



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO DE LA OPERACIÓN DE LOS FILTROS EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE VIZCACHAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

NITZA XAVIERA MIRANDA VALLEJOS

PROFESOR GUÍA:
JUAN CARLOS SANHUEZA NAVARRETE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BORIS TRUMPER SILBERMAN
YARKO NIÑO CAMPOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Aguas Andinas S.A.

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniera Civil
POR: Nitza Xaviera Miranda Vallejos
FECHA: 01/05/2020
PROF. GUÍA: Juan Carlos Sanhueza Navarrete**

**ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO DE LA OPERACIÓN DE LOS FILTROS EN PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE VIZCACHAS**

El agua es esencial para la vida, pero es un recurso limitado. Por lo que es necesario contar con un tratamiento que impida daños a la salud y a la vez sea aproveche el uso del agua.

El trabajo de título tiene como objetivo realizar un estudio de eficiencia de los filtros en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Vizcachas de la empresa sanitaria Aguas Andinas, estudiando la eficiencia de dos tipos de filtros en cuanto a la calidad del efluente y la eficiencia de operación. Para estudiar la calidad de agua del afluente se compara la turbiedad efluente de los filtros con la normativa nacional, internacional y con el desafío propio de la empresa Aguas Andinas que consiste que todas las mediciones se encuentren bajo 1 UNT. La eficiencia de operación de los filtros se estudiará con a la pérdida de carga de los filtros durante el ciclo de filtración y el comportamiento del lecho filtrante en el proceso de lavado. Para llevar a cabo este trabajo se debe recolectar la información y depurar los datos para realizar una evaluación estadística de la calidad del agua filtrada y una modelación Machine Learning de los datos de perdida de carga.

El resultado del trabajo de título presenta que la turbiedad en el efluente de los filtros de la PTAP Vizcachas cumple en un 100% la norma chilena, un 96 % en el desafío de la empresa y 56,10% en la normativa internacional, que exige un 95% de las mediciones bajo 0,3 UNT. Se espera que al renovar todos los filtros la turbiedad mejore y logre la normativa internacional mínimo en un 72,8% de las mediciones. En cuanto a los resultados operacionales, es recomendable respetar la tasa y nivel de diseño, aumentar las horas de filtración, realizando los estudios previos, para disminuir el gasto de agua. En cuanto a la modelación, sería necesario tener datos por un mayor tiempo, así el modelo es más robusto y representativo.

*“Pantalón cortito,
Bolsita de los recuerdos,
Pantalón cortito,
Con un solo tirador.”*

Leonardo Favio.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi mamá, que siempre ha tenido fe en mí y me ha motivado a ponerme metas y darle pa' delante. A mi hermana, por estar siempre ahí y soportarme tanto. Las amo. A mi papá, que, aunque este a la distancia sé que su apoyo es incondicional. A mis abuelos, por el cariño y apoyo que me han entregado siempre.

A Doooooon Seba, por su amor, comprensión, alegría volcánica, por el aguante al bUlla, por los desayunos, por los "Because soap is soap", por los "De nada". Gracias por ayudarme a llegar al final de esta etapa, y gracias por todo lo demás.

A los amigos cahuineros del colegio, Myrla, Chichi, Cami y Oso. Han sido fundamentales en mi vida. Gracias por las pizzas, los cafecitos, los copetitos, las conversaciones y por estar siempre conmigo.

A los amigos de bachi, Vane, Poli, Vivi, Sol y Mauri. En particular al Guille, fuiste el sol de mi etapa universitaria, porque tienes el cuerpo y la cara de niño juvenil, porque eres como talliani... y con salsa blanca. Gracias por tanto amigo.

Al flamenco y su gente, que me sacaron de los malos momentos.

A Don Juan Carlos, por aceptarme como su alumna de memoria y estar siempre disponible para guiarme resolver dudas.

A Boris y Pablo, y a toda el área de procesos, por darme la oportunidad de trabajar con ellos en Aguas Andinas y por enseñarme en el transcurso de la memoria.

A mi profesor de comisión Yarko Niño, por su buena disposición y colaboración en el desarrollo de esta memoria.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Contenido del informe.....	3
Capítulo 2: Antecedentes bibliográficos.....	5
2.1 Planta de Tratamiento de Agua Potable Vizcachas.....	5
2.2 Marco Regulatorio.....	6
2.3 Requerimientos de calidad de agua potable.....	6
2.3.1 Normativa nacional.....	7
2.3.2 Organización Mundial de Salud.....	7
2.3.3 Normativa Internacional.....	8
2.4 Tratamiento de Agua Potable.....	9
2.5 Proceso de filtración a través de lecho granular.....	11
2.5.1 Mecanismo de transporte.....	11
2.5.2 Factores de eficiencia.....	13
2.5.3 Tasa de filtración rápida.....	14
2.6 Calculo teórico de rendimiento de filtros por retención de turbiedad.....	23
2.7 Machine Learning.....	24
Capítulo 3: Caracterización filtros de estudio en PTAP Vizcachas.....	26
3.1 Filtros Leopold.....	27
3.1.1 Diseño.....	27
3.1.2 Operación.....	28
3.2 Filtros Multicrete II.....	29
3.2.1 Diseño.....	29
3.2.2 Operación.....	30
Capítulo 4: Metodología.....	32
4.1 Estudio de la eficacia y eficiencia del tratamiento sobre la calidad del agua.....	33
4.2 Estudio de la eficacia operacional del tratamiento.....	33
4.2.1 Pérdida de carga.....	33
4.2.2 Retrolavado.....	35
4.3 Modelación Machine Learning.....	35
Capítulo 5: Análisis y visualización de datos de la operación de los filtros.....	36
5.1 Calidad del agua de filtración.....	36
5.2 Pérdida de carga.....	43
5.2.1 Tasa de filtración.....	46
5.2.2 Temperatura.....	48
5.2.3 Calidad del agua de entrada.....	52

5.3	Lavado	57
5.3.1	Pérdida de carga inicial.....	57
5.3.2	Tiempo de carrera.....	59
5.3.3	Lavado según inspección visual	61
Capítulo 6:	Tratamiento de los datos y generación de modelo de Machine Learning	63
6.1	Resultado modelación.....	67
6.2	Simulación	69
Capítulo 7:	Conclusión.....	73
7.1	Análisis y conclusiones.....	73
7.2	Recomendaciones	76
Capítulo 8:	Bibliografía.....	77

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Parámetros de turbiedad mensuales exigidos en la norma chilena (Norma NCh 409/1, 2005).....	7
Tabla 2.2. Parámetros de turbiedad establecido por la Organización Mundial de Salud (World Health Organization, 2017).	7
Tabla 2.3. Parámetros de turbiedad exigidos en España, Francia, Canadá y Estados Unidos.	8
Tabla 3.1. Tiempos de carrera según relación SST/Turbiedad.....	29
Tabla 5.1 Resultados eficiencia de turbiedad filtros Muticrete II	41
Tabla 5.2. Resultados eficiencia de turbiedad PTAP Vizcachas.....	43
Tabla 5.3. Resumen de información de turbiedad de entrada a los filtros Leopold.	55
Tabla 5.4 Resumen de información de turbiedad de entrada a los filtros Multicrete II.	56
Tabla 6.1. Resultados modelación filtros Leopold.....	67
Tabla 6.2. Errores para evaluar la modelación de filtros Leopold	68
Tabla 6.3. Resultado modelación filtro Multicrete II.	68
Tabla 6.4. Errores para evaluar la modelación de filtros Multicrete II	69
Tabla 6.5. Media y desviación estándar de las variables para filtros Leopold.....	70
Tabla 6.6. Datos simulación filtros Leopold.	72

Índice de Ilustraciones

Figura 2.1. A la izquierda mapa ubicación geográfica Complejo Vizcachas en Santiago y a la derecha mapa satelital PTAP Vizcachas.	5
Figura 2.2 Esquema de tipificación de filtros.....	10
Figura 2.3. Mecanismos de Transporte (Sparks, 2016).....	13
Figura 2.4. Diagrama de drenaje filtros Leopold tipo S (Xylem, Inc, 2012).	19
Figura 2.5. Sistema de drenaje filtros Multicrete II (Westech, 2013).	20
Figura 3.1. Plano PTAP Vizcachas.	27
Figura 4.1. Plano de Filtros de estudio.	32
Figura 4.2. Ejemplo de limpieza de datos en filtros Leopold.....	34
Figura 5.1. Información del filtro 38 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.....	38
Figura 5.2. Turbiedad instantánea filtros Multicrete II.	39
Figura 5.3. Turbiedad promedio mensual filtros Multicrete II.....	40
Figura 5.4. Turbiedad instantánea de agua filtrada PTAP Vizcachas promedio mensual....	42
Figura 5.5. Pérdida de carga promedio mensual según la hora de carrera de los filtros Leopold.....	44
Figura 5.6. Pérdida de carga promedio mensual según la hora de carrera de los filtros Multicrete II.....	45
Figura 5.7. Pérdida de carga según tasa de filtración para filtros Leopold.	47
Figura 5.8. Pérdida de carga según tasa de filtración para filtros Multicrete II.	48
Figura 5.9. Temperatura del agua al inicio de la planta, arriba la temperatura instantánea y abajo el promedio mensual.	49
Figura 5.10. Gráfico de cajas de Pérdida de carga mensual para filtros Leopold.	50
Figura 5.11 Gráfico de cajas de Pérdida de carga mensual para filtros Multicrete II.	51
Figura 5.12. Turbiedad instantánea de entrada a los filtros Leopold.	53
Figura 5.13. Turbiedad promedio mensual de entrada a los filtros Leopold.....	54
Figura 5.14. Turbiedad de entrada a los filtros Multicrete II, arriba la turbiedad instantánea y abajo el promedio mensual.	56
Figura 5.15. Serie de tiempo de pérdida de carga inicial en filtros Leopold.....	58
Figura 5.16. Serie de tiempo de pérdida de carga inicial en filtros Multicrete II.....	59

Figura 5.17. Serie de tiempo de longitud de carrera en filtros Leopold.	60
Figura 5.18. Serie de tiempo de longitud de carrera en filtros Multicrete II.	61
Figura 5.19. Serie fotográfica del retrolavado en filtro Leopold.	62
Figura 5.20. Serie fotográfica del retrolavado en filtro Multicrete II.	62
Figura 6.1. Campana de Gauss de variable pérdida de carga y la raíz de la pérdida de carga para filtros Leopold.	64
Figura 6.2. Interpretación geométrica de regularización L2.	66
Figura 6.3. Interpretación geométrica de regularización L1.	67
Figura 6.4. Resultado simulación en condiciones estándares mensuales para filtros Leopold.	71
Figura A.1. Información del filtro 35 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.	86
Figura A.2. Información del filtro 36 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.	86
Figura A.3. Información del filtro 37 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.	87

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

El agua cubre más del 70 % de la superficie del planeta. La podemos encontrar en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. Es la fuente y el sustento de la vida. Contribuye a regular el clima del mundo dado a su gran capacidad calorífica. Las aguas salinas dan cuenta de casi el 97,5 % del agua del planeta y únicamente un 2,5% es agua dulce. De esto los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie rápidamente accesible sólo equivale al 1%. Esta baja cantidad de agua superficial se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%) y el porcentaje restante es representado por el vapor atmosférico y los ríos (Gleick, 1993). A medida que cambie el clima, cambiarán también los recursos de agua dulce sobre los que se basan nuestras sociedades y economías, por lo que es imperante que también cambie nuestra forma de relacionarnos con ella.

Por tanto, para ser sustentables se debe entender que el agua es un recurso limitado, por lo que es necesario ser lo más eficiente posible para no desperdiciar el recurso. Esto, desde el punto de vista de las empresas sanitarias, se puede hacer, siendo cuidadosos durante los procesos de tratamiento de agua potable, a través de mejoramiento en los procesos con el objetivo de no desperdiciar agua, evitando también las pérdidas durante la distribución y durante los procesos de tratamiento de aguas servidas, para reutilizar el agua luego del tratamiento, de forma de industrial o de riego.

Por otra parte, el agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio, esto incluye el cumplimiento de agua de consumo libre de contaminación, ya que, si existe contaminación del agua, esto tendrá una gran repercusión en la salud de las personas. Y el proceso de filtración es uno de los procesos en el cual se eliminan partículas y algunos microorganismos protozoos, como la *Giardia* o los quistes de *Cryptosporidium*, lo que evitará daños a la salud.

El objetivo del proceso de filtración de agua potable es retener partículas y microorganismos, partículas que no se retienen en los procesos previos del tratamiento, como la sedimentación y

microorganismos protozoos, como la *Giardia* o los quistes de *Cryptosporidium*, que no son destruidos en su totalidad durante la desinfección (Hsu, 2003). El mecanismo consiste en sistemas de filtración que tratan el agua pasándola a través de lechos de materiales granulares, como arena, carbón y/o antracita, donde se retienen los contaminantes.

La memoria de título tiene como objetivo realizar un estudio de los filtros operando en la planta de tratamiento de agua potable Vizcachas, dentro del Complejo Vizcachas de Aguas Andinas. El Complejo Vizcachas es donde se concentran tres plantas de tratamiento de agua potable (en adelante PTAP), estas son Vizcachas, Vizcachitas y Ruiz Tagle. Aquí es donde se produce el agua potable proveniente del río Maipo que abastece a la mayor parte de la ciudad de Santiago, en la Región Metropolitana, que luego de ser tratada es distribuida a la población como agua potable por la empresa sanitaria Aguas Andinas.

El estudio consiste en estudiar la eficiencia de los filtros, en cuanto a la calidad del efluente y operación. Para estudiar la calidad del efluente se corrobora el cumplimiento de la Norma Chilena de agua potable (NCh. 409/1) el 100% del tiempo y para aumentar la exigencia, como un desafío propio de la empresa Aguas Andinas, se disminuye el límite de turbiedad de salida de los filtros a menos de 1 UNT, para así acercarse a la normativa europea y norteamericana en parámetros de turbiedad. Para la eficiencia de los filtros en cuanto a operación se estudia su pérdida de carga, realizando una modelación de Machine Learning para ver la posibilidad de aumentar las horas de carrera de filtrado y así disminuir la cantidad de lavados, lo que llevará a disminuir también uso de agua durante el tratamiento. Finalmente se realiza una simulación para proponer técnicas de mejoramiento en el modo de operación, para así aprovechar al máximo el uso del agua.

1.2 Objetivos

El objetivo principal es realizar una evaluación operacional del funcionamiento de los filtros en PTAP Vizcachas, para optimizar el uso de agua.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Recolectar información de turbiedad, pérdidas de carga, nivel y caudal de los filtros de la PTAP Vizcachas durante el periodo 2017 al 2019.

- Realizar un análisis de la información del proceso de filtración para reconocer sus variables más importantes.
- Construir un modelo estadístico que incorpore las variables más importantes del proceso de filtración y hacer una simulación bajo condiciones que disminuyan el uso de agua.
- Evaluar cómo se comportan los filtros en la práctica con respecto de la teoría.
- Proposición de sugerencias en la operación de los filtros conforme a los resultados de la simulación

1.3 Contenido del informe

Capítulo 2. Revisión bibliográfica:

Contiene el marco regulatorio que rige el sector de las empresas sanitarias abarcando los parámetros de calidad que son atingentes al estudio y una comparación con la normativa internacional de estos parámetros. Luego, se describe el tratamiento convencional de agua potable, enfocándose en el proceso de filtración.

Capítulo 4. Caracterización filtros de estudio en PTAP Vizcachas:

Se resume la memoria de proyecto de los nuevos filtros (denominados Leopold por la marca del proveedor de su equipamiento) y la renovación de los filtros existentes denominados Multicrete II (nombre del modelo de equipamiento), para conocer sus características físicas y de operación.

Capítulo 3. Metodología:

Se detalla el procesamiento de los datos, desde el ingreso a la web perteneciente a Aguas Andinas de donde se descargan los datos, el ordenamiento y la limpieza de estos, para finalmente describir la modelación en base a los datos de la operación de los filtros, usando Machine Learning.

Capítulo 5. Análisis y visualización de datos de la operación de los filtros:

Evaluación de la operación de los filtros de diferentes aspectos del proceso de filtración como: calidad del agua filtrada (turbiedad a la salida de los filtros) y su eficiencia en cuanto a los cumplimientos normativos nacionales y los desafíos de la empresa. También se estudia la eficiencia de operación de los filtros, revisando la pérdida de carga

de los filtros en relación con los factores de eficiencia. Estos factores son turbiedad afluente, tasa de filtración y temperatura. De igual forma, se estudia la operación en base a la efectividad de los lavados, evaluando la pérdida de carga inicial de la carrera y el tiempo de carrera.

Capítulo 6. Tratamiento de los datos y generación de modelo de Machine Learning:

Se realiza la modelación para identificar la influencia de los factores de eficiencia que aumentan la pérdida de carga durante la filtración. Con los resultados de la modelación se realiza una simulación, aumentando las horas de carrera de filtración, para verificar su funcionamiento en condiciones diferentes a las actuales.

Capítulo 7. Conclusión:

Se presentan las conclusiones y recomendaciones finales del estudio, analizando las alternativas más adecuadas acorde a las distintas evaluaciones, tanto operacionales como en el ámbito de sustentabilidad. Se entrega una propuesta de mejoramiento para la eficiencia del proceso de filtración de agua potable, evaluando dónde se generan las mayores pérdidas de agua.

Capítulo 2: Antecedentes bibliográficos

2.1 Planta de Tratamiento de Agua Potable Vizcachas

El Complejo Vizcachas, recinto propiedad de la empresa sanitaria Aguas Andinas S.A. se encuentra ubicado en el sector del Cajón del Maipo, en Av. Camilo Henríquez #540, comuna de Puente Alto, Región Metropolitana. Aproximadamente a 29 kilómetros del centro de Santiago hacia el Suroriente, como se ve en la Figura 2.1; coordenadas geográficas 33°35'39'' latitud Sur y 70°32'23'' longitud Oeste.

El Complejo Vizcachas cuenta con tres plantas de tratamiento de agua potable que operan de forma independiente, denominadas Vizcachas, Vizcachitas e Ingeniero Antonio Tagle.

En la PTAP Vizcachas se realiza tratamiento tipo convencional de forma gravitacional, este tratamiento será descrito con más detalle en este capítulo, a grandes rasgos consiste en separar los contaminantes del agua cruda de forma física, apoyada por reacciones físico-químicas producto de la dosificación de coagulantes y floculantes, y para terminar el tratamiento se realiza la adición de insumos para cloración y fluoración del agua tratada. Las principales construcciones de la PTAP Vizcachas se encuentran señalados con pines blancos en la Figura 2.1. Dentro de ellos se encuentran los filtros Multicrete II y Leopold, que son el objeto de estudio de esta memoria.

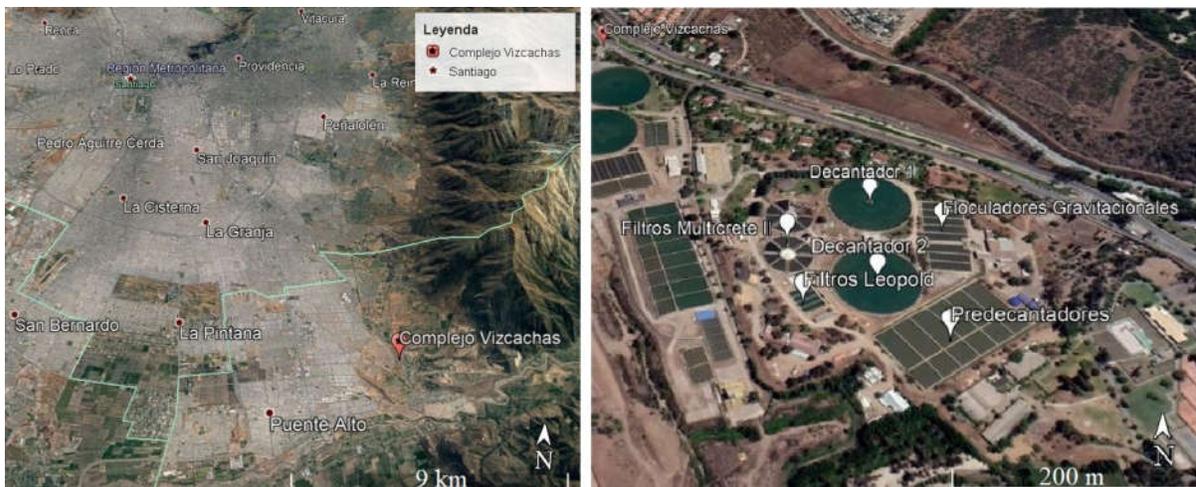


Figura 2.1.A la izquierda mapa ubicación geográfica Complejo Vizcachas en Santiago y a la derecha mapa satelital PTAP Vizcachas.

2.2 Marco Regulatorio

La legislación, normativa y reglamentación sanitaria que se incluye en esta sección abarca todos los temas referidos a los servicios de agua potable que son considerados para el desarrollo de este estudio.

- ☑ Ley 18.902/1990: Ley de la creación de la Superintendencia de Servicios Sanitarios como fiscalizador de los prestadores de servicios sanitarios.
- ☑ DFL 382/1988: Ley General de Servicios Sanitarios relativo a las disposiciones generales de explotación, concesión, fiscalización del cumplimiento de las normas de los servicios sanitarios y su relación con el Estado y los usuarios.
- ☑ NCh 409/1: Norma Chilena de Calidad del Agua Potable que establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional, proveniente de cualquier servicio de abastecimiento. Esta norma se aplica para el agua potable en el sistema de distribución y muestreada como se establece en NCH 409/2.

2.3 Requerimientos de calidad de agua potable

La norma chilena 409 de calidad del agua potable proveniente de cualquier servicio de abastecimiento establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional, considerando parámetros microbiológicos, turbiedad, sustancias químicas de importancia para la salud, elementos radioactivos, parámetros organolépticos y de desinfección. Esta norma se aplica para el agua potable en el sistema de distribución y muestreada como se establece en NCh 409/2.

Dentro de los parámetros importantes para el estudio de la presente memoria está la turbiedad. La turbiedad es una medida o indicador del grado de transparencia de un líquido, y en el agua potable, es uno de los indicadores más importantes a la hora de analizar su calidad, ya que refleja una aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser indicio de contaminación. (World Health Organization Pan American Health Organization, 1985)

A continuación, se comparan los requisitos que propone la Organización Mundial de Salud y los requisitos legales que se establecen para este parámetro que se aplican tanto en Chile, como en diferentes países del mundo.

2.3.1 Normativa nacional

La norma chilena, en parámetros de turbiedad exige una media mensual menor a 2 UNT en la red de distribución de agua potable y otros requisitos a cumplir en simultáneo como se ve en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de turbiedad mensuales exigidos en la norma chilena (Norma NCh 409/1, 2005).

Parámetro	Requisito
Turbiedad media mensual	Menor a 2 UNT.
Muestras con turbiedad > 4 UNT	<input checked="" type="checkbox"/> 5% cuando se analizan 20 o más muestras mensuales. <input checked="" type="checkbox"/> Una muestra cuando se analizan menos de 20 muestras mensuales.
Muestras con turbiedad entre 10 y 20 UNT	No pueden presentarse en un mismo periodo de 24 horas.
Muestras con turbiedad > 20 UNT	No puede presentarse ninguna en el mes.

2.3.2 Organización Mundial de Salud

La Organización Mundial de Salud establece metas como un principio de precaución para asegurar un alto nivel de protección a la salud de la población, las metas de turbiedad se ven en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros de turbiedad establecido por la Organización Mundial de Salud (World Health Organization, 2017).

Parámetro	Requisito
Turbiedad	Para tratamiento convencional el 95% de las muestras mensuales debe ser menor a 0,3 UNT y ninguna debe superar 1 UNT a la salida de los filtros.

2.3.3 Normativa Internacional

Los requisitos de diferentes países se ven en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros de turbiedad exigidos en España, Francia, Canadá y Estados Unidos.

País	Requisito
España. (Ministerio de la Presidencia de España., 2003)	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 1.0 UNT a la salida de la planta de tratamiento para todas las muestras realizadas. <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 5.0 UNT en las redes de distribución <p>Cuando exista una turbidez mayor 5 UNT se determinarán, en la salida de la planta, si la autoridad sanitaria lo considera oportuno, revisar presencia de <i>Cryptosporidium</i> u otros microorganismos o parásitos.</p>
Francia. (Ministère de la Santé et des Solidarités, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 1.0 UNT para todas las muestras realizadas.
Canadá. (Santé Canada, 2012)	<p>Para filtración convencional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 0.3 UNT en al menos el 95% de las mediciones, ya sea por ciclo de uso de los filtros, o por mes, sin exceder nunca 1.0 UNT <p>Para filtración lenta de arena y filtración de tierra de diatomeas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 1.0 UNT en al menos el 95% de las mediciones, ya sea por ciclo de uso de los filtros, o por mes, sin exceder nunca 3.0 UNT <p>Para filtración por membrana:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 0.1 UNT en al menos el 99% de las mediciones por ciclo de uso de los filtros o por mes. Cuando se obtienen mediciones superiores a 0.1 NTU durante un período de más de 15 minutos en la misma membrana de filtro, se debe investigar inmediatamente la integridad de esta membrana.
Estados Unidos. (United States Environmental Protection Agency, 2009)	<p>Para filtración convencional y filtración:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 0.3 UNT en al menos el 95% de las mediciones, ya sea por ciclo de uso de los filtros, o por mes, sin exceder nunca 1.0 UNT. <p>Los sistemas que usan filtración diferente a la filtración convencional deben seguir los límites del estado:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Igual o menor a 5.0 UNT

2.4 Tratamiento de Agua Potable

En el tratamiento convencional de agua potable los procesos que se desarrollan consisten en un pretratamiento, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

El pretratamiento consiste en un proceso previo, que tiene como objetivo remover material flotante y suspendido del agua cruda, iniciando en un sistema de rejas manuales o mecánicas, de diferentes medidas, que permiten frenar la entrada de material flotante de grandes dimensiones a la planta provenientes del cauce natural, y también se puede aplicar tratamiento de desarenación y predecantación para eliminar material suspendido, esto se recomienda cuando la turbiedad del agua cruda es muy elevada (mayor a 1000 UNT) e interfiere con los procesos de tratamiento convencional (Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, República de Colombia, 2000). Luego se realiza la coagulación, proceso donde se adicionan reactores químicos, estos pueden ser coagulantes metálicos, como sales de aluminio o hierro, o polielectrolitos, que se mezclan con el agua, produciendo que los coloides y el material suspendido se desestabilice y se aglomere en flóculos, que se transforman en un material sedimentable y filtrable. Los químicos y el tiempo de retención serán determinados con los resultados de las pruebas de jarras, pruebas que tienen como fin que se mantenga la turbulencia necesaria para completar las reacciones químicas durante el tiempo de retención. Inmediatamente después de la coagulación, pasan a un floculador. Aquí se busca mejorar la aglomeración de pequeños flóculos a más grandes, para que sea aún más fácil realizar la decantación y la filtración y también busca minimizar la destrucción del flóculo. Cuando los flóculos se encuentran estabilizados, se lleva al sedimentador. En este proceso las partículas descienden por gravedad. La entrada al sedimentador debe estar diseñada de tal forma que el agua se distribuya igual y con velocidad uniforme. El tiempo de retención efectivo depende del diseño de la planta y la naturaleza de las aguas entrantes (Ahumada, Coagulación y Floculación [Material de clases], 2018).

Luego se realiza la filtración, el objetivo principal de la filtración es separar las partículas y microorganismos que no han quedado retenidos en los procesos previos de tratamiento (Brandt, 2016). En este capítulo se ahondará en el proceso de filtración, en particular, en filtros gravitacionales rápidos de lecho granular, ya que estos son los filtros más ocupados en los tratamientos de agua potable en Chile y son los filtros de estudio para esta memoria. Pero

existen diferentes tipos de filtros y diferentes formas de combinar estos tipos, como se puede ver en la Figura 2.2.

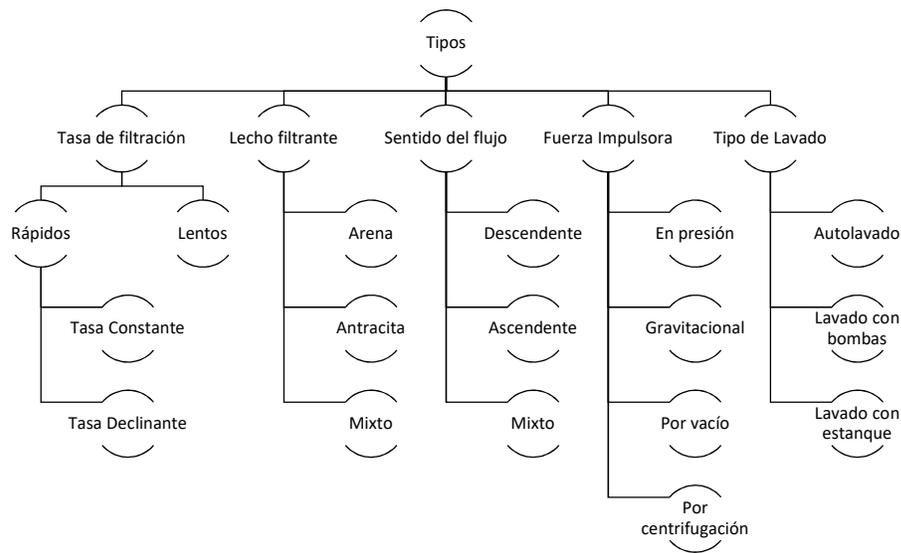


Figura 2.2 Esquema de tipificación de filtros.

Para terminar la potabilización del agua se realiza la desinfección, ya que, el agua filtrada no está completamente libre de bacterias y, antes de que el agua pase al suministro, debe desinfectarse con el fin de disminuir el riesgo enfermedades de origen hídrico, mediante la destrucción o inactivación de organismos patógenos, algunos organismos que pueden estar presentes en la fuente de agua cruda son bacterias como *Estafilococos*, *Escherichia coli* o *Salmonella*, Virus como *Norovirus* o *Rotavirus*, Protozoos, que en su mayoría quedan retenidos en la filtración, como la *Giardia* y *Cryptosporidium* (Ahumada, Desinfección [Material de clase], 2018).

Un punto importante en el tratamiento de agua es otorgarle continuidad a los procesos, para que no se vea interrumpida la distribución de agua potable a la población. Para esto se recomienda que las plantas de agua potable tengan al menos dos unidades por cada proceso del tratamiento que permita la continuidad de la operación al encontrarse alguna de estas unidades en mantención o fuera de servicio.

Téngase en cuenta que, el diseño de los procesos de tratamiento de agua potable depende de la naturaleza y calidad del agua a tratar, las variables estacionales, y la calidad deseada del agua de salida. Una planta de tratamiento de agua potable debe considerar la peor condición que

pueda existir durante el funcionamiento de la planta para realizar el diseño de ésta (Baruth, 2004).

2.5 Proceso de filtración a través de lecho granular

La filtración a través de lecho granular es un proceso físico fundamentado en el paso de una mezcla sólido-fluido a través de un lecho poroso, el cual retiene los sólidos y permite el paso del fluido. Se utiliza una filtración sobre lecho filtrante, cuando la cantidad de materias que deben retenerse es grande y la dimensión de las partículas contenidas en el agua es relativamente pequeña. La filtración presenta dos etapas, una de ellas es la carrera de filtración, que se define como el proceso de filtración de sólidos y la segunda etapa es el lavado del lecho filtrante (Brandt, 2016).

La filtración es un proceso importante en la eliminación de la *Giardia* o los quistes de *Cryptosporidium*, y es óptima llevando la turbidez a objetivos de menos de 0.1 UNT (Dullefont, 2006).

2.5.1 Mecanismo de transporte

Los principales mecanismos de filtración son físicos. Estos pueden ser sedimentación, intercepción, difusión hidrodinámica, atracción y repulsión. La contribución de cada mecanismo depende de la naturaleza del agua y su tratamiento químico (Amirtharajah, 1988).

Sparks (2016) define algunos de los mecanismos de transportes presentes en la filtración:

- El mecanismo de transporte más influyente en la filtración es la retención del paso de las partículas dentro de los poros debido a fenómenos físicos, es decir, cuando los granos del lecho actúan como un colador. Esto se produce debido a que el lecho tiene un tamaño suficiente que permite que queden retenidas partículas en la superficie filtrante que se encuentra perpendicular al flujo del agua. Para lograr la eliminación efectiva de las partículas más pequeñas, generalmente es necesaria la adición de un coagulante para formar un flóculo, pero incluso las partículas de flóculo pueden ser muy pequeñas en comparación con el tamaño de un grano del medio filtrante.

- ☑ La intercepción consiste en que las partículas siguiendo una línea de corriente, entra en contacto con el medio filtrante y se retiene. Se supone que el flujo del agua tratada es laminar y la probabilidad de captura a través de este mecanismo depende de la relación de tamaño de partícula a poro, y el enlace que se forma entre la partícula y el medio filtrante. Una vez más, la velocidad del fluido puede tener un efecto en este proceso.
- ☑ El impacto inercial ocurre cuando la partícula no sigue la línea de flujo, sino que continúa en su camino existente para interceptar con el medio filtrante. La probabilidad de que esto ocurra depende de la velocidad del fluido.
- ☑ Otro mecanismo de retención, en menor medida, es la atracción electrostática, ocurre cuando la carga superficial de la partícula puede ser opuesta a la del poro en el lecho filtrante, haciendo que su camino se desvíe hacia el medio, donde permanece. Estos mecanismos son complejos y cualquier conclusión clara es de aplicación limitada. Las fuerzas de Van der Waals son bien conocidas como fuerzas atractoras entre las moléculas y, en teoría, se aplican a casi todos los materiales en el agua, pero su rango generalmente se limita a distancias mínimas de menos de 0.05 μm .

Dado que existen variados mecanismos de retención en la filtración, como se pueden ver esquematizados en la Figura 2.3, el tamaño de poro del medio informa el tamaño máximo de partícula que puede pasar, pero no el mínimo, más bien puede indicar la probabilidad de que se capture una partícula. Dentro de un cierto rango de tamaño de partícula, características de fluido y flujo, una partícula tiene una cierta probabilidad de captura. El lecho puede eliminar una proporción de partículas incluso varios cientos de veces más pequeñas que el tamaño de los granos del lecho.

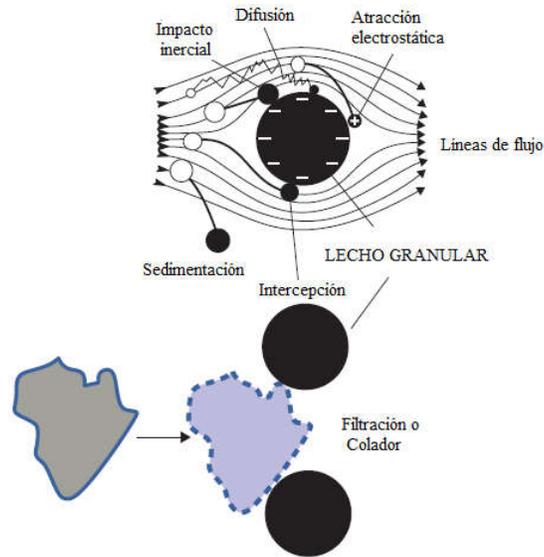


Figura 2.3. Mecanismos de Transporte (Sparks, 2016).

2.5.2 Factores de eficiencia

Según el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2004), los factores que determinan la eficiencia de filtración y su relación con la eficiencia de funcionamiento del filtro:

- ☑ Tipo de suspensión: Las características físicas y químicas de la suspensión afectan el comportamiento de los filtros, pudiendo llegar a ser más importante que el tamaño y clase de lecho filtrante:
 - ☑ Tamaño de partículas: Existe un tamaño crítico de partículas ($1\ \mu\text{m}$) que genera menos contacto entre las partículas suspendidas, dejando pasar la turbiedad, por eso es importante el proceso de coagulación y floculación, para mejorar la eficiencia del filtro.
 - ☑ Propiedad del agua afluyente: la existencia de algas en el afluyente influye en la formación de curvas de pérdida de carga más acentuada, disminuyendo la eficiencia del filtro, comparado con casos en que el afluyente solo posee partículas coaguladas de arcilla o sílice.
 - ☑ Dureza del flóculo: Los flóculos débiles tienden a fragmentarse y penetrar el medio, aumentando la turbiedad. En cambio, los flóculos resistentes no se fragmentan, pero producen una pérdida de carga mayor.

- ☑ Temperatura: A menor temperatura, es más lenta la remoción del flóculo porque disminuye la energía termodinámica de las partículas, existiendo menor retención en el filtro por mecanismo de difusión.
- ☑ Lecho filtrante: Las características del medio filtrante que influyen en la eficiencia de filtración, son: tipo de medio, granulometría y peso específico del material filtrante y espesor de la capa filtrante. Estas características deben seleccionarse de acuerdo con la calidad que se desea para el agua filtrada, los costos, la facilidad de adquisición de los materiales, y la existencia de personal calificado para operar las instalaciones. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta la duración de la carrera de filtración (capacidad de retención) y la facilidad de lavado.
- ☑ Tasa de filtración: A tasas muy altas (mayores a 20 m/h), disminuye eficiencia del filtro.
- ☑ Carrera de filtración: La duración de la carrera dependerá de la carga hidráulica disponible del filtro, cuando estas son mayores, las carreras de filtración resultan más largas. La duración de la carrera es típicamente de 24 a 60 horas. Las carreras más largas permiten ahorrar en el agua de lavado, pero alientan el crecimiento bacteriano en el lecho filtrante. Por lo tanto, es deseable restringir los largos máximos de funcionamiento a 48 horas en temperaturas de agua tibia y a 60 horas en temperaturas de agua fría.
- ☑ Lavado: Cualquier aumento apreciable en la frecuencia de lavado por encima del valor de diseño reduciría la producción por debajo del nivel de diseño.

2.5.3 Tasa de filtración rápida

La filtración rápida implica una tasa de filtración mayor, que a su vez conlleva una menor eficiencia de filtración, por lo que es necesario la existencia de procesos previos de tratamiento, para que la eficiencia no se vea afectada por el aumento de la tasa. Por otro lado, requiere menor necesidad de superficie y no se forma una capa activa biológica sobre el filtro (*schmutzdecke*), como en los filtros de tasa lenta (Huisman, 1974). Para un mejor rendimiento del filtro, se utiliza comúnmente un régimen de control que es el método de flujo o nivel constantes. Estos dividen el flujo equitativamente entre los filtros y permiten la filtración sin fluctuaciones en el nivel o la velocidad, que son esenciales para obtener buenos resultados de filtración (Arboleda, 1974). Para la eliminación de hierro, se recomienda una tasa entre 6 a 7.5 m³/h/m² y para la eliminación de manganeso aproximadamente de 15 a 18 m³/h/m². Cuando se usan los filtros aguas abajo de

los decantadores, se recomienda una tasa aproximada entre 6 a 12 m³/h/m², el límite mayor se utiliza cuando el agua, aguas arriba de los decantadores, se trata mediante una combinación de un coagulante y algún polielectrolito. A tasas de filtración superiores a 15 m³/h/m², la calidad del filtrado tiende a deteriorarse y a tasas superiores a aproximadamente 20 m³/h/m², la velocidad de aumento de la pérdida de carga se vuelve demasiado rápida. Cuando existe preocupación sobre la eliminación de la *Giardia* o los quistes de *Cryptosporidium* en los suministros de agua cruda, las tasas de filtración se limitan a aproximadamente 6 a 7 m³/h/m² para minimizar el riesgo de penetración de partículas. La acción biológica es prácticamente nula, pero a tasas muy bajas en ciertos casos se observa una nitrificación, a pesar de que el contenido de oxígeno es bajo, es suficiente y se encuentran en el agua bacterias nitrificantes en condiciones nutritivas favorables (Brandt, 2016).

La limpieza puede ser automática con retrolavado, pero requiere de lavados con un uso intensivo de agua filtrada. Para mejorar la eficiencia tanto del filtrado como de los lavados, es necesario recurrir al uso de químicos y sedimentación previa, y así es posible tratar aguas crudas de diferentes calidades (Scholz, 2016).

2.5.3.1 Lecho Filtrante

Ninguna especificación de medios única puede aplicarse universalmente para todas las aguas, la elección depende de: calidad del agua y los procesos aguas arriba del proceso de filtración, los objetivos de calidad del agua filtrada, el método de limpieza, la tasa de filtración y la longitud de los tramos del filtro. Es preciso que él o los materiales que componen el lecho se elijan cuidadosamente, tanto en su granulometría como en la altura de capa, de forma que el filtrado responda a la calidad deseada. Según las características de las partículas que deben retenerse, puede efectuarse la filtración sobre una capa de mayor o menor altura, de material homogéneo, sobre dos o varias capas de diferentes granulometrías o, por último, sobre una o varias capas de materiales de granulometría totalmente heterogénea y escalonada.

El tamaño del lecho se especifica en términos de su tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad. El tamaño efectivo (d_{10}) es el diámetro de malla que deja pasar un 10% en peso del material, este tamaño va a determinar la luz de los intersticios. El coeficiente de uniformidad (C_u) da idea de la mayor o menor diversidad de tamaños, obtenida mediante la relación entre

diámetro de malla que deja pasar el 60% (d_{60}) y el 10% en peso del material (d_{10}) y es recomendable que sea menor a 2.

$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

En cuanto a la forma de los granos, la calidad del agua filtrada es similar, sin importar si se realiza con un material anguloso de granos redondos. Pero para una misma granulometría, el aumento de pérdida de carga es menor con granos angulosos que con granos redondos, ya que los granos angulosos se acoplan menos fácilmente unos con otros y dejan secciones de paso mayores.

Algunas características importantes del material son la atacabilidad y la friabilidad. La atacabilidad mide la degradación del filtro por acción de agentes agresivos. Para probar la atacabilidad, el material granular se sumerge en una solución de ácido sulfúrico al 5% durante 24 horas y se mide la variación de peso del material granular y esta variación debe ser menor al 2% para ser apta como lecho filtrante. Para esta prueba, también se puede usar ácido clorhídrico al 40% durante 24 horas, en este caso la pérdida de peso debe ser inferior al 5%. La friabilidad mide la formación de finos por desgaste del material, esta prueba es importante para evitar atascamientos en el proceso de lavado. Por lo tanto, es importante que el material sea duro y resistente. Para medir la friabilidad del material, se valora la cantidad del material desechable, es decir, que no tiene el mismo tamaño efectivo que la muestra original luego de ser triturado bajo condiciones normalizadas. Así, un material friable debe rechazarse, especialmente en el caso de un filtro que funcione con flujo de arriba hacia abajo y que se lave solamente con agua, ya que los finos que se formen producirán un atascamiento en superficie (BW, 1996).

La capacidad máxima de retención de sólidos de un filtro es una función de los vacíos, que es aproximadamente igual a 40 a 45% del volumen del lecho. En la práctica, solo alrededor de una cuarta parte de este espacio está disponible para la eliminación de sólidos. La carga de sólidos diseñada en los filtros de forma conservadora equivale a 350 g/m² para los filtros de arena, mientras que otros diseños no tan conservadores usan un valor de 1000 g/m². En los filtros de antracita sería mayor y es del orden de 700 g/m².

Se restringe el empleo de muchos medios en un lecho o de un lecho homogéneo de arena porque esto puede producir problemas durante el retrolavado, pudiendo implicar la desaparición de

algunos de los materiales granulares. Esto se puede contrarrestar usando capas separadas de materiales de filtro que tienen diferentes densidades y tamaños de grano, los materiales más densos están en el fondo del lecho y los menos densos en la parte superior. Un tipo de lecho de filtro multicapa de amplio uso es el filtro de dos capas que utiliza antracita sobre arena. El funcionamiento de este tipo de filtro puede ser de 1.5 a 3 veces más largo que con los medios de arena, debido a la capacidad de retener sólidos en toda la profundidad del lecho y a la tasa reducida asociada al aumento de pérdida de carga (Scholz, 2016). La proporción de tamaños de medios, antracita:arena, generalmente está en el rango de 2:1 a 4:1. Cuando los filtros se lavan por aplicación separada de aire y agua, la profundidad del lecho de antracita es del orden de 0,15 a 0,30 m con arena suficiente para dar una profundidad combinada de aproximadamente 0,75 m. La arena debe ser apoyada en la grava dependiendo del tipo de sistema de drenaje subterráneo utilizado. Para este tipo de lecho debe formarse una interfase de los dos materiales donde ellos se juntan, que no puede ser mayor a 0,15 m, la interfaz mixta es beneficiosa ya que reduce el vacío de la capa de antracita y produce una mejor calidad de filtrado, pero a expensas de una mayor pérdida de carga debido a una mayor retención de sólidos en suspensión.

En el lavado, el medio mixto se expande y se fluidiza. Las tasas de retrolavado se usan para proporcionar una expansión del 10 al 15% del lecho, con un lavado ocasional a una tasa más alta para proporcionar una expansión del lecho de hasta el 30%. Después de enjuagar a velocidades de fluidización, el lecho de dos capas se vuelve a asentar con la clasificación de las dos capas por densidad y tamaño de grano.

Las características del material granular utilizado en el lecho filtrante son las siguientes:

- ☑ Antracita: Consiste en partículas con alto contenido de carbono de diversos tamaños, duras y duraderas, que deben estar visiblemente libre de esquistos y arcilla. Puede remover hierro y manganeso en tamaños menores a 0,8 mm. Las fuentes de antracita (contenido de carbono de al menos 90%) se limitan a unos pocos países del mundo. Por lo tanto, existe una tendencia a utilizar carbón bituminoso de alto grado (contenido de carbono al menos 80%) en lugar de antracita. Esto es generalmente aceptable, siempre que no sea friable y pueda cumplir con los estándares de friabilidad, solubilidad y dureza del ácido. Las características de la antracita en cuanto a su granulometría son: tamaño

efectivo que varía entre 0,7 mm y 1,3 mm, gravedad específica de 1,4 a 1,45, porcentaje de vacío de aproximadamente el 50 y C_u de 1,5.

- ☑ Arena: Los criterios para elegir el tamaño de la arena depende de eficacia de los procesos anteriores a la filtración y las condiciones del agua al entrar al filtro, para saber el grado de remoción que se requiera en este proceso. Otro criterio para elegir el tamaño es la tasa de lavado, dado que a altas tasas se puede degradar el material, si éste es muy fino. Las características de la arena en cuanto a su granulometría, tamaño efectivo varía entre 0,55 mm y 0,75 mm, gravedad específica de 2,6 a 2,7.

En Chile, la normativa solo se refiere a la grava y a la arena para filtros, no incluye, por lo tanto, ninguna referencia a la antracita, a pesar de ser un material ampliamente utilizado como lecho filtrante. Si bien tiene un párrafo sobre la colocación de la grava, nada se dice de la colocación del resto del lecho filtrante, ni de la preparación del lecho para su entrada en servicio.

2.5.3.2 *Soportante lecho filtrante*

Lecho de soporte que sustenta la arena y antracita, debe ser grava, con características y dimensiones dependientes del sistema de drenaje adoptado. Las partículas deben ser de material duro, resistentes a golpes y a la abrasión, de superficie lisa y deben tener un conjunto mínimo de formas alargadas y planas, debe estar limpia y lavada. La grava más gruesa debe ser de 6,35 cm cuando la grava descansa directamente sobre un sistema lateral, y debe extenderse por encima de la parte superior de los laterales perforados. Se deben proporcionar no menos de cuatro capas de grava. En algunos casos se puede reemplazar este soporte por placas porosas diseñadas especialmente para funcionar como soporte.

2.5.3.3 *Sistema de drenaje*

El medio filtrante se coloca sobre un sistema para recoger el agua de la parte inferior del lecho de manera uniforme y para distribuir el aire y el agua uniformemente a través del lecho durante el lavado (Brandt, 2016).

En modelos Leopold tipo S, presentado en la Figura 2.4, que es uno de los filtros estudiados en esta memoria, comprende bloques de drenaje de polietileno de alta densidad, que se unen para formar laterales más largos. Los bloques incorporan un diseño lateral doble con un canal de recuperación de agua para asegurar un flujo de aire continuo y uniforme desde los orificios

superiores. Este canal permite al agua reintroducirse en el falso fondo y balancear las áreas de baja presión. Presentan orificios de 6 mm con poco espacio entre ellos. Esto proporciona una distribución uniforme de aire y agua de retrolavado y mejora la limpieza del medio filtrante. El diseño incorpora grava como medio soportante, para evitar la interrupción causada por el aire durante el retrolavado de aire y agua (Xylem, Inc, 2012).

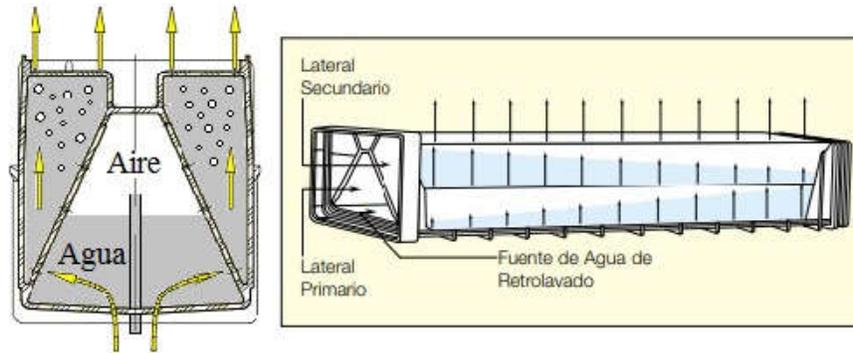


Figura 2.4. Diagrama de drenaje filtros Leopold tipo S (Xylem, Inc, 2012).

Los filtros en renovación en la PTAP Vizcachas, se han instalado con un sistema de drenaje Multicrete II. Este es un sistema de drenaje subterráneo mecánicamente fuerte y versátil para el retrolavado, permite distribución dual de agua y aire durante el retrolavado, con una distribución uniforme de ellos por todo el filtro. Durante el retrolavado, el agua se dosifica a través del orificio al final de cada conducto de salida. El aire se introduce a través del cabezal de la tobera de distribución de aire primario, luego se acumula debajo del falso fondo, formando un manto en toda la celda. La capa de aire empuja gradualmente el agua hacia abajo hasta que alcanza los orificios dosificadores de distribución secundaria en los lados de cada conducto de salida de la tobera. Este método preciso de dosificación obliga al aire a distribuirse uniformemente entre todos los tubos de escape. Esta combinación de dosificación con orificios de aire y agua garantiza una distribución uniforme, como se ve en la Figura 2.5 (Westech, 2013).

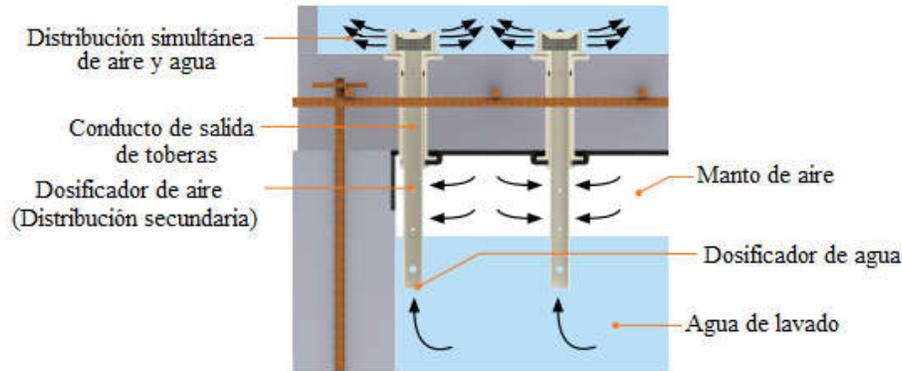


Figura 2.5. Sistema de drenaje filtros Multicrete II (Westech, 2013).

Los beneficios de este sistema de drenaje son, principalmente, la distribución uniforme de agua y aire, pero también es conveniente en cuanto a su instalación, ya que soporta variadas configuraciones de lechos filtrantes. Y, por último, presenta una mayor resistencia estructural y capacidad hidráulica que los drenajes de bloque.

2.5.3.4 Lavado

Los parámetros principales utilizados para iniciar un lavado del filtro son: la duración del funcionamiento del filtro, la pérdida de carga elevada o el deterioro de la calidad del filtrado medido por la turbiedad. En la mayoría de las instalaciones, los tres parámetros son monitoreados, pero solo los dos primeros se utilizan para automatizar el inicio de un ciclo de lavado del filtro. Ya que, la turbiedad se utiliza principalmente para dar una alerta temprana de presencia de microorganismos en el agua tratada (Brandt, 2016).

Los filtros de gravedad rápida que emplean arena graduada se lavan mediante la aplicación separada de aire y agua a través del lecho en la dirección inversa, el filtro se puede drenar hasta que el agua se encuentre unos centímetros por encima del lecho. Al inicio el aire se debe introducir a una baja tasa, de aproximadamente 6,5 a 7,5 mm/s, a través del sistema colector con el objetivo que se rompa la escoria superficial y se desprenda la suciedad de la superficie de los granos de arena. Esto es seguido por un flujo de agua hacia arriba a una velocidad cuidadosamente seleccionada para expandir y fluidizar el lecho. Bajo esta condición, los vacíos entre los granos de las arenas se incrementan y la rotación resultante de los granos y la consiguiente deserción entre los granos produce una acción de fregado para eliminar los depósitos unidos. La velocidad de lavado debe ser suficiente para lograr la velocidad de

fluidización con poca expansión del lecho. Aumentar la velocidad de retrolavado más allá de este estado sería contraproducente porque a medida que aumenta la distancia entre los granos de arena, se reduce la acción de fregado. Las altas tasas de retrolavado pueden provocar la pérdida de arena y el desperdicio de agua y energía. El canal de recolección de agua de lavado generalmente se coloca a unos 0,1 a 0,15 m por encima del lecho.

La velocidad del aire puede alcanzar los 16 mm/s, utilizando varias combinaciones de tasas de agua. La aplicación simultánea de aire y agua no se usa con medios de arena graduados, ya que esto mezclaría los medios y también podría provocar la pérdida de medios en el canal de recolección de agua de lavado. El lavado simultáneo de aire y agua se puede usar con medios finos si se coloca en drenajes de tipo bloque sin las capas de grava de soporte usadas en medios graduados. La pérdida de medios en este caso puede evitarse proporcionando canales de lavado elevados, terminando el flujo de aire antes de que el agua de lavado ascendente llegue a los canales y continuando solo con agua.

En el diseño del filtro de flujo descendente con lavado de flujo ascendente, es habitual que el filtro funcione con aproximadamente 1,5 a 2 m o más de profundidad de agua sobre el lecho. Hay algunos diseños que operan con una profundidad de agua mucho más pequeña que no se considera una buena práctica, ya que pueden surgir dificultades con grietas y barro en el lecho del filtro y la unión del aire, especialmente con altas tasas de filtración.

La duración de las fases de lavado depende del método de lavado y de la calidad del filtro. Para diseños con aire y agua aplicados por separado, la limpieza con aire dura de 3 a 4 minutos y el lavado con agua dura de 4 a 6 minutos. El período total que un filtro permanece fuera de línea para el lavado es de aproximadamente 30 a 45 minutos, lo que incluye aproximadamente 15 a 30 minutos para drenar el filtro dependiendo de la pérdida de carga del filtro. El consumo total de agua por lavado asciende a aproximadamente 2,5 volúmenes de lecho.

Para eliminar la mayor cantidad posible de agua sucia de retrolavado de la parte superior del filtro, antes de volver a llenarla y ponerla en uso, es común permitir que el agua filtrada ingrese al filtro y fluya ascendentemente a través de la parte superior del lecho hasta el canal de recolección de agua de lavado como la última etapa del retrolavado, esto aumenta el consumo total de agua de lavado a aproximadamente tres volúmenes de lecho.

Cuando el filtro vuelve al servicio después del lavado, hay un período corto, cuando la turbidez del filtrado es alta. Esto se debe al desplazamiento del agua de lavado residual que contiene sólidos desprendidos del lecho durante el lavado y también a la menor eficiencia de eliminación de sólidos de los medios recién lavados. Las opciones disponibles para reducir este efecto y dar tiempo para que el filtro 'madure' antes de devolverlo al servicio normal, es disminuir la tasa de la carrera los primeros 15 a 60 minutos de filtrado, para iniciar el filtro a un ritmo lento.

Es indispensable que, con este lavado, se devuelvan al lecho sus cualidades iniciales, sin las cuales, el filtro iría perdiendo eficiencia, y el material filtrante debería retirarse para su limpieza completa o para ser reemplazado.

La cantidad total de agua de lavado utilizada tiene una influencia importante en la economía de las obras de tratamiento, especialmente en relación con el rendimiento neto de una fuente. El agua de lavado total utilizada normalmente no debe exceder del 2 al 2.5% de la producción de agua filtrada.

2.5.3.5 Control de filtración rápida

Un régimen de control comúnmente utilizado es el método de flujo constante o nivel constante, en el que un canal de entrada común alimenta todos los filtros a través de compuertas sumergidas.

2.5.3.5.1 Flujo constante

Flujo constante consiste en una tasa constante de filtración y cualquier cambio en la tasa de filtración, como cuando se quita un filtro para lavar, debe ser lo más suave posible. El controlador más común utilizado es una válvula de control de caudal a la salida de cada filtro. A medida que el medio se obstruye progresivamente durante la ejecución del filtro, lo que aumenta es la pérdida de carga a través del filtro, por lo que el nivel de agua en la caja del filtro aumenta al máximo posible. La caída libre de agua en el filtro al comenzar el lavado, puede romper el flóculo frágil en pequeños fragmentos que pueden no eliminarse efectivamente en los filtros, para minimizar el daño del flóculo, por lo que se debe minimizar esta caída por debajo de 0,3 m. Este efecto también produce un avance de turbidez hacia el final de la ejecución del filtro.

2.5.3.5.2 Flujo declinante (Nivel constante)

Se mantiene un nivel constante, uniendo hidráulicamente el canal de entrada con todos los filtros, asegurando un nivel de agua común. En los filtros de velocidad decreciente, disminuye la tasa de filtración y la turbiedad a medida que la pérdida de carga en el filtro aumenta.

Debe contar con un vertedero de control, orificio o válvula que evite el vaciado del filtro al comienzo de las carreras. Empleando un controlador que mantenga una pérdida de carga total constante al abrirse gradualmente la válvula.

2.5.3.6 Pérdida de carga durante la filtración

Típicamente, cuando un filtro vuelve a estar en servicio después del lavado, la pérdida de carga a través de la cama, el sistema de drenaje y la salida del filtro debe ser inferior a aproximadamente 0,35 m. La tasa de aumento de la pérdida de carga es función de la capacidad de retención de sólidos del filtro, y es menor para los filtros de arena homogéneos gruesos que para los filtros de arena graduados; en este último se mejora mediante el uso de una capa de antracita. Cuando se alcanza la pérdida de carga máxima permitida, finaliza la ejecución del filtro. Normalmente, el margen de pérdida de carga para suciedad es de 1,5 m con todos los filtros en servicio. Esto debe aumentarse para tener en cuenta los filtros fuera de servicio para el lavado a contracorriente o mantenimiento (Ives, 1970).

2.6 Cálculo teórico de rendimiento de filtros por retención de turbiedad

Es necesario considerar la pérdida de rendimiento de los filtros por efecto de la acumulación de material en el medio filtrante, ya que esta implica una resistencia adicional al paso del flujo por el medio, lo que tendrá como consecuencia una distribución no homogénea del caudal entre los diferentes filtros. Esta resistencia desaparece una vez ejecutado el lavado sobre el filtro, ya que estos se ensucian de forma progresiva, y lineal, en el tiempo.

Por esto el último filtro lavado presenta la menor resistencia al paso del flujo con respecto al resto. De la misma forma, el filtro que lleva más tiempo en operación desde su lavado presentará la mayor resistencia al paso del flujo con respecto al resto. Este fenómeno se modela de la siguiente forma:

$$\Delta h(t) = \Delta h_0 \left(1 + A \frac{t}{T} \right)$$

Donde

$\Delta h(t)$: es la pérdida de carga en el filtro en el tiempo t

Δh_0 : es la pérdida de carga en el filtro limpio

A: factor de ajuste de pérdida de rendimiento del filtro

T: Tiempo de ciclo de lavado del filtro.

2.7 Machine Learning

Machine Learning es una disciplina científica del ámbito de la inteligencia artificial que crea sistemas que aprenden automáticamente, es decir, identifica patrones complejos en extensas bases de datos.

Para comenzar una modelación de aprendizaje automático existe una secuencia de pasos a seguir. Primero, es necesario obtener los datos y recopilarlos correctamente. Segundo, se limpian los datos, con la finalidad de eliminar las anomalías, y deshacerse de los datos que no son necesarios, convirtiendo los datos en algo con lo que realmente se puede trabajar. El tercer paso, es la integración, agregación y representación, donde se configuran los datos de una manera que sea directamente conducente a la minería de datos. De esta forma se debe obtener una base de datos central donde la información se almacena de forma agradable y ordenada. Estos tres pasos iniciales se explican en la metodología donde se apunta la extracción de datos desde la web y la forma de limpiarlos para realizar la modelación. Esta es la parte de la modelación que toma más tiempo, pero es imprescindible para que la modelación funcione correctamente. (Microsoft , 2019)

Luego está el cuarto paso que es el análisis y modelado. aquí se realiza la visualización de los datos y se lleva a cabo la minería de datos. Esto se realiza para comprender el comportamiento de los datos, cómo se relacionan las variables entre sí e identificar las que serán más útiles y cuáles no, antes de realizar la modelación. Cuando se visualizan los datos, es posible percatar diferentes anomalías en los datos, que no fueron eliminadas con la limpieza, por lo que es necesario volver al paso anterior, lo que vuelve a esta parte del proceso una secuencia iterativa donde se eliminan datos no deseados al visualizarlos. Finalmente, se realiza la interpretación,

donde se ve lo que se obtiene y se analiza, evaluando el uso que se le quiere dar a esta modelación, considerando los objetivos, limitaciones y riesgos.

Un último paso previo a la modelación, y luego de la visualización, es tratar los datos vacíos, ya que de haber datos vacíos la modelación no funciona.

Capítulo 3: Caracterización filtros de estudio en PTAP Vizcachas

El tratamiento en la PTAP Vizcachas consiste en un sistema de tratamiento convencional, de forma gravitacional, donde el agua del río Maipo es tratada inicialmente con un pretratamiento con floculadores mecánicos y predecantadores, luego pasa por floculadores gravitacionales y decantadores hasta llegar a los filtros, donde también se adiciona agua desde el Acueducto Laguna Negra (Acueducto que transporta agua desde la cordillera por una extensión de 87 kilómetros) y finaliza con la adición de compuestos químicos para cloración y fluoración del agua tratada, la línea del agua se puede ver en la Figura 3.1. Plano PTAP Vizcachas (Modificado de BAPA,2015)..

Por lo tanto, el agua que entra a los filtros estudiados proviene de agua cruda del río Maipo que pasa por un tratamiento convencional previo y se obtiene a la salida de los decantadores secundarios o puede ser agua cruda del Acueducto Laguna Negra, previo acondicionamiento, o una combinación controlada de ambos tipos de agua. El agua del río Maipo varía según las condiciones meteorológicas, por lo tanto, se espera una alta variabilidad del agua afluente a los filtros.

El agua de salida de los filtros Leopold alimentará a una zona de la comuna de Puente Alto, a través del acueducto Peralillo, y, a través del mismo acueducto, pero en el sentido inverso, el agua de salida de los filtros Multicrete II junto con la de los filtros Leopold se va hacia la Cámara de acueductos, que abastece la mayor parte del Gran Santiago.

En la planta existen 2 tipos de filtros, dentro de su operación tienen en común que el filtrado es de tipo convencional, rápido y gravitacional de flujo descendente con uso de falsos fondos y medio filtrante, y el proceso de retrolavado se realiza mediante estanques elevados de acumulación. Las diferencias se encuentran en el falso fondo, siendo los filtros Leopold bloques de HDPE con orificios superiores y los filtros Multicrete presentan toberas, otra diferencia es el retrolavado, ya que, los filtros Leopold inician el lavado con aire y luego con agua, y los filtros Multicrete pueden realizar el lavado de la misma forma secuencial o agua con aire simultáneo. Y por último, la diferencia de carga disponible de pérdida de carga, ya que, los filtros Leopold presentan 4,7 m.c.a y los filtros Multicrete 1,64 m.c.a, esto tiene directa relación con el volumen de agua que puede existir sobre el lecho filtrante.

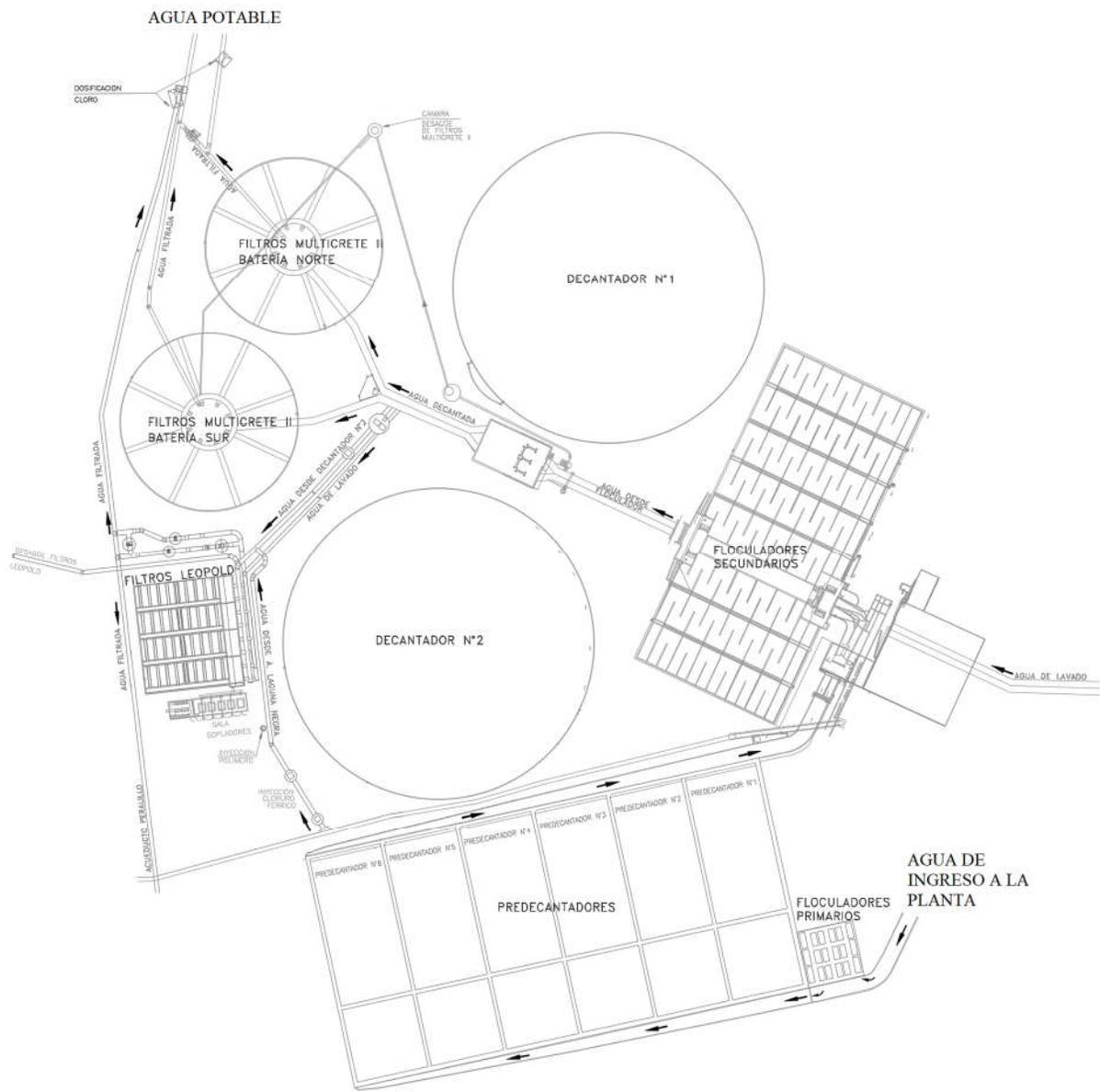


Figura 3.1. Plano PTAP Vizcachas (Modificado de BAPA,2015).

3.1 Filtros Leopold

3.1.1 Diseño

Los filtros Leopold están compuestos básicamente de un medio filtrante, piping inferior para la distribución de aire y agua para el retrolavado y distribución interior de agua de proceso para retrolavado.

Son 4 unidades de forma rectangular, con 7,1 m de altura y 25 m de largo con 6,3 m de ancho, esto equivale a un área de 157,5 m². Con una pérdida de carga disponible de 4,7 m.c.a con filtro limpio.

Se configura con un medio filtrante compuesto de 600 mm de antracita, con un tamaño efectivo (ES) del medio de 1,2 mm y 300 mm de arena con un tamaño efectivo (ES) del medio 0,6 mm. La relación profundidad/tamaño del medio en cada tipo de grano es de 500. En total se obtiene una relación profundidad/tamaño del medio de 1000, que proporciona un factor de seguridad importante en caso de que varíe la turbiedad del afluente. Como medio de soporte se usa grava con una profundidad de 300 mm con diferentes tamaños, cada capa tendrá una profundidad de 50 mm de profundidad. Primero, la parte más cercana a la arena tiene un tamaño de 13 mm, luego 3 mm, 2 mm, 3 mm, 6 mm y, finalmente, 13 mm. Por otra parte, para asegurar la estratificación antracita-arena, después del retrolavado fluidizado, el fabricante suministra una antracita que coincide con el tamaño de la arena fina seleccionada para la interfase entre arena y antracita (BAPA, 2015).

3.1.2 Operación

Cada filtro se restringe a un caudal medio diario de producción de agua filtrada de 0,4 m³/s, que es equivalente a decir una tasa de filtración de 9,14 m/h, siempre y cuando la alimentación sea agua decantada y las turbiedades de esta agua sean menores o iguales a 15 UNT. Para turbiedades de entradas mayores se reducirá el caudal de producción. La tasa de filtración aumentará a 12 m/h cuando alguno de los filtros comience a realizar un lavado, dado que la tubería de entrada está conectada con los 4 filtros a la vez.

Los tiempos de carrera del filtro se determinan según la relación SST/Turbiedad, cuya relación típicamente se encuentra entre 1 y 2. Cuando se hizo el estudio inicial del proyecto de filtros Leopold se encontró que el peor de los casos sería que la relación fuese 1,5, y el mejor caso sería 1, y según esta relación pueden existir diferente tiempo de carrera dependiendo de la turbiedad promedio o la turbiedad máxima del agua de afluente al filtro, como se puede ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tiempos de carrera según relación SST/Turbiedad

Relación SST/Turbiedad	Tiempo de Carrera [horas]	Turbiedad [UNT]
1.5	54	Promedio: 5
	21.	Máxima: 10
	13	Máxima: 15
1.0	108	Promedio: 5
	36	Máxima: 10
	22	Máxima: 15

El ciclo del retrolavado parte bajando el nivel de agua 15 cm sobre el medio y comienzan a operar los sopladores de 2 a 3 minutos a una tasa de 70 m/h. Luego se cierran los sopladores y entra el agua de lavado al filtro a baja tasa, aproximadamente 12,2 m/h por 4 minutos alcanzando un nivel de agua de 0,96 m sobre el medio filtrante. Posteriormente, se aumenta la tasa a 45,7 m/h por 6 minutos alcanzando un nivel de agua de 1,15 m sobre el medio filtrante. Al alcanzar este nivel, comienza a verter por la canaleta, luego se vuelve a un bajo caudal por 3 minutos y, finalmente, se cierra la válvula de ingreso de agua de lavado, se abre la válvula de ingreso a los filtros y comienza una nueva carrera de filtrado. En el lavado se consumen 944 m³ de agua y se rechazan 788 m³ de agua sucia.

3.2 Filtros Multicrete II

3.2.1 Diseño

Los filtros Multicrete II están compuestos básicamente de un medio filtrante, piping para la distribución de aire y agua para el retrolavado del medio.

Son 16 unidades repartidas en dos baterías de geometría circular con ocho filtros cada una, con un área de 207 m² para cada filtro. Con una pérdida de carga disponible de 1,64 m.c.a con filtro limpio, al principio de la carrera, y puede alcanzar 0,76 m.c.a. de pérdida de carga disponible cuando el filtro está sucio.

Se configura con un medio filtrante compuesto de 600 mm de antracita de profundidad, con un tamaño efectivo (ES) del medio de 1,2 mm y 300 mm de arena de profundidad con un tamaño

efectivo (ES) del medio 0,6 mm. La relación profundidad/tamaño del medio en cada tipo de grano es de 500, sumado se obtiene 1000 que proporciona un factor de seguridad importante en caso de que varíe la turbiedad del afluente y como medio de soporte se usa grava con una profundidad de 75 mm.

Los filtros consideran un falso fondo mediante boquillas con piso monolítico, cada panel del piso de 0,372 m² cuenta con 9 boquillas de 0,406 mm de diámetro, esto equivale a 4.824 boquillas por filtro aproximadamente (BAPA GRAMATEC, 2016).

3.2.2 Operación

Cada filtro debe cumplir con una producción promedio de agua filtrada mayor o igual a 0,45 m³/s, que es equivalente a decir una tasa de filtración de 7,83 m/h. La tasa de filtración aumentará a 8,94 m/h cuando alguno de los filtros comience a realizar un lavado.

El ciclo del retrolavado parte bajando el nivel de agua entre 15 y 25 cm sobre el medio filtrante y luego este se puede realizar de tres formas, que son explicadas a continuación:

- Solo agua
Consiste en inyección de agua a través de los falsos fondos y medio filtrante para permitir la agitación de los sólidos y su separación del medio filtrante por 2 minutos a baja tasa de 12,2 m/h y luego se inyecta agua por 14 minutos a alta tasa de 45,7 m/h, aquí se produce la eliminación de los sólidos del medio filtrante. Este tipo de lavado consume 2292 m³ de agua filtrada aproximadamente, este cálculo es conservador, por lo que la cifra exacta debe ser menor a esta.
- Aire y agua secuencial
Consiste en una primera etapa de inyección de aire a través de los falsos fondos y medio filtrante para permitir la agitación de los sólidos y su separación del medio filtrante. Se debe comenzar con un nivel mayor a 20 cm para no correr riesgo de que la antracita se eleve y se pierda por acción del aire; luego, el retrolavado continúa con agua, primero a baja tasa de 12,2 m/h por 2 minutos con la intención de asegurar un aumento de caudal de forma paulatina y suave y, luego, a alta tasa de 45,7 m/h por 10 minutos. Durante la alta tasa se produce la eliminación de los sólidos del medio filtrante. Después de estos 10 minutos a alta tasa se vuelve a baja tasa, para permitir una suave estratificación del medio y el llenado del filtro hasta su nivel de operación antes de comenzar un nuevo

ciclo. Este tipo de lavado consume 1745 m³ de agua aproximadamente, este cálculo es conservador, por lo que la cifra exacta debe ser menor a esta.

- Aire y agua concurrente

Consiste en una primera etapa de inyección de aire a través de los falsos fondos y medio filtrante para permitir la agitación de los sólidos y su separación del medio filtrante con una duración entre 2 a 3 minutos. Luego se continua con la inyección de aire y se adiciona agua en simultáneo por 1 minuto y 15 segundos a través de los falsos fondos y medio filtrante, y así permitir la agitación de los sólidos y su separación del medio filtrante. Se debe comenzar con un nivel mayor a 20 cm, luego se continúa con agua a baja tasa de 12,2 m/h por 3 minutos, asegurando un aumento de caudal de forma paulatina y suave y, luego, a alta tasa de 45,7 m/h por 6 minutos. Finalmente se vuelve a baja tasa, para permitir una suave estratificación del medio y el llenado del filtro hasta su nivel de operación antes de comenzar un nuevo ciclo. Este tipo de lavado consume 1209 m³ de agua aproximadamente, este cálculo es conservador, por lo que la cifra exacta debe ser menor a esta.

En la practica el promedio de agua utilizada es de 1124 m³ por lavado, a un caudal de 1,57 m³/s.

Capítulo 4: Metodología

Antes de comenzar el estudio de la eficiencia de los filtros de la PTAP Vizcachas, como vimos en el capítulo anterior, es necesario caracterizar los filtros en cuanto a su estructura, al tipo de medio y sus dimensiones. Luego se definieron los criterios de operación, es decir, el modo de operación, las tasas de filtración y de lavado para cada tipo de filtro basándose en lo que entrega la memoria del proyecto. Durante el estudio de eficiencia y eficacia de los filtros, tanto en su calidad de agua como en su operación, se estudian las 4 unidades de los filtros Leopold, enumerados desde el 35 al 38, y 8 unidades de los filtros Multicrete II correspondientes a la batería Sur, enumerados desde el 9 al 16, estas unidades se pueden ver en la Figura 4.1.

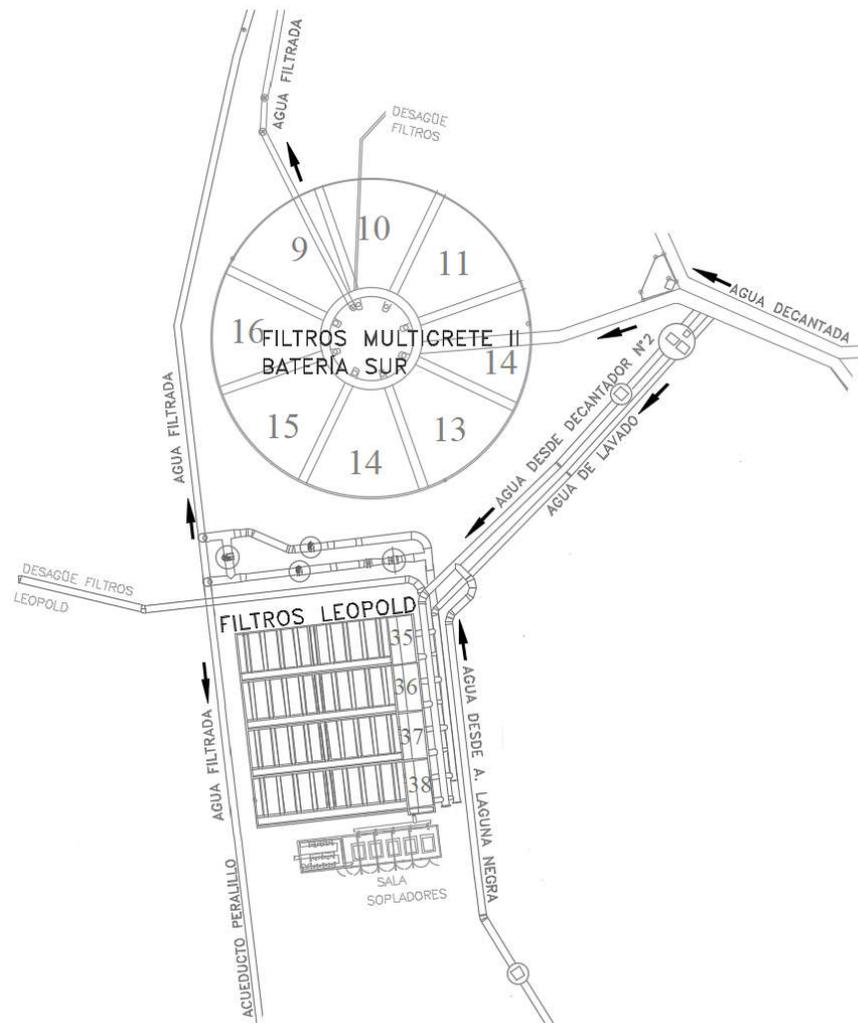


Figura 4.1. Plano de Filtros de estudio.

4.1 Estudio de la eficacia y eficiencia del tratamiento sobre la calidad del agua

Para determinar la eficacia del filtro en la calidad de agua se estudia la turbiedad de salida de los filtros y el cumplimiento de la norma chilena de agua potable, es decir, que la turbiedad mensual media mensual de agua filtrada entrega resultados menores a 2 UNT.

La información se extrajo desde el Portal web Sistema de Conocimiento Técnico (SCT) desde el sitio web *sitweb/sctap/Reportes/reportetabular.aspx*, este portal es de uso interno de Aguas Andinas, por lo que las indicaciones de descarga de información se adjuntaron en el Anexo 1, ya que estas solo serán útiles para personal de la empresa que verifique el correcto funcionamiento de los filtros.

Del reporte generado se obtiene información de fecha, horario de la toma de muestra, turbiedad y turbiedad promedio mensual, estos datos se grafican para visualizar su comportamiento.

4.2 Estudio de la eficacia operacional del tratamiento

4.2.1 Pérdida de carga

Se considera la pérdida de carga como parámetro operacional para visualizar el funcionamiento de los filtros con respecto a diferentes factores de eficiencia, determinando cuáles son los factores de eficiencia que tienen una mayor influencia en la pérdida de carga durante el ciclo de filtrado y luego se llevan estos resultados a la modelación.

Para ello, es necesario extraer nuevamente datos desde el Portal web SCT, las indicaciones de descarga de información se adjuntarán en el Anexo 2, ya que estas solo serán útiles para personal de la empresa que verifique el correcto funcionamiento de los filtros.

Generando un reporte con información de fecha, carrera, caudal, velocidad, nivel, pérdida de carga, turbiedad Decantador 2, turbiedad Laguna Negra, caudal Decantador 2 y caudal Laguna Negra para los filtros Leopold. Para adicionar información de turbiedad de entrada a los filtros, realizando un balance de masa entre la turbiedad a la salida del Decantador 2 y de Laguna Negra para obtener la turbiedad de entrada a los filtros Leopold. Despejando la siguiente ecuación:

$$Turb_{Leopold} = \frac{Q_{Decantador\ 2} * Turb_{Decantador\ 2} + Q_{Laguna\ Negra} * Turb_{Laguna\ Negra}}{Q_{Decantador\ 2} + Q_{Laguna\ Negra}}$$

En el caso de los filtros Multicrete II, la información se obtiene del contratista, dado que los filtros se encuentran en proyecto de renovación es el contratista BAPA SA. quien maneja los datos y se los entrega a Aguas Andinas con información de fecha y hora de muestreo, hora de carrera, nivel, caudal, pérdida de carga, turbiedad de entrada y de salida.

Se descarga información de temperatura para conocer su relación con la pérdida de carga, cuando se intenta realizar la modelación con estos datos, son eliminadas muchas filas dado que es muy poca la información, para solucionar este problema se utiliza el promedio de mes del dato, de esta forma se tienen menos filas con datos vacíos y una variable numérica que es más fácil de modelar.

En este punto se encuentran los datos completos, ahora es necesario realizar la limpieza de datos y deshacerse de los datos que no son necesarios. Esta es la parte de la modelación que toma más tiempo, pero es imprescindible para que la modelación funcione correctamente. En particular para este caso, las anomalías se presentan cuando los filtros comienzan un proceso de lavado, ya que aquí, la pérdida de carga disminuye drásticamente junto con el nivel, por lo que es importante reconocer el momento de lavado y eliminar estos datos, un ejemplo de la limpieza se puede ver en la Figura 4.2, donde la línea roja representa los datos crudos y la línea azul los datos luego de la limpieza en los filtros Leopold.

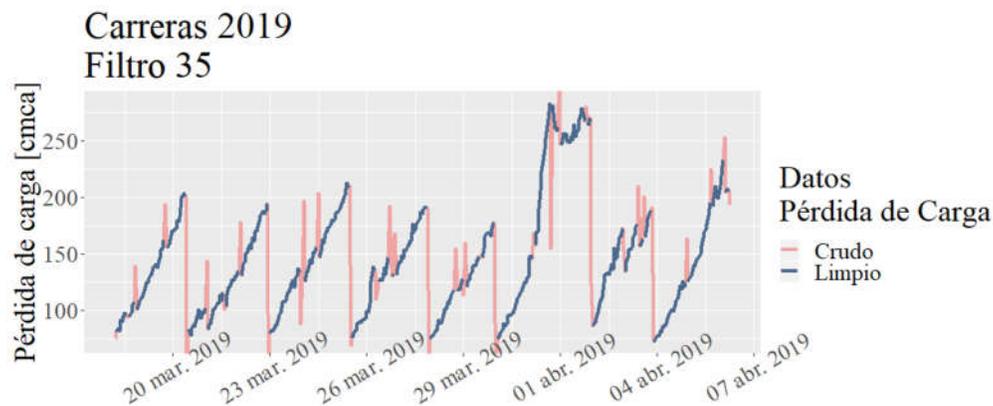


Figura 4.2. Ejemplo de limpieza de datos en filtros Leopold.

No solo hay datos entre una carrera y otra que es necesario eliminar, también durante la carrera se presentan peaks, esto ocurre porque los filtros se encuentran conectados entre sí, de modo que, si uno de ellos comienza un lavado, el caudal que estaba ingresando a este filtro, se reparte

en los otros filtros. Lo que hará que los filtros aumenten su caudal cuando los otros filtros están realizando el retrolavado, lo que alterara la presión, y es necesario eliminar estos datos porque no son representativos del funcionamiento de los filtros, ya que el retrolavado de un filtro tiene una duración aproximada de 40 minutos, por lo que representan un porcentaje bajo del tiempo total de carrera de un filtro, transformándose en una excepción debido al lavado de otro filtro.

4.2.2 Retrolavado

Para corroborar la efectividad del retrolavado se debe realizar una revisión de pérdida de carga inicial de cada carrera de filtrado, esto tiene una relación directa con la eficiencia del lavado ya que si la tendencia es positiva, es decir, si aumenta la pérdida de carga inicial en el tiempo, implica que los lavados han ido empeorando en el tiempo porque los lavados ya no son tan eficientes como lo hacían en un inicio. También es necesario corroborar que la operación se está realizando según lo diseñado, porque cualquier aumento apreciable en la frecuencia de lavado por encima del valor de diseño reduciría la producción de diseño. Finalmente, se realizan pruebas de inspección visual antes y después del retrolavado, esto para observar que después del retrolavado sea visible la antracita y que no exista daño en el medio.

4.3 Modelación Machine Learning

Para realizar la modelación es necesario instalar el programa RStudio y, con los datos ordenados y limpios como se especificó previamente, se ejecuta el código mostrado en el Anexo 4.

Capítulo 5: Análisis y visualización de datos de la operación de los filtros

Cuando se habla de eficiencia de los filtros, se pueden ver dos aristas. Una de ellas es la eficiencia de los filtros en cuanto a la calidad del efluente, en específico para esta memoria cumplimiento de la normativa chilena de agua potable (NCh 409), y la otra tiene relación con la eficiencia del proceso de filtración y su retrolavado.

Para analizar la eficiencia del proceso de filtración se estudian los factores que influyen de manera más importante, realizando un análisis de los datos. Los factores de eficiencia principales son medio filtrante, tasa de filtración, temperatura y calidad del afluente. En cuanto al perfil y al tipo de medio filtrante, ambos filtros, Leopold y Multicrete II, sólo se diferencian en la grava soportante. Los factores de eficiencia restantes se estudian en base a la pérdida de carga, es decir, cómo varía la pérdida de carga con la tasa de filtración, efecto de la temperatura y calidad del afluente. Esto es importante para realizar la modelación, ya que es necesario comprender el comportamiento de los datos, visualizando la eficiencia de operación por pérdida de carga según los factores de eficiencia, antes de modelar.

Finalmente, se estudia el retrolavado y se analizará la eficacia de los lavados revisando la pérdida de carga inicial de cada carrera de filtración, la duración de las carreras y la inspección visual a los filtros durante el retrolavado.

5.1 Calidad del agua de filtración

Para analizar la calidad de agua de filtración se analizara la turbiedad según: la norma chilena que exige una media mensual menor a 2 UNT, el desafío de Aguas Andinas que considera presentar siempre turbiedades menores a 1 UNT a la salida del filtro y la normativa de los países desarrollados, entre los que se encuentran Canadá y Estados Unidos, que exigen estar bajo las 0,3 UNT a la salida del filtro en el 95% de las muestras realizadas en un mes para una filtración convencional, como la realizada en la PTAP Vizcachas.

En la PTAP Vizcachas se mide turbiedad a la salida de los filtros con instrumentación de campo (en línea), para llevar un control constante del proceso; pero, al analizar las turbiedades de estas mediciones se observan inconsistencias, como se ve en la Figura 5.1. En ella se grafican los

datos que entregan los turbidímetros del filtro Leopold 38 (de entrada y de salida), utilizado como ejemplo, ya que este comportamiento se replica en el resto de los filtros Leopold que se adjuntan en Anexo 3. En la Figura 5.1.a) se grafica la turbiedad media mensual, mostrando que entre 2017 y 2018 hubo 10 meses en que no se cumple la norma, lo que es discordante con los controles realizado por el laboratorio, tanto de la planta como externo. En la Figura 5.1.b) se grafica la turbiedad instantánea, donde existe un 54% de las mediciones aproximadamente que cumple con el desafío de la empresa de encontrarse siempre bajo 1 UNT. Sin embargo, al revisar los gráficos, se observan inconsistencias que se reflejan en los peaks de turbiedad, ya que existe una acumulación de turbiedad y luego al llegar a las 10 UNT se vuelve constante en algunos tramos, para finalmente disminuir de forma instantánea. Estos problemas pueden ser causa de una falta de limpieza al turbidímetro (instrumento y tuberías) o de la calibración de este. En la Figura 5.1.c) se grafica la eficiencia de remoción, que corresponde al porcentaje de limpieza de turbiedad del agua en el proceso de filtración, calculado con la siguiente ecuación:

$$E [\%] = \left(\frac{\textit{Turbiedad afluyente} - \textit{Turbiedad efluente}}{\textit{Turbiedad afluyente}} \right) \cdot 100$$

En esta figura se corrobora que existen problemas con los turbidímetros, tanto en la lectura afluyente como en la efluente del filtro, ya que presenta inconsistencias desde marzo del 2018 en adelante, aquí se ven lecturas con porcentaje de remoción negativa, es decir, salen del filtro más turbios de lo que entraron, lo que es incongruente.

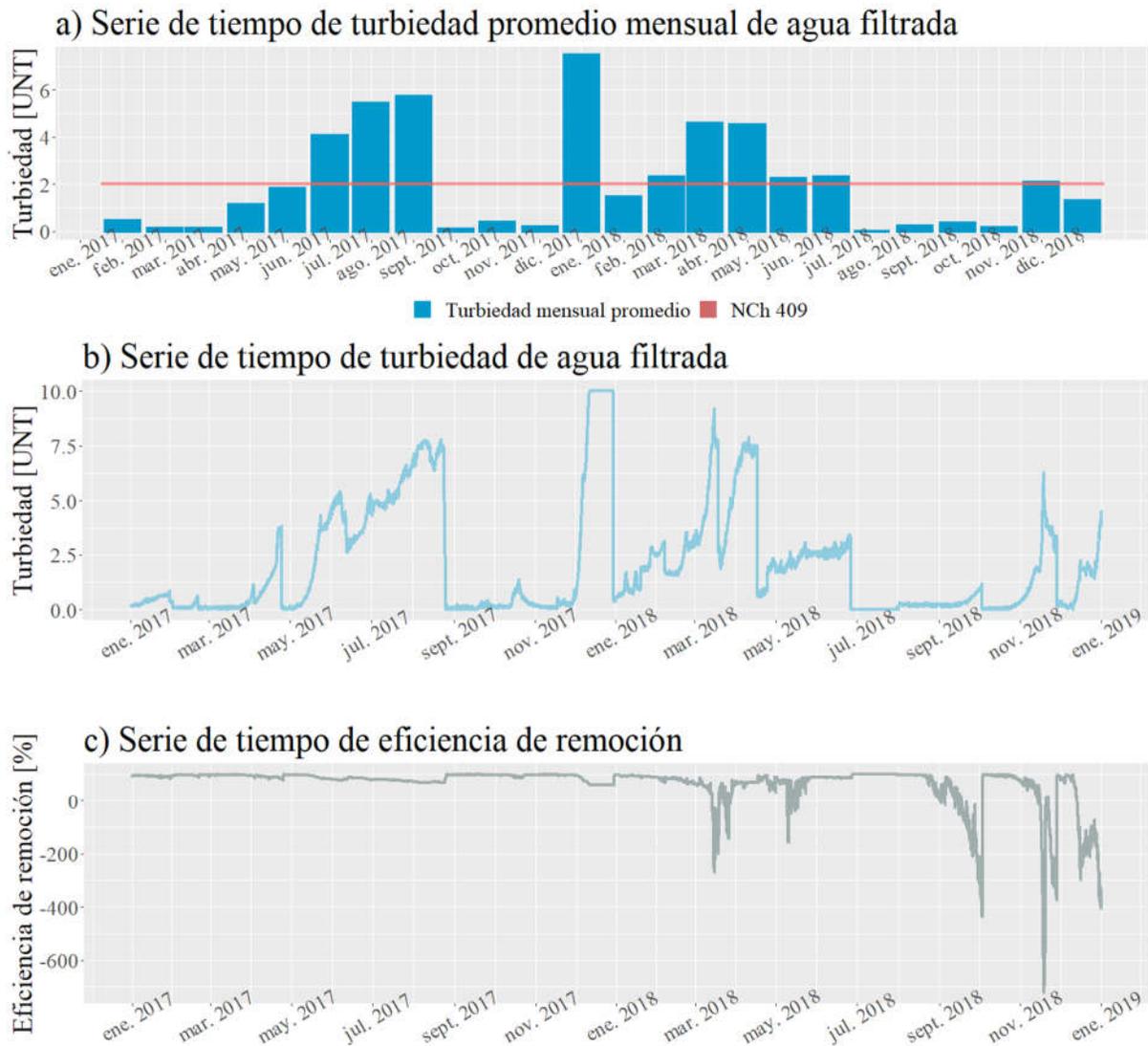


Figura 5.1. Información del filtro 38 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.

Dados los resultados de los turbidímetros, se indaga más en el comportamiento de la turbiedad de los filtros, y se encuentra información de toma de muestras puntuales realizadas en forma manual (con equipo portátil) en el efluente de filtros Multicrete II y a la salida de los filtros de la PTAP Vizcachas (la suma de los filtros Leopold y Multicrete II), que se detallan a continuación.

Es preciso recordar que los filtros Multicrete II se encuentran en un proceso de renovación (cambio de falso fondo y medio filtrante), pero no se puede prescindir de todos ellos a la vez porque se debe mantener el caudal de suministro de la planta, por lo tanto la renovación de los

filtros es paulatina y a medida que uno de los filtros es renovado y se le realizan las pruebas correspondientes para comenzar su funcionamiento, comienza el muestreo y la información es agregada, esta información es fidedigna ya que es tomada en un muestreo manual cada una hora.

La medición de turbiedad a la salida de los filtros Multicrete II se muestra en la Figura 5.2 y Figura 5.3. En la Figura 5.2 se grafica la turbiedad instantánea para cada filtro (a la derecha del grafico se señala a que unidad corresponde), en esta figura es posible notar que, en el año 2018, cuando comenzaron a funcionar algunos filtros Multicrete II, la turbiedad era mayor y más variable que el 2019, de aquí en adelante los filtros presentan turbiedades cercanas a 0,25 UNT la mayor parte del tiempo.

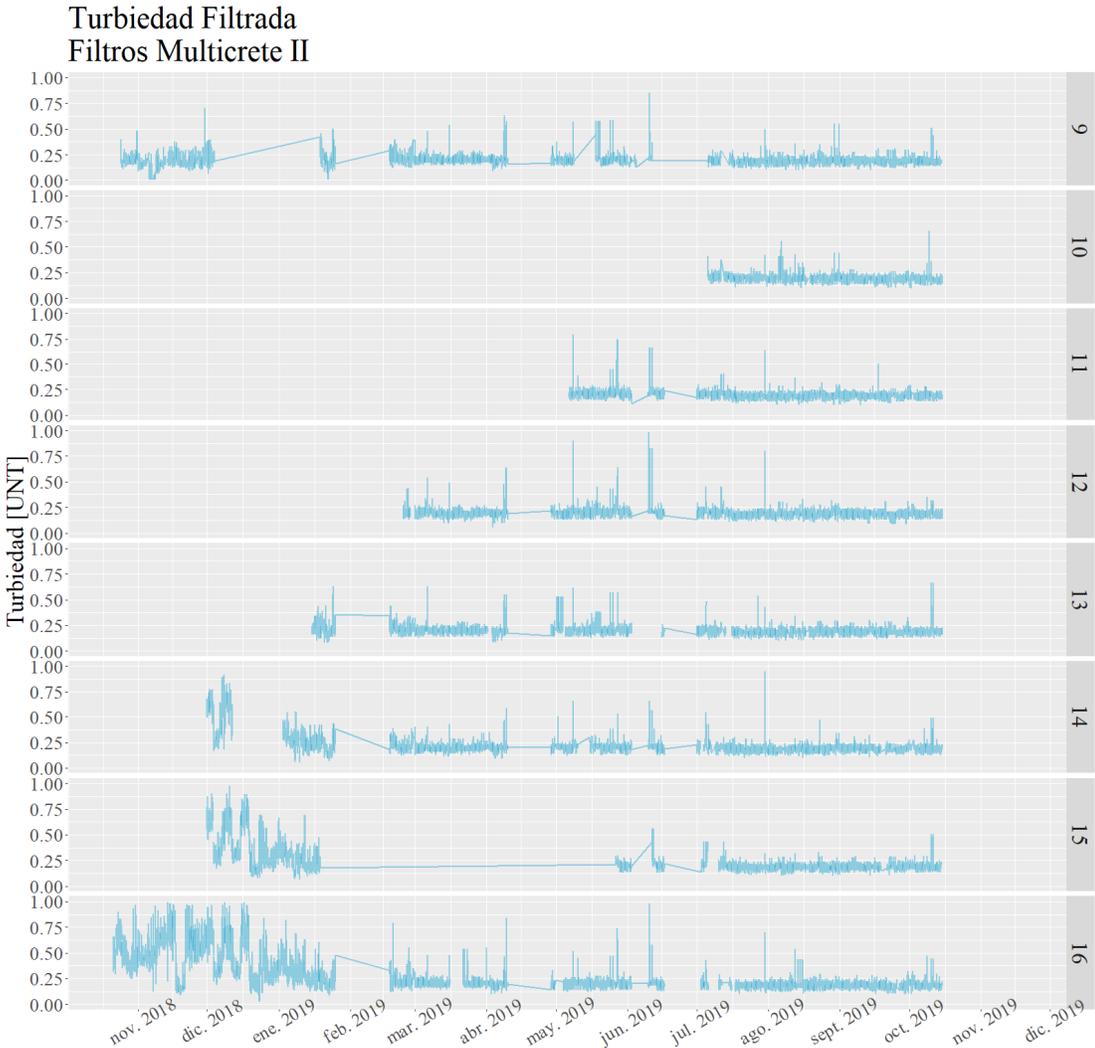


Figura 5.2. Turbiedad instantánea filtros Multicrete II.

Esto también se puede ver en la Figura 5.3, aquí se grafica la turbiedad media mensual para cada filtro (sobre cada grafico se señala a que unidad corresponde), en el grafico se ve que las medias mensuales son mayores en el año 2018. De todas formas, la normativa nacional se cumple muy por debajo del límite establecido, donde la media mensual de todo el periodo rodea las 0,2 UNT

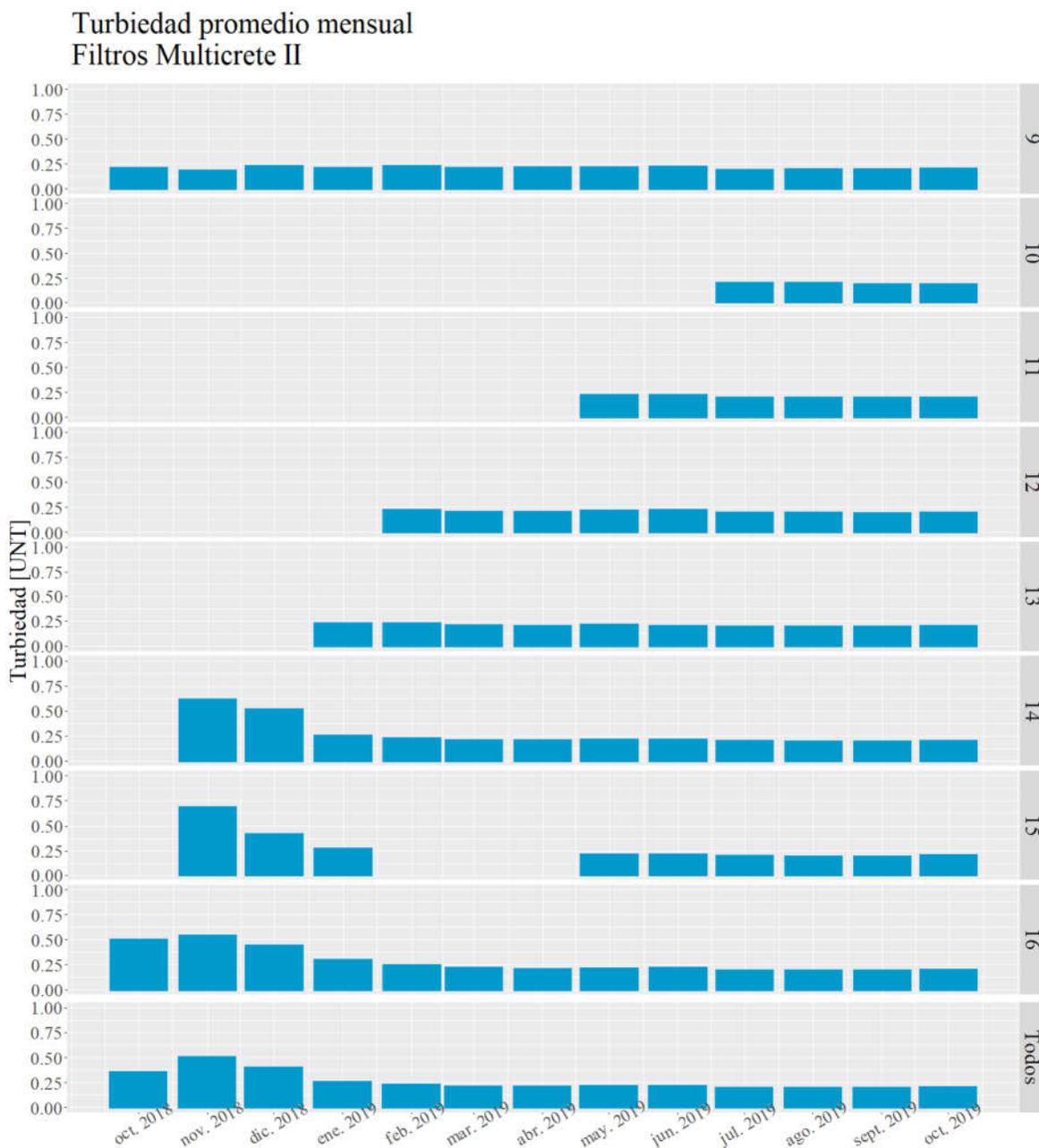


Figura 5.3. Turbiedad promedio mensual filtros Multicrete II.

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de la turbiedad en los filtros Multicrete II, indicando los porcentajes de cumplimiento para los tres límites de comparación. El resultado es el cumplimiento total de la normativa chilena, un cumplimiento del 99.99% en el desafío de la empresa y cumple la normativa internacional de estar bajo 0.3 UNT un 90.86% de las mediciones, por lo que se encuentra aproximadamente a un 4% de las mediciones para cumplir con la normativa internacional más conservadora.

Tabla 5.1 Resultados eficiencia de turbiedad filtros Muticrete II

	NCh 409 ($\bar{x}_{mensual} \leq 2$ UNT)	Desafío Aguas Andinas (Toda medición ≤ 1 UNT)	Normativa internacional (95% de las mediciones \leq 0.3 UNT)
Filtros Multicrete II	100%	99.99%	90.86%

Como se discutió antes, la información de los turbidímetros de los filtros Leopold es errónea, los datos de turbiedad no son confiables, ya que no concuerdan con pruebas realizadas en laboratorio y, para corroborar la calidad del agua a la salida de los filtros Leopold es mejor utilizar los datos de las tomas de muestras puntuales realizadas en forma manual con un equipo portátil a la salida de los filtros de la PTAP Vizcachas. Esta información no será representativa de cada filtro, si no que de la unión de los 20 filtros de la PTAP Vizcachas, por lo que no se puede verificar si existe alguna deficiencia en alguno de los filtros Leopold en particular, pero sí se puede confirmar el cumplimiento de la norma y el desafío de la empresa en la PTAP Vizcachas.

A continuación, se comprueba que esta información es más fidedigna y no presenta contradicciones, lo que nos permite descartar la información de los turbidímetros de los filtros Leopold presentada al inicio del capítulo y utilizar la información de la toma de muestra manual para realizar los análisis y la modelación.

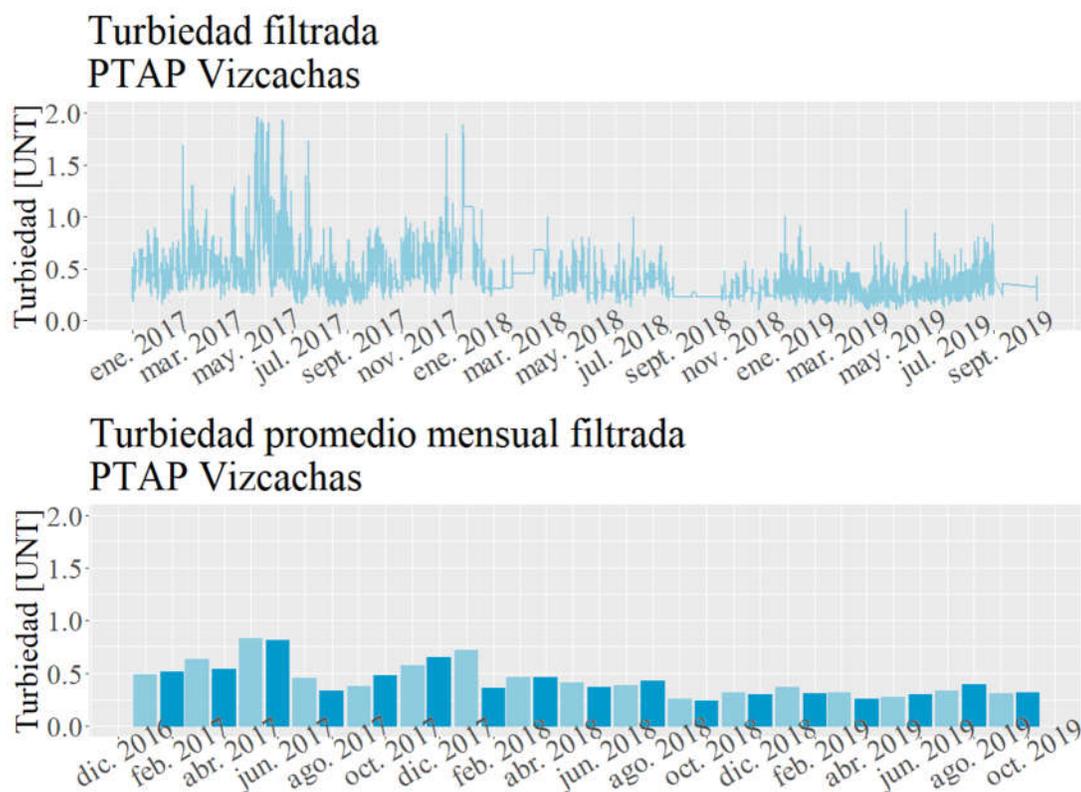


Figura 5.4. Turbiedad instantánea de agua filtrada PTAP Vizcachas promedio mensual.

El resultado de la eficiencia en calidad de agua filtrada se puede ver en la Figura 5.4, donde se nota el cumplimiento de la normativa chilena y de sobremanera entre los años 2017 y 2019. En este lapso, la turbiedad mensual media más alta es de 0,818 UNT que ocurre en mayo del 2017 y luego existe una tendencia a la baja. En cuanto al desafío de la empresa, el 96% del tiempo entrega turbiedad menor o igual a 1 UNT y aproximadamente el 30% del tiempo se presenta turbiedad menor o igual a 0,3 UNT.

En la Tabla 5.2 se presenta un resumen de los resultados por año, siendo el año 2017 el que presenta peores resultados y se observa que existe un perfeccionamiento en el correr del tiempo. El salto importante que se realiza el 2019, en cuanto al cumplimiento de la normativa internacional se puede adjudicar a la que 4 de los 16 filtros Multicrete II se encuentran completamente renovados y operativos durante todo el 2019 y a mediados del 2019, se suma el resto de la batería sur, por lo que se encuentran operativos 8 de los 16 filtros.

Tabla 5.2. Resultados eficiencia de turbiedad PTAP Vizcachas.

Año	NCh 409	Desafío Aguas Andinas	Normativa internacional
2017-2019	100%	96,07%	30,47%
2017	100%	93,06%	14,50%
2018	100%	97,93%	33,73%
2019	100%	99,88%	56,10%

5.2 Pérdida de carga

Para analizar la eficiencia del proceso de filtración, se estudian los factores de eficiencia en base a la pérdida de carga, es decir, cómo varía este parámetro según el efecto de la tasa de filtración, la temperatura y calidad del afluente. Esto es importante para realizar la modelación, ya que previamente es necesario comprender el comportamiento de los datos, para conocer cómo se relacionan las variables entre ellos e identificar cuáles serán más útiles y cuáles no.

En la Figura 5.5 y la Figura 5.6 se grafica el comportamiento de la pérdida de carga (promedio mensual) dependiendo de la hora de carrera, de los filtros Leopold y Multicrete II, respectivamente.

Pérdida de carga mensual promedio Filtros Leopold

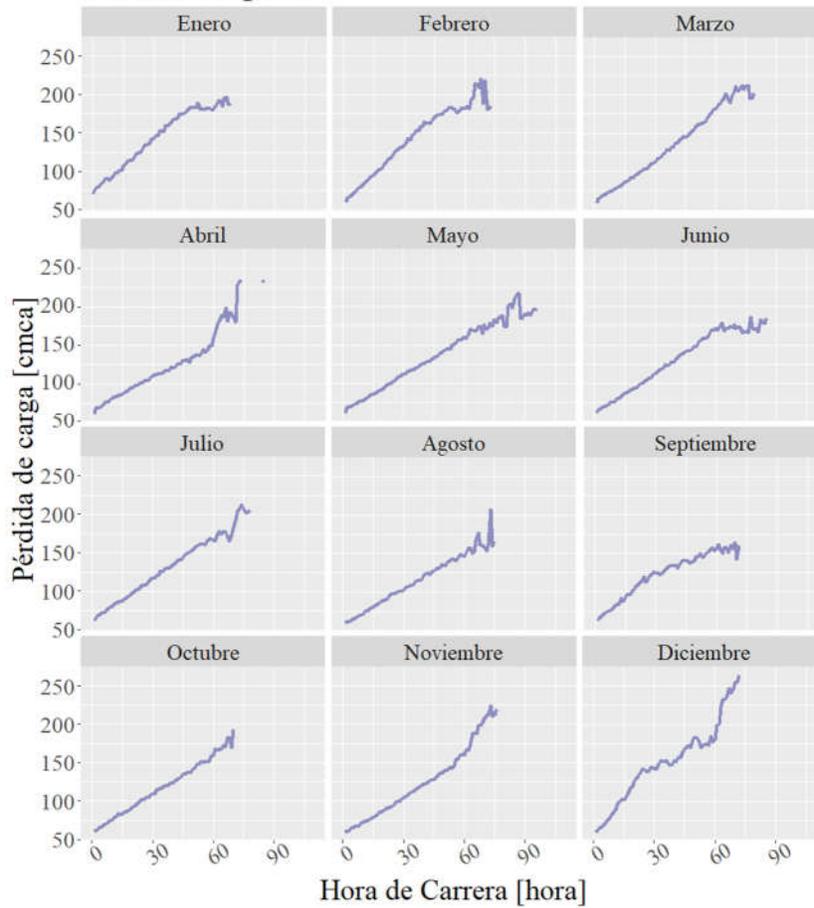


Figura 5.5. Pérdida de carga promedio mensual según la hora de carrera de los filtros Leopold.

El comportamiento de los filtros Leopold es estable en los diferentes meses y bastante similar entre ellos. En la Figura 5.5 se puede ver que la mayoría de las carreras es de 60 horas aproximadamente, ya que se ve una clara linealidad de la pendiente al inicio de la carrera, aproximadamente hasta las 60 horas, esta pendiente se forma con el promedio de una gran cantidad de mediciones y pasado las 60 horas se desestabiliza debido a los pocos procesos de filtración en que realizan carreras más largas, contando con pocos datos para establecer el promedio. También es posible notar que la pendiente aumenta en meses de verano, lo que indica una relación importante entre la pérdida de carga y el aumento de temperatura, para los filtros Leopold.

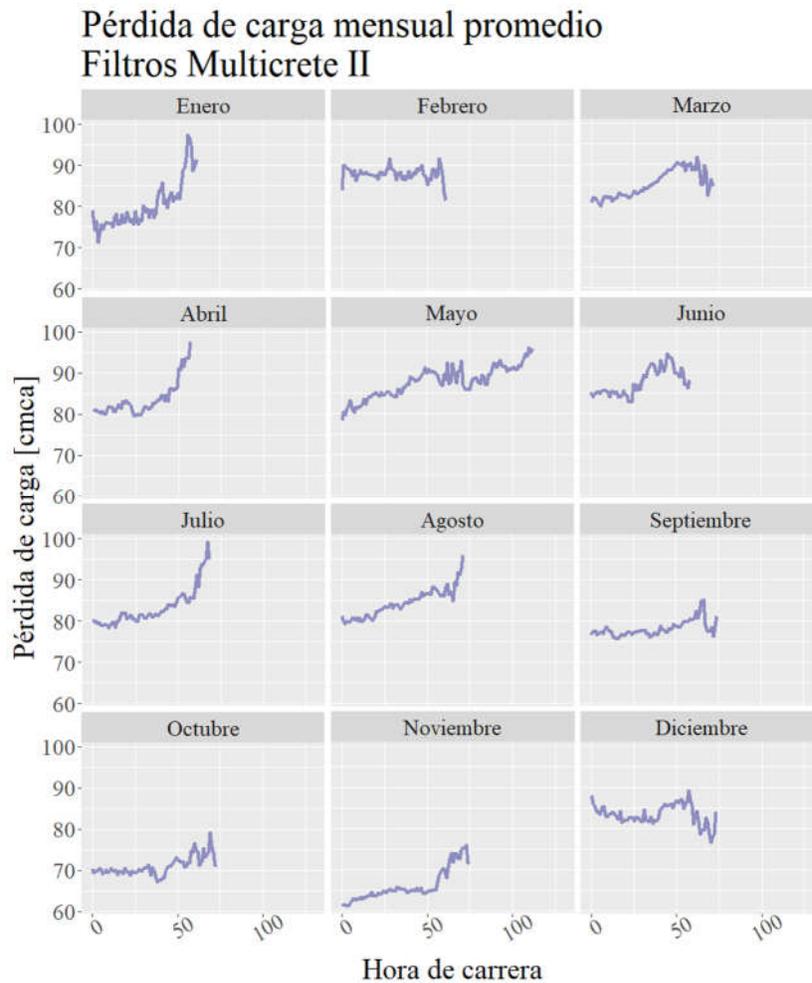


Figura 5.6. Pérdida de carga promedio mensual según la hora de carrera de los filtros Multicrete II.

El comportamiento de los filtros Multicrete II es diferente al de los filtros Leopold, esto se debe a los siguientes motivos. Primero, es posible notar que la amplitud de pérdida de carga durante la carrera es menor en los filtros Multicrete II que en los filtros Leopold, esto debido a que los filtros Multicrete II tienen una menor carga disponible, siendo de 1,64 m.c.a y la de los filtros Leopold de 4,7 m.c.a., debido a esto la pendiente será menor para los filtros Multicrete II. Segundo, los filtros Multicrete II trabajan a tasa declinante por lo que la pendiente debiese ser más nula, dado que a medida que aumenta la pérdida de carga, disminuye la tasa de filtración. También se presentan en su mayoría carreras de 60 horas aproximadamente, se distingue una pendiente lineal al inicio de la carrera (esta no es tan fácil de ver como en los filtros Leopold debido a que la pendiente es menor) y que luego se desestabiliza debido a los pocos procesos de filtración en que se realizan carreras más largas.

Tampoco es posible notar una tendencia en relación con la temperatura, inclusive en meses de verano como febrero y diciembre existe una pendiente cercana a cero, siendo en enero, abril y julio los meses que presentan una mayor pendiente.

Estas diferencias se pueden relacionar con la cantidad de información, los filtros Leopold presentan tres años de información y los filtros Multicrete II presentan aproximadamente un año.

Otro problema que se repetirá con diferentes factores de eficiencia es que se puede ver que los filtros Multicrete II están comenzando su funcionamiento, ya que existe mucha variación en el comportamiento entre los diferentes filtros. Al tener las mismas características se esperaría un comportamiento más uniforme, pero debido a que se encuentran en renovación, a veces se están realizando trabajos en terreno que interrumpen algunas carreras de filtración.

5.2.1 Tasa de filtración

Para ninguno de los filtros existen datos de tasa de filtración obtenidos de forma directa con un instrumento, por lo que es necesario transformar los datos existentes. Para los filtros Leopold y Multicrete II se obtiene dato de caudal de forma directa, por lo que se divide por el área del filtro para obtener la tasa de filtración.

Para los filtros Leopold, el problema con este factor de eficiencia es que los filtros pueden funcionar con dos modos de operación, a caudal o nivel constante; y estos son los datos que tomaremos para estudiar la pérdida de carga en la modelación. Sucede que, cuando se gráfica la pérdida de carga según la de tasa de filtración instantánea por carrera, no se observa información relevante, esto porque la pérdida de carga aumenta, pero la tasa de filtración no varía. La tasa de filtración sólo varía cuando alguno de los otros filtros entra en proceso de lavado, lo que conlleva a un aumento de caudal.

Por lo tanto, lo que se grafica en la Figura 5.7 y la Figura 5.8 es la pendiente de la pérdida de carga de cada carrera y su tasa de filtración promedio para tener conocimiento del correcto funcionamiento de los filtros, considerando que el diseño exige cierto rango de tasa de filtración para no provocar daños en el medio filtrante. En el caso de los filtros Leopold la tasa de diseño es de 9,14 m/h y aumentará a 12 m/h cuando alguno de los filtros comience a realizar un lavado

y para los filtros Multicrete II la tasa de diseño es de 7,71 m/h y aumentará a 8,8 m/h cuando alguno de los filtros comience a realizar un lavado.

Pendiente de pérdida de carga vs tasa de filtración promedio Filtros Leopold

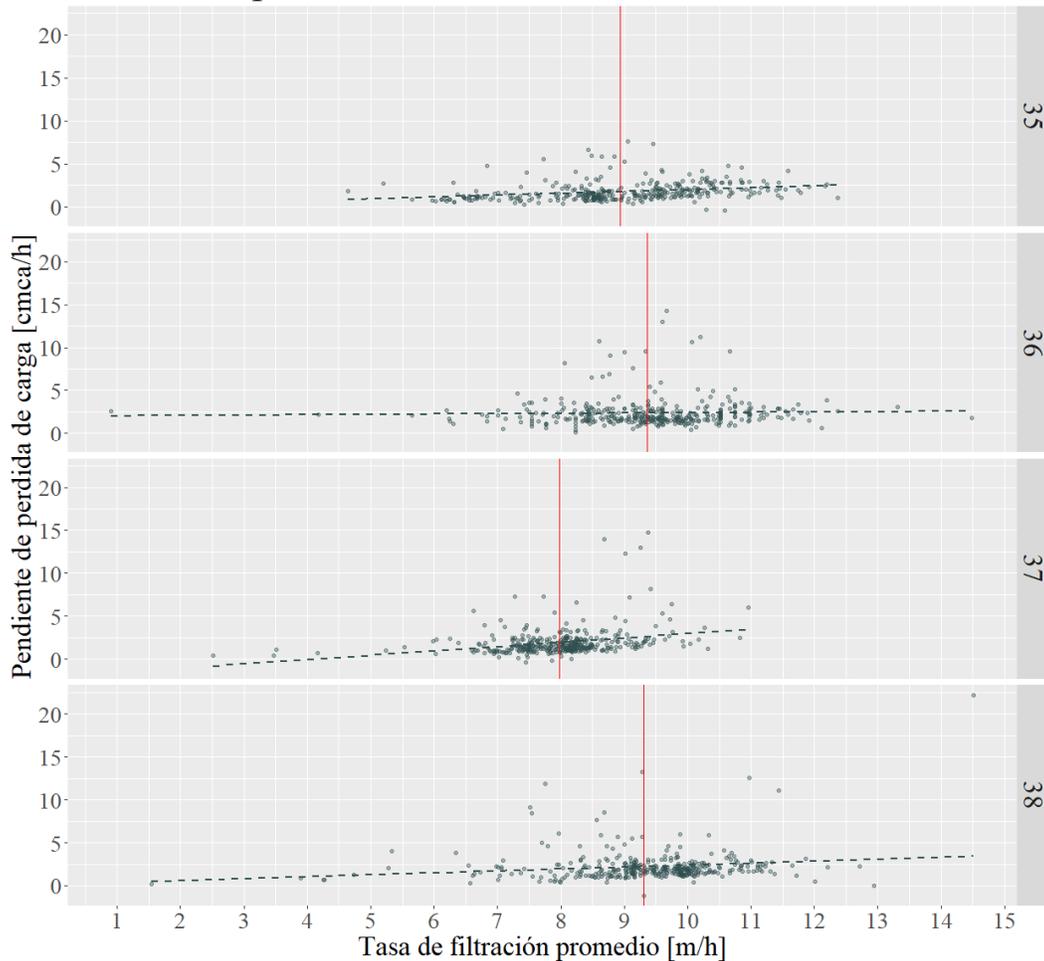


Figura 5.7. Pérdida de carga según tasa de filtración para filtros Leopold.

En los antecedentes bibliográficos se sostiene que la tasa de filtración es proporcional a la pérdida de carga, en la Figura 5.7 se ven los gráficos de filtro Leopold, en ellos se puede ver que esto ocurre, pero la pendiente es baja, inclusive en el filtro 36 se puede ver que la pendiente es hasta nula. Otro punto importante, es que la tasa de filtración promedio (línea roja en Figura 5.7) se mantiene muy cerca de la tasa de diseño (9,14 m/h), exceptuando por el filtro 37 que presenta un promedio más bajo.

Pendiente de pérdida de carga vs tasa de filtración promedio Filtros Multicrete II

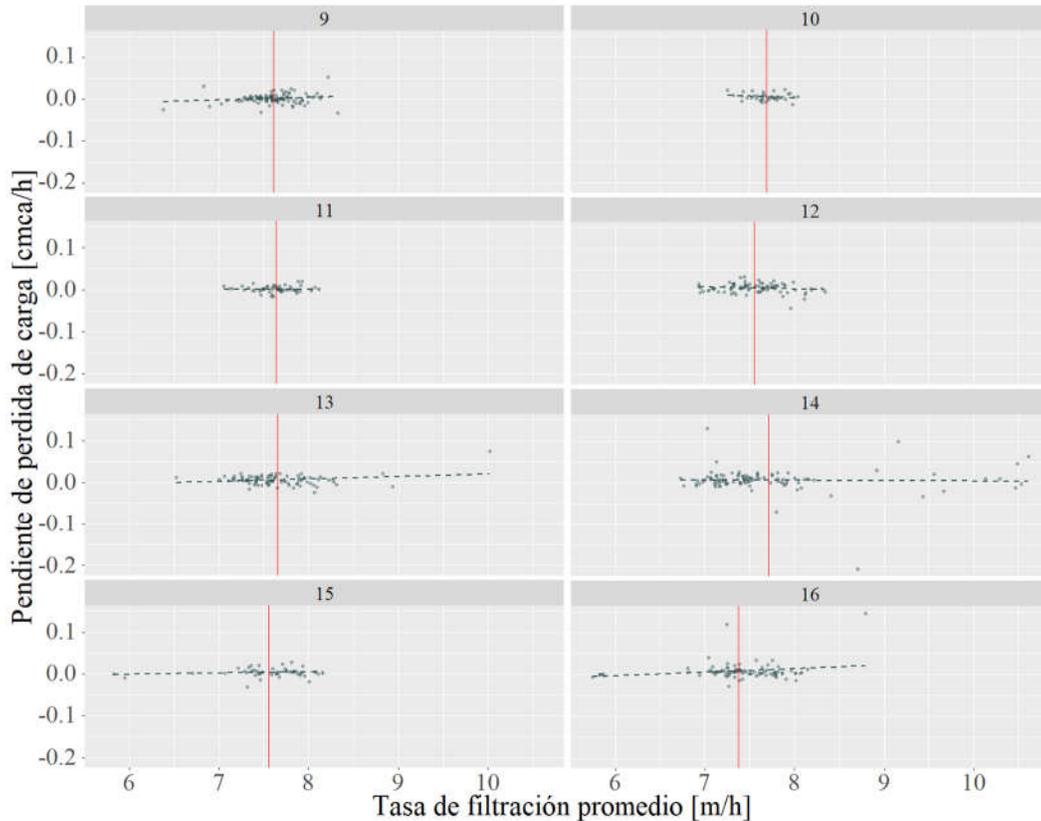


Figura 5.8. Pérdida de carga según tasa de filtración para filtros Multicrete II.

De los filtros Multicrete II se ve el mismo comportamiento, a mayor promedio de tasa de filtración aumenta la pendiente de la pérdida de carga, pero con pendientes muy bajas o prácticamente nulas y que la tasa de filtración promedio (línea roja en Figura 5.8) se mantiene muy cerca de la tasa de diseño (7,71 m/h).

5.2.2 Temperatura

Como se representó al inicio del estudio de pérdida de carga, los filtros Leopold presentan una relación directa con la temperatura. Para analizar el efecto de la temperatura, se revisa la temperatura del agua al inicio de la planta como se ve en la Figura 5.9 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

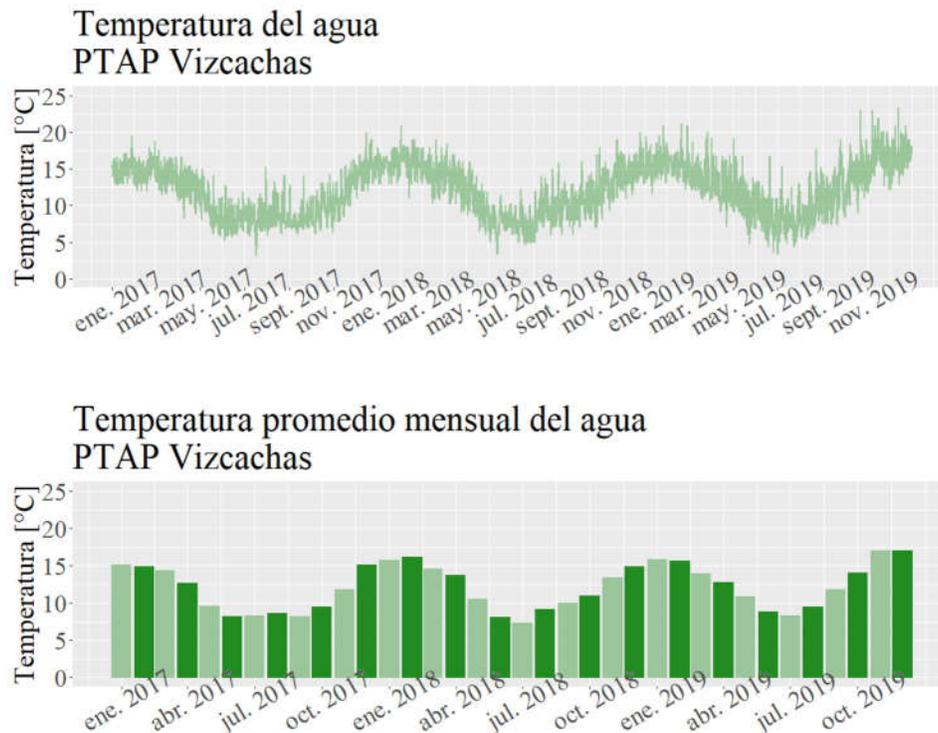


Figura 5.9. Temperatura del agua al inicio de la planta, arriba la temperatura instantánea y abajo el promedio mensual.

El problema es que estos datos se miden aproximadamente 5 veces al día, por lo que no es conveniente para realizar la modelación, por que eliminaría muchas filas de datos, por lo tanto el efecto de la temperatura se representara con un promedio mensual de la temperatura del agua, como se ve en la Figura 5.9 se refleja una relación directa de la temperatura con el mes del año y así se representará una variable numérica fácil de modelar.

En la Figura 5.10 y en la Figura 5.11 se grafica la pérdida de carga por mes de los filtros Leopold y Multicrete II respectivamente, en modo de diagrama de cajas. Cada caja contiene un 50% de los datos, marcando en la parte inferior el primer cuartil (Q1) y en la superior el tercer cuartil (Q3), dentro de la caja se presenta la mediana con una línea negra y la media con un punto rojo. La barra de error o bigote contiene en su límite superior los casos por encima de Q3 más 1,5 veces el rango intercuartílico ($RIC = Q3 - Q1$) y en su límite inferior contiene los casos por debajo de Q1 menos 1,5 el RIC. Los valores atípicos o *outliers*, graficados como puntos negros, son aquellos que están fuera de los límites de la barra de error.

Gráfico de cajas de Pérdida de Carga mensual Filtros Leopold

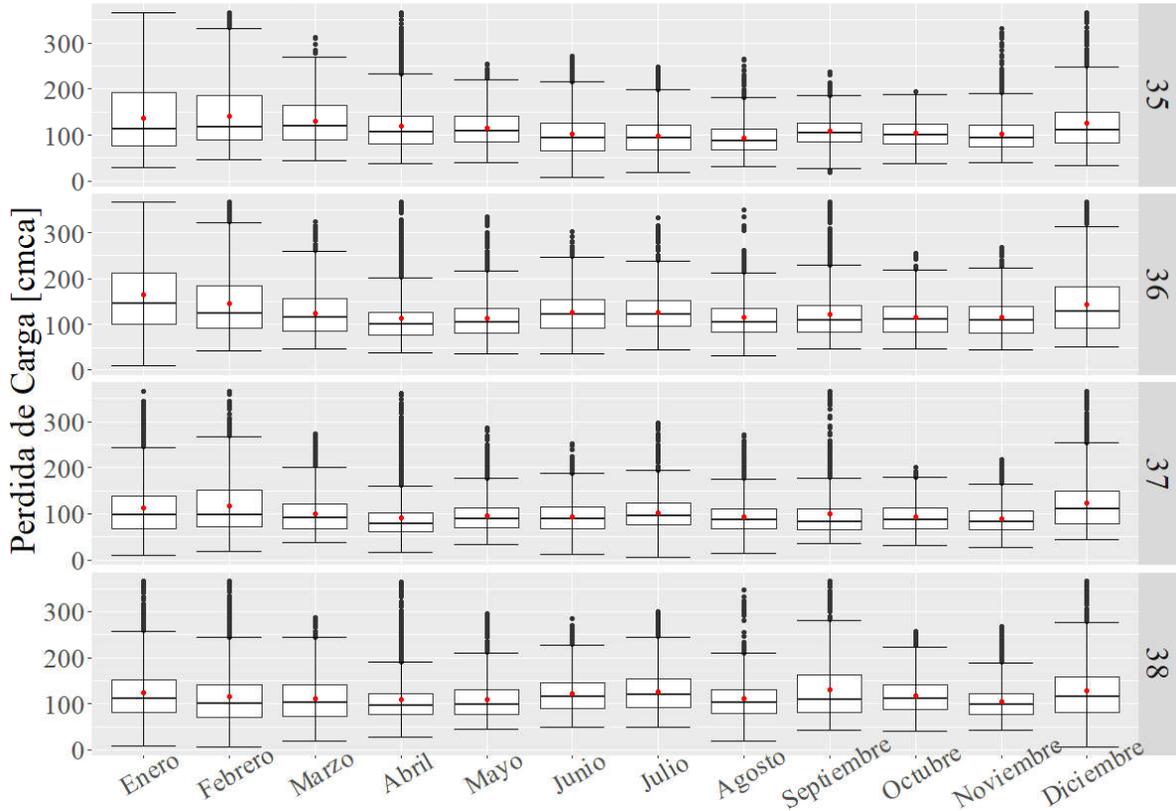


Figura 5.10. Gráfico de cajas de Pérdida de carga mensual para filtros Leopold.

En los filtros Leopold se puede ver que existe una mayor dispersión de pérdida de carga en los meses de verano, esto confirma que la pendiente es mayor en meses de verano como se concluyó con la Figura 5.5 y la media siempre es mayor a la mediana.

Gráfico de cajas de Pérdida de Carga mensual Filtros Multicrete II

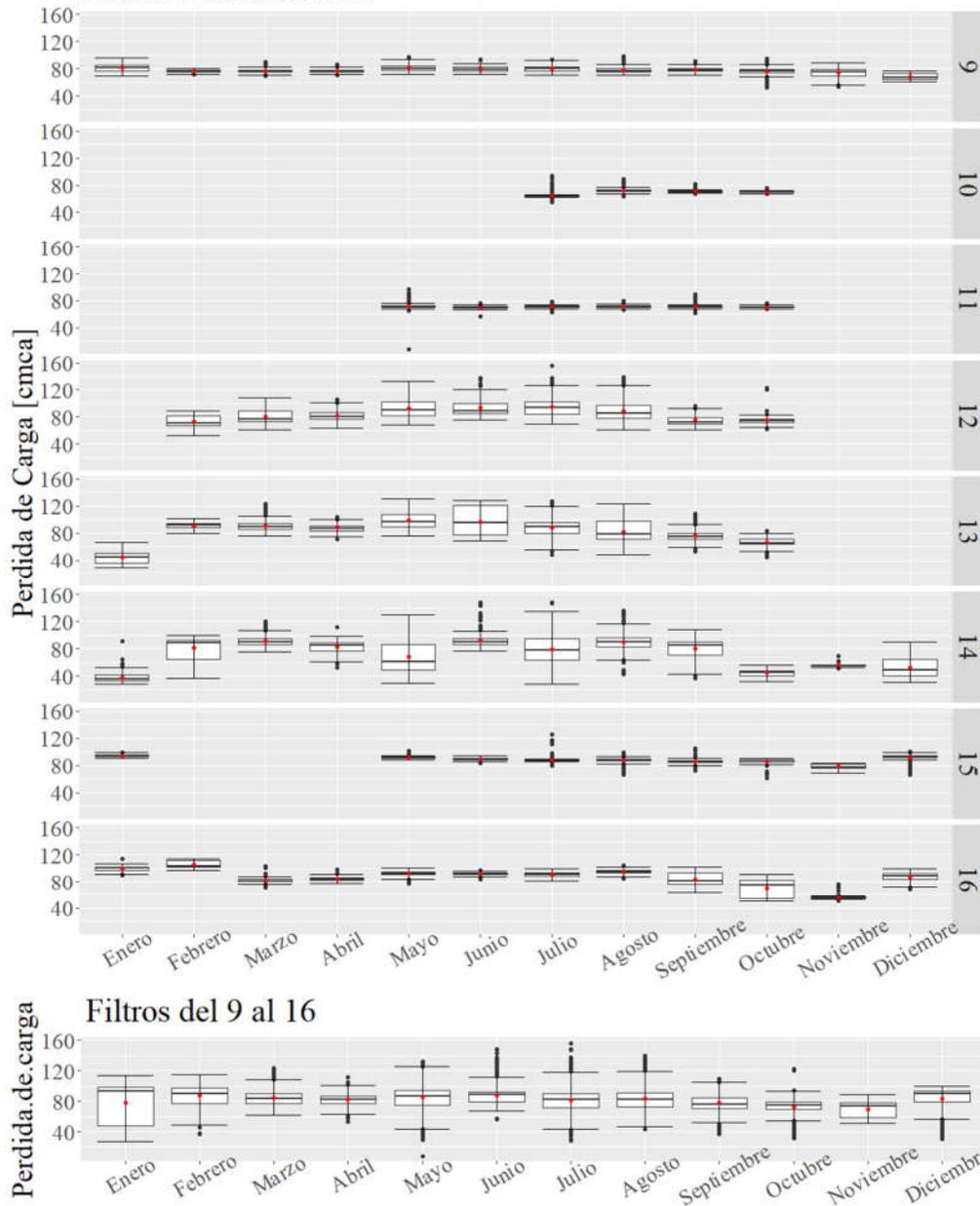


Figura 5.11 Gráfico de cajas de Pérdida de carga mensual para filtros Multicrete II.

Los filtros Multicrete II comenzaron su funcionamiento el 2018, por lo que tienen un comportamiento bastante inestable aún. Esto se puede ver en las diferencias entre los filtros 13 y 14 que presentan meses de gran dispersión y los filtros 10 y 11, que fueron los últimos en ponerse en marcha, presentan muy baja dispersión. El filtro 9, que es el que lleva más tiempo en funcionamiento, es posible notar que existe una mayor dispersión en los meses de verano,

pero la diferencia es muy sutil y los meses de transición presentan una dispersión muy baja, pero la media y la mediana se encuentra cercana a los 80 cmca durante todo el año.

Cuando se analizan todos los filtros en su conjunto, se ve más clara la dispersión en los meses de verano, pero también existe en los meses de invierno, siendo los meses de transición los que presentan una dispersión más baja, la media y la mediana se encuentra cercana a los 80 cmca durante todo el año, aumentando un poco en verano. Con estos resultados se puede concluir que la influencia de la temperatura en los filtros Multicrete II no es significativa, como lo es en los filtros Leopold.

5.2.3 Calidad del agua de entrada

Otro factor importante es la calidad del agua afluente a los filtros, analizada en base a la turbiedad. Para obtener la turbiedad afluente de los filtros Leopold se utilizan los datos de turbiedad y caudal de Laguna Negra y del Decantador 2 obtenida desde el SCT, ya que a estos filtros ingresa agua directa del Decantador 2, de Laguna Negra o una mezcla de ambos, por lo que se realiza un balance de masa para calcular la turbiedad de entrada a los filtros Leopold. Los resultados obtenidos se encuentran en la Figura 5.12. El lapso de tiempo de esta información es del 2017 hasta el 2019.

Para los filtros Multicrete II el agua de ingreso puede ser del Decantador 1 o del 2, por lo que se analizan ambos decantadores, pero para realizar la modelación se utiliza la información de toma de muestra manual en la entrada de la Batería Sur que alimenta a los filtros 9 al 16. El lapso de tiempo de esta información es de fines del 2018 a octubre del 2019.

Serie de tiempo de turbiedad entrada
PTAP Vizcachas

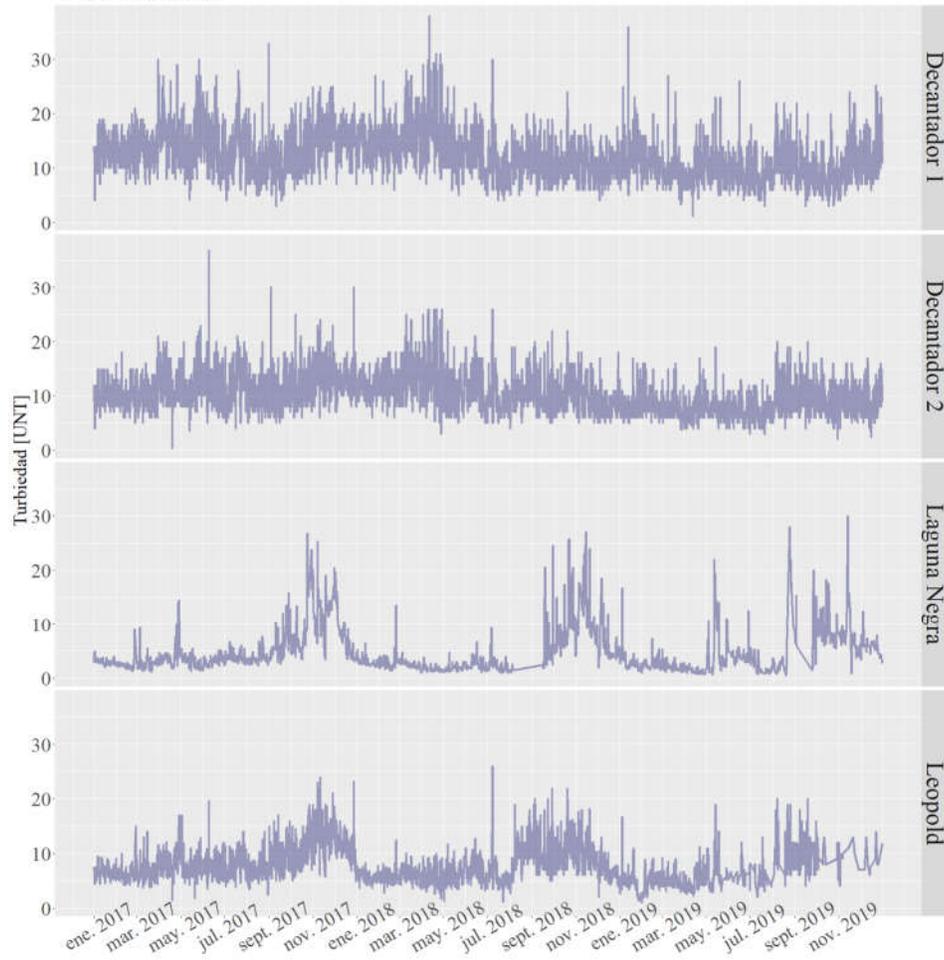


Figura 5.12. Turbiedad instantánea de entrada a los filtros Leopold.

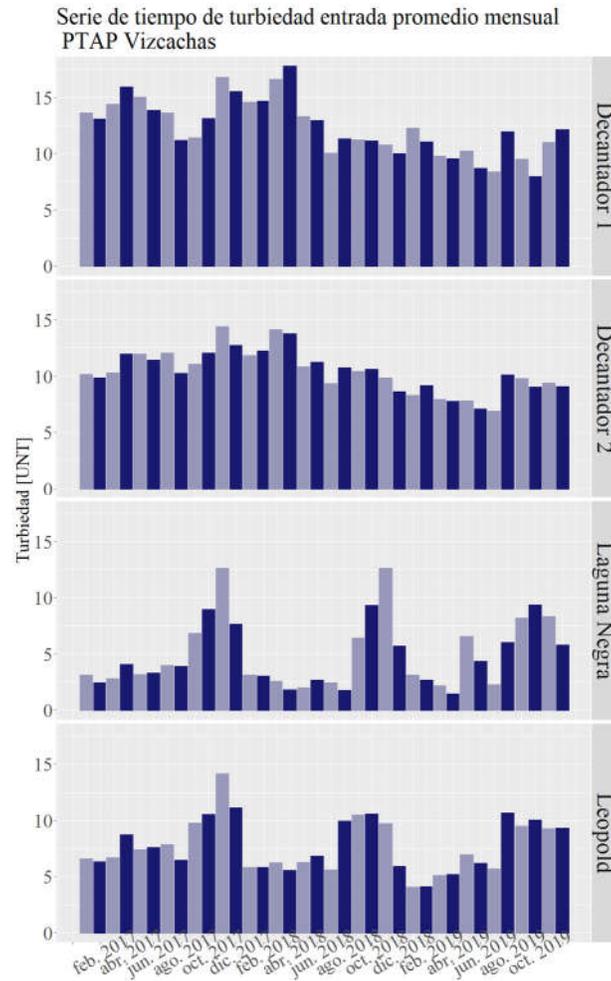


Figura 5.13. Turbiedad promedio mensual de entrada a los filtros Leopold.

Para los filtros Leopold, por lo general, se usa una mezcla del Decantador 2 con Laguna Negra, y como se puede ver en la Figura 5.12, la turbiedad de Laguna Negra tiene directa relación con los deshielos, aumentando la turbiedad en meses de primavera y verano, lo que también se refleja en los filtros Leopold.

En la Tabla 5.3 se resume la información de turbiedad de entrada de los filtros de PTAP Vizcachas.

Tabla 5.3. Resumen de información de turbiedad de entrada a los filtros Leopold.

	Decantador 1	Decantador 2	Laguna Negra	Leopold
Media	12,26 UNT	10,32 UNT	4,43 UNT	7,33 UNT
Desviación estándar (Nivel de confianza: 95%)	4,22 UNT	3,40 UNT	3,97 UNT	3,31 UNT
Media mensual máxima	17,70 UNT	14,34 UNT	12,56 UNT	14,06 UNT
Media mensual mínimo	7,89 UNT	6,80 UNT	1,36 UNT	3,97 UNT
Promedio 2017	13,88 UNT	11,44 UNT	4,88 UNT	8,50 UNT
Promedio 2018	12,79 UNT	11,07 UNT	4,50 UNT	7,22 UNT
Promedio 2019	10,11 UNT	8,44 UNT	3,22 UNT	5,87 UNT

El Decantador 1 es el que presenta las turbiedades más altas, con mayor desviación estándar y con mayores medias mensuales. Aunque la tecnología no varía entre los decantadores, existe una diferencia en el vertedero que presentan los decantadores que puede ser lo que causa la diferencia. Por otro lado, para los filtros Leopold es importante que la turbiedad media sea cercana a las 5 UNT porque esto permitiría alargar la longitud de carrera a 54 horas si la relación de SST/Turbiedad es 1.5 y hasta 108 horas si es que esta relación es de 1.

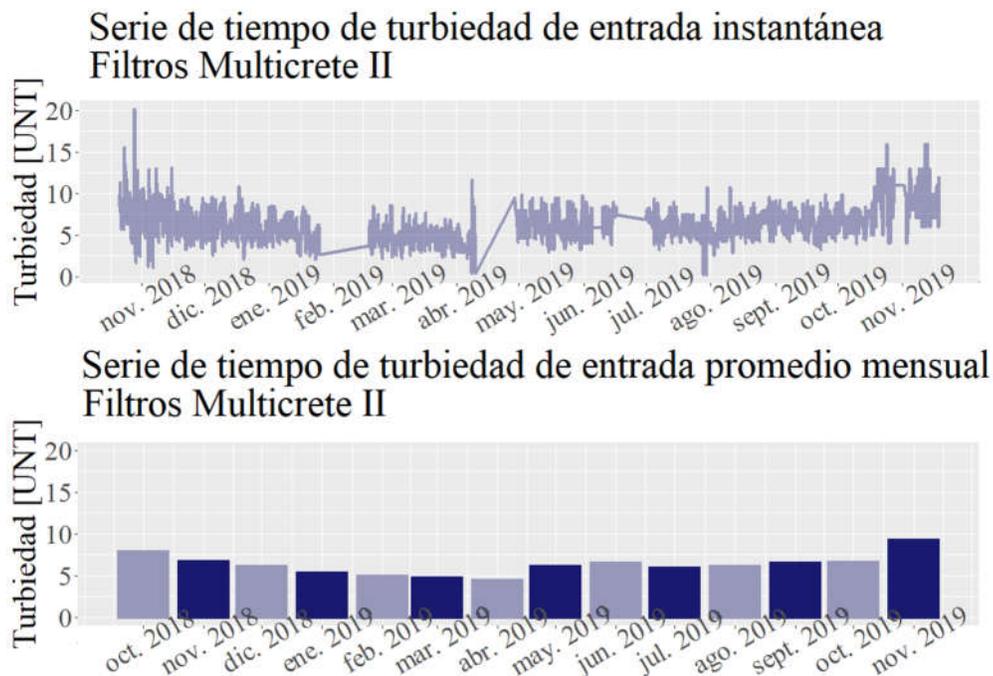


Figura 5.14. Turbiedad de entrada a los filtros Multicrete II, arriba la turbiedad instantánea y abajo el promedio mensual.

La turbiedad de entrada de los filtros Multicrete II, no presentas variaciones relacionadas con la meteorología, es constante en el tiempo, teniendo medias mensuales variables entre 5 y 7 UNT.

En la Tabla 5.4 se encuentra el resumen de la información de la turbiedad del agua afluyente a los filtros Multicrete II.

Tabla 5.4 Resumen de información de turbiedad de entrada a los filtros Multicrete II.

Afluyente Filtros Multicrete II	
Media	5,85 UNT
Desviación estándar (Nivel de confianza: 95%)	1,45 UNT
Media mensual máxima	9,26 UNT
Media mensual mínimo	4,39 UNT
Promedio 2018	6,43 UNT
Promedio 2019	5,82 UNT

El afluente a la batería sur de los filtros Multicrete II en su mayoría proviene del Decantador 2 y la media del efluente el año 2019, que es aproximadamente el mismo lapso de estudio de la turbiedad afluente a los filtros Multicrete II, es 8,44 UNT. Por lo que existe una diferencia de 2,5 UNT entre la salida del Decantador 2 y la entrada de los filtros. Entre una toma de muestra y otra puede existir decantación, pero es más de lo esperado. Esto puede suceder por que exista filtración en el punto de muestreo a la entrada de los filtros Multicrete II (toma en línea de succión de la bomba).

Si se comparan ambos tipos de filtros, la media de los filtros Multicrete II y su desviación estándar son menores, por lo tanto, la turbiedad de entrada en los filtros Multicrete II es más constante, lo que permite tomar decisiones en cuanto alargar la cantidad de horas de carrera de filtración sin importar la época del año en que se encuentre. A diferencia de los filtros Leopold, en que esta decisión estaría totalmente restringida a la época del año.

5.3 Lavado

En cuanto al lavado, se estudia la pérdida de carga inicial de los lavados en el tiempo, dado que, si ésta aumenta en el tiempo, es decir, si tiene una pendiente positiva, significa que los lavados no se están realizando correctamente. También se analiza la duración de la carrera en el tiempo, dado que, cualquier aumento apreciable en la frecuencia de lavado por encima del valor de diseño reduciría la producción por debajo del nivel de diseño. Finalmente, se realizó una inspección visual para determinar la limpieza al inicio y final del retrolavado.

5.3.1 Pérdida de carga inicial

Cuando los lavados se realizan correctamente, el ciclo de filtrado debiese comenzar siempre con la misma pérdida de carga independiente de la pérdida de carga con la que termine el ciclo de filtrado anterior. Por lo tanto, en una serie de tiempo que contenga las pérdidas de carga iniciales la pendiente debiese ser nula o aproximadamente nula.

Serie de tiempo de pérdida de carga inicial Filtros Leopold

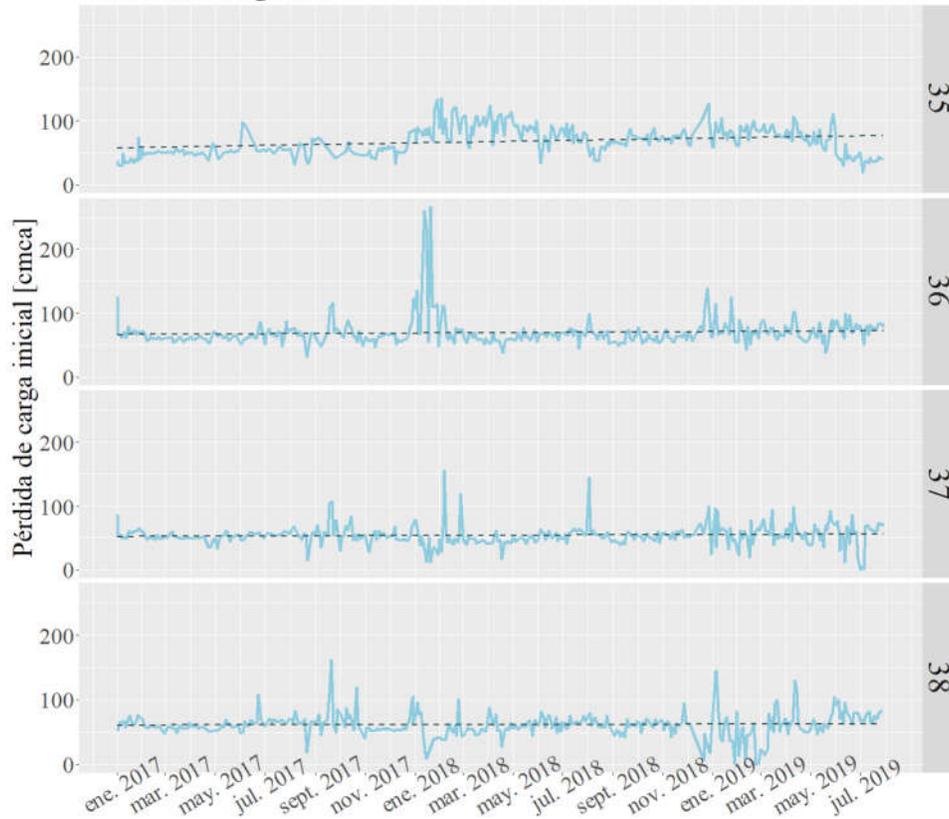


Figura 5.15. Serie de tiempo de pérdida de carga inicial en filtros Leopold.

En la Figura 5.15 se grafica la pérdida de carga inicial en el tiempo de los filtros Leopold, y es sólo en el filtro 35 donde se encuentra una pendiente positiva, el resto de los filtros se desvía de la pendiente la pérdida de carga inicial en algunos ciclos de filtración, pero siguen manteniendo una pendiente aproximadamente nula.

Serie de tiempo de Pérdida de carga inicial Filtros Multicrete II

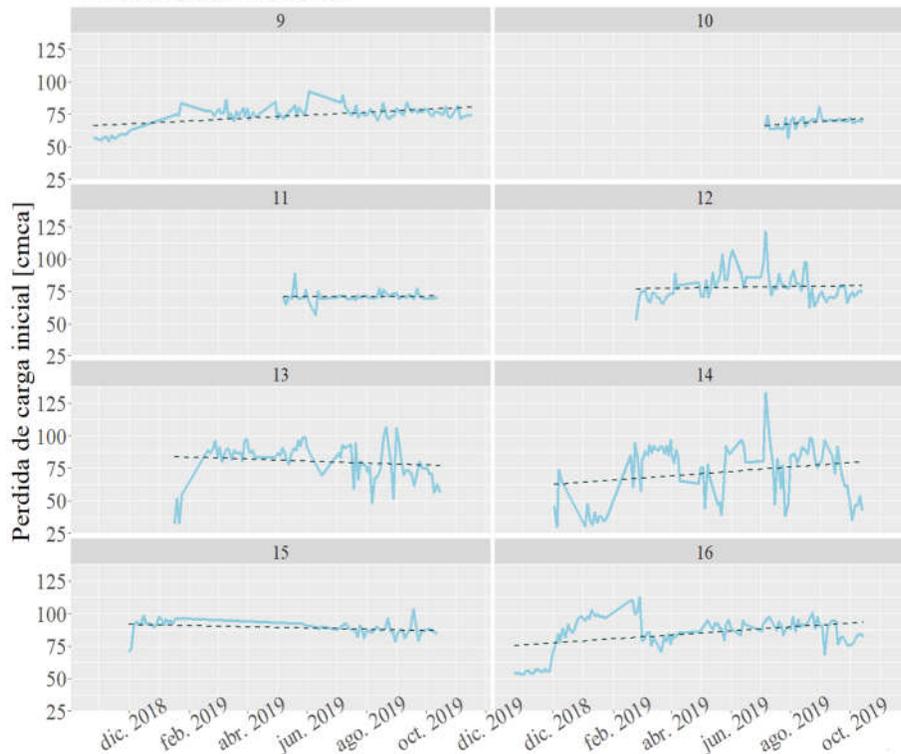


Figura 5.16. Serie de tiempo de pérdida de carga inicial en filtros Multicrete II.

En la Figura 5.16 se grafica la pérdida de carga inicial en el tiempo de los filtros Multicrete II. Aquí es posible notar pendientes positivas en los filtros 9,10, 14 y 16; pendientes negativas en los filtros 13 y 15, y el resto con pendiente aproximadamente nula. El problema de este funcionamiento es que no existe uniformidad en los filtros, se verifica una amplitud muy grande de pérdida de carga inicial en algunos filtros. La variación de este factor es preocupante porque implicaría que el lavado no se está realizando de la forma correspondiente, y esto puede dañar el medio filtrante, por lo que es necesario establecer cierta normativa de lavado que regularice la variación en la pérdida de carga inicial.

5.3.2 Tiempo de carrera

Es importante que la longitud de carrera se mantenga dentro de lo recomendado por el proveedor para no ocasionar daños en el medio filtrante que perjudique su funcionamiento. De igual forma, es necesario aprovechar al máximo la tecnología y realizar las carreras lo más larga posible.

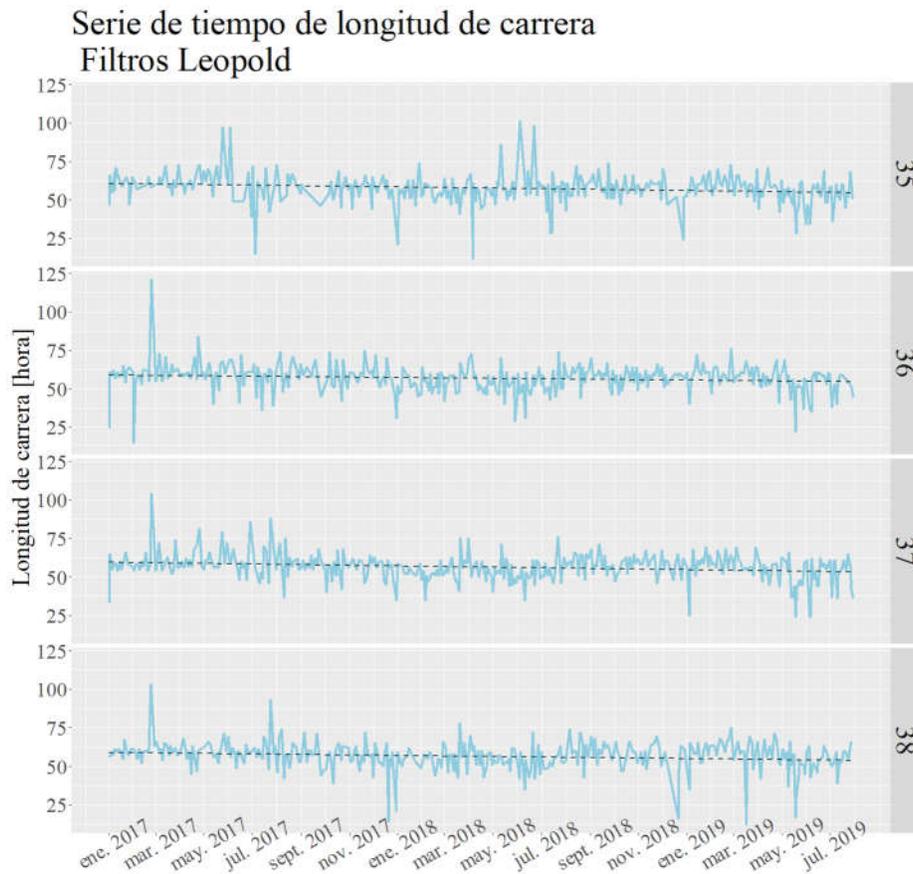


Figura 5.17. Serie de tiempo de longitud de carrera en filtros Leopold.

En el caso de los filtros Leopold, esta longitud de carrera permitida depende de la calidad de agua de entrada, ya que, con turbiedad media cercana a las 5 UNT la longitud de carrera puede ser de 54 horas si la relación de SST/Turbiedad es 1,5 y de 108 horas si es que esta relación es de 1. En la Figura 5.17 se observa que la longitud de carrera promedio en todos los filtros es cercana a las 54 horas, correspondiente a la longitud de carrera de diseño con la relación SST/Turbiedad es 1,5. Otro aspecto importante a destacar es que la longitud de carrera se mantiene siempre muy cercana a este promedio, reflejando una operación conservadora en términos de la longitud de carrera.

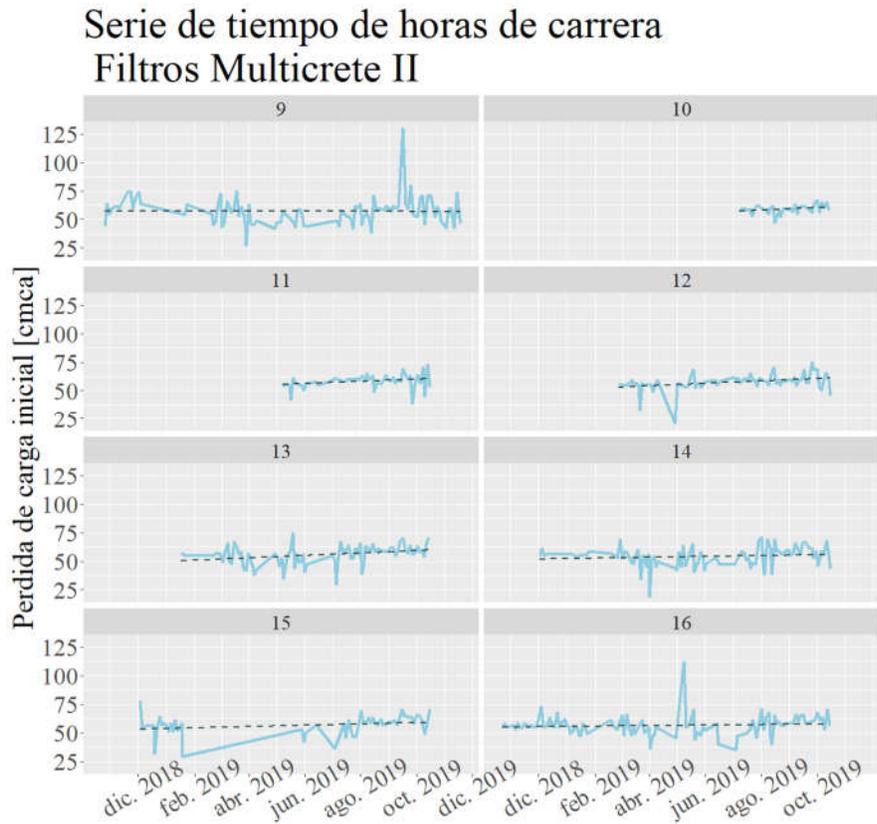


Figura 5.18. Serie de tiempo de longitud de carrera en filtros Multicrete II.

La Figura 5.18 muestra la longitud de carrera de los filtros Multicrete II. Estos filtros presentan pendientes aproximadamente nulas, lo que indica que la operación está siguiendo la normativa de horas de diseño. A pesar de esto, existe gran variabilidad, lo que se puede deber a que los filtros están comenzando su funcionamiento, en algunas ocasiones se están realizando trabajos en terreno que interrumpen algunas carreras de filtración.

5.3.3 Lavado según inspección visual

La secuencia del retrolavado consiste en, primero, una disminución de nivel bajo la superficie de la canaleta de lavado. Cuando el nivel desciende es posible apreciar organismos vivos, como algas y una capa de mugre de color amarillo claro sobre el medio filtrante (Esto se ve con claridad en la primera foto de la Figura 5.20, lavado de los filtros Multicrete II). Luego comienza el flujo de aire y cuando éste acaba se abre la compuerta de agua de lavado y comienza un flujo lento de agua, para posteriormente subir su velocidad y, finalmente, vuelve a ser lento para permitir una suave estratificación del medio. Finalmente, el lavado termina cuando se abre la compuerta de agua de filtrado. El aspecto más importante al terminar el lavado es que

se vea la antracita de color negro para corroborar que el lavado se realizó correctamente. En la Figura 5.19 se muestra una serie fotográfica de la secuencia de lavado de los filtros Leopold.

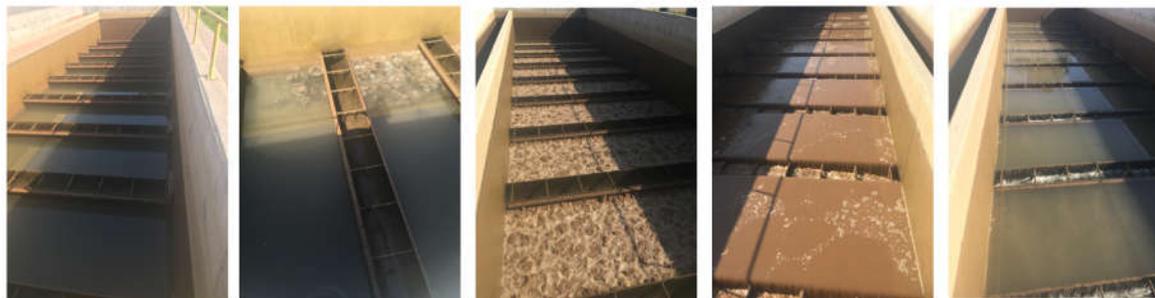


Figura 5.19. Serie fotográfica del retrolavado en filtro Leopold.

En los filtros Multicrete II, el proceso de lavado se realiza igual que en los filtros Leopold, pero este puede también realizar lavados con aire y agua de forma simultánea al inicio del lavado. En la Figura 5.20 se ve una serie fotográfica de la secuencia de lavado de los filtros Multicrete II.



Figura 5.20. Serie fotográfica del retrolavado en filtro Multicrete II.

Capítulo 6: Tratamiento de los datos y generación de modelo de Machine Learning

Un último paso previo a la modelación es tratar los datos vacíos, ya que de haber datos vacíos la modelación no funciona. Para esto, se decide eliminar todas las filas que tengan un dato vacío de alguna variable, para así dejar los resultados mas apegados a la realidad.

En el caso de los filtros Leopold existe una data de 3 años y con datos horarios en el caso de caudal, nivel y pérdida de carga para 4 filtros (72 .723 datos). Los datos de turbiedad se toman entre 5 a 6 veces al día, aproximadamente, por lo general, en los mismos horarios tanto para el Decantador 2 y para Laguna Negra, por lo tanto, al eliminar las filas vacías, el modelo pierde información, pero no pierde robustez, porque sigue teniendo la cantidad de datos necesaria para modelar (20.761 datos) y se decide no reemplazar datos vacíos para que se acerca más a la realidad. Una opción era replicar las turbiedades anteriores, pero ya que en los filtros Leopold esta depende de la meteorología y de cualquier desprendimiento que ocurra en el río Maipo, por lo que pueden existir cambios importantes en 1 hora. En el caso de los filtros Multicrete II, la data es de 1 año y con datos horarios en el caso de caudal, nivel, turbiedad afluente, turbiedad efluente y pérdida de carga, para 8 filtros.

Luego se preparan los datos para iniciar la modelación. Se revisa si la variable a modelar tiene un comportamiento Gaussiano para que sea más fácil el ajuste del modelo, para esto se prueba transformando la variable a modelar. Se probaron diferentes transformaciones, como raíz cuadrada, exponencial y logaritmo y se encuentra que en el caso de los filtros Leopold se ve una campana de Gauss cuando se transforma a la raíz de la pérdida de carga, como se puede ver en la Figura 6.1. En el caso de los filtros Multicrete II no se ven diferencias al transformar la variable, por lo que queda la variable de pérdida de carga sin transformación y finalmente se eliminan los datos duplicados, estos datos aparecen por un error de lectura del instrumento o por errores en el traspaso de información a la base de datos.

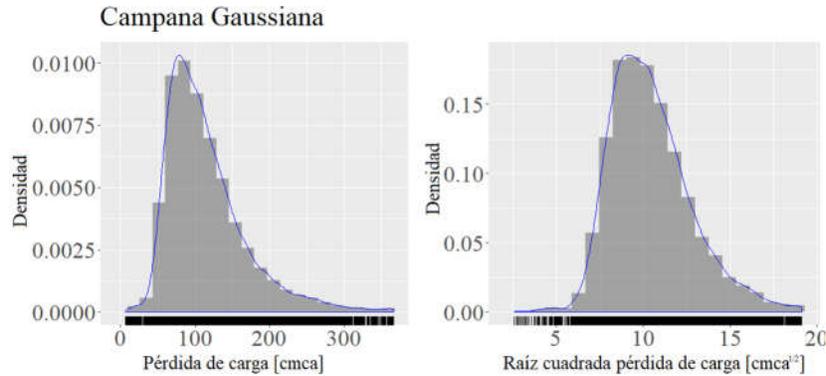


Figura 6.1. Campana de Gauss de variable pérdida de carga y la raíz de la pérdida de carga para filtros Leopold.

Para comenzar la modelación se escalan los datos numéricos, porque es importante que los valores se encuentren en el mismo rango y se separan los datos de forma aleatoria para realizar validación cruzada, utilizando un 70% de los datos para realizar la modelación, que se le denomina *training* y un 30% de los datos para evaluar el modelo, que se le denomina *test*.

El modelo realiza una regresión múltiple lineal con los datos de *training*, siendo x_i los factores de eficiencia conocidos y la pérdida de carga como y , como se ve en la siguiente ecuación.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_{i,1} + b_2 \cdot x_{i,2} + \dots + b_n \cdot x_{i,n}$$

Obteniendo como resultado de la modelación los coeficientes b_i de los factores de eficiencia y con estos coeficientes se puede realizar la predicción de la pérdida de carga como $f(x)$ para diferentes escenarios de los factores de eficiencia.

$$f(x_i) = b_0 + b_1 \cdot x_{i,1} + b_2 \cdot x_{i,2} + \dots + b_n \cdot x_{i,n}$$

Para evaluar, se calcula la cercanía de la verdad (y) a lo que predijimos ($f(x)$), usando los datos de testeo o “*test*”. Se evaluará entonces la diferencia, pero evitando ver los errores en la dirección de lo predicho o de los datos reales. Utilizando la siguiente fórmula para penalizar los errores en cualquier dirección:

$$|f(x_i) - y_i|$$

Pero eso no es exactamente lo que se va a usar para evaluar la calidad de la modelación, donde se utiliza el error al cuadrado (MSE) que considera los errores en cualquier dirección y es más fácil desde el punto de vista computacional y analítico porque es diferenciable, la raíz del error

al cuadrado (RMSE) y finalmente el error absoluto medio (MAE). Esto es fundamental para determinar la calidad de la regresión.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{n}}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i|}{n}$$

Luego de realizar la modelación que nos entrega la regresión lineal múltiple con los respectivos errores, se realizan dos regularizaciones para restringir los parámetros del modelo. El primero es conocido como L2 o Ridge regularización que evita el ajuste excesivo del modelo aplicando una penalización proporcional a la norma L2 o euclidiana de los pesos del modelo a la función de pérdida. Si usa el RMSE como la métrica, la función de pérdida total es la suma del error al cuadrado y el término de regularización. La función de pérdida total se puede escribir de la siguiente manera:

$$J(\beta) = \|A\beta + b\|^2 + \lambda \|\beta\|^2$$

Donde la penalización de los coeficientes del modelo β_i se escribe:

$$\lambda \|\beta\|^2 = (\beta_1^2 + \beta_2^2 + \dots + \beta_n^2)^{1/2} = \lambda \left(\sum_{i=1}^n \beta_i^2 \right)^{1/2}$$

Siendo $\|\beta\|^2$ lo que se denomina la norma L2 de los coeficientes, ya que se elevan a dos los pesos de cada coeficiente del modelo, se suman los cuadrados y finalmente se eleva la suma de las potencias a un medio. El valor de λ determina cuánto se restringe la norma de los coeficientes. La Figura 6.2 es una interpretación geométrica de la restricción de penalización de la norma L2.

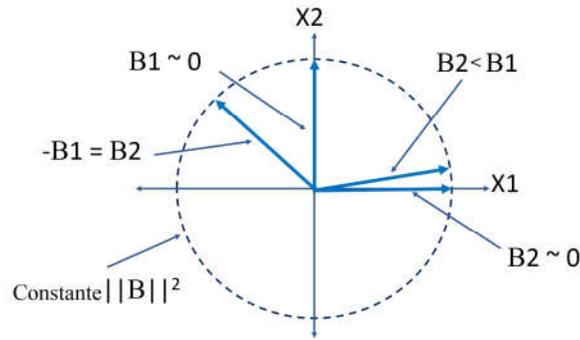


Figura 6.2. Interpretación geométrica de regularización L2.

La segunda regularización se denomina Regularización Lasso o L1. El método Lasso limita la suma de los valores absolutos de los coeficientes del modelo. La norma L1 se conoce en algún momento como la norma de Manhattan, ya que la distancia se mide como si estuviera viajando en una cuadrícula rectangular de calles. Esto contrasta con la norma L2 que mide la distancia "en línea recta".

Se puede calcular la norma L1 de los coeficientes del modelo de la siguiente manera:

$$\|\beta\| = (|\beta_1| + |\beta_2| + \dots + |\beta_n|) = \left(\sum_{i=1}^n |\beta_i| \right)$$

Para calcular la norma L1, elevamos la suma de los valores absolutos a la primera potencia. Al igual que con la regularización L2, para la regularización L1, un término de penalización se multiplica por la norma L1 de los coeficientes del modelo. Un multiplicador de penalización, λ , determina cuánto la norma del vector de coeficientes restringe los valores de los pesos. La función de pérdida completa es la suma de los errores al cuadrado más el término de penalización que se convierte en:

$$J(\beta) = \|A\beta + b\|^2 + \lambda\|\beta\|$$

Se puede ver una interpretación geométrica de la penalización de la norma L1 en la Figura 6.3 a continuación.

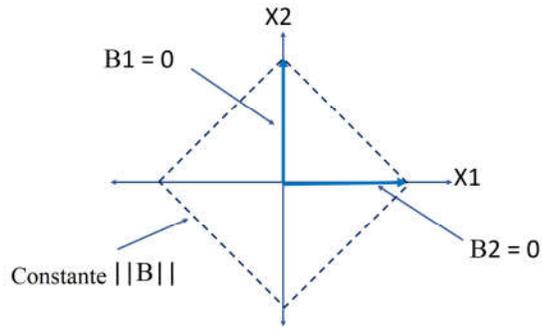


Figura 6.3. Interpretación geométrica de regularización L1.

6.1 Resultado modelación

Al realizar la modelación para los filtros Leopold se obtiene como resultado los coeficientes de la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Resultados modelación filtros Leopold.

b_x	Coefficiente	Valor estimado	Desviación estándar
b_0	—	0,0000	0,0062
b_1	Hora de carrera [h]	0,7001	0,0064
b_2	Nivel [cm]	0,4087	0,0065
b_3	Tasa [m/h]	0,1806	0,0063
b_4	Turbiedad de entrada [UNT]	-0,0174	0,0063
b_5	Temperatura [°C]	0,0686	0,0063

Por orden de importancia, las variables que presentan de mayor a menor relación con la pérdida de carga son las horas de carrera, el nivel, la tasa, la temperatura y luego la turbiedad.

Y al evaluar la calidad de la modelación se obtienen los errores de evaluación de los filtros Leopold en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Errores para evaluar la modelación de filtros Leopold.

	Valor
R^2	0,54350
MSE	0,42867
RMSE	0,65473
MAE	0,44206

Estos errores reflejan que la diferencia entre lo que se predice con el modelo y los datos que se reservaron para realizar la validación cruzada tienen una diferencia de 44% y el ajuste de la simulación es de 0,54. Estos resultados indican que el modelo no es confiable porque presenta errores, pero entrega un estimado.

Al realizar la modelación para los filtros Multicrete II se obtiene como resultado los coeficientes en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Resultado modelación filtro Multicrete II.

b_x	Coefficiente	Valor estimado	Desviación estándar
b_0	—	0,0000	0,0068
b_1	Hora de carrera [h]	0,0978	0,0070
b_2	Nivel [cm]	-0,0713	0,0075
b_3	Tasa [m/h]	0,1477	0,0079
b_4	Turbiedad de entrada [UNT]	-0,1626	0,0069
b_5	Temperatura [°C]	-0,1108	0,0071

Por orden de importancia, las variables que presentan de mayor a menor relación con la pérdida de carga son la turbiedad, la tasa, la temperatura, las horas de carrera y luego el nivel.

Al evaluar la calidad de la modelación, se obtienen los errores de evaluación de los filtros Multicrete II en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Errores para evaluar la modelación de filtros Multicrete II.

	Valor
R^2	0,0664
MSE	0,9606
RMSE	0,9801
MAE	0,7400

Estos errores reflejan que la diferencia entre lo que se predice con el modelo y los datos que se reservaron para realizar la validación cruzada tienen una diferencia de 74% y el ajuste de la simulación es de 0,06. Estos resultados indican que el modelo no es confiable porque presenta grandes errores, y el ajuste es muy bajo.

Los resultados eran esperados ya que, al visualizar los datos en el Capítulo 5, era posible notar que no existía correlación de comportamiento entre los diferentes filtros Multicrete II y tampoco fue posible establecer una relación con la temperatura o la turbiedad, que son parámetros de efecto climático.

Finalmente, cuando se realizan las regularizaciones a ambos modelos, tanto de los filtros Leopold como de los Multicrete II, los resultados no son positivos. Los errores aumentan y los coeficientes no varían, por lo que las regularizaciones se establecen en el código del modelo, para que, en el futuro, cuando se dispongan de más datos, poder volver a analizar estos datos, pero, por ahora, se obviarán debido a su baja influencia en los resultados.

6.2 Simulación

Se realiza la simulación con los resultados obtenidos de la modelación presentada en la sección anterior. Dado que los resultados del modelo no son buenos para los filtros Multicrete II, la simulación se realiza sólo para los filtros Leopold.

Para realizar la modelación los datos se escalan y se centran, por lo que es necesario tener la media y desviación estándar de las variables del modelo. Los estadísticos se presentan en la Tabla 6.5 para realizar la simulación descentrada y desescalada.

Tabla 6.5. Media y desviación estándar de las variables para filtros Leopold.

i	Coficiente	Media (\bar{x}_i)	Desviación estándar (sd_i)
1	Hora de carrera [h]	28,27	17,19
2	Nivel [cm]	263,39	9,47
3	Tasa [m/h]	9,08	1,65
4	Turbiedad de entrada [UNT]	7,09	3,28
5	Temperatura [°C]	12,35	2,83
6	Raiz pérdida de carga [cmca]	10,46	2,34

El modelo multilineal descentrado y desescalado queda representado por:

$$\begin{aligned} & \sqrt{PdC_{simulada}} \cdot sd_6 + \bar{x}_6 \\ &= b_0 + \frac{b_1}{sd_1} \cdot (x_1 - \bar{x}_1) + \frac{b_2}{sd_2} \cdot (x_2 - \bar{x}_2) + \frac{b_3}{sd_3} \cdot (x_3 - \bar{x}_3) + \frac{b_4}{sd_4} \cdot (x_4 - \bar{x}_4) \\ &+ \frac{b_5}{sd_5} \cdot (x_5 - \bar{x}_5) \end{aligned}$$

Despejando la pérdida de carga, la fórmula es:

$$PdC_{simulada} = \left[\frac{\left(b_0 + \frac{b_1}{sd_1} \cdot (x_1 - \bar{x}_1) + \frac{b_2}{sd_2} \cdot (x_2 - \bar{x}_2) + \frac{b_3}{sd_3} \cdot (x_3 - \bar{x}_3) + \frac{b_4}{sd_4} \cdot (x_4 - \bar{x}_4) + \frac{b_5}{sd_5} \cdot (x_5 - \bar{x}_5) \right) - \bar{x}_6}{sd_6} \right]^2$$

Con esto se pueden simular diferentes escenarios, con diferentes horas de carrera, tasa, turbiedades, temperaturas y nivel.

El primer escenario corresponde a una simulación en circunstancias estándar mensuales, es decir, se utiliza la tasa de diseño, la temperatura media mensual del agua, la turbiedad media mensual entrante, el nivel promedio y con carreras de 108 horas máximo como se ve en la Figura 6.4.

Simulación perdida de carga Filtros Leopold

Tasa de diseño = 9,14 m/h

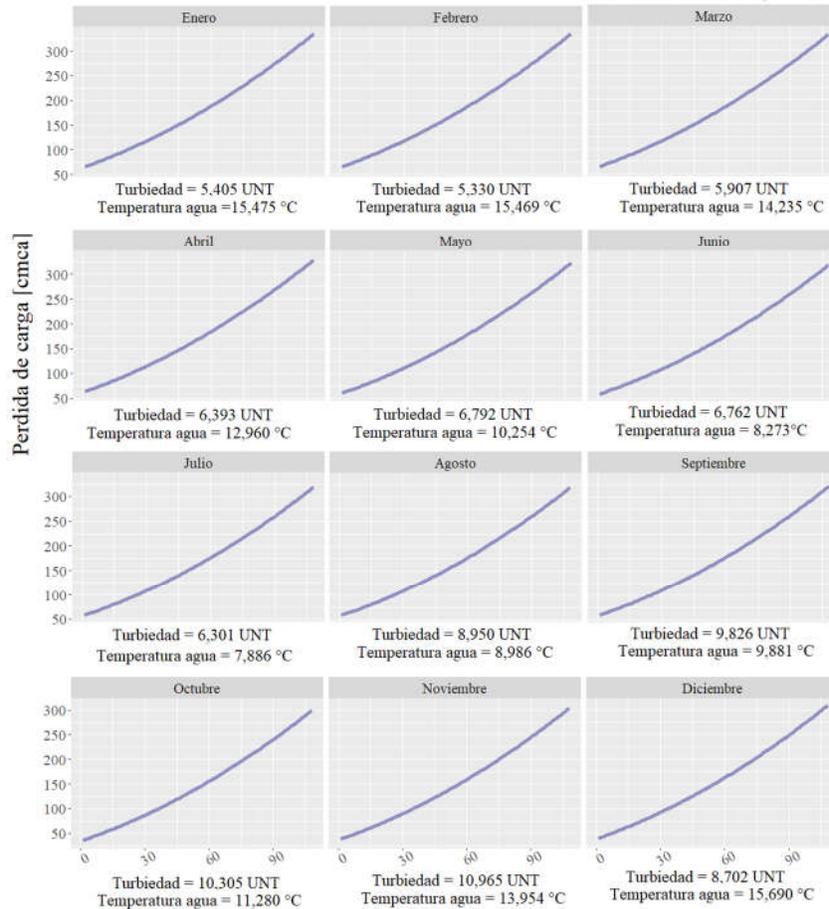


Figura 6.4. Resultado simulación en condiciones estándares mensuales para filtros Leopold.

Dentro de los resultados de la simulación las diferencias son poco perceptibles, esto podría mejorar, si en vez de ocuparse una temperatura promedio mensual por mes como variable de entrada se trabajará con la temperatura horaria. La diferencia que refleja esta simulación, al analizar los datos en la Tabla 6.6, es que en épocas más cálidas la pérdida de carga es mayor, existe una mayor pendiente y las máximas y mínimas son mayores. Como se esperaba luego de analizar los datos.

Tabla 6.6. Datos simulación filtros Leopold.

	Pendiente pérdida de carga [cmca/h] $\left(\frac{dP}{dt}\right)$	Pérdida de carga mayor [cmca] ($t = 108$ horas)	Pérdida de carga menor [cmca] ($t = 0$ horas)
Enero	2.517	334.704	66.939
Febrero	2.517	334.725	66.948
Marzo	2.502	331.904	65.690
Abril	2.487	329.052	64.425
Mayo	2.457	323.320	61.903
Junio	2.436	319.300	60.151
Julio	2.433	318.718	59.898
Agosto	2.432	318.718	59.898
Septiembre	2.446	321.210	60.981
Octubre	2.461	324.057	62.225
Noviembre	2.487	329.047	64.423
Diciembre	2.510	333.450	66.379

Capítulo 7: Conclusión

7.1 Análisis y conclusiones

Al analizar la eficiencia de los filtros se estudia la calidad de agua a la salida de los filtros y la operación de los filtros, esto último analizando la variación de la pérdida de carga según los diferentes factores de eficiencia que se consideran en la literatura y los lavados.

La calidad de agua de salida se estudia en cuanto al parámetro de turbiedad de salida de los filtros. Este parámetro presenta muy buenos resultados, dado que la norma chilena se cumple en un 100% de las carreras analizadas.

El desafío de la empresa Aguas Andinas consiste en que todas las mediciones se encuentren bajo 1 UNT. Este desafío se alcanza en un 96 % de las mediciones durante un lapso de tres años desde el 2017 al 2019 en los 20 filtros de PTAP Vizcachas. En los filtros Multicrete II su cumplimiento es de un 99,99% en donde el 0,01% que no se cumple puede encontrarse dentro del error de medición o un efecto de que estos se encuentran en un proceso de renovación, por lo que no se encuentran operando en circunstancias normales. En el año 2019, a nivel de planta, considerando los 20 filtros de PTAP Vizcachas el desafío se alcanzó un 99,88% de las mediciones, y el 0,12% que no cumple con el desafío se encuentra dentro de posibles errores de medición de turbiedad, o eventos específicos, que no representan el funcionamiento general de los filtros.

En cuanto a la normativa internacional, esta es más estricta en ciertos países como Estados Unidos y Canadá, donde se exige que un 95% de las mediciones se encuentren bajo 0,3 UNT de turbiedad a la salida de los filtros para plantas que realizan tratamiento convencional. Esta condición se cumple en los filtros Multicrete II en un 90,86% de las mediciones. En el año 2018, a nivel de planta se alcanzó un 33,73% de cumplimiento y en el 2019 éste fue de 56,10%, lo que significa un aumento del cumplimiento en un 22,4%. Esto puede tener una directa relación con la entrada en funcionamiento de los filtros renovados, ya que el primero de ellos se integró a fines de 2017, correspondiente al filtro piloto 9, y, entre fines del 2018 y hasta mediados 2019, se agregan los 7 filtros restantes de la Batería Sur. Por lo que se espera que al integrar la batería Norte, que contiene los filtros del 1 al 8, la turbiedad de la PTAP Vizcachas

a la salida de los filtros siga mejorando, logrando los estándares de la normativa internacional mínimo en un 72,8% de las mediciones, si la tendencia sigue como la actual.

En cuanto a los resultados operacionales, como se indica en la teoría, a mayor tasa de filtración, mayor será la pendiente de pérdida de carga, por lo que se recomienda respetar la tasa de diseño.

Los filtros Leopold funcionan, la mayor parte del tiempo, a nivel constante y la influencia del nivel es mayor que la tasa de filtración. Esto ocurre porque la tasa de filtración no se puede controlar tan fácilmente, dado que las tuberías de los cuatro filtros se encuentran unidas. Al entrar uno de los filtros en lavado, los otros filtros reciben su caudal.

Los factores de turbiedad afluente y temperatura del agua, factores asociados a efectos climatológicos, como deshielos o eventos de turbiedad, se ven reflejados en el comportamiento de los filtros Leopold, no así en los filtros Multicrete II. Esto se esperaba ya que en los filtros Leopold se usa agua de Laguna Negra, que acentúa el efecto climatológico. En cambio, en los filtros Multicrete II, este efecto climatológico se aminora en los procesos previos a la filtración. Por esto, en los filtros Multicrete II es importante ponerle atención a la tasa y nivel de filtración, ya que esto hará variar la eficiencia de los filtros en mayor medida que el efecto de la turbiedad de entrada a los filtros y la temperatura del agua.

Por último, se realiza el estudio operacional de los lavados. Cuando se realiza la visita, para la inspección visual de los lavados, se puede ver la antracita al final del lavado en ambos filtros, lo que indica que a simple vista el lavado se está realizando de buena manera. Sin embargo, al estudiar los datos que verifican el buen funcionamiento de los filtros, es decir, la pérdida de carga inicial, en los filtros Multicrete II se evidencia un lavado deficiente en los filtros, porque la pérdida de carga inicial es muy variable en el tiempo, presentando incluso pendientes positivas en algunos de los filtros. Esta variabilidad se acentúa en los primeros filtros que comenzaron a operar luego de la renovación (Filtro 9, 16 y 15). Esto se puede deber a las constantes interrupciones del proceso de filtración en estos filtros, dado que, ante cualquier prueba de los filtros en renovación del resto de la batería, es necesario interrumpir la carrera de estos filtros, y como fueron los primeros en entrar en funcionamiento, son los que presentan más interrupciones. Por lo que se espera que esto se regularice cuando todos los filtros se encuentren completamente renovados y el proceso de filtración se realice bajo circunstancias

normales, respetando las consignas del proceso de filtración y del lavado para obtener pérdidas de carga iniciales menos variables.

Con respecto a las horas de carrera, los filtros Multicrete II realizan las horas de carrera de diseño. Los filtros Leopold también operan dentro del rango de diseño establecido por el fabricante, pero usan las horas de diseño más conservadora, esto es, considerando que la relación SST/Turbiedad es de 1,5. Por lo que las carreras de los filtros Leopold podrían ser más largas, pero depende de realizar un estudio de SST antes de la entrada de los filtros, para conocer la relación SST/Turbiedad, ya que si esta relación es igual a 1, las carreras podrían ser hasta de 108 horas.

Los lavados son el punto donde existe mayor pérdida de agua en el proceso de filtración, para disminuir estas pérdidas es recomendable realizar lavados con aire, que es lo que se está implementando actualmente en PTAP Vizcachas, para disminuir el caudal de agua por lavado. Siendo ahora el uso de agua por lavados de 944 m³ aproximadamente para los filtros Leopold y 1124 m³ para los filtros Multicrete II. Otra forma de disminuir las pérdidas de agua es aumentar las horas de carrera, esto es crucial para disminuir las pérdidas de agua durante el proceso de filtración, ya que el porcentaje de aumento en longitud de carrera será aproximadamente equivalente al porcentaje de disminución de uso de agua por lavado.

En cuanto a la modelación, sería necesario tener datos por un mayor tiempo, así el modelo es más robusto y representativo. Esta diferencia se puede ver en que el modelo de los filtros Leopold tiene dos años más de datos que los filtros Multicrete II y se obtienen mejores resultados. Esto también ocurre porque los filtros Leopold tienen un funcionamiento más estable en el tiempo en que han estado operando, en comparación al funcionamiento de los filtros Multicrete II. En los filtros Leopold no ocurren interrupciones durante el proceso de filtración y las consignas de funcionamiento se han establecido.

Tener una mayor cantidad de datos en el tiempo permite tener más valores de temperatura para notar la diferencia simulación y que no sea necesario utilizar el promedio, si no el dato en sí.

7.2 Recomendaciones

1. Los resultados muestran una operación variable en los filtros Multicrete II. Pese a que los resultados de turbiedad son muy efectivos, en la operación los filtros presentan diferencias entre ellos, como se vio en el gráfico de cajas, la dispersión de la pérdida de carga no tiene una dependencia temporal y es diferente entre los filtros.
2. También es necesario mantener una revisión de la pérdida de carga inicial en los filtros Multicrete II terminada la renovación. Debido a que la variabilidad es mayor en los primeros filtros que comenzaron a operar luego de la renovación (Filtro 9, 16 y 15), se concluye que tiene relación con interrupciones del proceso de filtración, debido a la renovación. Por lo que se espera que esto se regularice cuando todos los filtros se encuentren completamente renovados y el proceso de filtración se realice bajo circunstancias normales.
3. Para disminuir el uso de agua se puede aumentar la longitud de carrera en los filtros Leopold, pero previamente es necesario realizar campañas de mediciones de SST a la entrada del filtro, para conocer específicamente la relación SST/Turbiedad, de esta forma se puede establecer cuánto tiempo es posible alargar las carreras. Dado que los filtros Leopold presentan una influencia climatológica mayor, se espera que los resultados apuntaran a que en épocas más cálidas la turbiedad aumenta, por lo que las carreras deberán ser más cortas que en épocas de frío.
4. Otra forma de alargar las carreras es realizar una renovación de los decantadores, o realizar mejoras a los procesos previos a la filtración y así disminuir la turbiedad entrante.
5. Revisar periódicamente el estado y calibración de los instrumentos de medición, estableciendo limpiezas periódicas. Principalmente en instrumentos que controlan el funcionamiento de los filtros, como turbidímetros y flujómetros que se encuentran en el afluente y efluente de los filtros y fallan más a menudo, lo que es necesario para una mayor precisión de las mediciones. Para que así el sistema de medición permanente de condiciones operacionales sea confiable y permita a la empresa verificar la operación de sus unidades de filtrado.

Capítulo 8: Bibliografía

- Ahumada, G. (2018). Coagulación y Floculación [Material de clases]. *Procesos de tratamiento de agua*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Ahumada, G. (2018). Desinfección [Material de clase]. *Procesos de tratamiento de agua*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Amirtharajah, A. (1988). Some theoretical and conceptual views of filtration. *Journal-American Water Works Association*, 80(12), 36-46.
- Arboleda, J. (1974). Hydraulic Control Systems of Constant and Declining Flow Rate in Filtration: A Metricized Article. *Journal-American Water Works Association*, 66(2), 87-94.
- BAPA. (2015). Informe para aguas Andinas: *Nuevas unidades de filtración en Planta de tratamiento de agua potable Vizcachas*.
- BAPA GRAMATEC. (2016). Informe para aguas Andinas: *Renovación 16 filtros en Planta de tratamiento de agua potable Vizcachas*.
- Baruth, E. E. (2004). *Water treatment plant design*. ASCE.
- Brandt, M. J., Johnson, K. M., Elphinston, A. J., & Ratnayaka, D. D. (2016). *Twort's Water Supply. Chapter 9: Water Filtration*. Butterworth-Heinemann.
- BW (1996). *The Specification, Approval and Testing of Granular Filtering Material and Code of Practice for the Installation of Filtering Material*. BW:P.18.96R.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida*. Lima.
- Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, República de Colombia. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico*.
- Dullemont, Y. J., Schijven, J. F., Hinjen, W. A. M. et al. (2006). Removal of microorganisms by slow sand filtration. *Recent Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes* (Ed. Gimbel, R., Graham, N. J. D. and Collins, M. R.). IWA Publishing.

- Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis. Pacific Institute for Studies in Dev., Environment & Security. Stockholm Env. Institute, Oxford Univ. Press.* 473p, 9.
- Hsu, B. M., & Yeh, H. H. (2003). Removal of Giardia and Cryptosporidium in drinking water treatment: a pilot-scale study. *Water Research*, 37(5), 1111-1117.
- Huisman, L. and Wood, W. E. (1974). *Slow Sand Filtration.* World Health Organization.
- Ives, K. J. (1970). Rapid filtration. *Water Research*, 4(3), 201-223.
- Microsoft . (2019). *Course: Principles of Machine Learning: R Edition.*
- Ministère de la Santé et des Solidarités. (2007, février 6). Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. *Journal Officiel de la République Française.*
- Ministerio de la Presidencia de España. (2003, febrero 7). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *Boletín Oficial del Estado.*
- Norma NCh 409/1. (2005). *Agua Potable: Requisitos.*
- Santé Canada. (2012). Page 12: Recommendations pour la qualité de l'eau potable au Canada: document technique - *La turbidité.* Ottawa. Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa (Ontario).
- Scholz, M. (2016). Rapid Filtration. *Wetlands for Water Pollution Control*, 69 - 75. Elsevier
- Sparks, T. &. (2016). *Filters and Filtration Handbook.* Butterworth-Heinemann.
- United States Environmental Protection Agency. (2009, Mayo). *National Primary Drinking Water Regulations.* Retrieved from <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
- Water Supply Committee of the Great Lakes. (2012). Recommended Standards for Water Works. Great Lakes-Upper Mississippi River Board of State and Provincial. *Health Research Inc.*

WesTech Engineering, Inc. (2013). *Granular media filter parts*.

World Health Organization. (2017). *Turbidity: information for regulators and operators of water supplies*.

World Health Organization Pan American Health Organization. (1985). *Guías para la calidad del agua potable* (Vol. 3). Pan American Health Org.

Xylem, Inc. (2012). *Leopold® Type S® Technology Underdrain*.

**ANEXO 1: INSTRUCTIVO DE DESCARGA DE
INFORMACIÓN DE TURBIEDAD A LA SALIDA DE LOS
FILTROS PTAP VIZCACHAS Y FILTROS LEOPOLD**

Primero se selecciona “Producción” en “Ámbitos” en el sector izquierdo de la pantalla, luego en el centro se selecciona “Aguas Andinas” en “Empresas” y “Original Topkapi” en “Frecuencia”, corroborando que estas opciones se marquen con un ticket. En “Plantas” se selecciona “Complejo Vizcachas” y se clikea en la flecha singular hacia la derecha. Finalmente se ingresa la fecha de inicio, en este caso el 1 de enero del 2017 a las 00:00 horas y fecha final, 31 de diciembre del 2019 a las 23:45 horas, y se da click en “GENERAR ARBOL”.

Primero se descarga información directa de los filtros Leopold, en “Clasificación” se escoge “Operación Nuevos Filtros” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, se selecciona marcando con un ticket en “Turbiedad [UNT]” en todos los filtros del 35 al 38.

Al graficar se encontraron errores en los datos, por lo que se indaga más en información de turbiedad de agua filtrada, y se encuentra seleccionando “Operación Complejo” en “Clasificación” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, este árbol se continúa abriendo en “Turbiedades filtrada por planta” y se selecciona marcando con un ticket en “Vizcachas Turbiedad”, para obtener los datos se da clic en “CREAR REPORTE”. Automáticamente se crea un reporte, y para extraerlo se da click en “EXPORTAR A EXCEL”.

Esta información se adiciona con otra información de turbiedad filtrada en la PTAP Vizcachas, extraída desde el mismo cuadro generado, pero seleccionando “Etapas” en “Clasificación” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, se continúa abriendo el árbol en “Filtración”, “Calidad” y luego “Vizcachas”, donde selecciona marcando con un ticket en “Turbiedad [UNT]” de color rojo, y de la misma forma que en la parte anterior se extrae a formato Excel.

Del reporte generado se conserva información de fecha, horario de la toma de muestra y el valor correspondiente a la turbiedad.

**ANEXO 2: INSTRUCTIVO DE DESCARGA DE
INFORMACIÓN DE OPERACIÓN DE FILTROS PTAP
VIZCACHAS**

Los pasos iniciales se repiten, al igual que para obtener la turbiedad de agua filtrada, hasta dar click en “GENERAR ARBOL”.

Primero se descarga información directa de los filtros Leopold, en “Clasificación” se escoge “Operación Nuevos Filtros” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, se selecciona marcando con un ticket en “Pérdida de carga (mca)”, “Nivel (cm)”, “Caudal (l/s)” y “Carrera (horas)” en todos los filtros del 35 al 38. Cabe destacar que la unidad de caudal está errada porque el programa entrega la información en m³/s. Finalmente, se colocan las columnas en el siguiente orden: fecha, carrera, caudal, nivel, pérdida de carga y filtro. Se agrega una columna a la derecha de la columna de caudal y en él, se calcula la velocidad, dividiendo el caudal por el área del filtro.

Para adicionar información de turbiedad de entrada a los filtros, se obtiene turbiedad a la salida del Decantador 2 y de Laguna Negra para obtener la turbiedad de entrada a los filtros Leopold, realizando un balance de masa. Despejando la siguiente ecuación:

$$Turb_{Leopold} = \frac{Q_{Decantador\ 2} * Turb_{Decantador\ 2} + Q_{Laguna\ Negra} * Turb_{Laguna\ Negra}}{Q_{Decantador\ 2} + Q_{Laguna\ Negra}}$$

La turbiedad del Decantador se obtiene desde el Portal web SCT, repitiendo los primeros pasos, y luego seleccionando “Operación Complejo” en “Clasificación” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, este árbol se continúa abriendo en “Calidad Planta Vizcachas” y se selecciona marcando con un ticket en “Decantador 2 (UNT)”. La turbiedad de Laguna Negra se obtiene en “Clasificación” en “Operación Complejo” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, este árbol se continúa abriendo en “Turbiedades de Ingreso” y se selecciona marcando con un ticket en “Turbiedad Microfiltros (UNT)” de color verde. Los caudales se obtienen seleccionando “Clasificación” en “Producción Caudales Nuevos” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, este árbol se continúa abriendo en “Ingreso Filtros Nuevos” y se selecciona marcando con un ticket en “Agua Decantada (m3/s)” y “Aporte L. Negra (m3/s)”.

En el caso de los filtros Multicrete II, la información se obtiene del contratista, dado que los filtros se encuentran en proyecto de renovación es el contratista BAPA SA. quien maneja los datos y se los entrega a Aguas Andinas.

A esta información se le adiciona turbiedad a la salida de los decantadores de la planta, para conocer la turbiedad de entrada a los filtros. Desde el Portal web SCT, se selecciona “Operación Complejo” en “Clasificación” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, este árbol se continúa abriendo en “Calidad Planta Vizcachas” y se selecciona marcando con un ticket en “Decantador 1 (UNT)” y “Decantador 2 (UNT)”.

Se descarga información de temperatura para conocer su relación con la pérdida de carga, seleccionando “Etapas” en “Clasificación” y se abre el árbol dando click en el signo positivo en “Complejo Vizcachas”, se continúa abriendo el árbol en “Filtración”, “Calidad” y luego “Vizcachas”, donde se selecciona marcando con un ticket en “Temperatura [°C]”, y se extrae a formato Excel. Cuando se intenta realizar la modelación con estos datos, son eliminadas muchas filas dado que es muy poca la información, para solucionar este problema se utiliza el promedio de mes del dato, de esta forma se tienen menos filas con datos vacíos y una variable numérica que es más fácil de modelar.

ANEXO 3: TURBIEDAD EFLUENTE FILTROS LEOPOLD

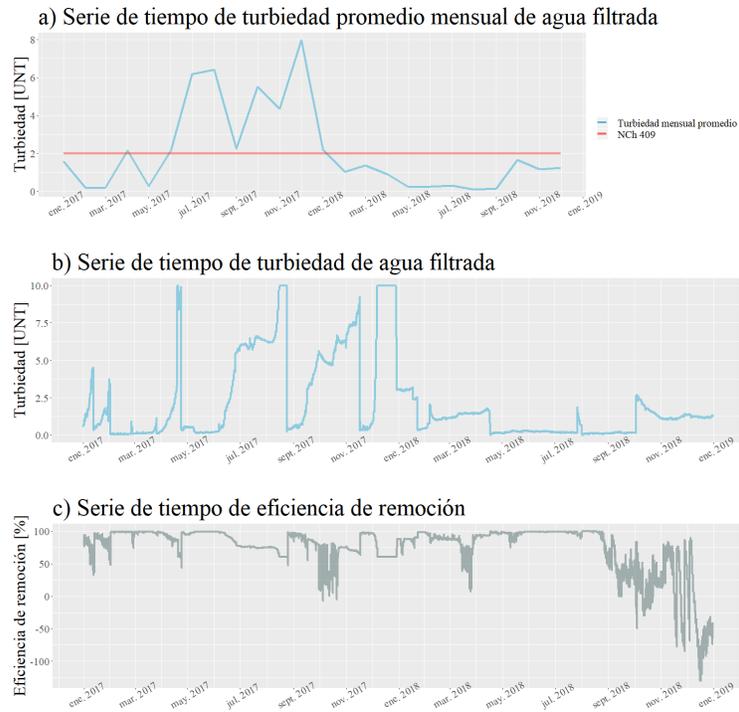


Figura A.1. Información del filtro 35 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.

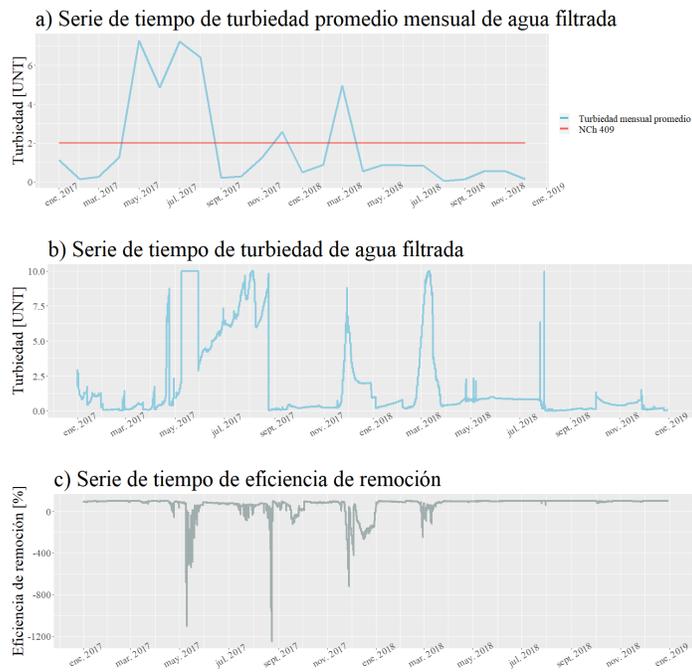


Figura A.2. Información del filtro 36 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.

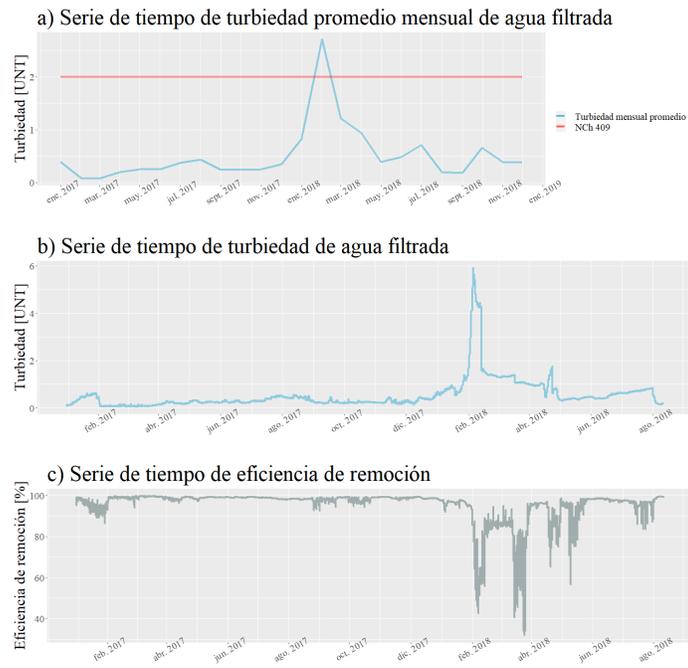


Figura A.3. Información del filtro 37 del 2017 al 2018. a) Turbiedad promedio mensual. b) Turbiedad instantánea. c) Eficiencia de remoción.

ANEXO 4: MODELACIÓN MACHINE LEARNING EN RSTUDIO

```

library(readxl)
library(lattice)
library(ggplot2)
library(caret)
library(kernlab)
library(randomForest)
library(e1071)
library(MASS)

#CARGANDO DATOS DESDE EXCEL
datos<-read_excel("C:/Desktop/XXXXX.xlsx")
label=c('N.de.Carrera','Fecha','Año','Hora.de.Carrera_hora','Caudal_m3s','v
_m.h','Nivel_cm','Pérdida.de.Carga_cmca','Turbiedad.filtrada_UNT',
'Turbiedad.entrada_UNT','Filtro','Uso.de.Laguna.Negra_Porc','Entrada','Mes'
)
colnames(datos) <- label

#DEJAR DATOS CONVENIENTES PARA MODELACIÓN, MANTENIENDO
#1.- HORA DE CARRERA PARA CONOCER EL DP/DT
#2.- VELOCIDAD POR FACTOR DE EFICIENCIA
#3.- NIVEL ESTA EN OBSERVACIÓN PORQUE PUEDE SER CAUDAL CONSTANTE O NIVEL
CONSTANTE
#4.- TURBIEDAD DE ENTRADA
#5.- TEMPERATURA/CONDUCTIVIDAD INTERPRETADO CON EL MES

datos$N.de.Carrera<-NULL
datos$Fecha <- NULL
datos$Año <- NULL
datos$Caudal_m3s<-NULL
datos$Turbiedad.filtrada_UNT<-NULL
datos$Filtro<- NULL
datos$Uso.de.Laguna.Negra_Porc<-NULL
datos$Entrada<-NULL
datos$Temp <-NULL
datos$Conduc<-NULL

#RESUMEN DATOS
dim(datos)
head(datos,20)
str(datos)

#BORRAR DATOS VACIOS

```

```

cols=c('Hora.de.Carrera_hora','v_m.h','Nivel_cm','Pérdida.de.Carga_cmca','Turbiedad.entrada_UNT')
datos[,cols]=lapply(datos[,cols], function(x){ifelse(x== '', NA,x)})
datos = datos[complete.cases(datos[,cols]),]
dim(datos)

#BORRAR DUPLICADOS
datos<-unique(datos)
dim(datos)

#PÉRDIDA DE CARGA
#GRAFICAR RAIZ DE PÉRDIDA DE CARGA PARA COMPROBAR SI PRESENTA UNA CAMPANA GAUSSIANA
datos[, 'sqr_Pérdida'] = sqrt(datos[, 'Pérdida.de.Carga_cmca'])
label =
c('Hora.de.Carrera_hora','v_m.h','Nivel_cm','Pérdida.de.Carga_cmca','Turbiedad.entrada_UNT','Mes','sqr_Pérdida')
colnames(datos) <- label

plot_hist = function(df,col, bins = 20){
  options(repr.plot.width=4, repr.plot.height=3)
  bw = (max(df[,col]) - min(df[,col]))/(bins+1)
  p= ggplot(df, aes_string(col))+
    geom_histogram(binwidth = bw, aes(y = ..density..), alpha= 0.5)+
    geom_density(aes(y = ..density..), color = 'blue')+
    geom_rug()
  print(p)
}
p1=plot_hist(datos, col = 'Pérdida.de.Carga_cmca')
p2=plot_hist(datos, col = 'sqr_Pérdida')

library(ggpubr)
ggarrange(p1,p2)

#ELIMINAR AQUELLA QUE PRESENTA UNA PEOR CAMPANA DE GAUSS
datos$Pérdida.de.Carga_cmca<-NULL
cols=c('Hora.de.Carrera_hora','v_m.h','Nivel_cm','Turbiedad.entrada_UNT','Mes','sqr_Pérdida')

#DIVIDIR LOS DATOS PARA REALIZAR VALIDACIÓN CRUZADA CON UN TESTEO DEL 30% DE LOS DATOS
set.seed(1955)
partition = createDataPartition(datos[[6]], times=1, p=0.7, list=FALSE)

```

```

training = datos[partition,]
dim(training)
test=datos[-partition,]
dim(test)

#DIVIR Y ESCALAR
preProcValues <- preProcess(training[,cols], method = c('center','scale'))
training[,cols]=predict(preProcValues, training[,cols])
test[,cols]=predict(preProcValues, test[,cols])
head(training[,cols])

#REGRESION MULTIPLE
lin_mod = lm( sqr_Pérdida ~ Hora.de.Carrera_hora + v_m.h + Nivel_cm +
Turbiedad.entrada_UNT + Mes , data = training)
summary(lin_mod)

#ERRORES
score<- as.data.frame(predict(lin_mod, newdata = test))
score[,2] <- test$sqr_Pérdida - score[,1]
score[,3]<-score[,2]**2
labelscore = c('score','resids','resids2')
colnames(score) <- labelscore
N=5164
MSE = sum(score$resids2)/N
RMSE = sqrt(sum(score$resids2)/N)
MAE= sum(abs(score$resids))/N

#HISTOGRAMA RESIDUAL PÉRDIDA DE CARGA
bins=20
score=(predict(lin_mod, newdata = test))
test$resids <- test['sqr_Pérdida']-score
bw = (max(test$resids)-min(test$resids))/(bins + 1)
resids<-test$resids
hist_resids <- ggplot(resids, aes(sqr_Pérdida))+
  geom_histogram(binwidth = bw , aes(y =..density..), alpha=0.5)+
  geom_density(aes(y=..density..), color= 'blue')+
  xlab('Valor Residual')+
  theme(text=element_text(size = 15,family = "serif"), title =
element_text(size = 20))+
  ggtitle('Histograma Residual')
g1<- print(hist_resids)

#QQ RESIDUAL

```

```

resids_qq <- ggplot()+
  geom_qq(data= resids, aes(sample = sqr_Pérdida))+
  ylab('Cuantiles Residuales')+ xlab('Cuantil normal estandar ')+
  theme(text=element_text(size = 20,family = "serif"), axis.title =
element_text(size = 25), title = element_text(size = 30))+
  ggtitle('Grafico QQ de valores Residuales')

g2<-print(resids_qq)

ggarrange(g1,g2,nrow=1)

#CONSTRUCCION DE UN MODELO GLMNET USANDO NLAMBDA COMO NUMEROS DE VARIABLES
PARA REALIZAR REGULARIZACIÓN,
#ALPHA DETERMINA EL PESO ENTRE REGULARIZACIÓN TIPO L1 Y L2
#DISTRIBUCIÓN GAUSSIANA USADA COMO CORRER EL TEST
#GRAFICAR PARAMETROS DE MODELO VS RESGULARIZACIÓN LAMBDA
cols =
c('Hora.de.Carrera_hora','v_m.h','Nivel_cm','Turbiedad.entrada_UNT','Mes')
dummies = dummyVars(sqr_Pérdida ~ ., data = datos[,cols])
training_dummies = predict(dummies, newdata = training[,cols])
print(dim(training_dummies))
head(training_dummies)
test_dummies = predict(dummies, newdata = test[,cols])

##### REGULARIZACIÓN L2 #####
library(glmnet)
options(repr.plot.width=6, repr.plot.height=6) # CANVAS GRÁFICO
y <- as.vector(training$sqr_Pérdida)
glmnet_mod_l2 = glmnet(x = training_dummies, y = y,
                      nlambda = 16, alpha = 0, family = 'gaussian')
plot(glmnet_mod_l2, xlab = 'Regularización inversa')
cv_fit = cv.glmnet(x = training_dummies, y = y,
                  nlambda = 16, alpha = 0, family = 'gaussian')
plot(cv_fit)
coef.glmnet(glmnet_mod_l2)

#####EVALUACION MODELO CON REGULARIZACIÓN L2
print_metrics_glm = function(df, score, label){
  resids = df[,label] - score
  resids2 = resids**2
  N = length(score)
  SSR = sum(resids2)
  SST = sum((mean(df[,label]) - df[,label])**2)

```

```

r2 = as.character(round(1 - SSR_L2/SST_L2, 4))
cat(paste('Mean Square Error      = ', as.character(round(sum(resids2)/N,
4)), '\n'))
cat(paste('Root Mean Square Error = ',
as.character(round(sqrt(sum(resids2)/N), 4)), '\n'))
cat(paste('Mean Absolute Error    = ',
as.character(round(sum(abs(resids))/N, 4)), '\n'))
cat(paste('R^2                    = ', r2, '\n'))
}
score = predict(glmnet_mod_l2, newx = test_dummies)[,16]
L2 = as.data.frame(matrix(ncol=3,nrow=5164))
L2[,1]<-(test$sqr_Pérdida-score)
L2[,2]<-(test$sqr_Pérdida-score)**2
L2[,3]<-(test$sqr_Pérdida)
labelL2=c('resids_L2','resids2_L2','yi_L2')
colnames(L2)<-labelL2
SSR_L2 = sum(L2$resids_L2)
SST_L2 = sum((mean(L2$yi_L2) - L2$yi_L2)**2)
r2_L2 = as.character(round(1 - SSR_L2/SST_L2, 4))

print_metrics_glm(test, score, 'sqr_Pérdida')

bins=20
test$resids <- test['sqr_Pérdida']-score
bw = (max(test$resids)-min(test$resids))/(bins + 1)
resids<-test$resids
hist_resids <- ggplot(resids, aes(sqr_Pérdida))+
  geom_histogram(binwidth = bw , aes(y =..density..), alpha=0.5)+
  geom_density(aes(y=..density..), color= 'blue')+
  xlab('Valor Residual')+
  theme(text=element_text(size = 15,family = "serif"), title =
element_text(size = 20))+
  ggtitle('Histograma Residual')
g3<-print(hist_resids)

#QQ RESIDUAL
resids_qq <- ggplot()+
  geom_qq(data= resids, aes(sample = sqr_Pérdida))+
  ylab('Cuantiles Residuales')+ xlab('Cuantil normal estandar ')+
  theme(text=element_text(size = 20,family = "serif"), axis.title =
element_text(size = 25), title = element_text(size = 30))+
  ggtitle('Grafico QQ de valores Residuales')
g4<-print(resids_qq)

```

```

ggarrange(g3,g4,nrow=1)

#### REGULARIZACIÓN L1 #####
options(repr.plot.width=6, repr.plot.height=6) # CANVAS GRÁFICO
y <- as.vector(training$sqr_Pérdida)
glmnet_mod_l1 = glmnet(x = training_dummies, y = y,
                      nlambda = 16, alpha = 1, family = 'gaussian')
plot(glmnet_mod_l1, xlab = 'Regularización inversa')
cv_fit = cv.glmnet(x = training_dummies, y = y,
                  nlambda = 16, alpha = 1, family = 'gaussian')
plot(cv_fit)
coef.glmnet(glmnet_mod_l1)

#####EVALUACION MODELO CON REGULARIZACIÓN L1
print_metrics_glm = function(df, score, label){
  resids = df[,label] - score
  resids2 = resids**2
  N = length(score)
  SSR = sum(resids2)
  SST = sum((mean(df[,label]) - df[,label])**2)
  r2 = as.character(round(1 - SSR_L1/SST_L1, 4))
  cat(paste('Mean Square Error      = ', as.character(round(sum(resids2)/N,
4)), '\n'))
  cat(paste('Root Mean Square Error = ',
as.character(round(sqrt(sum(resids2)/N), 4)), '\n'))
  cat(paste('Mean Absolute Error    = ',
as.character(round(sum(abs(resids))/N, 4)), '\n'))
  cat(paste('R^2                    = ', r2, '\n'))
}
score = predict(glmnet_mod_l1, newx = test_dummies)[,6]
L1 = as.data.frame(matrix(ncol=3,nrow=5164))
L1[,1]<-(test$sqr_Pérdida-score)
L1[,2]<-(test$sqr_Pérdida-score)**2
L1[,3]<-(test$sqr_Pérdida)
labelL1=c('resids_L1','resids2_L1','yi_L1')
colnames(L1)<-labelL1
SSR_L1 = sum(L1$resids_L1)
SST_L1 = sum((mean(L1$yi_L1) - L1$yi_L1)**2)
r2_L1 = as.character(round(1 - SSR_L1/SST_L1, 4))

print_metrics_glm(test, score, 'sqr_Pérdida')

```

```

bins=20
test$resids <- test[, 'sqr_Pérdida']-score
bw = (max(test$resids)-min(test$resids))/(bins + 1)
resids<-test$resids
hist_resids <- ggplot(resids, aes(sqr_Pérdida))+
  geom_histogram(binwidth = bw , aes(y =..density..), alpha=0.5)+
  geom_density(aes(y=..density..), color= 'blue')+
  xlab('valor Residual')+
  theme(text=element_text(size = 15,family = "serif"), title =
element_text(size = 20))+
  ggtitle('Histograma Residual')
g5<-print(hist_resids)

#QQ RESIDUAL
resids_qq <- ggplot()+
  geom_qq(data= resids, aes(sample = sqr_Pérdida))+
  ylab('Cuantiles Residuales')+ xlab('Cuantil normal estandar ')+
  theme(text=element_text(size = 20,family = "serif"), axis.title =
element_text(size = 25), title = element_text(size = 30))+
  ggtitle('Grafico QQ de valores Residuales')
g6<-print(resids_qq)

ggarrange(g5,g6,nrow=1)

```