizan los coeficientes de pérdidas, especificados en el Anexo B de este documento. En este caso el coeficiente de pérdidas utilizado en la primera ecuación corresponde a una ampliación de 1.5" a 3" y en la segunda a una válvula de mariposa de 3":

$$H_L = K * V1^2 / 2g = 9 * \frac{(1.974m/s)^2}{2 * 9.81m/s^2} = 1.787m$$

$$H_L = K_{ft} * V2^2 / 2g = 1 * \frac{(0.877)^2}{2 * 9.81m/s^2} = 0.032m$$

Donde:

K = coeficiente de pérdidas para ampliación de 1.5" a 3"

$$K = \frac{(1 - (dc/dg)^2)^2}{(dc/dg)^4} = \frac{(1 - (1.5/3)^2)^2}{(1.5/3)^4} = 9$$

K_{ft} = Coeficiente de pérdidas para válvula mariposa de 3" = $K_{ft} = K * ft = 45 * 0.018 = 1$.

V1 = velocidad de flujo para diámetro 1.5" = 1.97m/s.

V2 = velocidad de flujo para diámetro 3" = 0.877 m/s.

Para este cálculo el desglose se realizó por secciones de tubería para facilitar la cuantificación de los accesorios y reducir la probabilidad de error. Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla 27 para cada sección de las tuberías de filtración.

Tabla 26 Pérdidas locales durante filtración (proyecto 1).

Accesorio	N°	Q (m ³ /s)	Diámetro (m)	Área (m ²)	Vel. (m/s)	V ² /2g	K	f _T	Kf _T	H _L (m)
Amp 1.5" a 3"	1	0.0040	0.0508	0.0020	1.974	0.199	9	0	0	1.787
Val mar 3"	1	0.0040	0.0762	0.0046	0.877	0.039	45	0.018	1	0.032
Mezclador 3"	1	0.0040	0.0762	0.0046	0.877	0.039	168	0.018	3	0.119
Filtro malla 3"	1	0.0040	0.0762	0.0046	0.877	0.039	547	0.018	9.85	0.386
codo 90°, 3"	1	0.0040	0.0762	0.0046	0.877	0.039	30	0.018	0.54	0.021
Te f. des 3"	2	0.0040	0.0762	0.0046	0.877	0.039	60	0.018	1.08	0.085
Red 3" a 2"	1	0.0040	0.0508	0.0020	1.974	0.199	0.99	0	0.00	0.197
Te f. dir 2"	1	0.0040	0.0508	0.0020	1.974	0.199	20	0.019	0.38	0.075
Codo 90°, 2"	3	0.0020	0.0508	0.0020	0.987	0.050	30	0.019	1	0.085
Val mar 2"	1	0.0020	0.0508	0.0020	0.987	0.050	45	0.019	1	0.042
Amp 2" a 4"	1	0.0020	0.0508	0.0020	0.987	0.050	9	0	0.00	0.447
Te f. des 4"	1	0.0020	0.1016	0.0081	0.247	0.003	60	0.017	1	0.003
Codo 90°, 4"	1	0.0020	0.1016	0.0081	0.247	0.003	30	0.017	0.51	0.002
Orificios 19 mm	26	0.0001	0.0190	0.0003	0.271	0.004				0.010

Hidroesf bajo dren	15										0.007
Pérdida de bomba a filtro											3.30
Te f. des 4"	1	0.0020	0.1016	0.0081	0.247	0.003	60	0.017	1.02	0.003	
Red 4" a 3"	1	0.0020	0.0762	0.0046	0.439	0.010	0.49	0	0	0.005	
Val mar 3"	1	0.0020	0.0762	0.0046	0.439	0.0098	45	0.018	0.81	0.008	
Te f. des 3"	1	0.0040	0.0762	0.0046	0.877	0.039	60	0.018	1.08	0.042	
codo 90°, 3"	5	0.0040	0.0762	0.0046	0.877	0.039	30	0.018	0.54	0.106	
Pérdidas de filtro a depósito											0.16
Pérdida por accesorios en filtración											3.46

Proceso de retrolavado

Al igual que en filtración, para el sistema de retrolavado se obtuvieron las pérdidas locales de manera desglosada en secciones como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 27 Pérdidas locales durante retrolavado (proyecto 1).

Accesorio	N°	Q (m ³ /s)	Diámetro (m)	Área (m ²)	Vel. (m/s)	V ² /2g	K	f _T	Kf _T	H _L (m)
Te f. des 4"	1	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	60	0.017	1.02	0.176
Codo 90°, 4"	6	0.015	0.1524	0.0182	0.817	0.034	30	0.017	0.51	0.104
Amp 4" a 6"	1	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	1.56	0	0	0.269
Val comp 4"	1	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	8	0.017	0.136	0.023
Te f. dir 4"	2	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	20	0.017	0.34	0.117
Codo 90°, 4"	1	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	30	0.017	0.51	0.088
Val mar 4"	1	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	45	0.017	0.765	0.132
Te f. des 4"	1	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	60	0.017	1.02	0.176
Hidroesferas bajo dren	15									0.423
Orificios 19 mm	26	0.0006	0.0190	0.0003	2.021	0.208				0.578
Pérdida de tanque a filtro										2.08
Codo 90°, 4"	5	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	30	0.017	0.51	0.439

Te f. des 4"	2	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	60	0.017	1.02	0.351
Val mar 4"	1	0.015	0.1016	0.0081	1.838	0.172	45	0.017	0.765	0.132
Pérdida de filtro a descarga										0.92
Pérdida por accesorios en retrolavado										3.00

c) Pérdidas en medios filtrantes

Proceso de filtración

Para estimar la reducción de carga producida por el medio filtrante limpio se integraron todas las variables como se muestra a continuación:

$$Hf1 = 150(L1)(V_F) \frac{\gamma}{g} * \frac{(1 - \epsilon_01)^2}{(\epsilon_01)^3} * \frac{1}{(Ce1)^2} * \Sigma \frac{Pi1}{(di1)^2} =$$

$$= 150(70)(0.22) * \frac{0.0101}{g} * \frac{(1 - 0.4)^2}{(0.4)^3} * \frac{1}{(0.8)^2} * 443.57 = 94.3 \text{ cm}$$

$$Hf2 = 150(L2)(V_F) \frac{\gamma}{g} * \frac{(1 - \epsilon_02)^2}{(\epsilon_02)^3} * \frac{1}{(Ce2)^2} * \Sigma \frac{Pi2}{(di2)^2}$$

$$= 150(30)(0.22) * \frac{0.0101}{g} * \frac{(1 - 0.6)^2}{(0.6)^3} * \frac{1}{(0.7)^2} * 153.87 = 24.1 \text{ cm}$$

Donde:

$Hf1$ = pérdidas de carga en arena, en cm.

$Hf2$ = pérdidas de carga en antracita, en cm.

$L1$ = espesor del lecho de arena =70 cm.

$L2$ = espesor del lecho de antracita =30 cm.

V_F = velocidad de filtración = 0.22 cm/s

γ = viscosidad cinemática del agua a 20°C = 0.0101 cm²/s.

g = aceleración de la gravedad = 981 cm/s².

ϵ_{01} = porosidad del arena =0.4

ϵ_{02} = porosidad del antracita = 0.6

$Ce1$ = coeficiente de esfericidad del arena = 0.8

$Ce2$ = coeficiente de esfericidad del antracita = 0.7

p_i = fracciones en peso del material filtrante retenido entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica, g.

d_i = media aritmética de las aberturas de las mallas en el análisis granulométrico, cm.

La granulometría del material filtrante (arena y antracita) se tomó directamente de las pruebas realizadas por el IMTA (2010) para la remoción de arsénico mediante filtración directa. Los resultados del análisis granulométrico para ambos materiales se encuentran en el Anexo C de este documento.

Tabla 28 Pérdida en medios filtrantes durante filtración (proyecto 1).

Unidad	Arena	Antracita
L (cm)	70	30
γ (cm ² /s)	0.0101	0.0101
g (cm ² /s)	981	981
ϵ_0	0.4	0.6
Ce	0.8	0.7
$\sum p_i/(d_i)^2$	443.57	153.87
V_f (cm/s)	0.22	0.22
H_f (m)	0.943	0.0241
H_f Total (m)	0.967	

La pérdida generada por el lecho de grava no se considera dado que resulta ser despreciable para este cálculo debido los grandes intersticios del lecho y la baja velocidad del agua.

Proceso de retrolavado

$$h1 = l_{e1}[(\rho_m1 - 1)(1 - f_{e1})] = 98 * [(2.65 - 1)(1 - 0.64)] = 58.2 \text{ cm}$$

$$h2 = l_{e2}[(\rho_m2 - 1)(1 - f_{e2})] = 39 * [(1.65 - 1)(1 - 0.72)] = 7.1 \text{ cm}$$

Donde:

h_1 = pérdida de carga, en cm.

h_2 = pérdida de carga, en cm.

L_{e1} = altura del arena expandida= 98 cm.

L_{e2} = altura del antracita expandida = 39 cm.

f_{e1} = porosidad del arena expandida = 0.64

f_{e2} = porosidad del antracita expandida = 0.72

p_{m1} = peso específico arena = 2.65 g/cm³.

p_{m2} = peso específico antracita = 1.65 g/cm³.

De esta forma en la Tabla 30 se integran las variables y el resultado de aplicarlas en la ecuación anterior:

Tabla 29 Pérdida en medios filtrantes durante retrolavado (proyecto 1).

Datos	Arena	Antracita
l (cm) *	70.00	30.00
f_e	0.64	0.72
p_m (g/cm ³)	2.65	1.65
Expansión (%)	40	30
l_e (cm)	98.00	39.00
h (m)	0.582	0.071
h total (m)	0.653	

*altura del lecho estático

Pérdida por soporte de grava

$$H_{fs} = 150(L)(V_F) \frac{\gamma}{g} \frac{(1 - \epsilon_0)^2}{(\epsilon_0)^3} \left(\frac{S_v}{6} \right)^2 + 1.75 \frac{(1 - \epsilon_0) S_v}{\epsilon_0^3} \frac{V_F^2}{6g}$$

$$H_{fs} = 150 * 0.05 * 0.0167 * \frac{1.00E - 6 * (1 - 0.5)^2}{9.81 * 0.5^3} * (491.05)^2 + 1.75 * \frac{(1 - 0.5) * 491.05 * 0.0167^2}{0.5^3 * 9.81} = 0.103 \text{ m}$$

Donde:

H_{fs} = pérdidas de carga en el medio de soporte, en m.

L = espesor del lecho = 0.05 m.

V_F = velocidad de filtración = 0.0167 m/s.

γ = viscosidad cinemática del agua a 20°C = 1.00E-6 m²/s.

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s².

ϵ_0 = porosidad del medio filtrante = 0.5

$$\frac{S_v}{6} = \frac{6}{\sqrt{d_1 * d_2} * C_e} = \frac{6}{\sqrt{0.0048 * 0.0024} * 0.6} = 491.05 \text{ m}^{-1}$$

d_1 y d_2 = tamaño máximo y mínimo de la grava en una capa de entre 5 y 10 cm, en m.

C_e = coeficiente de esfericidad = 0.6

Como se observa en la Tabla 31, el valor de la pérdida generada por la cama de grava durante el retrolavado resulta superior a las decenas de centímetros y su integración al cálculo total de pérdidas ya es observable en el resultado.

Tabla 30 Pérdidas en medio de soporte durante retrolavado (proyecto 1).

Subcapa	Espesor (cm)	Tamaño (mm)		Dei	Sv/6	1	2	Hfr (m)
1	0.05	4.8	2.4	0.003	491.05	6.14E-03	0.097	0.103
2	0.05	12.5	4.8	0.008	215.17	1.18E-03	0.043	0.044
3	0.075	19	12.5	0.015	108.15	4.47E-04	0.021	0.022
4	0.075	38	19	0.027	62.03	1.47E-04	0.012	0.012
5	0.1	63	38	0.049	34.06	5.91E-05	0.007	0.007
Hfr total								0.188

d) Pérdidas totales por proyecto

Tanto el proyecto 2 como el 3 incluyeron la realización de estos cálculos con el mismo nivel de detalle que el proyecto 1. Al ser un procedimiento similar que varía principalmente por la forma del arreglo y los diámetros de las tuberías, en la Tabla 32 se presentan juntos los

resultados de los tres primeros proyectos, considerando las situaciones más desfavorables para cada caso y asegurando el funcionamiento correcto de la planta en todo momento.

Tabla 31 Pérdidas en procesos de filtración y retrolavado de la planta

Proyecto	Por fricción en filtración (m)	Locales en filtración (m)	Por medios filtrantes en filtración (m)	Pérdida total durante filtración (m)	Por fricción en retrolavado (m)	Locales en retrolavado (m)	Por medios filtrantes en retrolavado (m)	Por medio de soporte en retrolavado (m)	Pérdida total durante retrolavado (m)
1	0.424	3.460	0.967	4.85	0.727	3.00	0.653	0.188	4.57
2	0.1865	3.880	0.830	4.90	0.984	2.97	0.653	0.188	4.80
3	0.444	2.335	0.862	3.64	1.884	4.32	0.653	0.188	7.05

3.5 Cargas requeridas para alimentación y retrolavado de la planta

Proyecto 1

Para el proceso de filtración es importante considerar que la alimentación se realizará desde el depósito con ayuda de un equipo de bombeo adicional, por lo que se desprecia la carga hidrostática del agua asumiendo que la carga de llegada al equipo es prácticamente cero. Al descargar sobre el primer depósito se considera que la llegada al tanque está a 2 m sobre el suelo, lo que corresponde a la altura de la losa tapa desde el nivel de piso.

$$H_{T\text{ fil}} = Pt + \sum hf + \sum hl + hmf = 15 + 0.424 + 3.46 + 0.967 = 20.85 \text{ mca}$$

Donde:

$H_{T\text{ filtración}}$ = Suma de cargas requeridas para proceso de filtración.

Pt = Presión de trabajo mínima en filtros = 15 m.

$\sum hf$ = Pérdidas por fricción = 0.424 m.

$\sum hl$ = Pérdidas locales = 3.46 m.

hmf = Pérdidas en el filtro por el material filtrante (arena + antracita) = 0.967 m.

Como se mencionó previamente para este proyecto se colocará un equipo nuevo auxiliar por lo que si consideramos todas las cargas, la que se deberá proporcionar deberá ser mayor a 20.85 mca. Se sugiere una bomba con un punto de operación de $Q= 4 \text{ l/s}$ para $H = 2.5 \text{ kg/cm}^2$, considerando que la eficiencia del equipo en estas condiciones permita modificar el punto de operación incrementando el caudal en caso de requerirlo y manteniendo la eficiencia por encima del valor mínimo establecido para la potencia seleccionada.

- Retrolavado

El proceso de retrolavado se pretende realizar desde el depósito de agua filtrada; sin embargo al encontrarse prácticamente a nivel de piso debe verificarse la carga que debe proporcionar el equipo de retrolavado:

$$H_{T \text{ retro}} = Pr + \sum hf + \sum hl + hmf + hmfs + hms =$$

$$H_{T \text{ retro}} = 20 + 0.727 + 3.0 + 0.653 + 2 + 0.188 = 26.57 \text{ mca}$$

Dónde:

$H_{T \text{ retro}}$ = Suma de cargas requeridas para proceso de retrolavado.

Pr = Presión de retrolavado = 20 m.

$\sum hf$ = Pérdidas por fricción = 0.727 m.

$\sum hl$ = Pérdidas locales = 3.0 m.

hmf = Pérdidas en el filtro por el material filtrante (arena + antracita) = 0.653 m.

$hmfs$ = Pérdida adicional considerada por la saturación de los medios = 2 m.

hms = Pérdidas en medio de soporte (grava) = 0.188 m.

El retrolavado en este proyecto puede realizarse tomando el agua del depósito 1, pero ya que la carga de posición en este tanque con respecto a los filtros es prácticamente nula, es necesaria la implementación de un equipo de bombeo auxiliar con un punto de operación de $Q = 14.9 \text{ l/s}$ con aproximadamente $H = 2.6 \text{ kg/cm}^2$.

- Filtración

A diferencia del anterior, en el sistema de filtración de este proyecto la alimentación a la planta se realizará directamente desde la fuente de agua, ya que el pozo en cuestión cuenta con un equipo que tiene la capacidad suficiente para bombear directo la red de distribución y como se pudo comprobar la carga que proporciona es adecuada para el funcionamiento de los filtros. Con esto en mente el objetivo de este cálculo es verificar si la presión en la línea es mayor a la mínima requerida. Como se puede observar en el plano la descarga se realizará sobre la cisterna ubicada en el terreno, la cual tiene una losa tapa que se encuentra a 40 cm sobre el nivel del suelo.

$$H_{T\text{ fil}} = Pt + \sum hf + \sum hl + hmf = 15 + 0.187 + 3.88 + 0.83 = 19.9 \text{ mca}$$

Donde:

$H_{T\text{ filtración}}$ = Suma de cargas requeridas para proceso de filtración.

Pt = Presión de trabajo mínima en filtros = 15 m.

$\sum hf$ = Pérdidas por fricción = 0.187 m.

$\sum hl$ = Pérdidas locales = 3.88 m.

hmf = Pérdidas en el filtro por el material filtrante (arena + antracita) = 0.83 m.

El equipo de bombeo instalado en el pozo tiene un punto de operación de $Q = 29.6$ l/s con 3.0 kg/cm^2 . Esto implica que si la carga de llegada a la planta es 2.7 kg/cm^2 y la requerida por el sistema es de 19.9 mca, la presión de llegada a filtros será incluso mayor a los 20 mca recomendados. A pesar de que el equipo se encuentra por encima del rango requerido de presión, el sistema puede trabajar adecuadamente con la presión suministrada y permite mantener la posibilidad de alimentar directamente a la red en caso de requerirlo.

- Retrolavado

El proceso de retrolavado se pretende realizar con el agua del tanque de almacenamiento existente el cual tiene una elevación de 23 m sobre el nivel de piso. La carga variará con el

tiempo menos de 1 m hasta el final del retrolavado. Con estas condiciones se verifica la carga que la carga proporcionada sea mayor a la requerida.

$$H_{T\ retro} = Pr + \sum hf + \sum hl + hmf + hmfs + hms =$$

$$H_{T\ retro} = 15 + 0.98 + 2.97 + 0.653 + 2 + 0.188 = 21.79\ mca$$

Donde:

$H_{T\ retro}$ = Suma de cargas requeridas para proceso de retrolavado.

Pr = Presión de retrolavado = 15 m.

$\sum hf$ = Pérdidas por fricción = 0.98 m.

$\sum hl$ = Pérdidas locales = 2.97 m.

hmf = Pérdidas en el filtro por el material filtrante (arena + antracita) = 0.653 m.

hmfs = Pérdida adicional considerada por la saturación de los medios = 2 m.

hms = Pérdidas en medio de soporte (grava) = 0.03 m.

Como se puede observar la carga proporcionada por el tanque es suficiente para provocar una expansión adecuada del lecho y por lo tanto no es necesaria la colocación de un equipo adicional. El retrolavado en este proyecto puede realizarse al aprovechar la carga hidrostática del tanque elevado y utilizar una válvula reguladora de caudal para asegurar el paso del flujo deseado de 51.4 l/s.

Proyecto 3

- Filtración

Este proyecto contempla en su proceso de filtración una alimentación de la planta directamente desde la bomba del pozo; por lo que es importante verificar si este equipo es capaz de proporcionar la carga requerida para alimentar la planta y descargar en la cisterna de almacenamiento que se encuentra a 1.45 m sobre el nivel del suelo. La carga requerida en filtro por sí sola, asegura al menos 10 mca a la salida de los filtros, con lo que certifica que la presión es suficiente para llegar a la descarga.

$$H_{T\text{ fil}} = P_t + \sum h_f + \sum h_l + h_{mf} = 15 + 0.44 + 2.34 + 0.86 = 18.64 \text{ mca}$$

Donde:

$H_{T\text{ filtración}}$ = Suma de cargas requeridas para proceso de filtración.

P_t = Presión de trabajo mínima en filtros = 15 m.

$\sum h_f$ = Pérdidas por fricción = 0.44 m.

$\sum h_l$ = Pérdidas locales = 2.34 m.

h_{mf} = Pérdidas en el filtro por el material filtrante (arena + antracita) = 0.86 m.

Con la ecuación anterior se verifica que aun considerando que todas las pérdidas en tuberías se generan antes de llegar al filtro, la carga suministrada por el equipo de pozo de 1.9 kg/cm² para los 26.2 l/s, es suficiente para proporcionar a la planta un funcionamiento correcto y además descargar el agua filtrada sobre el tanque de almacenamiento.

- Retrolavado

El proceso de retrolavado es similar al del proyecto anterior ya que el organismo operador solicitó realizar el retrolavado con el tanque de almacenamiento existente el cual tiene una elevación de 13.3 m sobre el nivel de piso. La carga variará con el tiempo hasta finalizar en 12.3 m aprox. Por lo que es importante verificar la carga requerida por el sistema para realizar el retrolavado y compararla con la carga disponible.

$$H_{T\text{ retro}} = P_r + \sum h_f + \sum h_l + h_{mf} + h_{mfs} + h_{ms} =$$

$$H_{T\text{ retro}} = 15 + 1.88 + 4.32 + 0.653 + 2 + 0.188 = 24.04 \text{ mca}$$

Donde:

$H_{T\text{ retro}}$ = Suma de cargas requeridas para proceso de retrolavado.

P_r = Presión de retrolavado = 15 m.

$\sum h_f$ = Pérdidas por fricción = 1.88 m.

$\sum h_l$ = Pérdidas locales = 4.32 m.

h_{mf} = Pérdidas en el filtro por el material filtrante (arena + antracita) = 0.653 m.

h_{mfs} = Pérdida adicional considerada por la saturación de los medios = 2m.

h_{ms} = Pérdidas en medio de soporte (grava) = 0.03 m.

Como se puede observar la carga proporcionada por el tanque de 13.3 m, no es suficiente para provocar una expansión adecuada del lecho ni siquiera con la carga mínima sugerida, por lo que se recomienda la instalación de un equipo auxiliar que proporcione las condiciones adecuadas. Se sugiere un equipo de bombeo colocado sobre la línea con un punto de operación de $Q = 43.78$ l/s con alrededor de $H = 1.3$ kg/cm².

Proyecto 4

Al requerirse únicamente un diseño conceptual, la ingeniería básica desarrollada en este caso no incluyó un análisis de pérdidas en el sistema; sin embargo actualmente se realiza este proyecto a nivel ejecutivo por parte de un externo y nuestra participación se enfoca en el seguimiento y revisión de los planos, memorias, cálculos y presupuestos, contribuyendo para lograr una optimización de los recursos y el funcionamiento general del sistema.

3.6 Consumo de reactivos

- Dosificación de hipoclorito de sodio

En los proyectos no se obtuvieron valores considerables de Fe y Mn que incrementaran más de 0.1 mg/l el consumo del reactivo, por lo que no se consideran en el cálculo ya que esta influencia es prácticamente irrelevante al calcular el sistema para 1.5 mg/l de cloro residual. Entonces, para oxidar el As y los otros elementos, y dejar un cloro libre residual de 1.5 mg/l, tomando en cuenta la dosis estequiométrica de 0.95 partes de Cl₂ por una de As, la equivalencia cloro-hipoclorito y la concentración del NaClO al 13%, se obtiene el consumo o demanda de cloro de la siguiente manera:

$$D = \frac{[(0.95_{mgCl_2} * X) * 3 + 0.64_{mgNaClO} * Y + 1.29_{mgNaClO} * Z + 1.5_{mgNaClO}] * \frac{13}{100}}$$

$$\frac{* 1.0501 * Q_D * \frac{3600}{1000000}}{\frac{13}{100}} =$$

$$D = \frac{[(0.95_{mgNaClO} * 0.027) * 3 + 1.5_{mgNaClO}] * \frac{13}{100}}$$

$$\frac{* 1.0501 * 4.0 \frac{L}{s} * \frac{3600}{1000000}}{\frac{13}{100}} = 0.183 \frac{kg}{h}$$

Donde

X = Conc. de As = 0.027 mg/l

Y = Conc. de Fe = 0 mg/l

Z = Conc. de Mn = 0 mg/l

Q_D = Caudal de diseño de agua cruda = 4.0 l/s

Los resultados de los cálculos para los cuatro proyectos se resumen en la Tabla 33.

Tabla 32 Consumo de NaClO para 1.5 mg/l de cloro residual

Proyecto	Conc. En agua cruda (mg/l)			Dosis como (mg/l)			Caudales		Consumo NaClO al 13%	
	As	Fe	Mn	Cl ₂ *	NaClO al 100%	Producto al 13%	Agua cruda (l/s)	Sol. NaClO (ml/min)	(kg/h)	l/semana
1	0.027			1.58	1.66	12.74	4	2.51	0.18	25.26
2	0.041			1.62	1.7	13.06	29.6	19.01	1.39	191.64
3	0.02			1.56	1.63	12.58	26.2	16.21	1.9	163.35
4	0.038			1.61	1.69	12.99	54.48*	34.81	2.55	350.86

*Caudal considerando la recirculación de agua clarificada

- Dosificación de cloruro férrico

Al considerar la concentración del reactivo comercial de cloruro férrico (de 40%), el contenido de hierro en el mismo obtenido a partir de su peso molecular, la dosis, el caudal del agua y el factor de seguridad de 2 recomendado por el IMTA, se obtiene la cantidad del producto que debe ser adicionado al agua.

El contenido de Fe en el cloruro férrico:

Peso molecular del cloruro férrico 162.19 g/mol

Peso del hierro - 55.84 g/mol

$$\underline{1 \text{ mg de FeCl}_3 \text{ contiene}} \frac{55.84}{162.19} = \underline{0.344 \text{ mg de Fe}}$$

Tomando en cuenta ahora la concentración del reactivo comercial se obtiene que 1 mg de FeCl₃ en solución al 40%, contiene 0.344 x 0.40 = 0.1376 mg de Fe, esto es igual a decir que:

$$1 \text{ mg de Fe está contenido en } \frac{1}{0.1376} = 7.267 \text{ mg de FeCl}_3 \text{ al 40\%,}$$

De esta forma, si por cada mg de As se requieren 20 mg de Fe al que se le añade el factor de seguridad de 2 entonces:

La dosis (D) requerida es 7.267 x 20 x 2 = 290.48 mg de FeCl₃ al 40% (producto comercial).

Finalmente con este cálculo se obtiene el consumo de FeCl₃:

$$W = C * Q * D = 0.027 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 4.0 \frac{\text{L}}{\text{s}} * 290.48 \frac{\text{mg FeCl}_3}{\text{mg As}} = 31.37 \frac{\text{mg}}{\text{s}} = 0.113 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Donde:

D = dosis de Cloruro férrico = 290.48 mg FeCl₃ al 40% / mg As

Q = caudal de agua cruda a tratar = 4.0 l/s

C = contenido de As en el agua cruda = 0.027 mg/l

De esta forma se integró el cálculo para todos los proyectos, el cual se resume en la Tabla 34.

Tabla 33 Consumo de cloruro férrico

Proyecto	Conc. As en agua cruda (mg/l)	Dosis como (mg/l)			Caudales		Consumo FeCl ₃ al 40%	
		Fe	FeCl ₃ al 100%	Producto al 40%	Agua cruda (l/s)	Sol. FeCl ₃ (ml/min)	(kg/h)	l/semana
1	0.027	1.08	3.14	7.84	4	1.33	0.11	13.37
2	0.041	1.64	4.76	11.91	29.6	14.90	1.27	150.24
3	0.02	0.8	2.32	5.81	26.2	6.44	0.55	64.87
4	0.038	1.52	4.41	11.04	54.48*	25.43	2.16	256.29

*Caudal considerando la recirculación de agua clarificada

Tanto para el NaClO como para el FeCl₃, los equipos de dosificación requeridos deben poseer una capacidad superior a la requerida ya que por recomendación del fabricante, para prolongar la vida útil es necesario que el equipo trabaje a un máximo de 75% de su capacidad regular, por lo tanto el caudal de selección de los equipos dosificadores debe incrementarse un 25% sobre el flujo de trabajo requerido.

3.7 Modelos de simulación

Se realizó para dos proyectos un modelo estático (estado permanente) computacional en el programa EPANET, considerando para el cálculo de las pérdidas de carga la ecuación de Darcy Weisbach, ya que es la más exacta teóricamente y aplicable a flujos de agua para cualquier régimen en que se encuentren. Los tanques de filtración son representados como una válvula de regulación del diámetro de la tubería de retrolavado, con un coeficiente de pérdidas equivalente al generado por los medios filtrantes y los elementos internos del filtro. Dicho coeficiente es obtenido a partir de la ecuación del cálculo de pérdidas locales, de tal forma que al

conocer la pérdida generada, el caudal teórico que pasa por los filtros y la velocidad de dicho flujo en el diámetro seleccionado, es posible conocer el coeficiente de pérdidas asociado a estas características.

$$\frac{H_f(2g)}{V^2} = K_{ft}$$

Donde

H_f = es la pérdida dentro del filtro = 0.98 m.

V = velocidad del flujo en tubo de 4" = 0.25 m/s.

K_{ft} = coeficiente de pérdida total del filtro = 317

En capítulos anteriores se pueden observar los cálculos realizados para determinar las pérdidas locales, sin embargo en el modelo de simulación los coeficientes de pérdidas de los accesorios en un tramo de tubería se representan como un solo coeficiente acumulado que se muestra en la Tabla 35 para el proyecto 1, donde K representa la suma de los coeficientes de los accesorios incluidos en cada sección:

Proyecto 1

Dado que se conoce el gasto y la carga suministrados por el equipo de bombeo, se modeló este suministro como una fuente o reservorio con una carga hidráulica de $H = 25$ m. El análisis del modelo con esta carga permite observar que incluso si el equipo proporciona una carga menor a la indicada, el funcionamiento del sistema será adecuado aun cuando se tenga un filtro en retrolavado. Dentro del modelo se verificó el trabajo regular de la planta, pero también se realizaron algunas pruebas para proyectar las condiciones de la planta con un caudal mayor. Al igual que esta observación, el modelo permite hacer otras al implementar modificaciones en caso de requerirlas y proporciona datos sobre el funcionamiento de la planta como se puede observar en la Ilustración 21.

Tabla 34 Coeficiente de pérdidas acumulado para simulación de proyecto 1

Tubería	Nodo Inicial	Nodo final	Pieza	Long (m)	diámetro (mm)	K
p1	1	n3	te f des, codo 45, 5 codo 90,	17	76.2	4.077
p3	n3	n4		6.005		24.22
			red 3a2, amp 1.5a3, valmar		76.2	10.81
			flujómetro		76.2	0
			mezclador		76.2	3.02
			filtro malla		76.2	9.85
			codo 90		76.2	0.54
p4	n4	n5	te f des	0.33	76.2	1.08
p5	n5	n6	red 3a2, te f des/dir	1.3	50.8	1.75
p6	n6	n7	2 cod 90	2.5	50.8	1.14
p7,p26, p17	n7	n8	cod 90, val mar, amp 2a4	0.5	50.8	10.43
p8, p27, p18	n8	n9	te f des, cod 90	3.6279	101.6	1.53
p10, p20,p22	n10	n11	te fdes	0.2318	101.6	1.02
p11,p21,p23	n11	n12	red 4a3, val mar, te fdes	0.47	76.2	2.39
p12	n12	n24	te f dir	1.94	76.2	0.36
p13	n24	n25	2 cod 90	13.8	76.2	1.08
p24,p25	n23	n17	te f dir	2.5	76.2	0.36
p15	n25	n27	3 cod 90	4	76.2	1.62

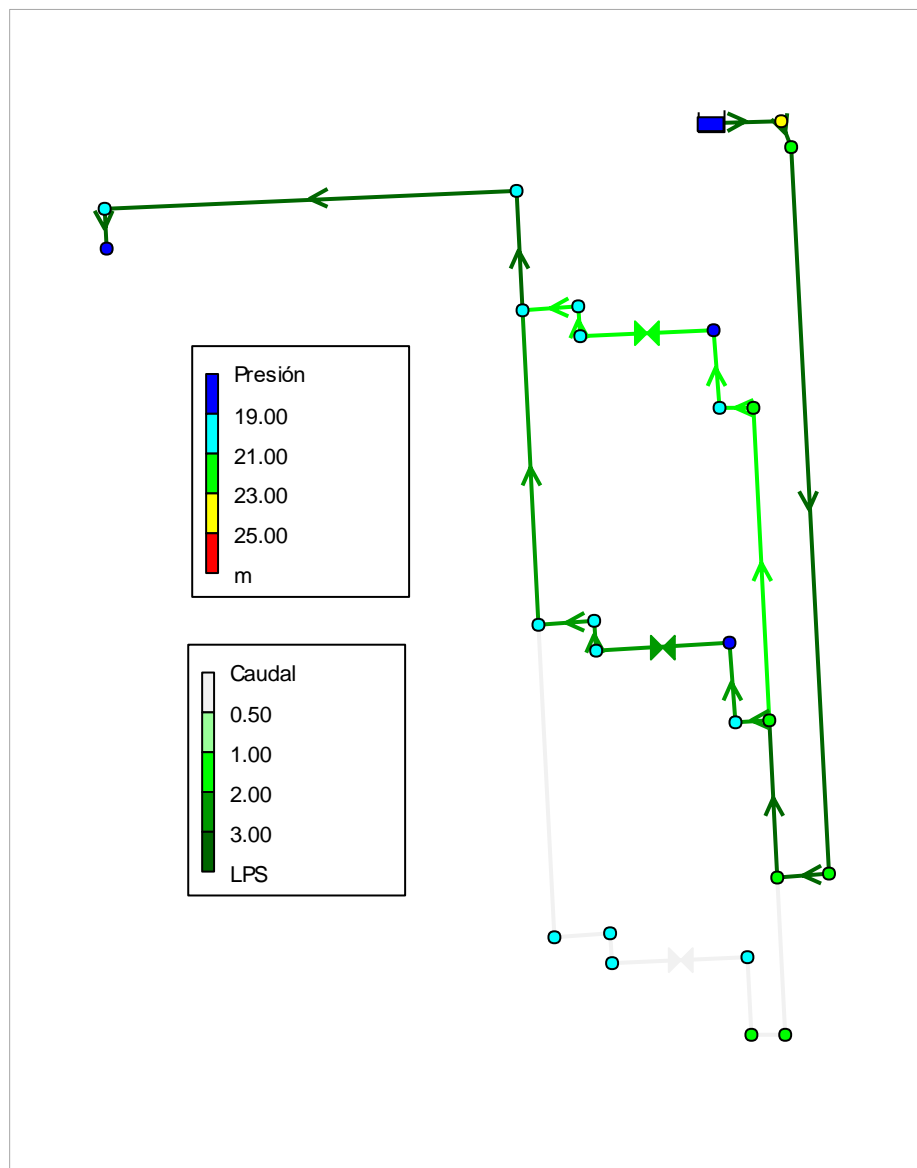


Ilustración 21 Simulación de presiones y caudales en planta de proyecto 1

Proyecto 2

La simulación en este proyecto se realizó debido a que el organismo ejecutor del proyecto consideraba un arreglo distinto al presentado, desperdiciando la carga hidráulica del flujo al llegar al terreno y utilizando equipos de bombeo auxiliares para la alimentación de la planta. Este sistema resultaba mucho más costoso y evidentemente menos eficiente; sin embargo se realizó el modelo de simulación para evidenciar la eficiencia del arreglo y como soporte para los cálculos y las decisiones tomadas. De manera análoga al proyecto anterior se simuló el sistema con un reservorio como alimentador con una carga $H = 27$ m y un filtro en retrolavado para provocar la condición más crítica.

El coeficiente de pérdidas representativo para simular los filtros como válvulas se obtuvo de la siguiente forma:

$$\frac{H_f(2g)}{V^2} = K_{ft}$$

Donde

H_f = es la pérdida dentro del filtro = 0.85 m.

V = velocidad del flujo en tubo de 8" = 0.18 m/s.

K_{ft} = coeficiente de pérdida total del filtro = 499

Los accesorios se representaron de la misma forma que en el proyecto anterior al integrarlos en un solo coeficiente de pérdidas para cada tramo de tubería (Ilustración 22), tal como se indica en la Tabla 36.

Tabla 35 Coeficiente de pérdidas acumulado para simulación de proyecto 2

Tubería	Nodo Inicial	Nodo final	Pieza	Long (m)	Diámetro (mm)	K
1	POZO	2	amp 4 a 6	0.1	101.6	1.600
p1	n3.2	n4		6.66	152.4	14.340
			1 val mar		152.4	1.360
			3 cod 90		152.4	1.350
			tee f.des	0.7	152.4	0.900
			medidor de flujo		152.4	0.000
			filtro malla		152.4	8.210
			mezclador estático		152.4	2.520
p2	n48	n49	tee f.des	0.7	152.4	0.900
p3,p3.1	n49	n51	3 cod 90	9.63	152.4	1.350
p4,p4.1	n51	n1	2 cod 90	3.87	152.4	0.900
p5, p5.1	n1	n4	red 6 a 4, 2 te f. dir/des	3.13	101.6	2.190
p6,p6.1	n4	n7	2 cod 90	3.13	101.6	1.020
P7, p7.1	n7	n8	cod 90, val mar, amp 4 a 8	1.08	101.6	10.280
p8,p8.1	n8	n9	te f. des, cod 90	2.8	203.2	1.260
p10	n16	n17	te f. des	0.25	203.2	0.840
p11	n17	n18	red 8 a 6, val mar, te f. des	0.6	152.4	2.080
p12	n18	n54	3 cod 90	4.21	152.4	1.350
p12.1	41	53	5 cod 90	8.58	152.4	2.250
p23,p24			te f. des/dir	3.13	152.4	0.600
p17, p17.1			red 8 a 6, val mar, cod 90	0.6	152.4	1.63

4 Conclusiones

Los resultados obtenidos durante la elaboración de los proyectos de los sistemas de tratamiento para remoción de As en agua, presentados en este informe, son la base para el desarrollo y construcción de las plantas de tratamiento correspondientes. El punto de partida tanto para este informe, como para los proyectos en general, es la selección del sistema de tratamiento más adecuado con base en los parámetros de diseño, las características y disponibilidad del terreno, para realizar un análisis técnico-económico y comparación de varias opciones de tratamiento aplicables, considerando también el consumo de energía y la complejidad de la operación de los sistemas. El análisis preliminar realizado para los cuatro proyectos cuyo diseño funcional se presenta en este informe, indicó como la mejor la tecnología de filtración directa por medio de filtros a presión.

Un resumen de la capacidad, principales elementos, parámetros de diseño y operación de las plantas de tratamiento para los cuatro proyectos se presenta en las Tablas 37 y 38. Estos datos se pueden utilizar como punto de comparación para futuros proyectos que involucren este tipo de tecnología o contaminante. La carga hidráulica requerida, los caudales y el consumo de reactivos en cada planta son puntos básicos para la selección de los principales equipos de bombeo requeridos en los sistemas. Por otro lado es importante recordar que algunos de los valores obtenidos en estos proyectos son válidos para el tratamiento de aguas con concentraciones de As relativamente bajas; ya que para concentraciones mayores se pueden requerir de variaciones en las tasas de filtración, afectando el resto de las capacidades requeridas o incluso la selección del tren de tratamiento.

Tabla 36 Capacidad y flujos resultantes por proyecto

Proyecto	Concentración de As (mg/l)	Caudal en afluente (l/s)	Diámetro comercial del filtro (in)	Número de filtros	Tasa de filtración ajustada (m/h)	Gasto de retrolavado (l/s)	Vol. de tanque de almacenamiento requerido (m ³)	Volumen de retrolavado (m ³)	Lodo sedimentado producido por retrolavado (m ³)
1	0.027	4.0	42	6	5.37	14.9	23.3	8.94	--
2	0.041	29.6	78	6	5.76	51.4	137.4	30.83	---
3	0.02	26.2	72	6	5.99	43.8	120.6	26.27	---
4	0.038	50.7	96	6	6.5	77.8	229.2	46.70	1.4

Tabla 37 Capacidad y flujos resultantes por proyecto

Proyecto	Carga hidráulica para alimentación (mca)	Carga hidráulica para retrolavado (mca)	Consumo NaClO (l/semana)	Caudal de equipo de dosificación (l/h)	Consumo de FeCl ₃ (l/semana)	Caudal de equipo de dosificación (l/h)	Caudal recirculado (l/s)
1	17.85	20.41	25.26	0.19	13.37	0.10	--
2	16.90	20.63	191.64	1.43	150.24	1.12	---
3	15.60	17.88	163.35	1.22	64.87	0.48	---
4	0	0	350.86	2.43	256.29	1.78	4.44

Otro aspecto destacable es el resultado de los de los modelos de simulación generados para dos de los proyectos, que proporcionaron un método confiable de ratificación de los datos hidráulicos calculados. En el primer proyecto este análisis se utilizó para verificar la carga hidráulica propuesta y el funcionamiento de la tubería, con lo que se observó que la planta sí posee las características hidráulicas adecuadas para tratar un caudal mayor de hasta 5 l/s sin realizarle modificaciones a las instalaciones; sin embargo un caudal de 6 l/s equivalente a lo requerido para proporcionar flujo continuo a la localidad, si requeriría el cambio de un par de tramos de tubería o del equipo de bombeo para superar las pérdidas ocasionadas. En el proyecto 2, el modelo de simulación confirmó el correcto funcionamiento del sistema sin la

implementación de equipos de bombeo adicionales; los cuales habían sido propuestos por el organismo ejecutor. Esta modalidad permitió aprovechar toda la energía suministrada por el equipo del pozo y reducir tanto el costo inicial de proyecto como el de operación de la planta.

De manera general el resultado principal en los proyectos es el diseño y el arreglo de los elementos propuestos para las plantas de tratamiento; sin embargo, tanto la obtención de pérdidas como el modelo de simulación otorgan un panorama imprescindible del funcionamiento hidráulico, que brindará a los contratistas la oportunidad de revisar a detalle estos aspectos e incluso proponer modificaciones que mejoren la eficiencia hidráulica de los proyectos. Por otro lado, los resultados obtenidos son una herramienta que permitirá al organismo licitante verificar que las propuestas recibidas en una licitación cumplan con ciertos criterios básicos y al mismo tiempo les ofrecerá un medio para comparar los aspectos específicos de un proyecto como: los reactivos necesarios para operar la planta, el sistema de tratamiento o los volúmenes y flujos a manejar.

El desarrollar proyectos similares permitió refinar algunos aspectos de un trabajo a otro y aplicar herramientas de ingeniería en etapas como la selección de la tecnología a aplicar, el diseño o adaptaciones específicas del tren de tratamiento, el dimensionamiento de los componentes de la planta y los resultados obtenidos. Durante la selección del tratamiento se logró una mejor comprensión de la importancia de remover este elemento del agua para consumo, además de obtener un manejo adecuado de las nociones básicas para elegir un proceso de tratamiento. Al presentarse condiciones distintas en cada lugar, fue posible adiestrar los conceptos de diseño adecuando el sistema a cada proyecto considerando las características del sistema de aguas existente, las dimensiones del lugar o las particularidades de cada población. El proceso de cálculo y dimensionamiento, que permitió ejercitar conceptos de hidráulica y comprender aspectos específicos de este tipo de sistemas de potabilización, fue incluso refinado en cada proyecto al pasar desde la elaboración de una hoja de cálculo básica para el diseño hidráulico, hasta la automatización de una fracción importante de los cálculos y la integración del dimensionamiento de cada componente en un solo archivo, con el objetivo de

agilizar el procedimiento, que posteriormente se consiguió y facilitó la realización de un proyecto múltiple con diversas tecnologías implicadas que se desarrolla actualmente.

Las acciones remediales presentadas para este conflicto creciente en nuestro país, proporcionan un alivio relativamente rápido que a pesar de beneficiar a la población y sin dejar de ser altamente necesarias, deben ser complementadas con métodos de prevención. El impulso de soluciones preventivas que contribuyan a evitar el consumo de agua contaminada puede plantearse como un objetivo paralelo a la implementación de sistemas potabilizadores para remoción de arsénico. Este tipo de medidas deben involucrar por supuesto; la concientización de la población tanto en los efectos que puede producir el contacto con este contaminante, como en el uso adecuado del agua que contribuya a evitar la sobreexplotación de los mantos acuíferos y el cambio asociado de la calidad del agua extraída; así mismo es imprescindible que no se descuide el monitoreo de constante de las fuentes de abastecimiento de agua potable en nuestro país con el objetivo de detectar perturbaciones en las concentraciones de los contaminantes y poder determinar si se trata de eventos efímeros o persistentes.

Evitar o anular concentraciones excesivas de algunos elementos en el agua, puede ser en muchas situaciones prácticamente imposible; sin embargo, aunque la solución no sea sencilla, en algunos casos se encuentra en nuestras manos y el reto en nuestro país, no son en sí las medidas a implementar, las tecnologías disponibles o la inversión requerida, sino el cambio cultural y mental requerido en nuestra sociedad para tomar las decisiones correctas en el momento adecuado.

Bibliografía

- Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (2007). *Resumen de Salud Pública: Arsénico*. Departamento de Salud y Servicios Humanos. EE. UU.
- Bournod, L., Cabezas, E. y Pérez, C. (2010). *Remoción del Arsénico Mediante Coagulación, Filtración y Sedimentación*. Seminario de Agua. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina.
- Cánepa, L. y Di Bernardo, L. (1992). Manual V Diseño, Tomo III: Criterios de diseño para filtros, de la serie Filtración Rápida. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Castro de Esparza (2006). *Remoción del arsénico en el agua para bebida y bioremediación de suelos*. [en línea]. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf>.
- Comisión Nacional del Agua (2007). *Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (edición 2007). México.
- Comisión Nacional del Agua (2013). *Estadísticas del Agua en México* (edición 2013). México.
- Comisión Nacional del Agua (1999). Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (edición 2007). México.
- Environmental Protection Agency (2000). *Technologies and Costs form removal of Arsenic from Drinking Water*. [en línea]. Washington, D.C. United States. Disponible en: http://water.epa.gov/drink/info/arsenic/upload/2005_11_10_arsenic_treatments_and_costs.pdf
- González, A. (2010) *Tecnologías de Potabilización Adecuadas al Medio Rural*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.

- Organización Mundial de la Salud. *Guías para la calidad del agua potable: Volumen 1* (3ª ed.). Suiza.
- Piña, M., Calderón, C. y González, A. (2011). *Asistencia Técnica para la Licitación e Instalación de Plantas Potabilizadoras para Remoción de Arsénico en Gómez Palacio, Durango*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Subcoordinación de Potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2010). *Remoción de arsénico mediante filtración directa en Torreón, Coahuila*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Secretaría de Salud (2000). *Modificación a la NOM-127-SSA1-1994*. [en línea]. México. Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>.
- Zerbato, M., Carrera, E., Eliggi, M., Modini, L., Vaira, S., Nosedá, J. y Abramovich, B. (2009). *Cloruro férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparásitos en agua*. Asociación de Universidades Grupo Montevideo. Uruguay.

Anexo A

Eficiencias electromecánicas (proyecto 4)

Datos del equipo del pozo A e instrumentos de medición

DATOS DE LA COLUMNA	Diámetro de Succión (plg):	6	Diámetro de la Flecha (m):	No visible
DATOS DE PLACA DEL MOTOR	Marca: EMERSON MOTOR COMPANY	Eficiencia (%): 93.4	Potencia (kw)	No visible
	Tensión (V): 440	Corriente (A): 154	Frecuencia de Rotación (RPM)	No visible
DATOS TÉCNICOS	Bomba (hp):	125	Transformador (kva):	225
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN		Certificado de Calibración		
	Tipo	Exactitud (%)	Expedidor por	
FLUJO	Ultrasónico - Tiempo en Tránsito DCT7088	±0.5 de velocidad ±0.0152 m/s	Dynamic Consultant S.A. de C.V.	
PRESIÓN DE DESCARGA	Manómetro con glicerina 100GBM A. INOX.	1-100 Psi 0-7 kg/cm ²	Altamira S.A. de C.V.	
NIVEL DINÁMICO	Sonda eléctrica: Mod. 101	De cada milímetro ó 1/100 de pie	Solinst S.A. de C.V.	

Reporte de pruebas de pozo A

No.	Símbolo	Descripción	Fórmulas	Unidad	Prueba	
					1	2
1	Di	Diámetro interno de la tubería		m	0.15	0.15
2	N	Frecuencia de rotación		RPM	1675.00	1700.00
3	ND	Nivel dinámico		m	142.70	142.70
4	x	Distancia desde el nivel de referencia a la línea de centros del manómetro		m	0.68	0.68
5	P ₁	Lectura del manómetro a la descarga		m	5.00	5.00
6	P _m	Presión a la descarga	$((4)+(5))$	m	5.68	5.68
7	A	Área del tubo a la descarga	$(3.141592*(1)^{2}/4)$	m ²	0.02	0.02
8	Q _v	Flujo		m ³ /s	0.02	0.02
9	h _v	Carga de velocidad	$((8)/(7))^{2}/19.613$	m	0.09	0.09
10	l	Longitud de tubería de succión		m	164.70	164.70
10	h _{fc}	Pérdidas de fricción en la columna	$10.674*((8)^{1.852}/(140^{1.852*(1)^{4.871}})*(10))$	m	1.90	1.93
11	h _d	Carga a la descarga	$[(6) + (9) + (10)]$	m	7.67	7.71
12	H	Carga Total	$[(3) + (11)]$	m	150.37	150.41
13	I _A	Corriente línea A		A	102.90	103.10
	I _B	Corriente línea B			113.10	113.10
	I _C	Corriente línea C			112.30	112.10
	I	Corriente promedio	$[(I_A+I_B+I_C)/3]$		109.43	109.43
14	V _{A-B}	Tensión fase AB		V	440.50	442.20
	V _{B-C}	Tensión fase BC			443.40	443.20
	V _{A-C}	Tensión fase AC			438.80	438.70

	V	Tensión promedio	$[(V_{AB} + V_{BC} + V_{AC}) / 3]$		440.90	441.37
15	F _{pA}	Factor de Potencia línea A			0.83	0.83
	F _{pB}	Factor de potencia línea B			0.81	0.81
	F _{pC}	Factor de potencia línea C			0.84	0.84
	F _p	Factor de potencia promedio	$[(F_{pA}+F_{pB}+F_{pC})/3]$	%	0.83	0.83
16	Pe	Potencia de entrada al motor	$[1.732 * (13) * (14) * (15) * 10^{-5}]$	kW	69.08	69.16
17	Ps	Potencia de salida de la bomba	$[(8) * (12) * 9.806]$	kW	34.33	34.72
	η	Eficiencia electromecánica	$[(17)/(16) * 100]$	%	49.69	50.21
		Eficiencia electromecánica promedio			49.95	

Datos del equipo del pozo B e instrumentos de medición

DATOS DE LA COLUMNA	Diámetro de Succión (pulg):	8	Diámetro de la Flecha (m):	No visible
DATOS DE PLACA DEL MOTOR	Marca: SIEMENS S.A DE C.V	Eficiencia (%): No visible	Potencia (kw)	223.8
	Tensión (V): 440	Corriente (A): 298	Frecuencia de Rotación (RPM)	1785
DATOS TÉCNICOS	Bomba (hp):	250	Transformador (kva):	225
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN		Certificado de Calibración		
	Tipo	Exactitud	Expedidor por	
FLUJO	Ultrasónico - Tiempo en Tránsito DCT7088	±0.0152 m/s	Dynamic Consultant S.A. de C.V.	
PRESIÓN DE DESCARGA	Manómetro con glicerina 100GBM A. INOX.	1-100 Psi 0-7 kg/cm ²	Altamira S.A. de C.V.	
NIVEL DINÁMICO	Sonda eléctrica: Mod. 101	De cada milímetro ó 1/100 de pie	Solinst S.A. de C.V.	

Reporte de pruebas de pozo B

No.	Símbolo	Descripción	Fórmulas	Unidad	Prueba	
					1	2
1	Di	Diámetro interno de la tubería		m	0.20	0.20
2	N	Frecuencia de rotación		RPM	1496.00	1496.00
3	ND	Nivel dinámico		m	191.20	191.20
4	x	Distancia desde el nivel de referencia a la línea de centros del manómetro		m	0.68	0.68
5	P ₁	Lectura del manómetro a la descarga		m	5.00	5.00
6	P _m	Presión a la descarga	$[(4)+(5)]$	m	5.68	5.68
7	A	Área del tubo a la descarga	$(3.141592 * (1)^2 / 4)$	m ²	0.03	0.03
8	Q _v	Flujo		m ³ /s	0.03	0.03
9	h _v	Carga de velocidad	$[(8)/(7)]^2 / 19.613$	m	0.04	0.04
10	l	Longitud de tubería de succión		m	195.20	195.20
10	h _{fc}	Pérdidas de fricción en la columna	$10.674 * ((8)^{1.852}) / (140^{1.852} * (1)^{4.871}) * (10)$	m	0.72	0.67
11	h _d	Carga a la descarga	$[(6) + (9) + (10)]$	m	6.44	6.38
12	H	Carga Total	$[(3) + (11)]$	m	197.64	197.58
13	I _A	Corriente línea A		A	205.20	205.40

	I_B	Corriente línea B			202.30	202.50
	I_C	Corriente línea C			211.40	211.60
	I	Corriente promedio	$[(I_A+I_B+I_C)/3]$		206.30	206.50
14	V_{A-B}	Tensión fase AB		V	432.20	432.50
	V_{B-C}	Tensión fase BC			433.20	433.50
	V_{A-C}	Tensión fase AC			433.10	433.40
	V	Tensión promedio	$[(V_{AB} + V_{BC} + V_{AC}) / 3]$		432.83	433.13
15	F_{pA}	Factor de Potencia línea A			0.76	0.76
	F_{pB}	Factor de potencia línea B			0.75	0.75
	F_{pC}	Factor de potencia línea C			0.74	0.74
	F_p	Factor de potencia promedio	$[(F_{pA}+F_{pB}+F_{pC})/3]$		%	0.75
16	P_e	Potencia de entrada al motor	$[1.732 * (13) * (14) * (15) * 10^{-5}]$	kW	115.99	116.19
17	P_s	Potencia de salida de la bomba	$[(8) * (12) * 9.806]$	kW	53.94	51.85
	η	Eficiencia electromecánica	$[(17)/(16) * 100]$	%	46.50	44.63
		Eficiencia electromecánica promedio			45.56	

Anexo B

Coeficiente de pérdidas por accesorio

Elemento	Diám (plg)	K	ft	kft
Codo 90°, 10"	10	30	0.014	0.42
Codo 90°, 8"	8	30	0.014	0.42
Codo 90°, 6"	6	30	0.015	0.45
Codo 90°, 4"	4	30	0.017	0.51
Codo 90°, 3"	3	30	0.018	0.54
Codo 45°, 10"	10	16.5	0.014	0.23
Codo 45°, 8"	8	16.5	0.014	0.23
Codo 45°, 6"	6	16.5	0.015	0.25
Codo 45°, 4"	4	16.5	0.017	0.28
Te f. dir 10"	10	20	0.014	0.28
Te f. dir 8"	8	20	0.014	0.28
Te f. dir 6"	6	20	0.015	0.30
Te f. dir 4"	4	20	0.017	0.34
Te f. des 10"	10	60	0.014	0.84
Te f. des 8"	8	60	0.014	0.84
Te f. des 6"	6	60	0.015	0.90
Te f. des 4"	4	60	0.017	1.02
Val comp 10"	10	8	0.014	0.11
Val comp 8"	8	8	0.014	0.11
Val comp 6"	6	8	0.015	0.12
Val comp 4"	4	8	0.017	0.14
Val mar 10"	10	45	0.014	0.63
Val mar 8"	8	45	0.014	0.63
Val Mar 6"	6	45	0.015	0.68
Val mar 4"	4	45	0.017	0.77
Val flot 3"	3	75	0.018	1.35
Red 8" a 6"	6	0.5		0.00
Red 8" a 4"	4	4.2		0.00
Red 8" a 3"	3	15.4		0.00
Red 6" a 4"	4	0.99		0.00
Red 4" a 3"	3	0.5		0.00
Red 6" a 3"	3	4.2		0.00
Amp 6" a 8"	6	0.6		0.00
Amp 4" a 6"	4	1.6		0.00
Amp 4" a 8"	4	9.0		0.00
Amp 8" a 10"	8	0.32		0.00
Red 10" a 8"	8	0.31		0.00
Te f. dir 3"	3	20.00	0.018	0.36

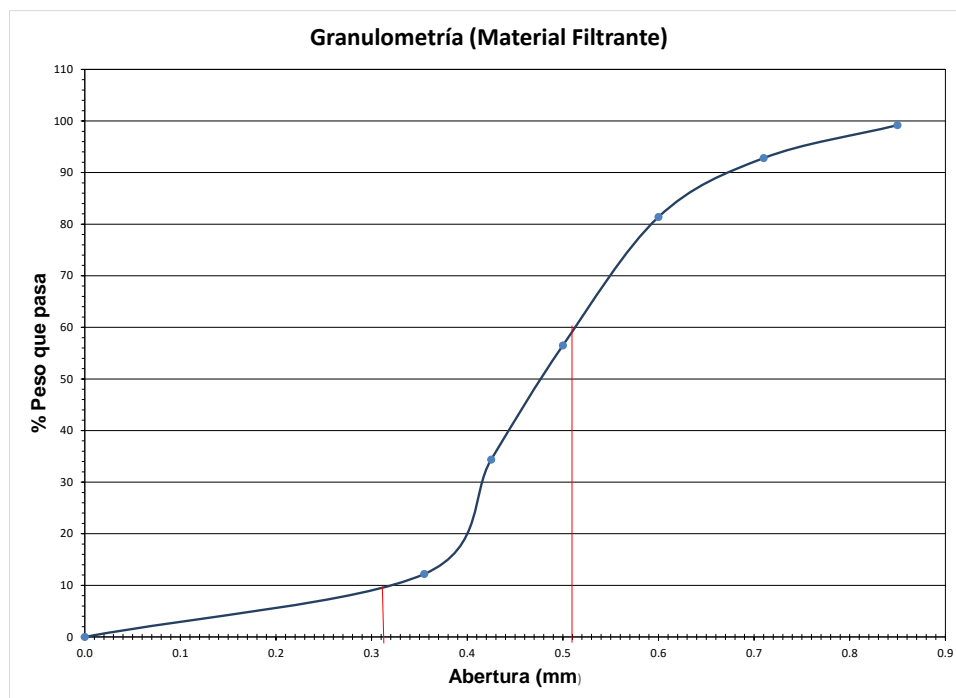
Val mar 3"	3	45.00	0.018	0.81
Amp 3" a 6"	3	9.00		0.00
Amp 3" a 4"	3	0.60		0.00
Val check 10"	10	55.00	0.014	0.77
Val check 8"	8	55.00	0.014	0.77
Val check 6"	6	55.00	0.015	0.83
Val check 4"	4	55.00	0.017	0.94
Val check 3"	3	55.00	0.018	0.99
Te f. des 3"	3	60.00	0.018	1.08
Flujómetro	0			0
Mezclador 8"	8	167.9	0.014	2.35
Filtro malla 8"	8	547.1	0.014	7.66
Mezclador 6"	6	167.9	0.015	2.52
Mezclador 4"	4	167.9	0.017	2.85
Mezclador 3"	3	167.9	0.018	3.02
Filtro malla 6"	6	547.1	0.015	8.21
Filtro malla 3"	3	547.1	0.018	9.85
Amp 2" a 3"	2	1.56		0.00
Codo 45°, 3"	3	16.5	0.018	0.297
Amp 2" a 4"	2	9		0
Amp 1.5" a 3"	1.5	9		0

Anexo C

Granulometría recomendada para arena sílica

Distribución granulométrica de la arena sílica.

N° de malla	Abertura (mm), di	di ²	% Retenido parcial (pi)	% peso que pasa	pi/(di) ²
20	0.85	0.72	0.81	99.19	1.12
25	0.71	0.50	6.39	92.80	12.67
30	0.60	0.36	11.41	81.39	31.70
35	0.50	0.25	24.89	56.50	99.57
40	0.43	0.18	22.12	34.38	122.49
45	0.36	0.13	22.18	12.19	176.03
$\Sigma pi/di^2$					443.57



El diámetro efectivo (D_{10}) y el diámetro D_{60} , se obtienen directamente de los datos graficados del % de peso de material que pasa por las mallas vs. Su abertura.

$$D_{10} = 0.33 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 0.52 \text{ mm}$$

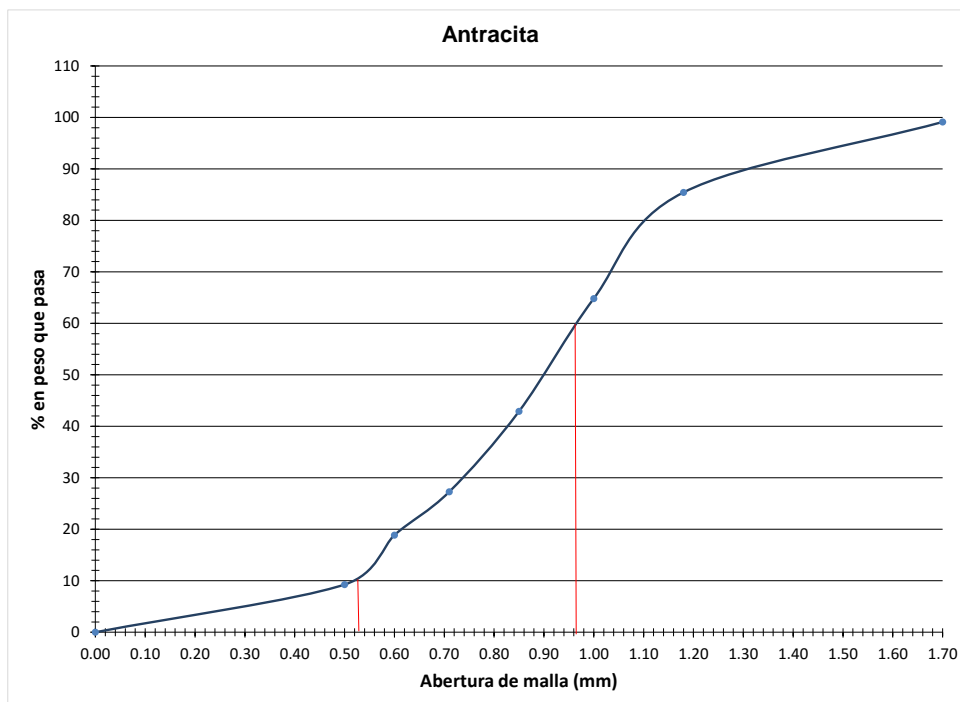
De tal forma que el coeficiente de uniformidad (*CU*) obtenido es el siguiente:

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.52}{0.33} = 1.57$$

Granulometría recomendada para antracita

Distribución granulométrica de la antracita.

Nº de malla	Abertura (mm), di	di ²	% Retenido parcial (pi)	% peso que pasa	pi/(di) ²
12	1.70	2.89	0.88	99.12	0.31
16	1.18	1.39	13.68	85.44	9.83
18	1.00	1.00	20.61	64.82	20.61
20	0.85	0.72	21.92	42.90	30.34
25	0.71	0.50	15.62	27.28	30.99
30	0.60	0.36	8.41	18.87	23.36
35	0.50	0.25	9.61	9.26	38.43
$\Sigma pi/di^2$					153.87



De manera análoga a la arena sílica se obtienen los siguientes resultados:

$$D_{10} = 0.54 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 0.96 \text{ mm}$$

$$CU = 1.78$$