



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL RÍO VERDE PARA EL
ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE LEÓN, GUANAJUATO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

P R E S E N T A:

ING. KARLA PATRICIA ALAVEZ LYNN

DIRECTOR DE TESINA: M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ

MÉXICO, D.F.

FEBRERO 2018



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Contenido

INTRODUCCIÓN	4
ALCANCES.....	5
1. PROYECTO “EL ZAPOTILLO”	6
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	6
2. PLANTA POTABILIZADORA “EL ZAPOTILLO”	9
2.1 LOCALIZACIÓN DEL PREDIO Y USO DE SUELO	9
2.2 FUENTE DE ABASTECIMIENTO	10
2.2.1 Río Verde	10
2.3 CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL SITIO	13
2.3.1 Topografía	13
2.3.2 Geotecnia	13
2.4 CAUDALES QUE TRATAR.....	13
2.5 CALIDAD DEL AGUA OBJETO	13
2.6 CARACTERÍSTICAS DE LA CALIDAD DEL AGUA	13
2.6.1 Evaluación de la calidad del agua.....	17
2.7 DESCRIPCIÓN DEL TREN DE TRATAMIENTO	18
3. OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS UTILIZADOS EN LA POTABILIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE SU EFICIENCIA.....	19
3.1 OPERACIONES UNITARIAS.....	19
3.1.1 Filtración granular	20
3.1.2 Filtración por membrana.....	21
3.1.3 Sedimentación.....	22
3.2 PROCESOS UNITARIOS	23
3.2.1 Adsorción.....	23
3.2.2 Ósmosis Inversa.....	23
3.2.3 Intercambio Iónico	24
3.2.4 Oxidación.....	24
3.2.5 Floculación.....	25
3.3 PROPIEDADES APROVECHADAS Y CONTAMINANTES OBJETO DE LAS OPERACIONES Y LOS PROCESOS UNITARIOS ...	25
4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTA DEL TRATAMIENTO DE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL RÍO VERDE	26
4.1 CALIDAD DE AGUA OBJETO A POTABILIZAR	27
4.2 NORMATIVA UTILIZADA.....	27
4.3 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA	27
4.4 CALIDAD DE AGUA DE INGRESO A LA PLANTA POTABILIZADORA	28
4.5 PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LA CALIDAD DEL AGUA	29
4.5.1 Flúor, presencia relevante.....	30
4.6 PROPUESTA DE DISEÑO DE TRATAMIENTO PARA LA PLANTA POTABILIZADORA	31



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



4.6.1	Pre-oxidación y ajuste del índice de Langelier en Estación de Bombeo	32
4.6.2	Oxidación en el Tanque de Agua Cruda (Precloración)	33
4.6.3	Coagulación	33
4.6.4	Floculación.....	40
4.6.5	Sedimentación por Flotación.....	44
4.6.6	Filtración.....	49
4.6.1	Ajuste de pH y desinfección (Postcloración)	60
4.6.2	Tratamiento de Lodos	61

CONCLUSIONES.....	62
--------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA.....	64
--------------------------	-----------

Índice de Figuras

Figura 1-1. Construcción de la Presa El Zapotillo. Fuente: (SAPAL, 2014)	6
Figura 1-2. Esquema general del megaproyecto El Zapotillo.....	7
Figura 1-3. Macrocircuito distribuidor de agua potabilizada para la ciudad de León, Guanajuato. Fuente: (SAPAL, 2014)	8
Figura 2-1. Ubicación del predio para la Planta Potabilizadora.	9
Figura 2-2. Ubicación del río Verde en el estado de Jalisco. Fuente: (INEGI, s.f.).....	11
Figura 2-3. Cuenca del Río Verde dentro de los límites de estudio (Jalisco). (IMTA, 2009).....	12
Figura 2-4. Ubicación de los puntos de muestreo.....	14
Figura 3-1. Representación esquemática del sistema de Filtración granular. Recuperado de: www.elaguapotable.com/filtración.htm	20
Figura 3-2. Ejemplo de membrana en módulo tubular. Fuente: OSMO VIC.....	21
Figura 3-3. Ejemplo de tanque sedimentador. Fuente: (CONAGUA, 2015)	22
Figura 3-4. Ósmosis inversa. Fuente: (CONAGUA, 2015)	23
Figura 3-5. Principio de floculación.	25
Figura 4-1. Minas de flúor y plata en la cuenca del río Verde. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 4-2. Diagrama de bloques del Sistema de Potabilización propuesto.	32
Figura 4-3. Planta. Tanque de Coagulación.....	39
Figura 4-4. Corte A-A'. Tanque de Coagulación.....	39
Figura 4-5. Turbina de aspa inclinada (45° PBT).....	42
Figura 4-6. Planta. Tanque Floculador.....	43
Figura 4-7. Corte B-B'. Tanque Floculador.....	44
Figura 4-8. Planta. Tanque de Sedimentación por Floculación.	48
Figura 4-9. Corte C-C'. Tanque de Sedimentación por Flotación.	49
Figura 4-10. Planta. Tanque de Filtración.....	59
Figura 4-11. Corte D-D'. Tanque de Filtración.....	60
Figura 4-12. Planta. Tanque de Postcloración.....	60
Figura 4-13. Corte E-E'. Tanque de Postcloración.	61



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Índice de Tablas

Tabla 2-1. Coordenadas del predio para la Planta Potabilizadora.	9
Tabla 2-2. Coordenadas de los puntos de muestreo.	14
Tabla 2-3. Resumen de caracterización del agua.	15
Tabla 2-4. Parámetros monitoreados que incumplen la Norma para Agua Potable.	17
Tabla 3-1. Jerarquía de los procesos de membranas y principales aplicaciones.	21
Tabla 3-2. Tipos de sedimentación y sus aplicaciones.	22
Tabla 3-3. Propiedades aprovechadas y contaminantes objeto más comunes.	26
Tabla 4-1. Caudales de operación de la Planta Potabilizadora.	27
Tabla 4-2. Calidad de agua de ingreso a la Planta Potabilizadora.	29
Tabla 4-3. Principales reactivos usados en potabilización.	33
Tabla 4-4. Agitador de Entrada Vertical seleccionado para coagulación.	35
Tabla 4-5. Viscosidad Dinámica del agua a diferentes temperaturas.	36
Tabla 4-6. Valores de G para diferentes tipos de agua.	40
Tabla 4-7. Agitador de Entrada Vertical seleccionado para floculación.	41
Tabla 4-8. Criterios típicos de diseño para tanques rectangulares de flujo horizontal.	45
Tabla 4-9. Viscosidad cinemática del agua a diferentes temperaturas.	47
Tabla 4-10. Principales características de los filtros.	49
Tabla 4-11. Datos de proyecto para medios filtrantes.	51



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



INTRODUCCIÓN

En los años recientes, la ciudad de León, Guanajuato, ha experimentado un acelerado crecimiento demográfico, agropecuario e industrial. Ante la necesidad de dotar de agua a la ciudadanía para garantizar de manera sustentable su calidad de vida y contribuir a la sustentabilidad del lago de Chapala, el Gobierno Federal a través de la Comisión Nacional del Agua, tomó la decisión de generar un proyecto en coordinación con los estados de Jalisco y Guanajuato para el aprovechamiento de las aguas superficiales del río Verde, que permitirá la recuperación de los mantos acuíferos con los que actualmente se abastece a la ciudad; éste fue licitado entre los años 2009 y 2011 y consta de dos obras, una presa de almacenamiento y un acueducto.

La presa el Zapotillo, licitada y construida desde el año 2009 a cargo de las empresas FCC Construcción (Fomento de Construcciones y Contratas), junto con La Peninsular y Grupo Hermes, se localiza en las inmediaciones de la comunidad del mismo nombre, en el municipio de Cañadas de Obregón sobre el Río Verde a 18 km aguas arriba de la confluencia de éste con el río el Salto y a 100 km de su confluencia con el río Santiago en la región de los Altos de Jalisco.

El acueducto el Zapotillo, adjudicado en junio del 2011 a la empresa Abengoa, consiste en una Concesión para el Diseño, Construcción y Operación por 25 años (3 años para la construcción, 22 años de operación) de una línea de conducción de 140 km de longitud comprendidos entre la zona de los Altos de Jalisco (localidad el Zapotillo, Cañadas de Obregón) hasta la Ciudad de León, Guanajuato, dividida en dos tramos, uno de impulsión (7.7 km) y el resto a gravedad.

Sin embargo, este proyecto tuvo que ser detenido ya que se vio envuelto en conflictos de tipo social y ambiental. La presa, cuya cortina extendió su altura hasta los 105 m, presentaba una superficie de inundación de más de 4,500 hectáreas de tierras fértiles, que traerían como consecuencia la pérdida de riqueza ambiental, producción agrícola y, particularmente, la inundación de tres comunidades: Temacapulín, Palmarejo y Acasico, que se localizan en la región denominada Los Altos de Jalisco, a 132 kilómetros al noreste de la ciudad de Guadalajara.

Durante este periodo de interrupción y como parte de la revisión y propuesta de optimización a los costos de operación propios de la concesión, se revisará y mejorará el Proyecto de Ingeniería para la planta potabilizadora “El Zapotillo”.

Debido a que las aguas superficiales están expuestas a la contaminación, se realizaron diferentes campañas de caracterización del agua del río Verde para su estudio. A partir de las muestras tomadas en el embalse, y los Términos de Referencia contractuales, se propondrá la alternativa de solución para potabilizar 5.6 m³/s provenientes de la presa que recibe el mismo nombre; se hará la recopilación, análisis y evaluación de la información que se menciona en la Ingeniería Básica realizada en 2011 y se propondrán las mejoras necesarias para la configuración del nuevo tren de tratamiento.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



ALCANCES

Se describirá el proceso de potabilización existente así como la alternativa más viable para la futura planta potabilizadora El Zapotillo a partir de la información proporcionada de calidad del agua del río Verde (parámetros físicos, químicos y bacteriológicos) y sus afluentes, sitios considerados para extracción de agua cruda y entrega de agua potabilizada, predio disponible para la ubicación de la planta y demás datos útiles; se describirá el proceso de tratamiento así como los reactivos a utilizar para la potabilización del agua y el diseño de los tanques, de tal forma que se cumpla con la normatividad establecida para su consumo humano.

Con este proyecto, se pretende garantizar el suministro de agua potable a más de 2 millones 400 mil habitantes de León y los Altos de Jalisco, reduciendo la sobreexplotación de los acuíferos de la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

1. PROYECTO “EL ZAPOTILLO”

1.1 Descripción general del proyecto

El proyecto “El Zapotillo” consiste en el otorgamiento de una concesión por 25 años (3 años de construcción y 22 años de operación), para la elaboración del proyecto de ingeniería, construcción, equipamiento, operación, conservación y mantenimiento de la infraestructura consistente en el acueducto con una capacidad máxima de 5.6 m³/s y la prestación del servicio hidráulico, consistente en el suministro de hasta 3.8 m³/s de agua en bloque potabilizada al municipio de León, en el estado de Guanajuato, así como la preparación de los sitios de conexión a los municipios de Los Altos de Jalisco, en el estado de Jalisco, hasta por 1.8 m³/s, integrado por una línea de conducción, dos plantas de bombeo, una planta potabilizadora, un tanque regulador en Venaderos y un macrocircuito distribuidor con 10 sitios de entrega en la Ciudad de León, Guanajuato.

La fuente que servirá de abastecimiento es el agua que se almacenará en la presa El Zapotillo, misma que proviene de la cuenca del río Verde.



Figura 1-1. Construcción de la Presa El Zapotillo. Fuente: (SAPAL, 2014)

El acueducto El Zapotillo – Los Altos de Jalisco – León, Guanajuato, se divide en dos tramos: uno de impulsión y otro por gravedad, ambas tuberías construidas en acero de 96” (2.43 m) de diámetro. Éste consta de 140 kilómetros y beneficiará directamente a más de 2 millones 400 mil habitantes de León y los Altos de Jalisco. (SAPAL, 2014)

El tramo de Impulsión de agua cruda, con capacidad máxima de $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$, se inicia en la línea de succión de la planta de bombeo (PB1) y aproximadamente a 2.0 km de distancia, con una carga de 250 m.c.a. llega a la planta de bombeo (PB2), de donde rebombea a 2.50 km y 250 m.c.a. hasta el tanque de agua cruda de la Planta Potabilizadora (PP) El Zapotillo. La PP se diseñará para $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ y se construirá y equipará para $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$, cumpliendo con 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”.

A partir del tanque de aguas claras, ubicado aguas abajo de la PP, se inicia el tramo por gravedad de aproximadamente 135 km de longitud con capacidad de $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta la última derivación correspondiente a Lagos de Moreno, Jalisco, con un diámetro de 96” (2.43 m) y a partir de este punto, la capacidad de la línea de conducción será de $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el tanque regulador en Venaderos, capaz de almacenar 100 millones de litros, que estará ubicado en los límites de la ciudad de León, Guanajuato.

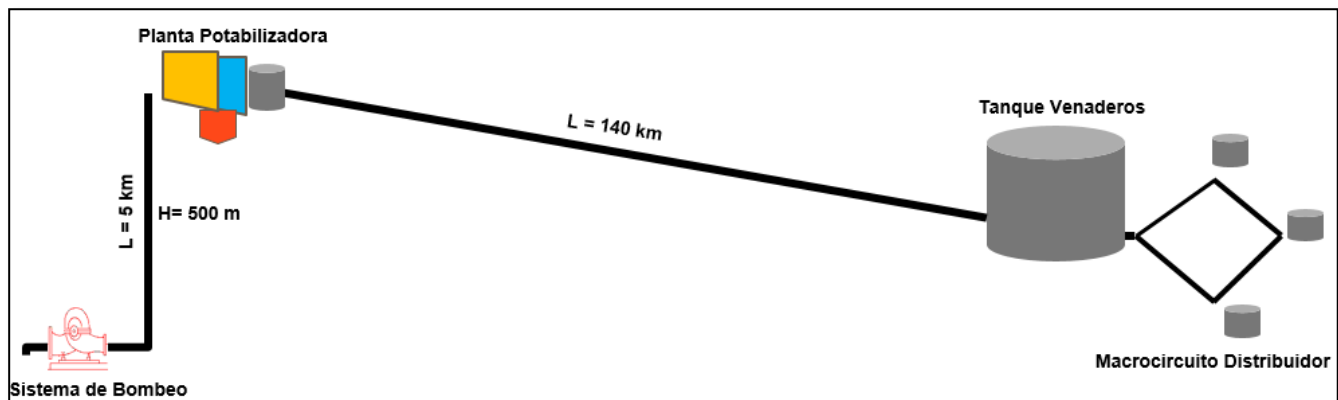


Figura 1-2. Esquema general del megaproyecto El Zapotillo.

El Tanque Regulador en Venaderos, alimentará al macrocircuito de 40 kilómetros de longitud, que distribuirá el caudal hacia los 10 sitios de entrega en la Ciudad de León, Guanajuato.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

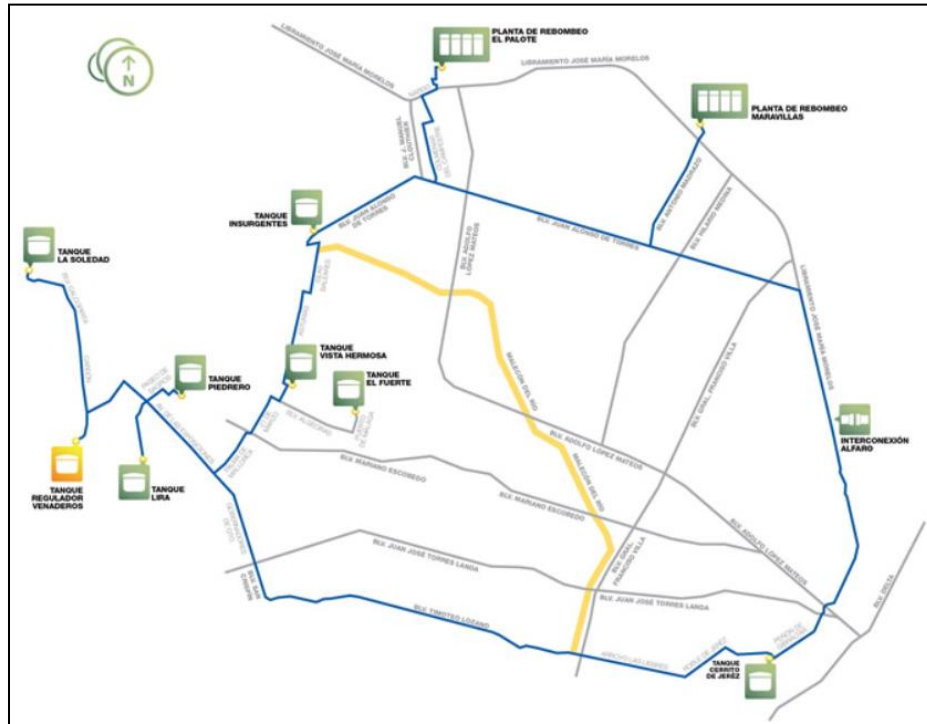


Figura 1-3. Macrocircuito distribuidor de agua potabilizada para la ciudad de León, Guanajuato. Fuente: (SAPAL, 2014)

2. PLANTA POTABILIZADORA “EL ZAPOTILLO”

2.1 Localización del predio y uso de suelo

El predio disponible para la construcción de la PP se encuentra al noreste del estado de Jalisco, entre las localidades de Cañadas de Obregón y Yahualica de González Gallo, en las coordenadas indicadas en la **Tabla 2-1**. La **Figura 2-1** muestra la ubicación del predio.

Tabla 2-1. Coordenadas del predio para la Planta Potabilizadora.

Coordenadas	X	Y	Área disponible (ha)
Planta Potabilizadora	731964.2488	2338345.7567	18.09

Se encuentra en la Unidad de Gestión Ambiental (UGA) P3164A, quiere decir que es para uso pecuario, con un nivel de fragilidad medio, ya que representa un estado de penestabilidad (equilibrio entre morfogénesis y la pedogénesis). Las actividades productivas deben de considerar los riesgos de erosión latentes y la vegetación primaria está semitransformada.

La política territorial de esta UGA es de aprovechamiento, con uso del suelo predominante pecuario y un uso compatible agrícola. El uso condicionado es para flora y fauna, forestal y asentamientos humanos. (CONAGUA)

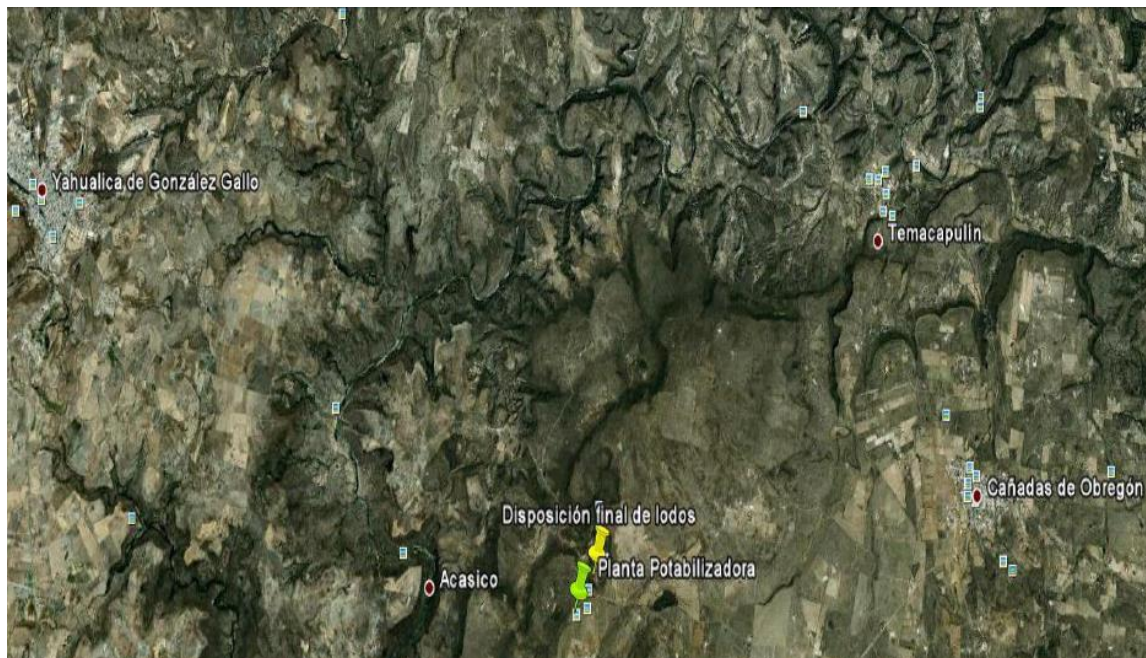


Figura 2-1. Ubicación del predio para la Planta Potabilizadora.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



2.2 Fuente de abastecimiento

El agua superficial se define como cualquier cuerpo de agua abierto a la atmósfera susceptible de fluir o permanecer en reposo como corrientes, ríos, lagunas, lagos y embalses. Estas fuentes se alimentan de la precipitación directa, o bien, por la descarga de agua de algún manto freático. (CONAGUA, 2015).

La calidad del agua en almacenamiento se complica por dos factores que la deterioran considerablemente. El primero se refiere a que en aguas en reposo se favorecen las poblaciones de algas, y segundo, la profundidad de los lagos y embalses puede generar un sistema estratificado térmicamente, en particular durante los meses de verano con ausencia de oxígeno.

En cuanto a calidad, las aguas superficiales son por lo general menos duras, tienen mayor concentración de oxígeno disuelto y no contienen ácido sulfhídrico. Su temperatura es variable en función del año y la profundidad de la captación. En contrapartida, son fácilmente contaminables, tienen alta actividad biológica, color, turbiedad, sólidos en suspensión, materia orgánica y material flotante por lo que el tratamiento principal que se les aplica es la remoción de partículas.

La fuente de abastecimiento de la PP El Zapotillo es el agua superficial proveniente de la cuenca del río Verde, almacenada en la presa que recibe el mismo nombre que la Potabilizadora.

2.2.1 Río Verde

El río Verde es tributario del río Santiago, se encuentra integrado dentro de la Región Hidrológica No. 12 “Lerma – Santiago - Pacífico”, nace en el estado de Zacatecas, cruza el estado de Aguascalientes y recorre las regiones Altos Norte y Altos Sur del estado de Jalisco hasta su confluencia con el río Santiago. Esta corriente se inicia aproximadamente a 40 km al sur de la ciudad de Zacatecas, zona donde se le conoce como río San Pedro, el cual cambia de nombre a río Aguascalientes una vez que ingresa a este estado y hasta la confluencia con el río de Lagos, y desde ahí adquiere el nombre de río Verde hasta su parte final.

El río Lagos y el río Encarnación, forman parte de los afluentes principales del río Verde; ambos se encuentran en la margen izquierda. El río Lagos, que se origina en el municipio del mismo nombre, y después toma el nombre de San Juan de los Lagos, tiene una longitud de 245 km. El río Encarnación que nace en el municipio de Encarnación de Díaz tiene una longitud de 163 km.

Los afluentes menores por la margen derecha son los ríos Agostadero en el municipio de San Juan de los Lagos, Jalostotitlán, San Miguel, El Salto o Valle de Guadalupe y el río Tepatitlán. Hacia la margen derecha están los ríos Teocaltiche, Ipalco y Acásico en Mexxicacán, Yahualica y Manalisco en Yahualica. La pendiente del cauce se acentúa 135 km antes de la desembocadura, encañonándose en una barranca que alcanza una profundidad de 500 metros.

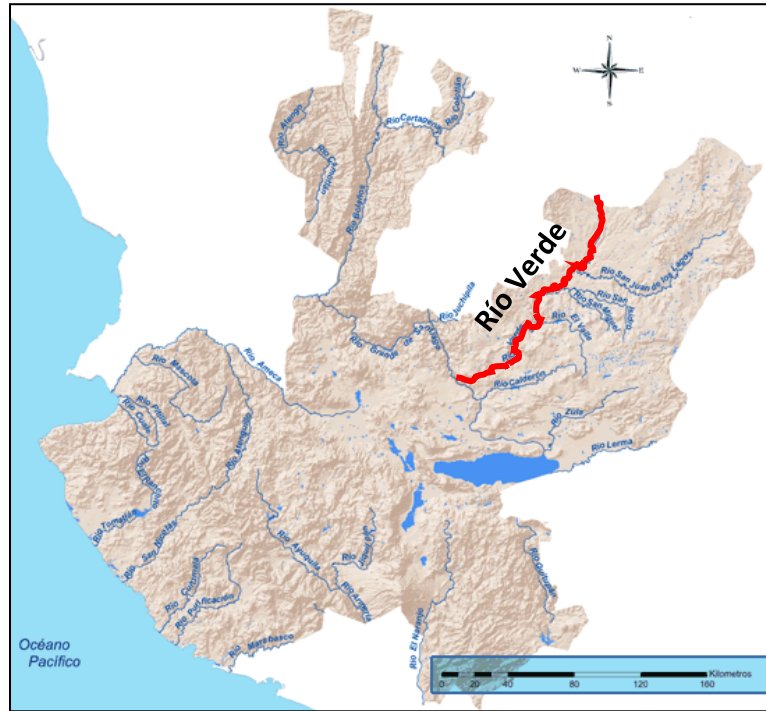


Figura 2-2. Ubicación del río Verde en el estado de Jalisco. Fuente: (INEGI, s.f.)

En la **Figura 2-3** se muestra la cuenca del Río Verde, la cual se divide en tres: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja. La cuenca alta abarca desde el nacimiento del Río en el estado de Zacatecas, hasta el sitio de la confluencia del Río Verde con el río Lagos.

La cuenca media comprende del sitio de la confluencia del Río Verde con el Río Lagos hasta la confluencia del mismo con el Río Valle (o Río El Salto). La cuenca baja del Río Verde se localiza a partir del sitio de la confluencia del Río Valle y hasta el sitio donde el Verde confluye con el Río Santiago, lugar denominado El Purgatorio, esta parte de la cuenca se localiza enteramente en el estado de Jalisco.

Hidrológicamente se identifican 13 subcuencas en el río Verde, obteniéndose una superficie aproximada de 20,650 km².

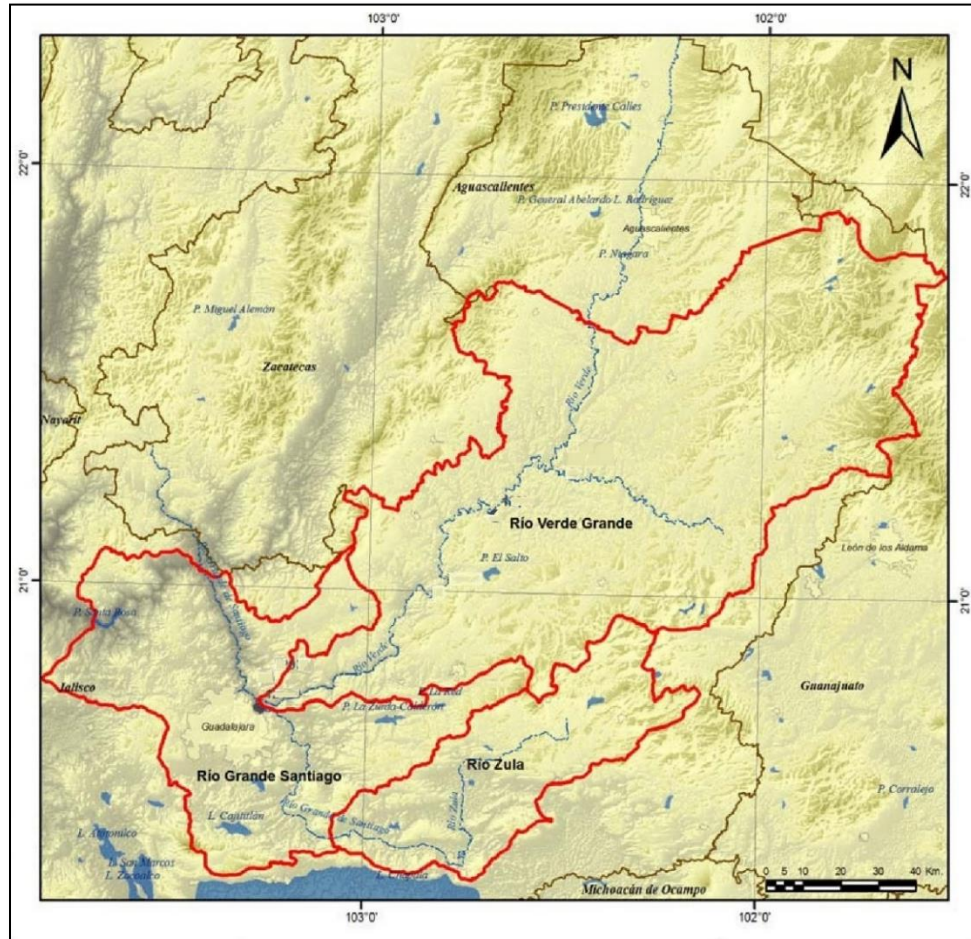


Figura 2-3. Cuenca del Río Verde dentro de los límites de estudio (Jalisco). (IMTA, 2009)

La parte alta de la cuenca del río Verde será aprovechada para el abastecimiento de agua a la Zona Metropolitana de León, Guanajuato, y para las diversas localidades de Los Altos de Jalisco mediante la construcción de la presa El Zapotillo. Los escurrimientos superficiales y los aportes de las diversas localidades asentadas en la parte de la cuenca, así como los vertidos puntuales y difusos de la actividad pecuaria y agrícola, serán retenidos y aprovechados en la presa.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



2.3 Características topográficas y geológicas del sitio

2.3.1 Topografía

Este predio se encuentra muy accidentado ya que en ciertas áreas hay presencia de barrancos y zonas muy escarpadas.

La parte más elevada del predio corresponde al lado Suroeste, situado a 2,050 m.s.n.m. y la parte más baja corresponde al lado Noreste que está situada a 2,027.50 m.s.n.m., existiendo un desnivel de 22.50 m. entre ambos puntos.

2.3.2 Geotecnia

Existe una cubierta compuesta por arcillas color café de alta y baja plasticidad, así como arenas finas de tonos café y gris. Como materiales secundarios se encuentran carbonatos y grumos de carbonatos de 15 a 40 cm de diámetro, gravas de 7.50 a 15.00 cm de diámetro, boleas de hasta 15.00 cm de diámetro, arcillas y fragmentos de roca basáltica de 10.00 hasta 60.00 cm de diámetro.

El material presente en el sitio se clasifica como material tipo II, fácilmente excavables hasta los 4.50 m de espesor; material tipo II A, difícilmente excavables de los 1.50 hasta los 4.50 m de profundidad y de tipo III, a profundidades mayores de 1.50 o 4.50 m.

2.4 Caudales que tratar

La PP tendrá una capacidad instalada de tratamiento de 5.6 m³/s; en una primera etapa, 3.8 m³/s para el abastecimiento de agua al municipio de León, Guanajuato y en una segunda etapa, 1.8 m³/s para el futuro abastecimiento de los municipios de Los Altos de Jalisco.

2.5 Calidad del agua objeto

El agua potabilizada que se obtenga de la PP, deberá cumplir con la modificación a la Norma Oficial Mexicana: NOM-127-SSA1-1994 vigente, de Calidad de Agua.

2.6 Características de la calidad del agua

De acuerdo con los Términos de Referencia y Bases de Licitación del proyecto El Zapotillo, se realizó una caracterización en el río Verde, en las coordenadas donde se ubicará la presa, en dos sitios diferentes. El primero en una presa cercana llamada Presa Alcalá, sobre el río Lagos, antes de su confluencia con el río Verde y parte de lo que será el embalse de la presa El Zapotillo, ya que se prevé que al embalsar el agua, se modifiquen algunos parámetros de calidad del agua como turbiedad, color, presencia de algas, etc. El segundo se trata del cauce del río Verde en el cruce de la localidad de Temacapulín. En la **Tabla 2-2** se muestra la nomenclatura para identificar la ubicación de los muestreos.

Tabla 2-2. Coordenadas de los puntos de muestreo.

Clave	Nombre	Latitud	Longitud
M1	Presa Alcalá	21° 14' 21.86"	102° 18' 12.56"
M2	Temacapulín	21° 11' 29.49"	102° 41' 59.05"

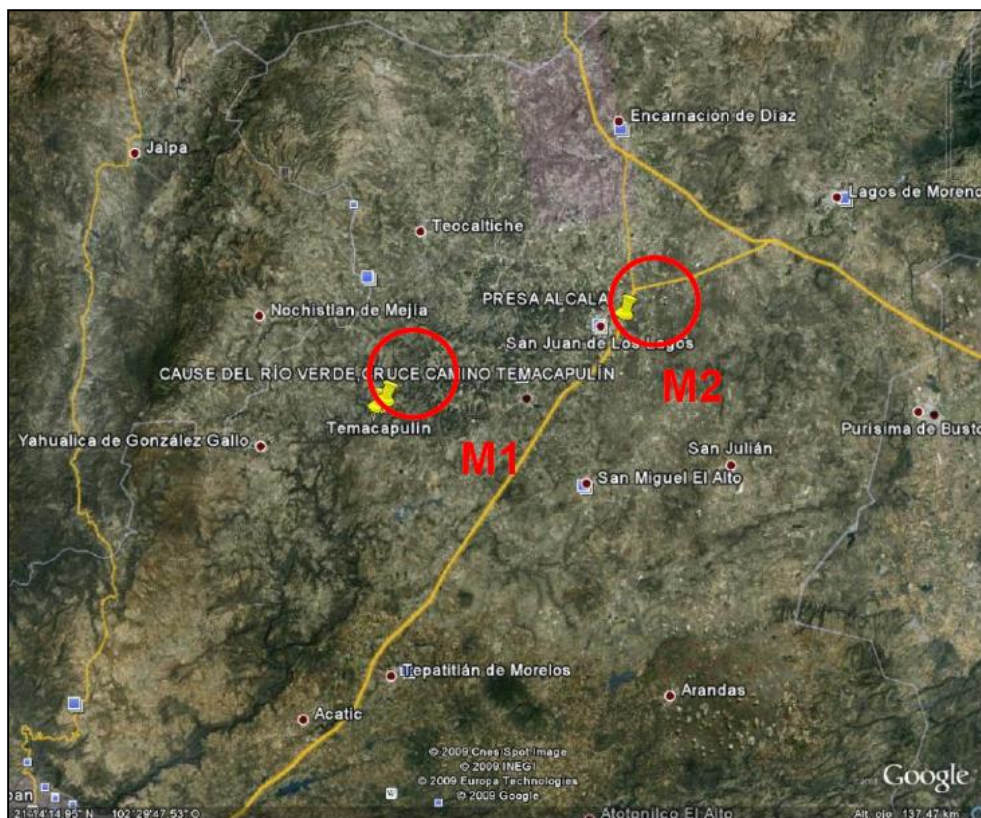


Figura 2-4. Ubicación de los puntos de muestreo.

Se tomaron 60 L de cada una de las muestras, mismas que se preservaron en hielo para su transporte al laboratorio conforme la NOM-001-ECOL-1996.

La **Tabla 2-3** muestra la caracterización del agua, incluyendo las concentraciones promedio de los parámetros de calidad el agua; los valores resaltados con color azul fueron aquellos que presentaron concentraciones mayores a las establecidas en la NOM-127-SSA1-1994.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 2-3. Resumen de caracterización del agua.

Parámetro	Unidad	Concentraciones promedio de los muestreos		Límites Máximos Permisibles
		Mínimo	Máximo	NOM-127-SSA1-1994
Alcalinidad total	mg/l	280.00	310.00	No se indica
Aluminio	mg/l	0.616	0.630	0.200
Arsénico	mg/l	0.007	0.044	0.025
Bario	mg/l	ND	<0.06	0.700
Cadmio	mg/l	ND	<0.004	0.005
Cianuros	mg/l	0.006	0.006	0.070
Cloruros	mg/l	36.87	58.99	250.00
Cobre	mg/l	ND	<0.05	2.00
Coliformes Fecales	NMP/100ml	93.00	210.00	Ausencia o ND
Coliformes Totales	NMP/100ml	460.00	1100.00	Ausencia o ND
Color	U. pt/co	8.00	8.00	20.00
Cromo	mg/l	ND	<0.025	0.050
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/l	5.93	7.56	No se indica
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	40.00	52.71	No se indica
Dureza de Calcio	mg/l	94.35	160.39	No se indica
Dureza Total	mg/l	150.96	201.91	500.00
Fenoles	mg/l	0.0021	0.0025	0.300
Fierro	mg/l	0.090	0.097	0.300
Fluoruros	mg/l	1.23	2.50	1.50
Grasas y Aceites	mg/l	5.59	5.59	No se indica
Manganeso	mg/l	0.780	0.083	0.150
Mercurio	mg/l	ND	<0.0008	0.001
Nitratos	mg/l	0.200	0.910	10.00
Nitritos	mg/l	0.010	0.050	1.00
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	4.24	5.87	0.500
Nitrógeno Orgánico	mg/l	8.81	9.46	No se indica
pH medición en laboratorio	U. de pH	6.78	7.98	6.50-8.50
Plomo	mg/l	0.007	0.008	0.010
Sodio	mg/l	97.41	110.55	200.00
Sólidos Suspendidos Fijos	mg/l	3.84	16.00	No se indica
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	11.84	20.00	No se indica
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/l	4.00	8.00	No se indica
Sólidos Totales Disueltos	mg/l	530.21	611.91	1000.00



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Sólidos Totales Fijos	mg/l	510.00	581.04	No se indica
Sólidos Totales Volátiles	mg/l	70.83	113.75	No se indica
Sólidos Totales	mg/l	601.04	623.75	No se indica
Sulfatos	mg/l	65.20	69.80	400
Sustancias Activas	mg/l	ND	<0.10	0.500
Turbiedad	UTN	20.00	26.00	5.00
Zinc	mg/l	ND	<0.125	5.00
Aldrín	µg/l	ND	<0.0012	0.030
Dieldrín	µg/l	ND	<0.0010	0.030
Clordano	µg/l	ND	<0.01	0.200
Ppddt	µg/l	ND	<0.0070	1.00
Lindano	µg/l	ND	<0.0014	2.00
Hexaclorobenceno	µg/l	ND	<0.0017	1.00
Heptacloro	µg/l	ND	<0.0010	0.030
Heptacloro epoxi	µg/l	ND	<0.0010	0.030
Metoxicloro	µg/l	ND	<0.0150	20.00
Trihalometanos Totales	mg/l	0.015	0.160	0.200
Herbicidas Clorados 2,4	µg/l	ND	<1.00	20.00
Benceno	µg/l	ND	<10.00	10.00
Tolueno	µg/l	ND	<100.00	700.00
Etilbenceno	µg/l	ND	<100.00	300.00
Xileno (o,p,m)	µg/l	ND	<100.00	500.00

*ND= No Detectable

*Fuente: Términos de Referencia del Proyecto El Zapotillo.

A partir de los resultados obtenidos en la **Tabla 2-3**, se realizó el siguiente muestreo para dar seguimiento a los parámetros que incumplieron la normatividad. Se tuvo el siguiente registro del monitoreo realizado en los cuerpos de agua del Río Verde y Río Lagos, para los parámetros donde se observó incumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 2-4. Parámetros monitoreados que incumplen la Norma para Agua Potable.

Fecha	Cuerpo de Agua	Sitio	Al (mg/l)	As (mg/l)	Col. Fecales (NMP/100 ml)	Col. Totales (NMP/100 ml)	Color (U. Pt.Co)	F (mg/l)	Turbiedad (UTN)
06-jun-09	Río Lagos	Presa Alcalá	0.63	0.064	23	93	<5	1.99	33
06-jun-09	Río Verde	Temacapulín	0.63	0.044	93	460	<5	2.50	26
07-jun-09	Río Lagos	Presa Alcalá	0.768	0.3310	1,100	<2,400	12	1.85	106
07-jun-09	Río Verde	Temacapulín	0.616	0.2370	210	1,100	8	2.03	20
NOM-127-SSA1-1994			0.2	0.025	0	0	20	1.05	5

2.6.1 Evaluación de la calidad del agua

De acuerdo con los resultados obtenidos de los estudios de calidad del agua, se concluye que no se cumplen los siguientes parámetros:

- ❖ Aluminio
- ❖ Arsénico
- ❖ Flúor
- ❖ Coliformes Fecales
- ❖ Coliformes Totales
- ❖ Turbiedad
- ❖ Nitrógeno amoniacal
- ❖ Manganeso

En aguas superficiales, es frecuente que previo al tratamiento se incumpla en Coliformes totales y fecales, color y turbiedad. Estos parámetros normalmente se remueven mediante un proceso convencional de potabilización. El aluminio también se incumple con frecuencia, debido a que es un constituyente de las arcillas, las cuales son formadas principalmente por silicatos aluminicos, con material coloidal y trozos de fragmentos de rocas; un proceso convencional de potabilización también es capaz de eliminar este parámetro.

Los parámetros que no siempre se eliminan en un proceso convencional de potabilización son flúor, arsénico y manganeso.

Los parámetros más problemáticos que se detectaron fueron el flúor y el arsénico. No es frecuente su presencia en cuerpos de agua superficiales; se estima que provienen de las aguas de abastecimiento subterráneas para las distintas localidades asentadas en la cuenca, ya que existen muchos reportes de problemas de flúor en localidades de los Altos de Jalisco y Aguascalientes; su eliminación frecuentemente requiere de un proceso no convencional de potabilización.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



2.7 Descripción del tren de tratamiento

Para la potabilización del río Verde, se había propuesto, en una primera etapa, un arreglo de dos trenes de tratamiento para potabilizar $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ y, en una segunda etapa, un tercer tren de tratamiento para $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ($5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en total).

Cada tren de tratamiento estaba compuesto por las siguientes etapas:

Tanque de recepción

El agua proveniente de la presa El Zapotillo, se recibirá en dos tanques de recepción y almacenamiento de agua cruda.

Adición de sustancias químicas

A la salida del tanque de recepción, se propone la adición de sustancias químicas, como son sulfato de aluminio como coagulante principal y polímero aniónico (cal), como floculante de ayuda. En caso de que se requiera controlar el pH, se propuso adicionar cal.

Mezclado rápido

Para asegurar la incorporación de las sustancias adicionales, se propone un mezclado mediante un dispositivo mecánico tipo propela.

Mezclado lento (floculación)

Para favorecer la formación de flocúlos de tamaño grande, el agua pasa a una etapa donde se mezclará en condiciones de flujo laminar que permita el contacto entre las partículas.

Flotación

Dado que se espera la presencia de algas en la presa, se propuso emplear un sistema de flotación para separar las partículas presentes; el material separado en esta etapa (lodos de flotación), se dispondrá hacia el sitio de disposición final de lodos.

Oxidación por medio de Ozono

Para lograr la oxidación de material orgánico e inorgánico, se empleará el ozono que puede eliminar el sabor y olor que son ocasionados por algunos metales o químicos suspendidos en el agua.

Filtración de tipo granular

La filtración permite retener sólidos suspendidos que persisten en efluentes de sistemas de potabilización de agua, la cual se logra al hacer pasar agua a través de un lecho formado por partículas sólidas (gravilla, arena, antracita, etc).

El proceso de filtración consta de dos etapas: filtración y retrolavado. Durante la filtración los intersticios del lecho filtrante se obstruyen paulatinamente con sólidos suspendidos del agua que



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



circula, produciéndose así una disminución paulatina del flujo a través del lecho, hasta el punto en el que el proceso se detiene. La filtración será de tipo granular.

Filtración (Alúmina Activada)

El tratamiento con alúmina activada se usa para atraer y eliminar contaminantes como el arsénico y el flúor, los cuales tienen iones con carga negativa.

En la medida en que la alúmina absorbe contaminantes, va perdiendo su capacidad de tratamiento de agua, por lo tanto, la calidad del agua tratada deberá monitorearse cuidadosamente para asegurar que se reemplacen los cartuchos antes de que éstos pierdan su eficacia de tratamiento. Además, la capacidad de la alúmina tiene una fuerte influencia en el pH del agua.

Desinfección por rayos ultravioleta

La desinfección por UV requiere energía luminosa como agente de contacto para la desinfección, ya que al ser absorbida por las bacterias, éstas mueren y los riesgos a infecciones o enfermedades, disminuyen de manera importante.

Adicional a este sistema de Rayos UV, existe un sistema de dosificación de cloro al inicio del proceso, que podrá ser utilizado en caso de falla o mantenimiento de las lámparas ultravioleta.

Almacenamiento Final

Finalmente, el agua se almacenará en tanques para su posterior distribución.

Cisterna de Agua de Servicios

Se prevé contar con 2 tanques para el suministro de agua potabilizada para usos múltiples como lo son el retrolavado de los filtros, servicios generales en casetas, entre otros.

3. OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS UTILIZADOS EN LA POTABILIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE SU EFICIENCIA

3.1 Operaciones Unitarias

Son aquellas operaciones usadas para remover contaminantes en los cuales se requiere la aplicación de alguna fuerza física. Estos fueron los primeros métodos en utilizarse ya que surgieron de la experimentación. (Metcalf & Eddy)

Las operaciones unitarias más utilizadas en el proceso de potabilización son: filtración granular, filtración por membrana, sedimentación, entre otras.

3.1.1 Filtración granular

La filtración es una de las principales operaciones unitarias para la potabilización. En ésta se remueven las partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada. En la filtración granular el medio poroso es un lecho de arena, por ejemplo.

La filtración se compone de dos etapas: filtración y retrolavado. En la filtración, el agua pasa a través de un filtro compuesto por una cama de material granular con o sin la adición de químicos que aumenten la eficiencia del proceso. En el retrolavado, se remueven los sólidos suspendidos acumulados a través del filtro granular; usualmente se lleva a cabo invirtiendo el flujo a través del filtro.

Generalmente la filtración se efectúa después de la separación de la mayoría de los sólidos suspendidos por sedimentación, sin embargo, dependiendo las características del agua, es posible que ésta entre directamente en la etapa de filtración sin ser sedimentada previamente.

La eficiencia de filtración del medio granular se ve afectada por las propiedades del medio filtrante, incluyendo el tamaño de grano y su distribución, densidad, forma, dureza, porosidad y área superficial. Éste debe ser lo suficientemente grueso para tener una abertura entre los granos con gran capacidad de almacenamiento, pero a la vez, suficientemente fino para impedir el paso de los sólidos suspendidos y tener una graduación adecuada para permitir un lavado eficiente.

Los medios más utilizados son: arena, antracita, tierra, perlita y carbón activado en polvo o granulado.

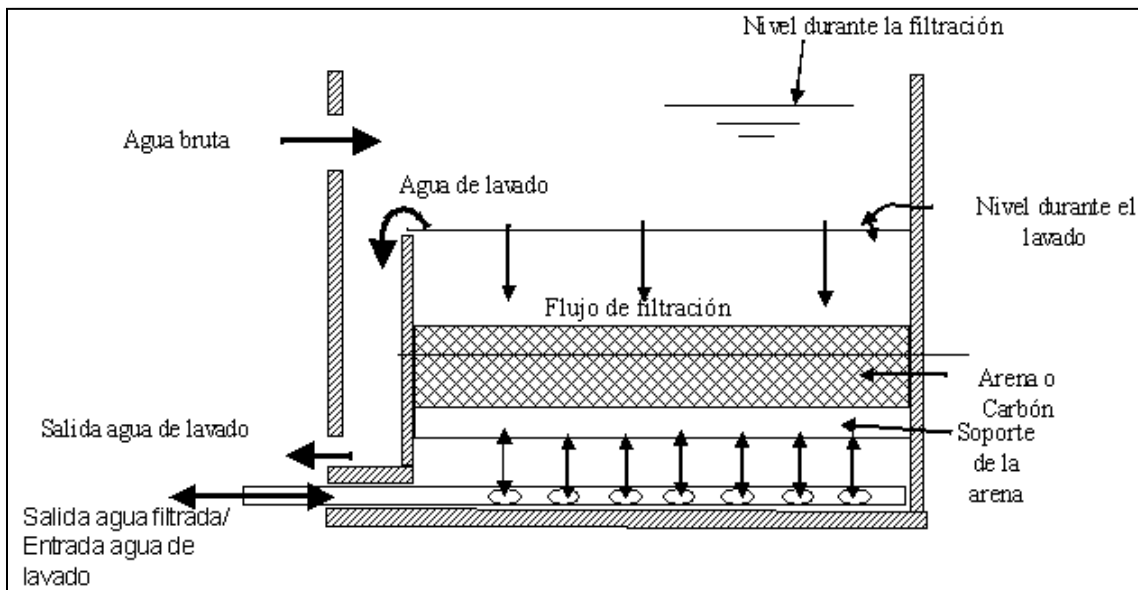


Figura 3-1. Representación esquemática del sistema de Filtración granular. Recuperado de: www.elaguapotable.com/filtración.htm

3.1.2 Filtración por membrana

La filtración por membrana es una de las tecnologías más modernas utilizadas para la potabilización del agua. El tipo de membrana a utilizar dependerá del tamaño de los contaminantes que se quieran eliminar; los diferentes procesos existentes para membranas de filtración son: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (**Tabla 3-1**).

Este proceso consiste en forzar el paso del líquido a filtrar a través de una membrana colocada sobre un soporte sólido.

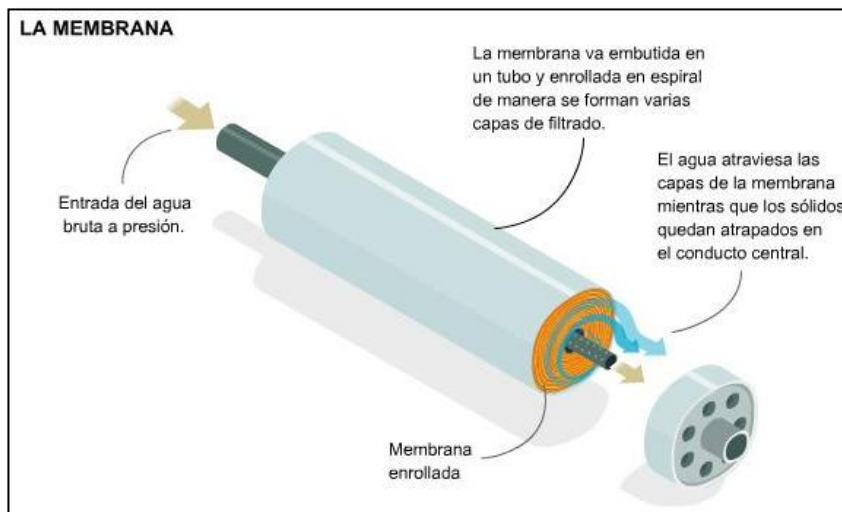


Figura 3-2. Ejemplo de membrana en módulo tubular. Fuente: OSMO VIC.

Tabla 3-1. Jerarquía de los procesos de membranas y principales aplicaciones.

Características	Microfiltración	Ultrafiltración	Nanofiltración	Ósmosis Inversa
Tamaño de poro	0.1 μm	0.01 μm	0.001 μm	Sin poros
Remueve	Partículas Sedimentos Algas Protozoarios Bacterias	Pequeños coloides Virus	Materia orgánica disuelta Iones divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+})	Iones monovalentes
Aplicaciones en la industria	Producción de agua ultra-pura para la industria electrónica	Producción de agua estéril y libre de pirógenos para la industria química y farmacéutica	Esterilización del agua para la industria electrónica, química y farmacéutica	Desionización y esterilización del agua para la industria electrónica, química y farmacéutica

*Fuente: Apuntes Dr. Enrique César; Filtración mediante membranas.

3.1.3 Sedimentación

Sedimentación, o también llamada clarificación, es la separación de las partículas, flóculos químicos y precipitados de una superficie en un tanque que actúa por gravedad.

La eficiencia de remoción de esta operación unitaria, es del 60% de los sólidos que son perceptibles a simple vista en el agua. Se consideran sólidos sedimentables a las partículas que por su tamaño y peso sedimentan en una hora.

Existen cuatro tipos de asentamiento que se pueden presentar: partícula discreta, floculante, obstaculizado y por compresión; el tipo a utilizar dependerá de la concentración que las partículas presenten, como se indica en la **Tabla 3-2**.

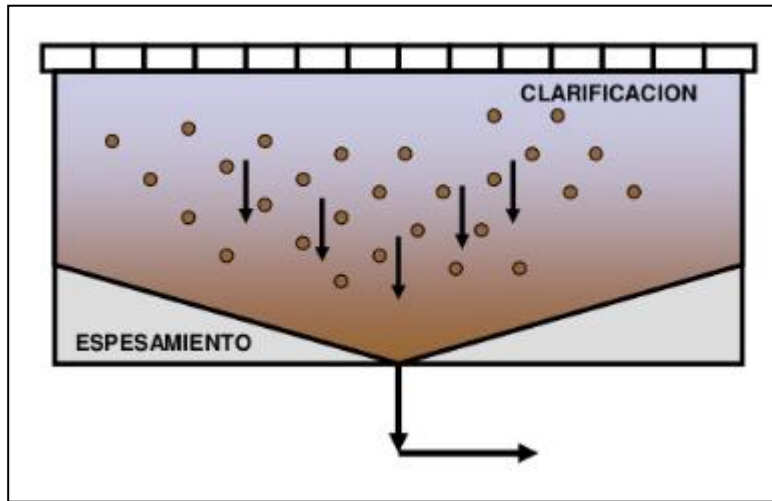


Figura 3-3. Ejemplo de tanque sedimentador. Fuente: (CONAGUA, 2015)

Tabla 3-2. Tipos de sedimentación y sus aplicaciones.

Tipo de fenómeno de sedimentación	Descripción	Aplicación
De partículas discretas	Sedimentación de partículas en una suspensión con baja concentración de sólidos; no cambian de forma ni de densidad.	Eliminación de las arenas de agua residual.
Floculante	Suspensión bastante diluida de partículas que se agregan o flotan, durante el proceso de sedimentación; se adhieren entre sí por lo que cambian su forma y densidad.	Eliminación de una fracción de los sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria.
Obstaculizada	Suspensiones de concentración intermedia, en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para desplazar el agua al ir sedimentando.	Se presenta en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Compresión	Sedimentación donde las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura; concentraciones superiores a 1000 mg/l.	Se produce en las capas inferiores de una masa de fango de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de fango.
-------------------	--	---

*Fuente: Apuntes Dr. Enrique César. Clarificación.

3.2 Procesos Unitarios

Son aquellos procesos utilizados en la potabilización del agua en donde el cambio se produce a través de una reacción química. (Metcalf & Eddy)

3.2.1 Adsorción

Se entiende por adsorción la remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de tal forma, que son separadas de la solución. (NOM-127-SSA1-1994). Elimina compuestos orgánicos que no son removidos por métodos de tratamiento convencionales.

Es uno de los métodos más utilizados en la remoción de metales pesados y metaloides. Este proceso consiste en la transferencia de masa entre dos fases, un líquido o un gas hacia partículas sólidas. La molécula que se transfiere y se acumula o adsorbe, es llamada adsorbato y el sólido en el que se lleva a cabo, es llamado adsorbente.

3.2.2 Ósmosis Inversa

El objetivo de este proceso es obtener agua purificada partiendo de un caudal de agua que está relativamente impura o salada. En el fenómeno de ósmosis inversa, el agua se mueve a través de una membrana semipermeable desde una zona de baja concentración hacia una zona más concentrada (de sales e impurezas), hasta un punto en que se alcanza un equilibrio de fuerzas. (CONAGUA, 2015)

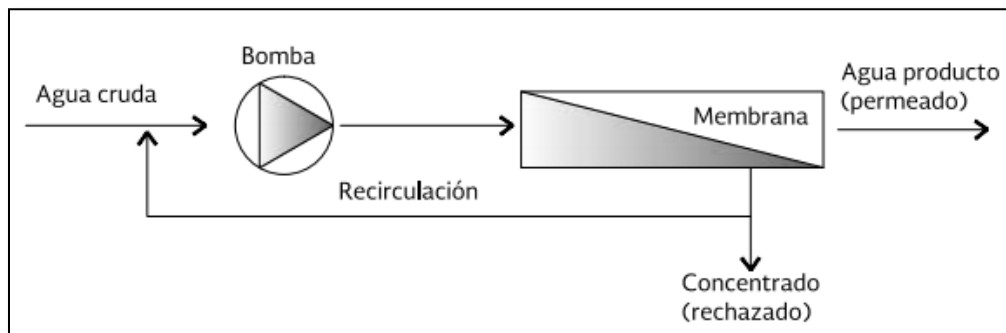


Figura 3-4. Ósmosis inversa. Fuente: (CONAGUA, 2015)



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



3.2.3 Intercambio Iónico

Este proceso químico consiste en la remoción de los iones indeseables de un agua cruda transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico.

Es un proceso no convencional ya que, en plantas de gran tamaño, no es muy recomendado.

Los intercambiadores iónicos se usan para la separación de sales del agua. Sus aplicaciones en la potabilización del agua son:

- ❖ Ablandamiento. Separación de iones de calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- ❖ Desmineralización. Remoción de Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- .
- ❖ Remoción de nitratos, barios, cadmio, arsénico, percloratos y cromatos.

3.2.4 Oxidación

Introducción de oxígeno en la molécula de ciertos compuestos para formar óxidos. (NOM-127-SSA1-1994).

La oxidación se emplea en la potabilización para remover constituyentes químicos que se encuentran en un estado reducido, como compuestos orgánicos tóxicos o compuestos olorosos y compuestos inorgánicos como hierro, manganeso o sulfuro de hidrógeno.

Los agentes oxidantes más utilizados son:

- ❖ Cloro
- ❖ Dióxido de carbono
- ❖ Ozono
- ❖ Permanganato de potasio

Las principales aplicaciones de los oxidantes son:

- ❖ Control del olor y sabor
- ❖ Remoción de color
- ❖ Remoción de hierro y manganeso
- ❖ Remoción de sulfuro de hidrógeno
- ❖ Desinfección

Tipos de oxidación

- ❖ Oxidación con cloro
- ❖ Oxidación con ozono
- ❖ Oxidación con permanganato de potasio

3.2.5 Floculación

El objetivo de la floculación es provocar turbulencia en el agua para proporcionar la colisión de las partículas.

Es el proceso mediante el cual una vez que las cargas de los coloides se han neutralizado, se propicia el contacto entre partículas mediante un mezclado suave que incrementa la tasa de encuentros o colisiones entre ellas, aglomerándose para formar flóculos y de esta manera, facilitar su precipitación. (Romero, 2006).

Se realiza a través del movimiento lento de paletas; demasiado mezclado hace que los flóculos sean pequeños y finalmente dispersos. Mientras más pesado sea el flóculo, la concentración de sólidos suspendidos, se requiere más mezclado para mantener los flóculos en suspensión.



Figura 3-5. Principio de floculación.

3.3 Propiedades aprovechadas y contaminantes objeto de las operaciones y los procesos unitarios

A modo de resumen la **Tabla 3-3** muestra las operaciones y procesos más utilizados, sus propiedades aprovechadas y los contaminantes objetivos más comunes.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 3-3. Propiedades aprovechadas y contaminantes objeto más comunes.

Operaciones Unitarias	Propiedades aprovechadas	Contaminantes objetivo más comunes
Filtración Granular	Electronegatividad	Partículas
Filtración por Membrana	Tamaño	Inorgánicos disueltos
Sedimentación	Tamaño	Sólidos en suspensión
Procesos Unitarios	Propiedades aprovechadas	Contaminantes objetivo más comunes
Adsorción	Polaridad, hidrofobicidad	Orgánicos disueltos
Ósmosis inversa	Tamaño, carga, polaridad	Inorgánicos disueltos
Intercambio Iónico	Cargas	Inorgánicos disueltos
Oxidación	Reactividad química	Orgánicos e inorgánicos disueltos

*Fuente: Apuntes Dr. Enrique César Valdez.

4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTA DEL TRATAMIENTO DE LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL RÍO VERDE

El agua colectada en la presa El Zapotillo, la cual es alimentada por el cauce de la parte alta de la cuenca río Verde, será la fuente de agua que alimente a la PP.

La planta potabilizadora tendrá una capacidad de tratamiento, en una primera etapa de 3.8 m³/s para el abastecimiento de agua al municipio de León, Guanajuato y una capacidad total (etapa futura) de 5.6 m³/s, ya que se contempla en el futuro el abastecimiento de agua para los municipios de Los Altos de Jalisco, (1.8 m³/s).

El diseño de las instalaciones se realizará teniendo en cuenta la etapa futura, desarrollándose la ingeniería y construyéndose las instalaciones únicamente para la primera etapa.

Los caudales de operación de la PP serán los mencionados en la **Tabla 4-1**, mismos que se planearon para un periodo de operación de 22 años.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 4-1. Caudales de operación de la Planta Potabilizadora.

Caudal	Gasto
Mínimo	1.90 m ³ /s
Medio	3.80 m ³ /s
Máximo (futuro)	5.60 m ³ /s

4.1 Calidad de agua objeto a potabilizar

El proceso de tratamiento de la PP se seleccionó buscando alcanzar los parámetros de calidad exigidos por la modificación de la NOM-127-SSA-1994, para agua de consumo humano.

4.2 Normativa utilizada

A continuación, se incluye la normativa más significativa y los documentos técnicos que se utilizaron para realizar el diseño de la Planta Potabilizadora El Zapotillo.

- ❖ 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.
- ❖ NOM-052-SEMARNAT-1993 Norma Oficial Mexicana, que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- ❖ Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la Comisión Nacional del Agua.
- ❖ Curso de Plantas de Tratamiento de Agua para Consumo Humano del Dr. Enrique César Valdez. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, UNAM.

4.3 Monitoreo de la calidad del agua

Desde el lanzamiento de la licitación para el proyecto El Zapotillo en el año 2006 y hasta la fecha presente, se han realizado diferentes monitoreos de la calidad del agua para comprobar la viabilidad de la planta del Zapotillo. A continuación, se enlistan los estudios realizados, mismos que sirvieron de como datos de proyecto para el diseño de la Planta Potabilizadora.

- ❖ En el año 2006 se realizó el estudio de *Actualización y Caracterización de Fuentes de Contaminación de la Cuenca del río Verde en el Estado de Jalisco*, encargado por CEAS y redactado por AYMA.
- ❖ En junio de 2009 se realizó un muestreo que forma parte del documento titulado *“Estudios geológicos y geotécnicos de Plantas de: Bombeo 2 y Potabilizadora; de corrosión y diseño*



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



avanzado del sistema de potabilización, incluye disposición final de lodos, del acueducto El Zapotillo – Los Altos de Jalisco – León, Guanajuato”.

- ❖ En la 1° Junta de Aclaraciones se incluyó el *“Estudio para la actualización y complementación de la calidad del agua del río Verde y sus afluentes, para el abastecimiento de agua potable a Los Altos de Jalisco-León, Guanajuato; de la presa el Zapotillo, Estado de Jalisco”* redactado por la Universidad Técnica de Querétaro, basado en muestras tomadas de junio a septiembre de 2010.
- ❖ Durante la fase de redacción del proyecto de licitación, Abeima realizó la toma de dos muestras en junio de 2011.
- ❖ En 2012 se contrató al laboratorio Ecolaboratorio S.A. de C.V., para realizar muestreos mensuales del río durante un año, iniciando el 14 de marzo de 2012 y concluyendo el día 22 de febrero de 2013.
- ❖ 2016 se volvió a contratar al laboratorio Ecolaboratorio S.A. de C.V., para realizar muestreos mensuales del río durante un año, iniciando el 5 de julio de 2016 y concluyendo el día 10 de julio de 2017.

Será necesario tomar en consideración que el agua una vez embalsada, presentará características de calidad de agua diferente; se requiere estudiar diversos escenarios para el ajuste de la planta a proyectar.

4.4 Calidad de agua de ingreso a la Planta Potabilizadora

El diseño del tren de tratamiento para la PP, partirá de los siguientes parámetros de calidad del agua producto del monitoreo realizado de 2016 a 2017 por el laboratorio Ecolaboratorio S.A. de C.V.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 4-2. Calidad de agua de ingreso a la Planta Potabilizadora

Parámetro	Unidad	Valores adoptados	
		Medio	Máximo
Arsénico	mg/l	0.014	0.044
Alcalinidad	mg/l	212.19	311.01
Aluminio	mg/l	3.96	7.05
Bicarbonato	mg/l	202.69	278.93
Calcio	mg/l	47.03	64.95
Carbonatos	mg/l	13.60	56.60
Conductividad	mS/cm	715.11	939.00
DBO	mg/l	23.36	41.88
DQO	mg/l	54.17	178.18
Dureza	mg/l	147.62	204.71
Flúor	mg/l	3.00	4.84
Hierro	mg/l	4.55	8.65
Manganeso	mg/l	0.16	0.76
Nitrógeno amoniacal	mg/l	0.50	1.50
Plomo	mg/l	0.0013	0.0270
Mercurio	mg/l	0.0002	0.0042
pH	U. De pH	8.47	9.09
Sólidos Suspendidos	mg/l	26.68	44.50
Turbidez	NTU	24.18	40.34
Temperatura del agua	°C	20.97	28.90

*Fuente: muestreo realizado por el laboratorio Ecolaboratorio S.A. de C.V.

4.5 Parámetros fundamentales de la calidad del agua

Los contaminantes detectados hasta la fecha son aquellos que condicionarán el diseño del proceso de la PP.

- ❖ Arsénico
- ❖ Aluminio
- ❖ DQO/DBO
- ❖ Dureza
- ❖ Flúor
- ❖ Hierro
- ❖ Manganeso
- ❖ Nitrógeno amoniacal



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



- ❖ Turbidez
- ❖ Sólidos en suspensión
- ❖ Plomo
- ❖ Mercurio

Se consideran como parámetros especiales de calidad del agua, aquellos que no son fácilmente removidos del agua mediante procesos convencionales de potabilización. Dentro de los mencionados contaminantes, el único que puede ser considerado como parámetro especial es el flúor ya que requiere de procedimientos específicos para las concentraciones puntuales detectadas.

Otros parámetros de calidad del agua que condicionan de una manera u otra el proceso y deben ser igualmente tomados en cuenta son:

- ❖ Alcalinidad
- ❖ Calcio
- ❖ Conductividad
- ❖ pH
- ❖ Temperatura del agua

Los parámetros anteriormente mencionados, serán aquellos que se analicen para el diseño de la planta. En cuanto al resto de los parámetros de calidad del agua establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, no presentaron niveles por encima de los establecidos, así que no será necesario tomarlos en cuenta para el diseño del proceso de tratamiento.

4.5.1 Flúor, presencia relevante

Las concentraciones de fluoruros en las aguas del río Verde superan significativamente la norma. Dicho contaminante es un parámetro relevante ya que requiere de tratamientos específicos. La presencia de fluoruros puede ser explicada de dos maneras:

- ❖ Descargas de aguas residuales e industriales aguas arriba.
- ❖ Fuentes naturales.

Debido a que en la cuenca del río Verde se presentan condiciones propicias a la saturación de aguas subterráneas de flúor, la probabilidad de su presencia superficial es muy alta.

En la siguiente imagen se indica la ubicación con respecto al río Verde de la mina de fluorita más grande del mundo (las Cuevas), que se encuentra en el estado de San Luis Potosí y una mina de plata (San Martín de Bolaños) en el estado de Jalisco, que también reporta una fuerte presencia de fluorita. Las dos minas se encuentran en la misma región geológica y pertenecen al “cinturón de fluorita” que corre a través de los estados de Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro, rodeando la cuenca y cruzando todas las zonas geológicas presentes en ella.

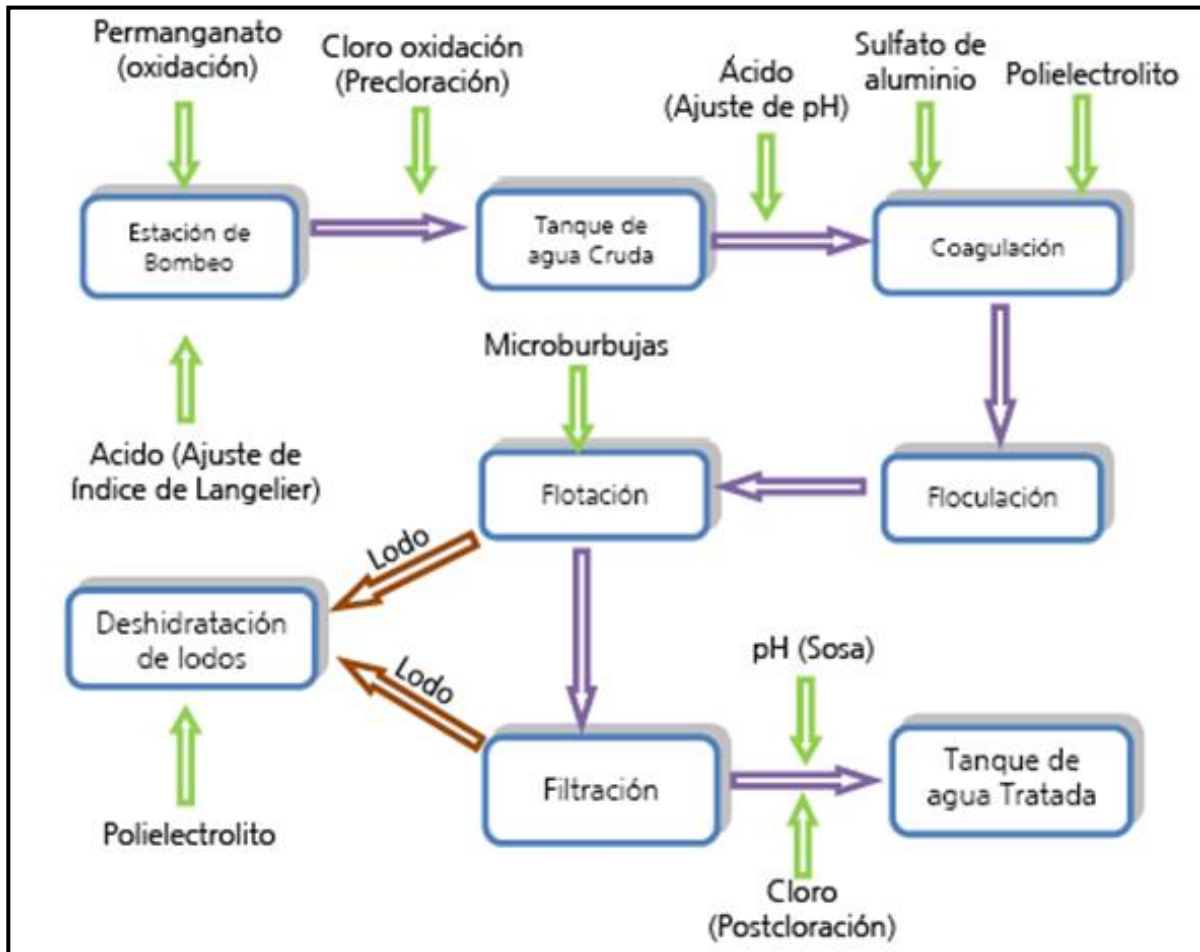


Figura 4-2. Diagrama de bloques del Sistema de Potabilización propuesto.

4.6.1 Pre-oxidación y ajuste del índice de Langelier en Estación de Bombeo

El proceso de tratamiento comienza desde la estación de bombeo, que se ubica a un costado de la presa El Zapotillo. Al agua que entra a la obra de toma de la estación de bombeo, se le adicionará permanganato de potasio, con el objetivo de oxidar la materia orgánica disuelta que pueda contener el agua bruta, y así, evitar la futura formación de trihalometanos después de la adición de cloro.

En seguida de la dosificación de permanganato, se adicionará ácido sulfúrico para ajustar el índice de Langelier y así conseguir prolongar la vida útil de la línea de bombeo.

A continuación, el agua será enviada a través de dos estaciones de bombeo hasta la Planta Potabilizadora, donde se continuará con el tratamiento.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



4.6.2 Oxidación en el Tanque de Agua Cruda (Precloración)

El agua proveniente de la estación de bombeo será colectada en un tanque de 64 000 m³, los requeridos para un almacenamiento de 4.5 horas, en donde se añadirá cloro para oxidar los iones de NH₃, Mn⁺², Fe⁺², Pb⁺², Hg⁺² y As⁺² hasta su máximo nivel de oxidación para pasarlos a sus formas insolubles. De este modo, estos metales disueltos se precipitarán y se removerán aguas abajo en los procesos de clarificación y filtración.

El agua clorada saldrá del tanque de agua cruda por una línea de conducción a gravedad en donde se le dosificará ácido sulfúrico, con el propósito de ajustar el pH a un valor cercano a 7, que es el óptimo para el proceso de coagulación-floculación.

El caudal de agua será medido y regulado en una caja de reparto para después enviarla a los procesos de coagulación-floculación, flotación y filtración.

4.6.3 Coagulación

En la coagulación es común usar compuestos inorgánicos y químicos que ayudan a ajustar la alcalinidad y el pH. En la **Tabla 4-3** se muestran los reactivos más utilizados para este proceso.

Tabla 4-3. Principales reactivos usados en potabilización.

Clasificación	Fórmula Química	Peso Molecular (g/mol)	Aplicación
Coagulantes			
Sulfato de aluminio	Al₂(SO₄)₃	594.4	Coagulante primario
Aluminato de sodio	Na ₂ Al ₂ O ₄	163.9	Usado junto con sulfato de aluminio controla el pH y alcalinidad
Cloruro de aluminio	AlCl ₃	160.3	Se usa mezclado con polímeros orgánicos
Policloruro de aluminio	Al _a (OH) _b (Cl) _c (SO ₄) _d	Variable	Coagulante primario
Polisulfato de aluminio	Al _a (OH) _b (Cl) _c (SO ₄) _d	Variable	Coagulante primario, producido in situ
Policloruro de hierro	Fe _a (OH) _b (Cl) _c (SO ₄) _d	Variable	Coagulante primario, producido in situ
Cloruro férrico	FeCl ₃	162.2	Coagulante primario
Sulfato férrico	Fe ₂ (SO ₄) ₃	400	Coagulante primario
Ayudantes de coagulación			
Sílice activada	SiO ₂	60	Ayudante de coagulación usado con sulfato de aluminio en invierno
Silicato de Sodio	Na ₂ O(SiO ₂) ₃₋₂₅	242-1562	Ayudante de coagulación, producido in situ
Bentonita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	258	Mejora la remoción de compuestos orgánicos
Ajustadores de pH y alcalinidad			
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	56.1	Proveer alcalinidad y ajustar el pH
Hidróxido de sodio	NaOH	40	Proveer alcalinidad y ajustar el pH
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	106	Proveer alcalinidad y ajustar el pH

*Fuente: (CONAGUA, 2015)



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Para este proceso el agua será mezclada con sulfato de aluminio para incrementar los sulfatos en el agua y formar flóculos fáciles de sedimentar; tiene la función de coagulante para remover sólidos suspendidos y turbiedad y, adicionalmente, ayudar en la remoción de flúor. Mediante una prueba de jarras se determinó que la dosificación óptima de sulfato de aluminio, para un pH óptimo de 7, fue de 80 mg/l = 0.08 kg/m³.

1. El gasto al cual se le dosificó coagulante fue:

$$Q_{MD} = \left(1.9 \frac{m^3}{s}\right) \left(86,400 \frac{s}{d}\right) = 164,160 m^3/d$$

2. Con la dosis óptima obtenida de la prueba de jarras se calculó el requerimiento mensual de sulfato de aluminio.

$$Req. \text{ mensual} = \left(0.08 \frac{kg}{m^3}\right) \left(164,160 \frac{m^3}{d}\right) \left(30 \frac{d}{mes}\right) = 393,984 kg/mes$$

Para el diseño de los tanques de coagulación, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- ❖ Gradiente de velocidad (energía necesaria para producir la mezcla): 700 a 1000 s⁻¹
- ❖ Tiempo de residencia o retención hidráulico: aproximadamente 1 minuto
- ❖ Volumen del tanque: máximo 150 m³
- ❖ Sección: cuadrada
- ❖ Equipo de mezclado: flecha vertical accionada por un reductor de velocidad y un motor eléctrico
- ❖ Tipos de impulsores: turbina o hélice

Se consideró el gasto mínimo de diseño de 1,900 l/s, ya que serán tres trenes de tratamiento los propuestos para sumar los 5,600 l/s que requerirá la Planta.

1. Se obtuvo el QMD en [m³/s]:

$$Q_{MD} = \left(1,900 \frac{L}{s}\right) \left(\frac{1 m^3}{1000 L}\right) = 1.9 \frac{m^3}{s}$$

2. Se obtuvo el volumen a mezclar (V) considerando un tiempo medio de residencia teórico (t₀) de 60 segundos.

Se partió de la siguiente expresión:



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$Q_{MD} = \frac{V}{t_0}$$

A continuación, se despejó el volumen:

$$V = Q_{MD} t_0 = (1.9 \text{ m}^3/\text{s})(60 \text{ s}) = \mathbf{114 \text{ m}^3}$$

Como se recomienda un volumen máximo por tanque de 150 m^3 .

3. Se consultó un catálogo comercial, del cual se seleccionó el siguiente modelo con una potencia de 90 kW, ya que para la mezcla rápida será necesaria una gran potencia.

Tabla 4-4. Agitador de Entrada Vertical seleccionado para coagulación.

Agitador de Entrada Vertical de Lignin
Serie 70/80
Gran abanico de potencias disponibles desde 0.75 kW hasta 150 kW
Velocidades desde 9 rpm hasta 280 rpm
Completa garantía tanto de proceso como mecánica

4. Se calculó la potencia impartida al agua (P) por el equipo seleccionado, considerando una eficiencia (η) del 80% (es decir, que el 80% de la potencia del equipo queda en el agua) y la colocación de 2 impulsores en la flecha (impulsor dual), lo que incrementa la potencia impartida en 1.9 veces.

$$P = 1.9 P_{\text{equipo}} \eta = (1.9)(90 \text{ kW})(0.8) = \mathbf{136.8 \text{ kW}}$$

5. Se calculó el volumen que es posible mezclar con la potencia calculada en el paso anterior.

Se tomó como dato que la temperatura mínima promedio anual ($T_{\text{mín}}$) del estado de Jalisco, es de 11.6°C .

$$T_{\text{mín}} = 11.6^\circ\text{C}$$

Debe diseñarse con esta temperatura debido a que es la que proporciona las condiciones más desfavorables (condiciones críticas de diseño) en términos de viscosidad del agua (a menor temperatura mayor viscosidad).

Para esta temperatura (11.6°C) se tuvo que realizar una interpolación para determinar la viscosidad dinámica.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 4-5. Viscosidad Dinámica del agua a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Viscosidad Dinámica (kg/m·s)
11	0.0013
11.6	0.00125
12	0.001236

Fuente: (Mott, 2006)

$$\mu = 0.00125 \frac{kg}{m \cdot s}$$

Adicionalmente, se estableció que el gradiente de velocidad de raíz media (G) fuera de al menos 1000 s^{-1} .

$$G = 1000 \text{ s}^{-1}$$

Para calcular el volumen (V) que es posible mezclar con la potencia impartida al agua por el equipo seleccionado (Agitador de Entrada Vertical de Lighnin), se partió de la ecuación del gradiente de velocidad:

$$\frac{P}{V} = \mu G^2$$

A partir de ésta, se despejó el volumen:

$$V = \frac{P}{\mu G^2} = \frac{136.8 \times 10^3 \text{ W}}{\left(0.00125 \frac{kg}{m \cdot s}\right) (1000 \text{ s}^{-1})^2} = \mathbf{109.44 \text{ m}^3}$$

6. Se calculó el número de tanques que se requieren.

$$N^{\circ} \text{ de tanques} = \frac{V \text{ total a mezclar}}{V \text{ que se puede mezclar}} = \frac{114 \text{ m}^3}{109.44 \text{ m}^3/\text{tanque}} = \mathbf{1.04 \text{ tanques}}$$

Se propondrá un tanque de 125 m^3 .

Con este valor se modifica el gradiente de velocidad (intensidad de mezclado):

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{136.8 \times 10^3 \text{ W}}{\left(0.00125 \frac{kg}{m \cdot s}\right) (125 \text{ m}^3)}} = \mathbf{935.70 \text{ s}^{-1}}$$



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Este valor es cercano a 1000, por lo que es aceptable.

- Se calculó el diámetro del impulsor dual (D_i) con la ecuación de Rushton para tanques con pantallas.

$$P = \frac{K_T n^3 D_i^5 \rho}{g}$$

Donde:

P = potencia impartida al líquido, W

K_T = constante del impulsor

n = velocidad de rotación, revoluciones/s

D_i = diámetro del impulsor, en m

ρ = densidad del líquido, kg/m^3

g = aceleración debida a la gravedad, m/s^2

A partir de ésta, se despejó el diámetro del impulsor (D_i)

$$D_i = \left(\frac{P g}{K_T n^3 \rho} \right)^{1/5}$$

En esta expresión se sustituyeron los siguientes valores:

$P = 136.8 \times 10^3 \text{ W}$

$K_T = 6.30$ (impulsor Rushton)

$n = 175 \text{ rpm} = 2.92 \text{ rps}$

$\rho = 999.58 \text{ kg/m}^3$ a 11.6°C ($T_{\text{mín}}$)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$D_i = \left[\frac{(136.8 \times 10^3 \text{ W})(9.81 \text{ m/s}^2)}{(6.30)(2.92 \text{ rps})^3(999.58 \text{ kg/m}^3)} \right]^{1/5} = 1.5 \text{ m}$$

- Se calculó el ancho del tanque (B), se recomienda una sección cuadrada.

Se partió de esta recomendación de diseño:

$$D_i = (0.3 \text{ a } 0.5)B$$

Se tomó el valor de 0.3 y se despejó el ancho (B):



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$D_i = 0.3 B$$

$$B = \frac{D_i}{0.3} = \frac{1.5 \text{ m}}{0.3} = 5 \text{ m}$$

9. Se calculó el espacio entre impulsores (E).

Se partió de esta recomendación de diseño:

$$E = 2 D_i = 2 (1.5 \text{ m}) = 3 \text{ m}$$

10. Se calculó la profundidad (h) del tanque.

Se comenzó por calcular el área de la sección del tanque (cuadrada).

$$A = B^2 = (5 \text{ m})^2 = 25 \text{ m}^2$$

A continuación, se calculó la profundidad del tanque (h):

$$h = \frac{V}{A} = \frac{125 \text{ m}^3}{25 \text{ m}^2} = 5 \text{ m}$$

11. Se revisó la relación profundidad/ancho (h/B) del tanque:

$$\frac{h}{B} = \frac{5 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 1$$

Este valor se encuentra en el intervalo de 1 a 1.6, por lo tanto, es aceptable la profundidad del tanque.

La cámara de coagulación tendrá unas dimensiones de 5 x 5 x 5 m y contará con un agitador mecánico para asegurar una mezcla completa del sulfato de aluminio donde se dosificará el coagulante. Habrá un tanque de coagulación por cada bloque de tratamiento (tres bloques).

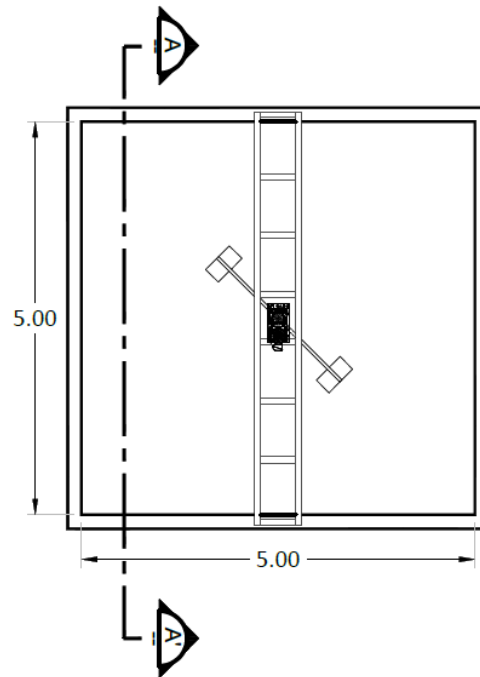


Figura 4-3. Planta. Tanque de Coagulación.

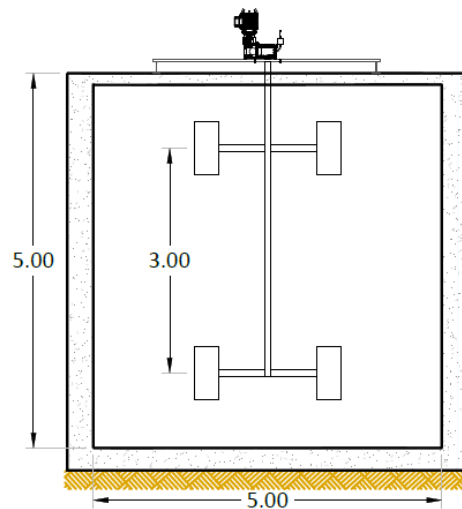


Figura 4-4. Corte A-A', Tanque de Coagulación.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



4.6.4 Floculación

El agua que atravesará el tanque de coagulación entrará en un canal que repartirá el agua a cuatro trenes de floculación. Cada tren de floculación poseerá dos cámaras de mezclado; en la primera cámara es donde se adiciona y mezcla el polielectrolito; y en la segunda cámara, el movimiento del agitador promoverá la aglomeración y crecimiento de los flóculos que se formarán en la cámara anterior.

Se propuso un tanque floculador con impulsores rotatorios de eje vertical.

1. Al igual que en el tanque de mezcla rápida (coagulación), el gasto de diseño utilizado fue:

$$Q_d = 1.9 \frac{m^3}{s}$$

2. Se consultó la **Tabla 4-6** para proponer un gradiente de velocidad (G) de acuerdo con el tipo de agua de la fuente.

Tabla 4-6. Valores de G para diferentes tipos de agua.

Tipo de agua de la fuente	G [s ⁻¹]
Baja turbiedad y color	20 - 70
Alta turbiedad, sólidos suspendidos	50 - 150

*Fuente: Apuntes Dr. Enrique César.

Como el agua de la fuente es de baja turbiedad y color, se recomienda un gradiente $G = 40 \text{ s}^{-1}$. Se acepta un $t_0 = 13.5 \text{ min} = 810 \text{ s}$.

$$Gt_0 = (40 \text{ s}^{-1})(810 \text{ s}) = 32,400$$

3. Se calculó el volumen a mezclar (\forall) considerando el tiempo medio de residencia teórico (t_0) propuesto de 13.5 min = 810 s.

$$\forall = Q_{MD} t_0 = \left(1.9 \frac{m^3}{s}\right)(810 \text{ s}) = 1539 \text{ m}^3$$

Como se tienen 4 tanques de mezcla rápida (coagulación), es lógico suponer 2 tanques de mezcla lenta (floculación).

4. El volumen de cada tanque floculador se calculó como:

$$\forall_{\text{tanque}} = \frac{1,539 \text{ m}^3}{4 \text{ tanques}} = 384.75 \text{ m}^3$$



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



5. Cada tanque floculador contará con 2 compartimientos, cuyo volumen se calculó de la siguiente manera:

$$V_{comp} = \frac{384.75 \text{ m}^3}{2 \text{ compartimientos}} = 192.37 \text{ m}^3$$

Para estos 2 compartimientos de 192.37 m³ se propusieron los siguientes gradientes de velocidad escalonados:

- Compartimiento 1: $G = 40 \text{ s}^{-1}$ (+10 respecto al gradiente propuesto)
- Compartimiento 2: $G = 30 \text{ s}^{-1}$ (gradiente propuesto)

Como los gradientes tienen poca diferencia (10 s^{-1}), se puede utilizar el mismo equipo mecánico en los 2 compartimientos, y sólo variar la velocidad de rotación para proporcionar el gradiente deseado en cada uno.

Por tal motivo, sólo se diseñó el compartimiento 1.

6. Se calculó la potencia impartida al agua en el compartimiento 1.

$$P = G^2 \mu V_{comp} = (40 \text{ s}^{-1})^2 \left(0.00125 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right) (192.37 \text{ m}^3) = 384.74 \text{ W}$$

7. Considerando una eficiencia del equipo, del 80%, se calculó la potencia del equipo.

$$P_{equipo} = \frac{P}{\eta_{equipo}} = \frac{384.74 \text{ W}}{0.8} = 480.93 \text{ W} = 0.48 \text{ kW}$$

8. Se seleccionó el equipo siguiente con una potencia baja para garantizar la mezcla lenta.

Tabla 4-7. Agitador de Entrada Vertical seleccionado para floculación.

Agitador de Entrada Vertical de Lignin
Serie EC
Potencias desde 0.25 kW hasta 4 kW
Velocidades desde 40 rpm hasta 1450 rpm
Gran variedad de cierres disponibles



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



9. Se propuso una profundidad de **4 m** y sección rectangular en cada compartimiento, de esta manera se calculó el área por compartimiento y la dimensión de sus lados.

$$A_{comp} = \frac{192.37 \text{ m}^3}{4 \text{ m}} = 48 \text{ m}^2$$

Cada lado será:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{5 \text{ m}} \\ \mathbf{L} &= \mathbf{10 \text{ m}} \end{aligned}$$

10. Se calculó el diámetro del impulsor.

Se utilizó el siguiente criterio de diseño:

$$\frac{\text{diámetro del impulsor "D}_i\text{"}}{\text{ancho del tanque "B"}} = 0.3$$

Por lo tanto:

$$D_i = 0.3 B = 0.3 (5 \text{ m}) = \mathbf{1.5 \text{ m}}$$

11. Se propuso el tipo de impulsor.

- Tipo de impulsor: Turbina de aspa inclinada (45° PBT)
- Número de potencia: $K_T = 1.26$



Figura 4-5. Turbina de aspa inclinada (45° PBT)

12. Se calculó la velocidad rotacional (n) para el impulsor, con la ecuación de Rushton para tanques con pantallas.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$P = \frac{K_T n^3 D_i^5 \rho}{g}$$

Donde:

- P, potencia impartida al líquido, 480.93 W
- K_T , constante del impulsor, 1.26
- n, velocidad de rotación, revoluciones/s
- D_i , diámetro del impulsor, 1.5 m
- ρ , densidad del líquido, 999.58 kg/m³ a 11.6°C (T_{\min})
- g, aceleración debida a la gravedad, 9.81 m/s²

Se despejó n:

$$n = \left(\frac{Pg}{K_T D_i^5 \rho} \right)^{1/3} = \left(\frac{(480.93 \text{ W})(9.81 \text{ m/s}^2)}{1.26 (1.5 \text{ m})^5 (999.58 \text{ kg/m}^3)} \right)^{1/3} = 0.80 \text{ rev/s}$$

$$n = \left(0.80 \frac{\text{rev}}{\text{s}} \right) \left(60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \right) = 48 \text{ rpm}$$

Ambas cámaras tendrán dimensiones de 10 x 5 x 4 m, para el volumen requerido de 190 m³.

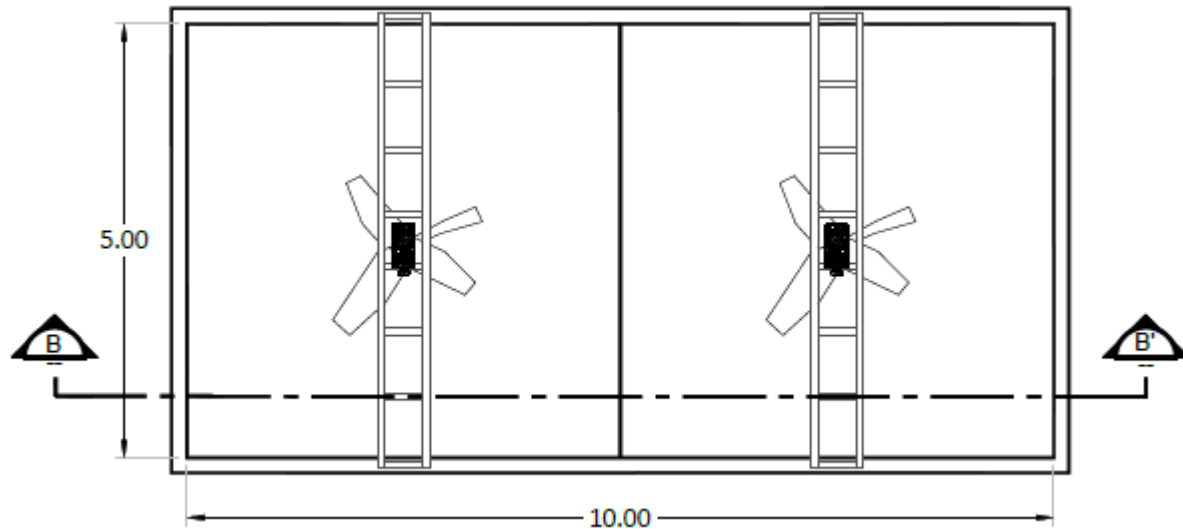


Figura 4-6. Planta. Tanque Floculador.

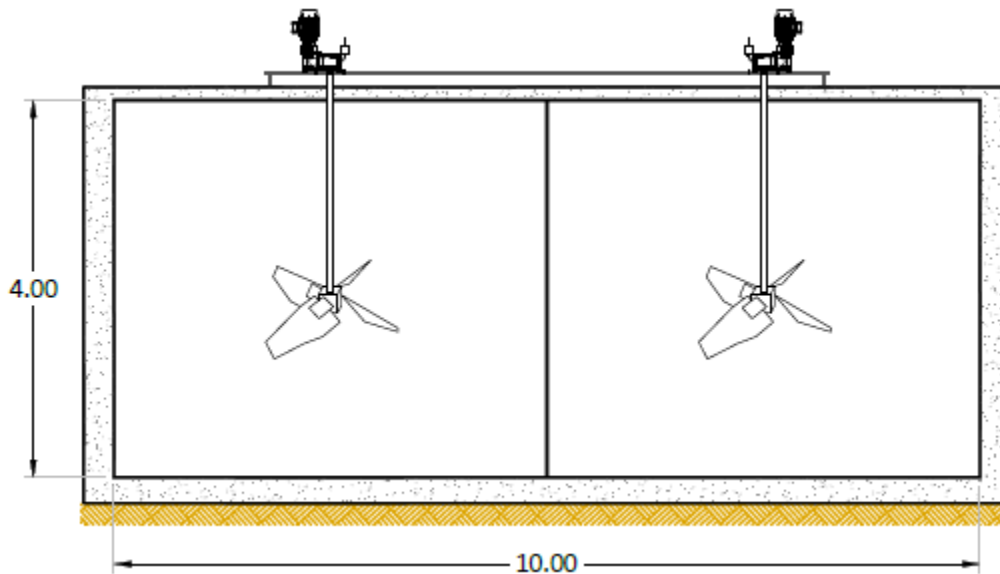


Figura 4-7. Corte B-B'. Tanque Floculador.

4.6.5 Sedimentación por Flotación

Al salir de la zona de floculación, el agua ingresará en la cámara de flotación donde el flujo y las partículas suspendidas se distribuirán suavemente a través de la sección transversal de la zona de sedimentación. El agua clarificada saldrá por los canales ubicados en la parte superior del tanque y los lodos serán arrastrados constantemente en el fondo hacia un cárcamo de donde será bombeado.

El diseño de los tanques sedimentadores partió de los criterios mencionados en la **Tabla 4-8** para tanques rectangulares de flujo horizontal con decantadores tubulares o de placas.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 4-8. Criterios típicos de diseño para tanques rectangulares de flujo horizontal.

Criterios típicos para diseñar tanques rectangulares de flujo horizontal con decantadores tubulares o de placas		
Parámetro	Unidades	Valor
Número mínimo de tanques	Sin Unidades	2.0
Tasa de carga superficial	m/h	3.8-7.5
Tiempo de retención (con decantadores tubulares)	min	6-10
Tiempo de retención (con decantadores de placas)	min	15-25
Profundidad del agua	m	3-5
Velocidad máxima de flujo en decantadores de placa o tubulares	m/min	0.15
Fracción de tanque cubierta por los decantadores de placas o tubulares	%	<75
Ángulo de placa o tubular	deg	60
Dirección del flujo	-	Normalmente flujo ascendente a contracorriente
Número de Reynolds	Adimensional	<20,000
Número de Froude	Adimensional	>10 ⁻⁵

*Fuente: (Howe et al, 2017)

Se propusieron tanques de flotación rectangular.

1. Al igual que en el tanque floculador (mezcla lenta), el gasto de diseño utilizado fue:

$$Q_{MD} = \left(1.9 \frac{m^3}{s}\right) \left(86,400 \frac{s}{d}\right) = 164,160 m^3/d$$

Partiendo de los cuatro bloques de tratamiento de floculación, se propondrán 4 bloques de tratamiento de flotación, cada uno de ellos contará con 4 unidades, resultando un total de 16 unidades.

2. Se determinó el área de sedimentación; de acuerdo con la **Tabla 4-8**, se propuso una carga superficial de 4.16 m/h (100 m³/d·m²).

$$C_S = \frac{Q_{MD}}{A_x} \therefore A_x = \frac{Q_{MD}}{C_S} = \frac{164,160 m^3/d}{100 m^3/d \cdot m^2} = 1,641.6 m^2$$

3. Se calculó el área de sedimentación requerida para cada unidad.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$A_{tanque} = \frac{1,641.6 \text{ m}^2}{16 \text{ tanques}} = 102.6 \text{ m}^2$$

4. Se propuso un ancho de **10 m** para cada tanque.
5. Se calculó la longitud de la zona de sedimentación.

$$L_{sedm} = \frac{102.6 \text{ m}^2}{10 \text{ m}} = 10.26 \text{ m}^2 \approx 10.20 \text{ m}^2$$

6. Se prosiguió a calcular la longitud total del tanque, considerando que el módulo de sedimentación ocupe el 75% éste. Ver **Figura 4-8**.

$$L_T = \frac{10.20 \text{ m}^2}{0.75} = 13.6 \text{ m} \approx 13.80 \text{ m}$$

7. Se propusieron valores para la profundidad lateral del agua (SWD). Ver **Figura 4-9**.

$$SWD = 0.4 \text{ m} + 0.5 \text{ m} + 0.5 \text{ m} + 2 \text{ m} = 3.4 \text{ m} + 0.6 \text{ m} = 4 \text{ m}$$

8. Para la calcular la Velocidad de aproximación, se utilizó la siguiente expresión.

$$V_{aprox} = \frac{10,260 \text{ m}^3/d}{3.4 \text{ m} \times 10 \text{ m}} = 301.76 \frac{\text{m}}{d} \therefore 0.0035 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Este valor se encuentra muy cercano a lo recomendado por Howe et al, por lo que se toma como bueno.

Revisión Hidráulica

9. Para revisar que el flujo no sea turbulento, se emplea el Número de Reynolds y para revisar que exista flujo horizontal sin retromezcla, se usa el Número de Froude, con las siguientes expresiones.

$$Re = \frac{V Rh}{\nu}$$
$$F = \frac{V_f^2}{g Rh}$$

Es necesario contar con el valor de la viscosidad cinemática a 11.6°C; para ello se interpolaron los siguientes valores.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Tabla 4-9. Viscosidad cinemática del agua a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Viscosidad Cinemática (m ² /s)
10	1.3x10 ⁻⁶
11.6	1.252x10⁻⁶
15	1.15x10 ⁻⁶

*Fuente: (Mott, 2006)

El diámetro hidráulico de acuerdo con el proveedor de panel de tubos es de 50 mm = 0.05 m.

$$Rh = \frac{D}{4} = \frac{0.05 \text{ m}}{4} = \mathbf{0.0125 \text{ m}}$$

En los tanques de alta tasa, V_f es la velocidad de flujo de los tubos, por lo tanto:

$$V_f = \frac{Q}{A_{\text{tanque}} \sin 60^\circ} = \frac{1.9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / 16 \text{ tanques}}{102.6 \text{ m}^2 \sin 60^\circ} = \mathbf{0.0013 \text{ m/s}}$$

$$\therefore Re = \frac{0.0013 \frac{\text{m}}{\text{s}} (0.0125)}{1.252 \times 10^{-6}} = \mathbf{12.98 < 20,000} \therefore \text{SE ACEPTA}$$

El número de Reynolds es menor a 20,000, lo que asegura no habrá turbulencia.

$$F = \frac{(0.0013 \text{ m/s})^2}{9.81 \text{ m/s}^2 (0.0125)} = \mathbf{1.37 \times 10^{-5} > 10^{-5}} \therefore \text{SE ACEPTA}$$

10. Para el diseño de los canales del efluente, se propusieron 7 canales de sección cuadrada de 0.4 m de alto, separados a cada 1.25 m.

11. Para terminar con el diseño, se revisó la carga sobre los vertedores.

$$h_{\text{vert}} = \frac{\frac{164,160 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{16 \text{ tanques}}}{7(10.20 \text{ m} \times 2\text{m})} = \mathbf{71.85 \frac{\text{m}^3}{\text{d} \cdot \text{m}^2} < 300 \frac{\text{m}^3}{\text{d} \cdot \text{m}^2}} \therefore \text{SE ACEPTA}$$

El agua ahora clarificada saldrá por la parte superior de la cámara de flotación a través de los canales. Cada cámara de flotación tendrá dimensiones de 13.80 m x 10 m x 4 m. Se contará con 4 unidades de flotación por cada bloque de tratamiento.

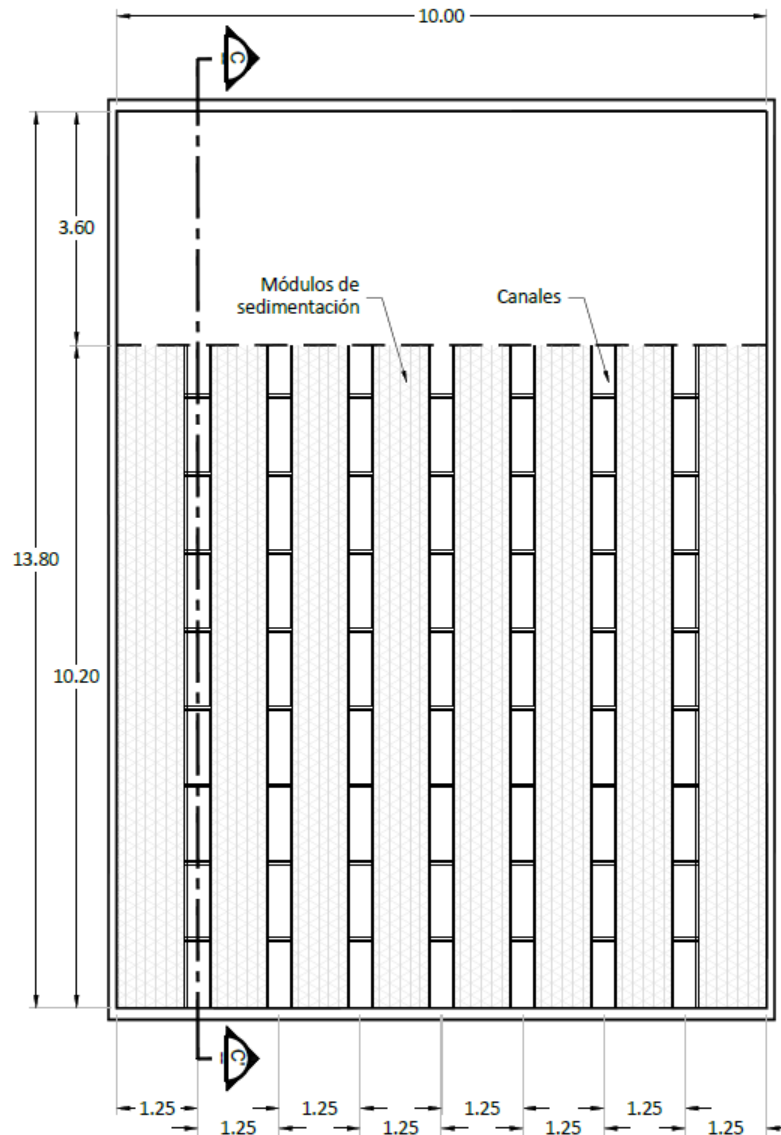


Figura 4-8. Planta. Tanque de Sedimentación por Floculación.

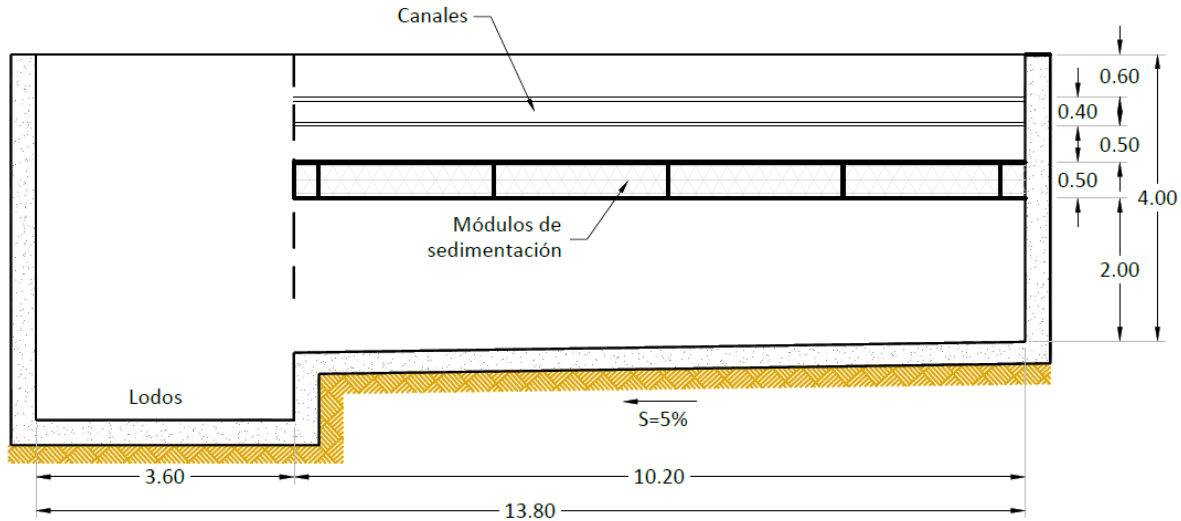


Figura 4-9. Corte C-C'. Tanque de Sedimentación por Flotación.

4.6.6 Filtración

El agua clarificada que sale de cada unidad de flotación se coleccionará en un canal que distribuirá el agua a los 16 filtros con los que contará la Planta.

Para el sistema de filtración, se usará un lecho doble de arena-antracita; el tipo de control de la filtración será a tasa alta y nivel constante.

Tabla 4-10. Principales características de los filtros.

Características	Filtros Lentos	Filtros Rápidos	Filtros de Alta Tasa
Tasa de filtración	2-5 (<12 m/d)	120 m/d	180-400 m/d
Medio	Arena	Arena	Arena y Antracita
Distribución del medio	No estratificado	Estratificado: fino a grueso	Estratificado: grueso a fino
Duración de carrera	20-60 días	12-36 horas	12-36 horas
Pérdida de carga	Inicial: 0.6 m Final: 1.2 m	Inicial: 0.3 m Final: 2.4-3 m	Inicial: 0.3 m Final: 2.4-3 m
Agua de lavado	No requiere	2-4% del agua filtrada	6% del agua filtrada
Profundidad del medio	0.6-1.0 m	0.60-0.75 m	Antracita: 0.4-0.6 m Arena: 0.15-0.3 m
Profundidad de grava	0.30 m	0.30-0.45 m	0.30-0.45 m
Drenaje	Tubería perforada	Tubería perforada con Fondo Falso	Tubería perforada con Fondo Falso

*Fuente: Apuntes Dr. Enrique César Valdez



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



De acuerdo con la **Tabla 4-10**, se propuso una tasa de filtración de $400 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, correspondiente a filtros de Alta Tasa.

1. El gasto de diseño utilizado fue:

$$Q_{MD} = \left(1.9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \left(86,400 \frac{\text{s}}{\text{d}}\right) = 164,160 \text{ m}^3/\text{d}$$

2. Se calculó el área de filtración (A_f), como el gasto de diseño (Q) entre la tasa de filtración (V_a).

$$V_a = \frac{Q}{A_f} ; A_f = \frac{Q}{V_a} = \frac{164,160 \text{ m}^3/\text{d}}{400 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}} = 410.4 \text{ m}^2$$

Se limitó el área superficial máxima por caja de filtro a 100 m^2 , con el fin de limitar el volumen de lavado del filtro.

3. Se calculó el número de cajas de filtro.

$$\text{No. de cajas de filtro} = \frac{410.4 \text{ m}^2}{100 \text{ m}^2} = 4.1 \rightarrow 4 \text{ cajas}$$

4. Se calculó el área requerida por módulo.

$$A_m = \frac{410.4 \text{ m}^2}{4 \text{ cajas}} \Rightarrow 102.6 \text{ m}^2$$

5. Se calculó la nueva tasa de filtración (V_a).

$$V_a = \frac{Q}{A_f} = \frac{164,160 \text{ m}^3/\text{d}}{4 (100 \text{ m}^2)} = 410.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

Como este valor sigue estando en el rango para filtro de Alta Tasa, se acepta.

Hidráulica de filtración de los medios filtrantes

Se determinó la velocidad de filtración para los filtros.

$$V_a = \left(102.6 \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \left(\frac{1 \text{ d}}{86,400 \text{ s}}\right) = 1.19 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Para determinar la pérdida de carga a través de los lechos filtrantes, se utilizaron los siguientes datos. Debido a que los materiales filtrantes presentan porosidades diferentes, se hará el análisis de cada medio por separado, sumando al final, las pérdidas de carga de cada uno.

Tabla 4-11. Datos de proyecto para medios filtrantes.

Datos		
Características	Arena	Antracita
T (agua)	11.6 °C	11.6°C
μ (viscosidad dinámica a 11.6°C)	0.00125 N·s/m ²	0.00125 N·s/m ²
ρ_w (densidad del agua a 11.6°C)	999.58 kg/m ³	999.58 kg/m ³
V _a (velocidad de filtración)	1.19x10 ⁻³ m/s	1.19x10 ⁻³ m/s
ρ_p (densidad del material)	2650 kg/m ³	1500 kg/m ³
L (profundidad del filtro)	0.30 m	0.50 m
d _p (diámetro de partícula)	0.00055 m	0.0008 m
e (porosidad)	0.38	0.50
CU (coeficiente de uniformidad)	<1.5	<1.5
ϕ (factor de forma de las partículas)	0.85	0.85

Arena

Se consideró que el filtro rápido de arena tenía un lecho de arena de 0.30 m de profundidad (L), de material uniforme con partículas de 0.55 mm de diámetro (d_p), densidad de 2,650 kg/m³ (ρ_p), una porosidad (e) de 0.38, un factor de forma (ϕ) de 0.85.

Retomando datos previos, para T_{min} = 11.6 °C, se tenían la siguiente densidad (ρ_w) y viscosidad dinámica del agua (μ):

$$\rho_w = 999.58 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

1. Se calculó el número de Reynolds (Re) para la tasa de filtración actual (V_a).

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_a d_p}{\mu} = \frac{(0.85) \left(999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(1.19 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$$Re = 0.44 < 1 \therefore \text{Flujo laminar}$$



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



2. Se calculó el factor de fricción debido al arrastre provocado al pasar el agua entre los granos (f').

$$f' = 150 \frac{1 - e}{Re} + 1.75 = 150 \frac{(1 - 0.38)}{0.44} + 1.75 = \mathbf{213.11}$$

3. Se calculó la pérdida de carga debida a la fricción a través del lecho de partículas de tamaño uniforme.

$$h_f = f' \frac{L(1 - e)V_a^2}{e^3 g d_p} = \frac{(213.11)(0.3 \text{ m})(1 - 0.38) \left(1.19 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{(0.38)^3 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})} = \mathbf{0.19 \text{ m}}$$

Como esta es la pérdida de carga a abatir, se necesita tener un tirante de al menos 0.19 m cuando el filtro está limpio. Para filtro sucio se recomienda un 50% más, es decir, un tirante de al menos 0.38 m.

Antracita

Se consideró que el filtro rápido de antracita tenía un lecho de 0.50 m de profundidad (L), de material uniforme con partículas de 0.80 mm de diámetro (d_p), densidad de 1,500 kg/m³ (ρ_p), una porosidad (e) de 0.50, un factor de forma (ϕ) de 0.85.

4. Se calculó el número de Reynolds (Re) para la tasa de filtración actual (V_a).

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_a d_p}{\mu} = \frac{(0.85) \left(999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(1.19 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$$Re = \mathbf{0.65 < 1 \therefore \text{Flujo laminar}}$$

5. Se calculó el factor de fricción debido al arrastre provocado al pasar el agua entre los granos (f').

$$f' = 150 \frac{1 - e}{Re} + 1.75 = 150 \frac{(1 - 0.50)}{0.65} + 1.75 = \mathbf{117.13}$$

6. Se calculó la pérdida de carga debida a la fricción a través del lecho de partículas de tamaño uniforme.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$h_f = f' \frac{L(1-e)V_a^2}{e^3 g d_p} = \frac{(117.13)(0.5 \text{ m})(1-0.50) \left(1.19 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{(0.50)^3 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})} = \mathbf{0.04 \text{ m}}$$

Como esta es la pérdida de carga a abatir, se necesita tener un tirante de al menos 0.04 m cuando el filtro está limpio. Para filtro sucio se recomienda un 50% más, es decir, un tirante de al menos 0.08 m.

Sumando ambas cargas, se obtendrá el tirante que se debe considerar por encima del material filtrante.

$$h_{fT} = 0.38 \text{ m} + 0.08 \text{ m} = \mathbf{0.46 \text{ m}}$$

Hidráulica de retrolavado

Para determinar la profundidad del lecho fluidizado, es decir, la altura hasta la que el material se expandirá en el retrolavado, se hizo el siguiente análisis; ambos resultados se sumarán y se obtendrá la altura a la que irán los canales.

Arena

1. Se calculó la velocidad de sedimentación terminal (V_t) del medio con la ecuación de Stokes para flujo laminar y se revisó el número de Reynolds (Re).

$$V_t = \frac{g(\rho_p - \rho_w) d_p^2}{18 \mu} = \frac{(9.81 \text{ m/s}^2) \left(2,650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{18 \left(0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}\right)} = \mathbf{0.22 \text{ m/s}}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) \left(999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0.22 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$$Re = \mathbf{82.25 > 1 \therefore \text{Flujo transicional}}$$

2. Con este valor de número de Reynolds (Re) se calculó el coeficiente de arrastre C_D , se calculó la velocidad de sedimentación terminal (V_t) del medio con la ecuación para flujo transicional ($1 < Re < 10^4$), se revisó el número de Reynolds (Re) y se comparó éste con el obtenido en el paso anterior. Este es un proceso iterativo que termina cuando el Re obtenido sea igual (o bastante parecido) al Re con el que se inició el cálculo.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{82.25} + \frac{3}{\sqrt{82.25}} + 0.34 = \mathbf{0.96}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{(2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.96 (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}}$$
$$V_t = \mathbf{0.11 \text{ m/s}}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$Re = 41.12 < 82.25 \therefore \text{Seguir iterando}$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{41.12} + \frac{3}{\sqrt{41.12}} + 0.34 = \mathbf{1.39}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{(2,650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})}{1.39 (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}}$$
$$V_t = \mathbf{0.09 \text{ m/s}}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.09 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$Re = 33.65 < 41.12 \therefore \text{Seguir iterando}$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{33.65} + \frac{3}{\sqrt{33.65}} + 0.34 = \mathbf{1.57}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{(2,650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.55 \times 10^{-3} \text{ m})}{1.57 (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}}$$
$$V_t = \mathbf{0.08 \text{ m/s}}$$



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) \left(999.58 \frac{kg}{m^3}\right) \left(0.08 \frac{m}{s}\right) (0.55 \times 10^{-3} m)}{0.00125 \frac{N \cdot s}{m^2}}$$

$$Re = 29.90 < 33.65 \therefore \text{Seguir iterando}$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{29.90} + \frac{3}{\sqrt{29.90}} + 0.34 = 1.69$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 m/s^2) \frac{\left(2,650 \frac{kg}{m^3} - 999.58 \frac{kg}{m^3}\right) (0.55 \times 10^{-3} m)}{1.69 \left(999.58 \frac{kg}{m^3}\right)}}$$

$$V_t = 0.08 m/s$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) \left(999.58 \frac{kg}{m^3}\right) \left(0.08 \frac{m}{s}\right) (0.55 \times 10^{-3} m)}{0.00125 \frac{N \cdot s}{m^2}}$$

$$Re = 29.90 = 29.90 \therefore \text{Fin de la iteración}$$

Por lo tanto, la velocidad de sedimentación terminal correcta es $V_t = 0.08 m/s$.

3. Se calculó la velocidad de retrolavado con la siguiente expresión, considerando la porosidad del lecho fluidizado (e_{fb}) como 0.7.

$$e_{fb} = \left(\frac{V_B}{V_t}\right)^{0.22}$$

$$0.7 = \left(\frac{V_B}{0.08 m/s}\right)^{0.22} ; V_B = 0.015 m/s$$

4. Se calculó la profundidad del lecho fluidizado (L_{fb}) con la siguiente expresión.

$$L_{fb} = L \frac{(1 - e)}{(1 - e_{fb})} = (0.3 m) \frac{(1 - 0.38)}{(1 - 0.51)} = 0.40 m$$



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Antracita

5. Se calculó la velocidad de sedimentación terminal (V_t) del medio con la ecuación de Stokes para flujo laminar y se revisó el número de Reynolds (Re).

$$V_t = \frac{g (\rho_p - \rho_w) d_p^2}{18 \mu} = \frac{(9.81 \text{ m/s}^2) \left(1,500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{18 \left(0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}\right)} = \mathbf{0.14 \text{ m/s}}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) \left(999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.14 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$$\mathbf{Re = 76.13 > 1 \therefore \text{Flujo transicional}}$$

6. Con este valor de número de Reynolds (Re) se calculó el coeficiente de arrastre C_D , se calculó la velocidad de sedimentación terminal (V_t) del medio con la ecuación para flujo transicional ($1 < Re < 10^4$), se revisó el número de Reynolds (Re) y se comparó éste con el obtenido en el paso anterior. Este es un proceso iterativo que termina cuando el Re obtenido sea igual (o bastante parecido) al Re con el que se inició el cálculo.

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{76.13} + \frac{3}{\sqrt{76.13}} + 0.34 = \mathbf{0.99}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{\left(1,500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.99 \left(999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}}$$

$$\mathbf{V_t = 0.07 \text{ m/s}}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) \left(999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.07 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$$\mathbf{Re = 38.06 < 76.13 \therefore \text{Seguir iterando}}$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{38.06} + \frac{3}{\sqrt{38.06}} + 0.34 = \mathbf{1.45}$$



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{(1,500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{1.45 (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}}$$
$$V_t = 0.06 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$Re = 32.62 < 38.06 \therefore$ Seguir iterando

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{32.62} + \frac{3}{\sqrt{32.62}} + 0.34 = 1.60$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{(1,500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{1.60 (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}}$$
$$V_t = 0.05 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.05 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$Re = 27.18 < 32.62 \therefore$ Seguir iterando

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 = \frac{24}{27.18} + \frac{3}{\sqrt{27.18}} + 0.34 = 1.79$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{C_D \rho_w}} = \sqrt{\frac{4}{3} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{(1,500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{1.79 (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}}$$
$$V_t = 0.05 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\phi \rho_w V_t d_p}{\mu} = \frac{(0.85) (999.58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (0.05 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0.8 \times 10^{-3} \text{ m})}{0.00125 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

$Re = 27.18 = 27.18 \therefore$ Fin de la iteración



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Por lo tanto, la velocidad de sedimentación terminal correcta es $V_t = 0.05 \text{ m/s}$.

7. Se calculó la velocidad de retrolavado con la siguiente expresión, considerando la porosidad del lecho fluidizado (e_{fb}) como 0.8.

$$e_{fb} = \left(\frac{V_B}{V_t} \right)^{0.22}$$

$$0.8 = \left(\frac{V_B}{0.05 \text{ m/s}} \right)^{0.22} ; V_B = 0.18 \text{ m/s}$$

8. Se calculó la profundidad del lecho fluidizado (L_{fb}) con la siguiente expresión.

$$L_{fb} = L \frac{(1 - e)}{(1 - e_{fb})} = (0.5 \text{ m}) \frac{(1 - 0.50)}{(1 - 0.55)} = 0.55 \text{ m}$$

9. Se obtuvo la profundidad total de los lechos fluidizados, sumando ambos resultados.

$$LT_{fb} = 0.40 \text{ m} + 0.55 \text{ m} = 0.95 \text{ m}$$

Cuando el filtro entre en la etapa de retrolavado, el material se expandirá hasta 0.95 m, por lo tanto, a esta altura irán los canales.

El agua de lavado se colectará en un tanque con capacidad para almacenar el volumen de agua generado por los lavados de filtros; cada unidad de filtración será de dimensiones de 17 m x 6 m x 3 m.

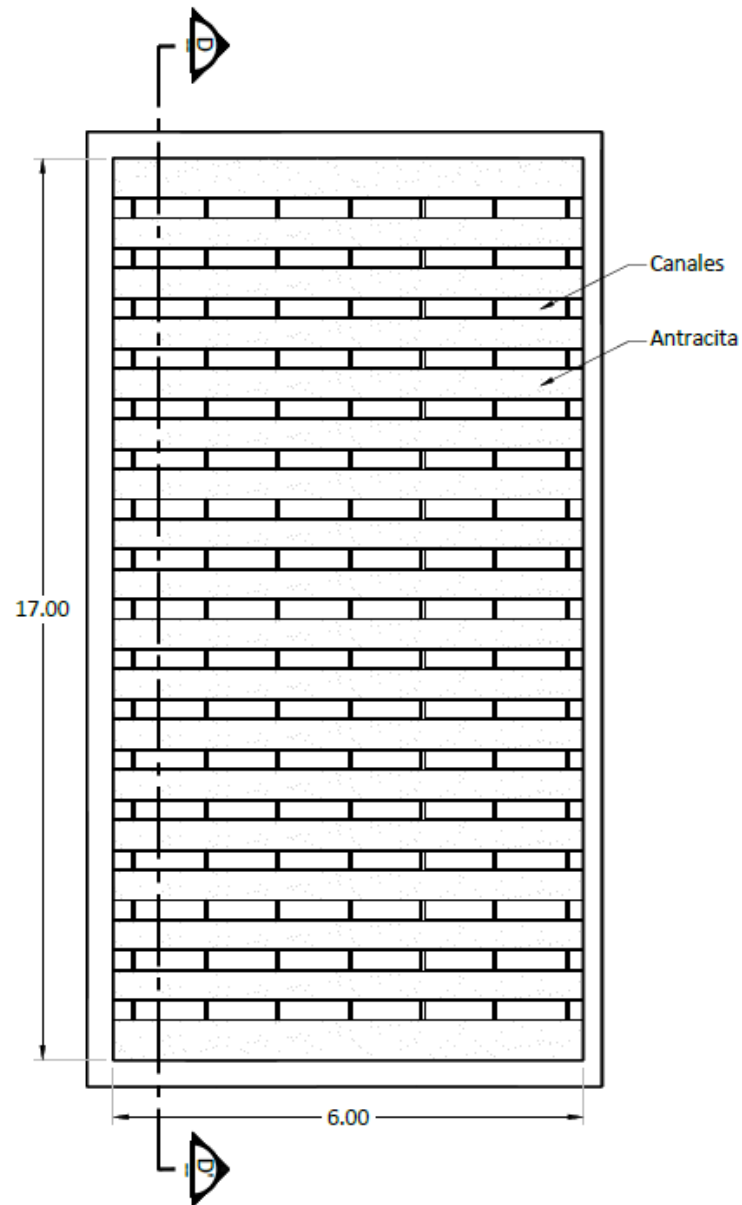


Figura 4-10. Planta. Tanque de Filtración.

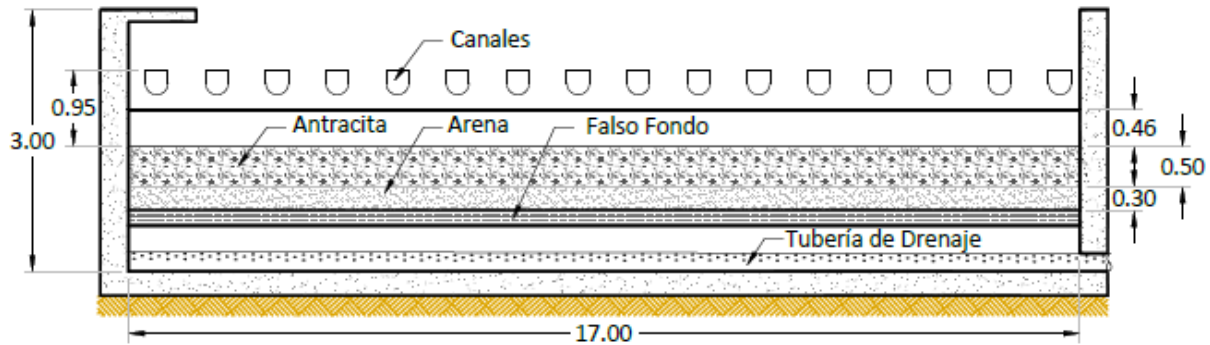


Figura 4-11. Corte D-D'. Tanque de Filtración.

4.6.1 Ajuste de pH y desinfección (Postcloración)

Debido a la adición de sulfato de aluminio, existe la posibilidad que el pH descienda por debajo de los valores que indica la NOM-127-SSA1-1994, por ello, se preverá el ajuste de pH con la adición de sosa cáustica y así, aumentar el pH en caso de ser necesario.

Por último, el agua será nuevamente clorada con cloro gas antes de ser colectada en el tanque de agua tratada; este tanque tendrá una capacidad de 7,986 m³. El tanque de agua tratada contará con un depósito integrado que fungirá como cisterna de agua potable; este depósito tendrá una capacidad de 1506.6 m³, suficiente para satisfacer la demanda de agua de toda la Planta. El agua potabilizada saldrá de la Planta por una tubería de acero de 96" hacia el tanque Venaderos en la Ciudad de León, Guanajuato.



Figura 4-12. Planta. Tanque de Postcloración.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



Figura 4-13. Corte E-E'. Tanque de Postcloración.

4.6.2 Tratamiento de Lodos

El lodo colectado de las unidades de flotación y el lodo sedimentado del tanque de agua de lavado, serán mezclados y enviados a la estación de deshidratación que consistirá en tres unidades de equipos combinados de filtro banda y mesa espesadora; estos equipos tendrán la capacidad para retener el 95% de sólidos. El lodo deshidratado será transportado en camiones hasta el sitio de disposición final, un monorelleno que se encontrará dentro del terreno de la PP.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



CONCLUSIONES

A partir de la información disponible del proyecto El Zapotillo para su licitación en 2009, de la Ingeniería Básica realizada en 2011, de los diferentes monitoreos realizados para comprobar la calidad del agua del río Verde, y de la ingeniería básica realizada en la presente tesina se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Debido a que los principales parámetros identificados que incumplen la NOM-127-SSA1-1994 fueron arsénico, aluminio, calcio, conductividad, DBO, DQO, dureza, flúor, hierro, manganeso, pH, entre otros, se propuso un tren de tratamiento convencional capaz de llevar las concentraciones de estos parámetros a los límites máximos permisibles establecidos por la norma; éste incluye etapas para la corrección del pH, oxidación, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, así como el manejo y disposición de los lodos producto.
2. Tomando en cuenta que la mayoría de los muestreos se realizaron en temporada de estiaje, los resultados obtenidos para el diseño fueron conservadores y con un alto índice de seguridad, ya que las concentraciones grandes de fluoruros presentes corresponden a las peores condiciones que se podrían tener en la presa.
3. El predio disponible para la construcción de la PP cuenta con el desnivel suficiente para el funcionamiento por gravedad del sistema.
4. Se preverá que la PP cuente con la instrumentación para la medición de los siguientes parámetros y los sensores necesarios para medir los caudales de entrada a los tanques.

Tabla 5-1. Parámetros que analizar en cada proceso de tratamiento.

Parámetros Analizados	
Proceso	Parámetro
Entrada	pH, SST, Turbidez, Fe, Mn, Al, Nitrógeno amoniacal, THM, Fluoruros, Alcalinidad, Ca
Tras oxidación	pH, Nitrógeno amoniacal
Tras coagulación	pH, Alcalinidad
Tras flotación	pH, SST, Turbidez, Fe, Mn, Al, Fluoruros
Tras filtración	pH, SST, Turbidez, Fe, Mn, Al, Fluoruros
Tras desinfección	pH, Cloro libre residual, Alcalinidad, Ca

5. Se hicieron las consideraciones técnicas necesarias basadas en la bibliografía y normatividad aplicable para sustentar el dimensionamiento de los tanques de los diferentes procesos de tratamiento de la PP.
 - Con la adición de permanganato de potasio en la etapa de preoxidación, se oxidará la materia orgánica presente en el agua de la presa y se evitará la formación de trihalometanos después de la cloración. La adición de ácido sulfúrico permitirá reducir el pH del agua y así prepararla para el proceso de remoción de fluoruros.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



- Se añadirá cloro gas en el agua ya libre de materia orgánica, para oxidar los metales pesados presentes. El volumen del tanque permitirá almacenar el agua durante máximo 4.5 horas para que se puedan apagar las bombas durante las horas pico y de esta forma, se reduzca el consumo de energía eléctrica.
 - En la coagulación se añadirá sulfato de aluminio para ajustar la alcalinidad y el pH. Se contará con 3 cámaras de 5 m x 5 m x 5 m con agitador mecánico donde se dosificará el coagulante.
 - Para la floculación se propusieron 8 tanques con impulsores rotatorios de eje vertical; las dimensiones de cada tanque serán de 10 m x 5 m x 4 m.
 - En la sedimentación por flotación se buscó eliminar la materia suspendida de forma efectiva y en el menor tiempo posible, así como reducir la turbidez, color, algas y materia orgánica presente. Se propusieron 16 tanques de 13.8 m x 10 m x 4 m.
 - Para el proceso de filtración se contará con 16 tanques de 17 m x 6 m x 4 m compuesto por un lecho filtrante dual de 30 cm de arena y 50 cm de antracita; ésta es una excelente solución para la remoción de sólidos finos que puedan ser removidos en la clarificación.
 - En la postcloración se dosificará cloro gas previo al tanque de agua tratada.
 - El tanque agua tratada tendrá una capacidad de 7,986 m³ donde el agua podrá ser almacenada para su futura conducción por el acueducto y distribución al a ciudad de León, Guanajuato.
6. Con este proyecto se pretende garantizar el suministro de agua potable a más de 2 millones 400 mil habitantes de León y los Altos de Jalisco y así reducir la sobreexplotación de sus acuíferos.



TESINA PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA



BIBLIOGRAFÍA

NOM-127-SSA1-1994 Norma Oficial Mexicana. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.

NOM-052-SEMARNAT-1993 Norma Oficial Mexicana, que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

CONAGUA. (2015). Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada. En CONAGUA, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México, D.F.

CONAGUA. (2015). Evaluación Rápida de Plantas Potabilizadoras. En CONAGUA, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*.

CONAGUA. (s.f.). *Modificación al Proyecto: Presa El Zapotillo, para Abastecimiento de Agua Potable a Los Altos de Jalisco y a la Ciudad de León, Guanajuato*.

IMTA. (2009). *Actualización del estudio de calidad del agua del Río Santiago (desde su nacimiento en el Lago de Chapala, hasta la Presa Santa Rosa)*.

INEGI. (s.f.). *Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:250,000*. Obtenido de Sistema de Información del Agua.

Metcalf & Eddy. (s.f.). *Wastewater Engineering Treatment/Disposal/Reuse*. McGraw Hill.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. México : Pearson.

SAPAL. (2014). *Presa El Zapotillo*. Obtenido de Proyectos Prioritarios: <http://www.sapal.gob.mx/proyectosprioritarios/presaelzapotillo>

Vera, L. D. (diciembre-marzo de 2014-2015). *Presa El Zapotillo, Jalisco, México*. Obtenido de La resistencia de Temacapulín ante un proyecto extractivista inmerso en irregularidades e impunidad del gobierno mexicano.: <http://entretextos.leon.uia.mx/num/18/PDF/ENT18-5.pdf>