

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
QUÍMICO

**“ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DEL USO DE KOH
PARA LA REDUCCIÓN DEL SODIO PORCENTUAL EN
AGUAS DESTINADAS PARA RIEGO”**

PUERTO PUNTA CHUNGO – MINERA LOS PELAMBRES

Rodrigo Ernesto Pereira Oyarzun

Profesor Guía:

Carlos Carlesi Jara

2014

AGRADECIMIENTOS

Quiero primeramente, agradecer a mis padres, Silvia y Ernesto, por darme la posibilidad de estudiar, y apoyarme constantemente en esta etapa de vida.

A mi hermana Beatriz por confiar en mí incondicionalmente.

A mi polola Carolina, mi compañera de vida por todo el apoyo brindado en este proceso.

A mi profesor guía Carlos Carlesi, por su tiempo y su ayuda entregada.

A minera Los pelambres por darme esta oportunidad de realizar este trabajo.

Finalmente quiero agradecer a todas esas personas lindas que conocí en este proceso, quienes día a día, año a año, hicieron de esta etapa, momentos muchos más gratos.

RESUMEN

Este trabajo de tesis fue realizado en el Puerto Punta Chungo, de minera Los Pelambres, el compromiso con el medio ambiente y el desarrollo sustentable es el principal papel de la empresa, es por esto que este estudio técnico económico, se enfatiza en reducir los niveles de Sodio Porcentual de las aguas del efluente de la minera, que son destinadas para riego de eucaliptus, las cuales son regidas por la Norma Chilena de Riego 1.333, que establece ciertos niveles de compromiso de metales contenidos en aguas para riego.

El Sodio Porcentual según los últimos estudios realizados por SGS, arroja resultados sobre el límite permitido por la norma, debido a esto se realiza una propuesta para reducir estos valores y cumplir con la normativa, la cual establece en cambiar el NaOH y utilizar KOH como agente precipitador, apuntando directamente a la reducción del sodio en las aguas (menor a un 35%). Las pruebas realizadas en el laboratorio de la minera consistieron en pruebas de precipitación, las cuales arrojaron resultados satisfactorios en cuanto a eficiencia de precipitación, remoción de metales y reducción de los niveles de sodio porcentual, registrando niveles de precipitación de Cu y Fe cercanos al 99% y la reducción del sodio porcentual, establecido en un margen de 35% por la norma chilena de riego, llevándolo a niveles inferiores al establecido por la norma (ver Anexo D).

Posterior al estudio técnico, se procedió con el estudio económico, en el cual se presentó dos alternativas de uso de KOH, la compra de KOH líquido (50% p/v) y la compra de KOH sólido, para prepararlo en la planta de tratamiento de aguas de la empresa (planta FAD), sin embargo ambos valores sobrepasaron los costos actuales destinado a este proceso, debido al alto precio que posee el KOH en comparación con el NaOH, elevando los gastos en casi 4 veces más de lo que se consume actualmente para el KOH líquido y un 66% aumentan los gastos con el KOH sólido, no obstante, la alternativa de compra de KOH sólido, se eligió como la que mejor cumplía de las dos, ya que su costo necesitaba una inversión inicial de US\$ 62400, pero resultaba más económica que comprar el reactivo líquido, además de cumplir con la idea principal de reducir los niveles de sodio.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN.....	ii
INDICE	iii
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE TABLAS.....	viii
1. INTRODUCCION^[1]	1
1.1 Antecedentes generales de la Empresa.....	1
1.2 Antecedentes Puerto Punta Chungo.....	1
1.3 Antecedentes generales del proceso.....	1
1.3.1 Proceso de filtración.....	1
1.3.2 Proceso de Tratamiento de Aguas^[2]	4
1.4 Planteamiento del problema.....	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo Principal	6
1.5.2 Objetivos Específicos	6
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Metodología de tratamiento de metales disueltos^[3].....	7
2.2 Metodología de precipitación^[4]	10
2.2.1 Nucleación.....	10
2.2.2 Crecimiento de cristales.....	10
2.2.3 Envejecimiento	10
2.3 Descripción del proceso de precipitación alcalina.....	11
2.4 Solubilidad	12
2.4.1 Producto de solubilidad	15
2.5 Neutralización.....	15
2.5.1 Proceso de Operación Neutralización	16
2.5.2 Campo de aplicación.....	17
2.6 Reactivo: Hidróxido de Sodio	18
2.7 Reactivo: Hidróxido de Potasio.....	20
2.8 Salinidad de los suelos.....	21

2.8.1	Daños directos.....	21
2.8.2	Daños indirectos	22
2.8.3	Algunos factores que afectan la salinidad de los suelos	22
2.8.4	Metodología de evaluación de sodio porcentual	23
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	24
3.1	Equipos, Materiales y Reactivos	24
3.2	Método Experimental	27
3.2.1	Preparación de NaOH 50%.....	27
3.2.2	Preparación de KOH al 50%	27
3.2.3	Preparación de la lectura de Cu soluble por EAA	28
3.2.4	Preparación de la lectura de Mo soluble	28
3.2.5	Preparación de la lectura de Fe soluble	29
3.2.6	Procedimiento experimental	29
3.2.7	Procedimiento para el proceso de precipitación.....	30
3.2.8	Procedimiento para el procesode sedimentación.....	30
3.2.9	Procedimiento para determinar %Cu en precipitado	30
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	31
4.1	Caracterización agua de lavado de filtros.....	31
4.2	Proceso Actual de precipitación con NaOH.....	34
4.3	Curvas de Neutralización para el NaOH y el KOH	37
4.4	Ajuste de pH	38
4.5	Análisis de sodio porcentual.....	57
5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	61
5.1	Utilización de KOH 50% comercial	63
5.2	Utilización de KOH sólido	65
5.3	Capital de inversión	68
6.	CONCLUSIONES.....	70
7.	BIBLIOGRAFIA.....	71
	ANEXOS	72
	ANEXO A Diseño de un estanque agitador para NaOH	73
	ANEXO B Estimación de costos de equipos principales.....	95
	ANEXO C FIGURAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS.....	98

ANEXO D NORMA CHILENA DE RIEGO	101
ANEXO E ASPECTOS DE SEGURIDAD MANIPULACION DE REACTIVOS	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de proceso de Filtrado, Puerto Punta Chungo de Minera Los Pelambres.....	3
Figura 2: Diagrama de Procesos Planta de Flotación por Aire Disuelto, Puerto Punta Chungo.....	5
Figura 3: Solubilidad de hidróxidos metálicos vs pH. ^[5]	13
Figura 4: Rangos de pH de precipitación de metales pesados.	14
Figura 5: Curva típica de neutralización.	18
Figura 6: Muestra de hidróxido de sodio utilizado en laboratorio.	19
Figura 7: Muestra de hidróxido de Potasio en escamas.	21
Figura 8: Absorbedor atómico utilizado para análisis de muestras.....	25
Figura 9: Material de laboratorio utilizado para experimentación.	26
Figura 10: Agua de lavado de filtros inicialmente, antes de la precipitación.	31
Figura 11: Gráfico de concentraciones de Cu presente en agua de lavado de filtros.	32
Figura 12: Gráfico de concentraciones de Fe presente en agua de lavado de filtros.	32
Figura 13: Gráfico de concentraciones de Mo presente en agua de lavado de filtros.	33
Figura 14: Concentraciones de Cu, Fe y Mo solubles en proceso de neutralización con NaOH.	35
Figura 15: Mediciones de pH para muestras en proceso de neutralización con NaOH.	35
Figura 16: Medición de % Sodio en análisis de aguas para riego por SGS periodo 2012 a 2013.	36
Figura 17: Gráficas de curvas de neutralización con NaOH y KOH.	38
Figura 18: Eficiencia promedio de % remoción de metales Cu y Fe en la Muestra 1 de aguas de lavado de filtros.	43
Figura 19: % Eficiencia promedio de remoción de metales Cu y Fe en la Muestra 2 de aguas de lavado de filtros.	44
Figura 20: % Eficiencia promedio de remoción de metales Cu y Fe en la Muestra 3 de aguas de lavado de filtros.	44
Figura 21: Comparación de gasto promedio de reactivo precipitante por 1L de agua de lavado de filtros para KOH y NaOH.....	47
Figura 22: Prueba de precipitación N° 1 con KOH y NaOH a diferentes pH.	48
Figura 23: Prueba de precipitación N° 2 con KOH y NaOH a diferentes pH.	48
Figura 24: Prueba de precipitación 3 con KOH y NaOH a diferentes pH.	49
Figura 25: Prueba n° 1: % eficiencia para Cu y Fe a diferentes niveles de pH con KOH.	52
Figura 26: Prueba n° 2: % eficiencia para Cu y Fe a diferentes niveles de pH con KOH.	52
Figura 27: Prueba n° 3: % eficiencia para Cu y Fe a diferentes niveles de pH con KOH.	53
Figura 28: Tendencia del consumo de reactivos KOH y NaOH para diferentes volúmenes.	55
Figura 29: Grafica de sodio % con NaOH y KOH en el proceso de tratamiento de aguas.	59
Figura 30: Comparación de gastos para las alternativas vs proceso actual.	66
Figura 31: Dimensiones para el cálculo del agitador.	80
Figura 32: Dimensiones del tanque agitador.....	81
Figura 33: Diagrama de tanque para preparación de reactivo.....	94
Figura 34: Diagrama de Moody para el diseño de equipos principales.	98

Figura 35: Rugosidad Relativa de los materiales y factor de fricción (f) para flujo en régimen turbulento.	99
Figura 36: Pérdidas locales para accesorios en línea hidráulica.	100

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tecnologías para la remoción de metales pesados.....	8
Tabla 2: Ventajas y desventajas de la precipitación alcalina.	9
Tabla 3: Características físicas y químicas del NaOH utilizado en experimentación.....	19
Tabla 4: Principales características físicas y químicas del KOH utilizado en la experiencia.	20
Tabla 5: Equipos utilizados en la experimentación de precipitación de metales.	24
Tabla 6: Materiales utilizados en la experimentación.....	25
Tabla 7: Reactivos utilizados en la experimentación.....	26
Tabla 8: caracterización de aguas de lavado de filtro.	31
Tabla 9: Datos obtenidos de análisis de aguas provenientes del proceso de neutralización con NaOH.	34
Tabla 10: Datos obtenidos para curva de neutralización con NaOH y KOH.....	37
Tabla 11: Resultados para Muestra 1, Prueba 1 de agua de lavado de filtros con KOH.....	39
Tabla 12: Resultados para Muestra 1 Prueba 2 de agua de lavado de filtros con KOH.....	39
Tabla 13: Resultados para Muestra 1 Prueba 3 de agua de lavado de filtros con KOH.....	40
Tabla 14: Resultados para Muestra 2 Prueba 1 de agua de lavado de filtros con KOH.....	40
Tabla 15: Resultados para Muestra 2 Prueba 2 de agua de lavado de filtros con KOH.....	41
Tabla 16: Resultados para Muestra 2 Prueba 3 de agua de lavado de filtros con KOH.....	41
Tabla 17: Resultados para Muestra 3 Prueba 1 de agua de lavado de filtros con KOH.....	42
Tabla 18: Resultados para Muestra 3 Prueba 2 de agua de lavado de filtros con KOH.....	42
Tabla 19: Resultados Muestra 3 Prueba 3 de agua de lavado de filtros con KOH.	43
Tabla 20: Gasto promedio de KOH a diferentes pH para prueba 1.	45
Tabla 21: Gasto promedio de NaOH a diferentes pH para prueba 1.....	46
Tabla 22: Gasto promedio de KOH a diferentes pH para prueba 2.	46
Tabla 23: Gasto promedio de NaOH a diferentes pH prueba 2.....	46
Tabla 24: Gasto promedio de KOH a diferentes pH para prueba 3.	47
Tabla 25: Gasto promedio de NaOH a diferentes pH para prueba 3.....	47
Tabla 26: Prueba 1 de precipitación a pH 10 con KOH.....	49
Tabla 27: Prueba 1 de precipitación a pH 10,5 con KOH.....	49
Tabla 28: Prueba 1 de precipitación a pH 11 con KOH.....	50
Tabla 29: Prueba 2 de precipitación a pH 10 con KOH.....	50
Tabla 30: Prueba 2 de precipitación a pH 10,5 con KOH.....	50
Tabla 31: Prueba 2 de precipitación a pH 11 con KOH.....	50
Tabla 32 Prueba 3 de precipitación a pH 10 con KOH.....	51
Tabla 33 Prueba 3 de precipitación a pH 10,5 con KOH.....	51
Tabla 34 Prueba 3 de precipitación a pH 11 con KOH.....	51
Tabla 35: Gasto en ml de KOH y NaOH para 1 Litro de agua de lavado de filtros.....	53
Tabla 36: Gasto en ml de KOH y NaOH para 2 Litros de agua de lavado de filtros.	54
Tabla 37: Gasto en ml de KOH y NaOH para 3 Litros de agua de lavado de filtros.	54
Tabla 38: concentraciones de metales (mg/L) en la alimentación y efluente planta FAD mes de agosto 2013.....	56

Tabla 39: Niveles de Ca, Mg, K y Na en efluente planta FAD. (SGS).....	57
Tabla 40: Sodio porcentual periodo 2012 a 2013 efluente planta FAD.....	58
Tabla 41: Sodio porcentual prueba con KOH.	58
Tabla 42: Sodio porcentual prueba con NaOH.	58
Tabla 43: Niveles de sodio en el proceso de precipitación y ajuste de pH.	58
Tabla 44: Niveles de sodio porcentual con KOH.....	59
Tabla 45: Valores de reactivos Química del Sur.....	61
Tabla 46: Consumo de reactivo NaOH Puerto Punta Chungo 2012 a 2013.	61
Tabla 47: Gastos en NaOH periodo 2012 a 2013.....	62
Tabla 48: Consumo de reactivo KOH Puerto Punta Chungo 2012 a 2013.	63
Tabla 49: Gastos de reactivo KOH comercial para periodo 2012 a 2013.	64
Tabla 50: Consumo de reactivo KOH (sólido) periodo 2012 a 2013.....	65
Tabla 51: Gastos de reactivo KOH (sólido) periodo 2012 a 2013.	65
Tabla 52: gastos de actual reactivo (NaOH) y propuestas con KOH.....	66
Tabla 53: Capital fijo directo	68
Tabla 54: Capital Fijo Indirecto.	69
Tabla 55: Capital de Trabajo.....	69
Tabla 56: Capital Total de Inversión.....	69
Tabla 57: Espesor mínimo de cuerpo para diseño de tanques según norma A.P.I.....	74
Tabla 58: Espesores para fondo de tanques según prueba hidráulica.	76
Tabla 59: Dimensiones para diseño del Tanque de preparación de Soda (o potasa).	79
Tabla 60: Proporciones básicas para cálculo de agitadores.	80
Tabla 61 Valores para K_T y K_L , calculo de potencia de agitador.....	83
Tabla 62: Características de la bomba de succión.....	84
Tabla 63: valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.....	86
Tabla 64: valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.....	87
Tabla 65: datos para el cálculo de balance de energía.	88
Tabla 66: Datos para el cálculo de la potencia de la bomba.	89
Tabla 67: valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.....	90
Tabla 68: Valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.....	92
Tabla 69: datos para el cálculo de balance de energía.	92
Tabla 70: Datos para el cálculo de la potencia de la bomba.	93
Tabla 71: Datos de electrobombas seleccionadas.	95
Tabla 72: Valores CIF para electrobombas seleccionadas.....	95
Tabla 73: valores en US\$ para electrobombas seleccionadas.....	95
Tabla 74: Datos de cotización de tanque agitado.....	96
Tabla 75: Valores de los principales equipos para la inversión inicial.	97
Tabla 76: Parámetros para aguas de riego según la Norma Chilena de Riego 1333.....	101

1. INTRODUCCION^[1]

1.1 Antecedentes generales de la Empresa

Minera Los Pelambres, es una mina a tajo abierto ubicada en la cuarta región de Coquimbo, en la comuna de Salamanca, su principal producto es el concentrado de cobre y su subproducto es el concentrado de molibdeno. Minera los Pelambres pertenece en un 60% a Antofagasta PLC y el 40% al grupo Mitsubishi.

La empresa se encuentra dividida en cuatro sectores Principales, el primero es el de explotación, ubicado en la localidad de Salamanca, el segundo es la planta de concentrados, ubicado en el sector precordillerano de Piuquenes, el tercero es el tranque de relaves ubicado en el Mauro, y por último el Puerto Punta Chungo, ubicado en la localidad de Los Vilos.

1.2 Antecedentes Puerto Punta Chungo

El Puerto Punta Chungo, ubicado en la Comuna de Los Vilos, cumple la función de recepción y filtrado del concentrado de cobre para su posterior comercialización, junto con este proceso, en el puerto existe una planta de flotación por aire disuelto (FAD), encargada de tratar las aguas provenientes del proceso de filtrado para posteriormente ser utilizadas como aguas de riego, cumpliendo con los límites establecidos por la Norma Chilena de Riego.

1.3 Antecedentes generales del proceso

Se pueden distinguir dos importantes procesos en el Puerto Punta Chungo:

1.3.1 Proceso de filtración

El proceso de filtración se lleva a cabo en la planta de filtros (**figura 1**), la cual dispone de 8 filtros de placas cerámicas, las cuales cumplen la función de retirar el agua de la pulpa que llega al Puerto Punta Chungo. El proceso produce y filtra entre 2000 a 5000 toneladas día de concentrados de cobre aproximadamente. Los principales productos de este proceso son:

concentrado de cobre y agua filtrada. Sin embargo a medida que se va filtrando la pulpa, las placas cerámicas de los filtros van perdiendo paulatinamente su rendimiento, por ello se hace necesario realizar lavados extras, fuera del lavado normal conocido como retrolavado, el cual es parte del proceso de filtrado.

Se distinguen dos tipos de lavados, que se realizan a los filtros:

- Lavado con Ácido Nítrico: este lavado se realiza cada 6 u 8 horas, tiene como finalidad impedir la obstrucción de las microporosidades de las placas cerámicas, liberando los poros de la acumulación de sales depositadas por el filtrado. En ese proceso se pueden distinguir tres etapas importantes, (1) *post filtrado*, consiste en lavar y filtrar hasta el nivel más bajo de la cuba, (2) *lavado*, este es el lavado con ácido nítrico en contracorriente y la aplicación de ultra frecuencia para la limpieza de las placas cerámicas, en esta etapa se produce la disolución del cobre. (3) *enjuague*, consiste en el enjuague final de la cuba. Este proceso se repite en cada uno de los filtros.

Finalmente las aguas son recepcionadas en una cuba en la cual se le agrega la soda para elevar su pH de 2 a 11 y son enviadas a un tanque de almacenamiento donde ocurre la sedimentación y se espera que decante por alrededor de 6 horas. Posteriormente el sólido decantado será enviado nuevamente a la planta de filtros y el agua se enviara a la planta FAD, finalmente se repetirá el proceso.

- Lavado con Hipoclorito de Sodio: este lavado se realiza cada 4 meses aproximadamente, se realiza con el fin de evitar la saturación de las placas cerámicas, especialmente con películas de material orgánico provenientes de los procesos de flotación y espesamiento.

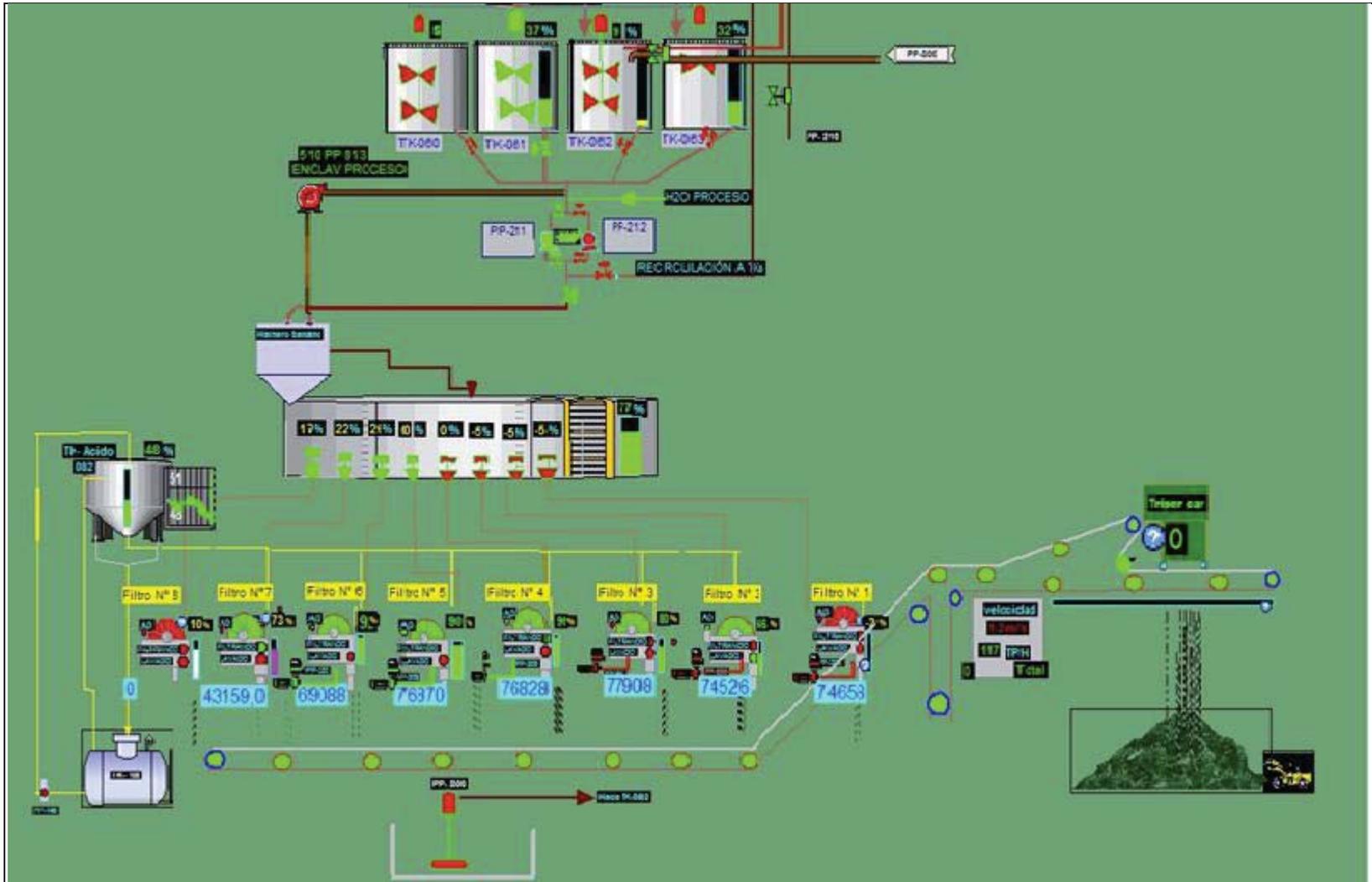


Figura 1: Diagrama de proceso de Filtrado, Puerto Punta Chungo de Minera Los Pelambres.

1.3.2 Proceso de Tratamiento de Aguas^[2]

El proceso se inicia con la recepción de las aguas de lavado de los filtros, almacenados en una cuba donde se le agrega NaOH, y son enviados a dos tanques de almacenamiento con capacidad de 1000 m³ que cumplen la finalidad de sedimentar los metales en suspensión (Cu, Fe principalmente), luego son enviados a una piscina de agua tratada, para posteriormente ser alimentados a la planta FAD (**Figura 2**) a razón de 12 a 40 l/s. El flujo de entrada es controlado en una canaleta y se le agrega cloruro férrico para formar hidróxido de hierro (encargado de atrapar los iones de Molibdeno), soda caustica y/o ácido nítrico (para regular el pH), para la óptima captación del molibdeno. Luego el agua se envía a dos agitadores donde primero se produce la coagulación y posteriormente la floculación por medio de un floculante sintético.

En el área de flotación el contenido de la celda se mezcla con agua saturada (agua-aire) la cual es inyectada a una presión de 6,5 a 7 bar, esto produce micro burbujas que se adhieren a los flóculos, de esta manera se forma una espuma estable en la superficie, esta espuma es separada por medio de paletas y enviada a la canaleta de lodos, mientras que el agua se envía por unas tuberías perforadas en el fondo de la celda que la llevan a un cajón para el control del nivel de la celda.

El agua clara producida en la primera celda, es enviada a la celda n° 2 donde se repite la misma operación, el agua resultante se envía a un tanque de agua flotada donde se le regula el pH con soda caustica (5,5-9,0), para pasar a la etapa de riego.

Los lodos resultantes son descargados a un estanque de lodos (2800 lt aprox.) provisto de una suave agitación, de esta manera se evita la decantación del lodo. El lodo es filtrado en un filtro prensa y luego es depositado en tambores.

Las aguas de proceso tratadas se utilizan en el riego de hectáreas de eucaliptus ubicados a un costado de la planta, estas aguas se rigen por la norma chilena de riego, NCh 1.333 (anexo D), la cual establece las cantidades de concentraciones máximas de elementos químicos para el riego. Los lodos obtenidos en la planta FAD son enviados en tambores de 200 lt a deposición al tranque Mauro, ubicado en la comuna de Caimanes.

1.4 Planteamiento del problema

La idea de buscar nuevas alternativas para la neutralización de aguas de lavado de filtros nace con el objeto, de disminuir el sodio porcentual en el efluente proveniente del proceso de neutralización de aguas en el Puerto Punta Chungo, utilizado para el riego del bosque de eucaliptus. Si bien, el actual proceso es factible desde un punto de vista de eficiencia, se pretende buscar una alternativa que cumpla con una eficiencia igual o mayor y se ajuste a tratar de reducir de alguna manera la cantidad de sodio en las aguas de regadío, la cual es regida por la Norma Chilena de Riego 1.333 (ver anexo D) que establece un límite máximo para sodio porcentual presente en aguas para riego, ante esta normativa se propone el uso de KOH, con el cual se pretende cumplir con el parámetro establecido.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Principal

Evaluar la efectividad del hidróxido de potasio (KOH) como agente precipitador de metales pesados y reductor de los niveles de sodio porcentual, como alternativa al uso de Hidróxido de Sodio, y su factibilidad económica.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Identificar los mecanismos químicos y físicos implicados en el proceso.
- Determinar la concentración de metales disueltos en las aguas de lavado de filtros.
- Verificar la disponibilidad de KOH en el mercado nacional y sus precios en comparación con el NaOH considerando aspectos de transporte y seguridad.
- Determinar índices de efectividad, consumos específicos y costes del actual proceso de precipitación.
- Evaluar experimentalmente la eficacia del KOH en el proceso.
- Evaluar económicamente el proceso con el KOH en reemplazo del NaOH.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los procesos de tratamientos de aguas deben ser eficientes, simples y lo más importante económicamente factibles. Considerando que el costo de tratamiento de estas es siempre un gasto extra en la producción. El tipo de tratamiento de aguas de efluentes más común utilizado en la empresa minero metalúrgica es el uso de tranques de relave. El objetivo de estos tranques es la decantación de los sólidos en suspensión, para ello se necesita una suficiente área superficial, elevados tiempos de retención y ausencia de turbulencia.

Una práctica simple y común en el control de efluentes es la neutralización con cal, dolomita, soda caustica, amonio o cenizas para las aguas acidas, y con ácido sulfúrico para las básicas. Estas prácticas permiten la precipitación de los metales en suspensión en el efluente.

Se puede mencionar que la precipitación-sedimentación de iones (principalmente metales pesados) es el método convencional seguido de espesamiento y/o filtración. La adición de una base es lo primordial en la formación del precipitado (hidróxido). Los reactivos comúnmente más utilizados son la Cal y la Soda caústica.

2.1 Metodología de tratamiento de metales disueltos^[3]

Varias son las formas que existen para tratar y eliminar los metales disueltos presentes en agua, la decisión del tratamiento dependerá primordial del equipo con que se cuente, tomando en cuenta el uso posterior que se le dé al agua. Algunas alternativas para el tratamiento de metales disueltos son: remoción por columnas de adsorción, precipitación alcalina, precipitación con sulfatos y remoción con bacterias.

En la Tabla 1 se muestran las principales técnicas de remoción de metales disueltos.

Tecnologías	Agente
Precipitación Convencional	Hidróxidos
	Sulfatos
	Carbonatos
	Co-precipitación
Precipitación Mejorada	Dimetil tío carbamato
	Dietil tio carbamato
	Trimercapto-s-tricina, sal trisódica
Otros métodos	Intercambio iónico
	Adsorción
Oportunidades de recuperación	Intercambio iónico
	Membranas
	Técnicas electrolíticas

Tabla 1: Tecnologías para la remoción de metales pesados

Los métodos de precipitación mencionados en la tabla 1 son fáciles de realizar dando una metodología simple y con grandes resultados. La diferencia entre precipitación convencional y precipitación mejorada es el uso de coagulantes o floculantes para facilitar la precipitación, de esta manera se hace más grande el tamaño del sedimento. En cuanto a los otros métodos de remoción de metales, estas técnicas son más rigurosas y requieren de una mayor infraestructura y espacio. Además de que en las tecnologías de intercambio iónico se debe pensar acerca de la regeneración de las columnas o resinas, así como de las membranas.

Para este estudio en particular se utilizara la precipitación alcalina de metales. En la Tabla 2 se muestran algunas ventajas y desventajas del método a utilizar en esta investigación para la remoción de metales pesados.

Ventajas	Desventajas
<p>Fácil control de pH de la solución</p> <p>Operación relativamente simple</p> <p>Costo de precipitante relativamente bajo</p>	<p>Los precipitantes hidróxidos tienden a resolubilizarse si el pH de la solución se varia</p> <p>La remoción de mezclas de metales no siempre es efectiva ya que la mínima solubilidad de los diferentes metales ocurren a diferentes condiciones de pH</p> <p>Si existe la presencia de complejos, esto provocara efectos adversos en la remoción</p> <p>No hay gran precipitación alcalina cuando el pH es bajo 6</p>

Tabla 2: Ventajas y desventajas de la precipitación alcalina.

Las ventajas son bastante sólidas para el método alcalino, ya que es la técnica más fácil y adecuada al momento de solo tener metales disueltos en aguas residuales. Las desventajas pueden ser contrarrestadas con un buen funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas, se debe mantener el pH controlado y constante, para ello se puede utilizar controladores de pH, medidores de flujo y bombas inteligentes que estén conectadas a los medidores para medir la dosificación del agente precipitante (hidróxido).

Los valores de pH cercanos a 9 o 10, para la remoción de metales, otorgaran una buena remoción, se tendrá una diferencia de remoción por no ser el valor óptimo de remoción, pero si existirá ésta debido a que la precipitación se lleva a cabo a pH altos. En el caso de que existan mezclas de metales si existirán interferencias de remoción, pero deben ser tratadas ya que así se evita que pasen altas concentraciones y ser un peligro para el medio ambiente y/o salud.

2.2 Metodología de precipitación^[4]

La precipitación es un proceso físico-químico utilizado para separar iones disueltos en solución por medio de la adición de un reactivo. En el caso de los metales y las sales orgánicas solubles, pasan a ser insolubles al agregar dicho reactivo. Habitualmente se utiliza un reactivo alcalino para poder aumentar el pH de la solución, de esta manera se disminuye la solubilidad del metal y se induce la precipitación. El reactivo utilizado reacciona con el componente específico, formándose de este modo un precipitado, que se separa de la fase líquida.

La precipitación alcalina es un proceso que está controlado por una solución de pH básico, si agregamos una solución alcalina de NaOH para elevar el pH, el hidróxido metálico correspondiente se vuelve insoluble y precipita en la solución.

La precipitación es un proceso que consta de tres partes que son: la nucleación, crecimiento y envejecimiento.

2.2.1 Nucleación

La nucleación es el proceso de formación de una nueva fase más estable que contiene partículas capaces de desarrollarse en otras partículas más grandes. En esta etapa quedan descritas las características como el número y el tamaño de las partículas.

2.2.2 Crecimiento de cristales

El crecimiento de cristales constituye la formación de partículas más grandes, a través de la deposición de los cristales en la solución sobresaturada sobre los núcleos preexistentes, hasta alcanzar un tamaño macroscópico. Este crecimiento consta de dos etapas, la difusión de la sustancia hacia la superficie y la deposición hacia la red cristalina.

2.2.3 Envejecimiento

El envejecimiento cristalino se refiere a los cambios estructurales irreversibles que experimentan los precipitados después de formarse. Una vez que se realiza la precipitación, las partículas se hacen más grandes, más perfectas y fáciles de filtrar.

2.3 Descripción del proceso de precipitación alcalina

El proceso consiste en agregar un precipitante químico al residuo acuoso, que contiene metales disueltos, este proceso se lleva a cabo en un tanque de reacción con agitación. Los metales disueltos pasan a ser insolubles debido a una reacción química de los compuestos metálicos solubles y el precipitante. Los sólidos suspendidos resultantes se separan por sedimentación en un clarificador. Como opción a mejorar la remoción de los sólidos suspendidos se puede realizar una floculación, con o sin un coagulante químico.

La elección del reactivo es primordial en la precipitación de metales pesados; la segunda es la solubilidad, debido a que la precipitación depende del producto de solubilidad del compuesto indeseable (metal que va a separarse). Debido a que la solubilidad es afectada por la temperatura también es un factor importante.

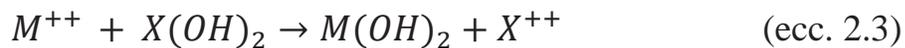
Es importante para este tipo de procesos tener en consideración las siguientes reglas de solubilidad.

- Las sales de sodio, potasio y amonio son solubles. Los nitratos, nitritos, cloratos y acetatos son solubles; el nitrito de potasio es relativamente poco soluble.
- Los óxidos e hidróxidos metálicos son insolubles, excepto los de los metales alcalinos (sodio, potasio y también amonio), y el de bario, los óxidos e hidróxidos de estroncio y calcio son relativamente poco solubles.
- Los sulfuros son insolubles, excepto los alcalinos, alcalinotérreos (calcio, estroncio y bario) y magnésicos.
- Los cloruros, los bromuros y yoduros son solubles, excepto los de plata, mercurio (I) y plomo; el yoduro de mercurio (II) también es insoluble.
- Los fluoruros son insolubles, excepto los alcalinos y los de plata, bismuto, hierro (III) y estaño (IV).
- Los sulfatos son solubles excepto los de plomo, bario y estroncio; los de calcio y plata son relativamente poco solubles.
- Los cromitos son insolubles, excepto los alcalinos y los de calcio, magnesio y zinc.

- Los carbonatos, sulfitos, fosfatos, arseniatos, arsenitos, boratos y oxalatos son insolubles, excepto los de metales alcalinos. Las sales insolubles de estos aniones son solubles en ácido.

Existen diferentes precipitantes químicos para la remoción de metales pesados de los residuos acuosos. El método más empleado es la precipitación por hidróxidos, la mayoría de los metales también puede precipitarse como sulfuros, algunos de ellos como carbonatos.

Los principales reactivos utilizados en la precipitación de hidróxidos son el de calcio (Cal) y el de sodio (Soda cáustica), estos transforman los metales disueltos en hidróxidos metálicos insolubles. La reacción se puede observar en la siguiente ecuación



Los niveles de concentración presentes en el efluente dependerán principalmente de los metales presentes (inicialmente), el precipitante empleado; condiciones de operación, principalmente pH y la presencia de otros materiales que pueden inhibir la precipitación. En la mayoría de los casos, un pH entre 9 y 11 es acorde a las características para producir un efluente aceptable.

2.4 Solubilidad

La solubilidad teórica se puede definir como el número de moles o miligramos de soluto que se pueden disolver en un litro de solución. El agua como solvente posee la propiedad de disociar ciertos compuestos, dispersando así los iones que lo componen.

El concepto de solubilidad, se utiliza tanto para describir fenómenos cualitativos de los procesos de disolución, como también para expresar de manera cuantitativa la concentración de una solución.

La interacción entre las moléculas del disolvente con las del soluto, para la formación de agregados se conoce como solvatación, en cambio si el disolvente es agua se conoce como hidratación.

La temperatura, presión y concentración de las sustancias presentes en la solución, son algunos de los factores que afectan de gran manera la solubilidad de la solución.

Tal como muestra la Figura 3 se puede observar la solubilidad e algunos hidróxidos metálicos en función del pH.

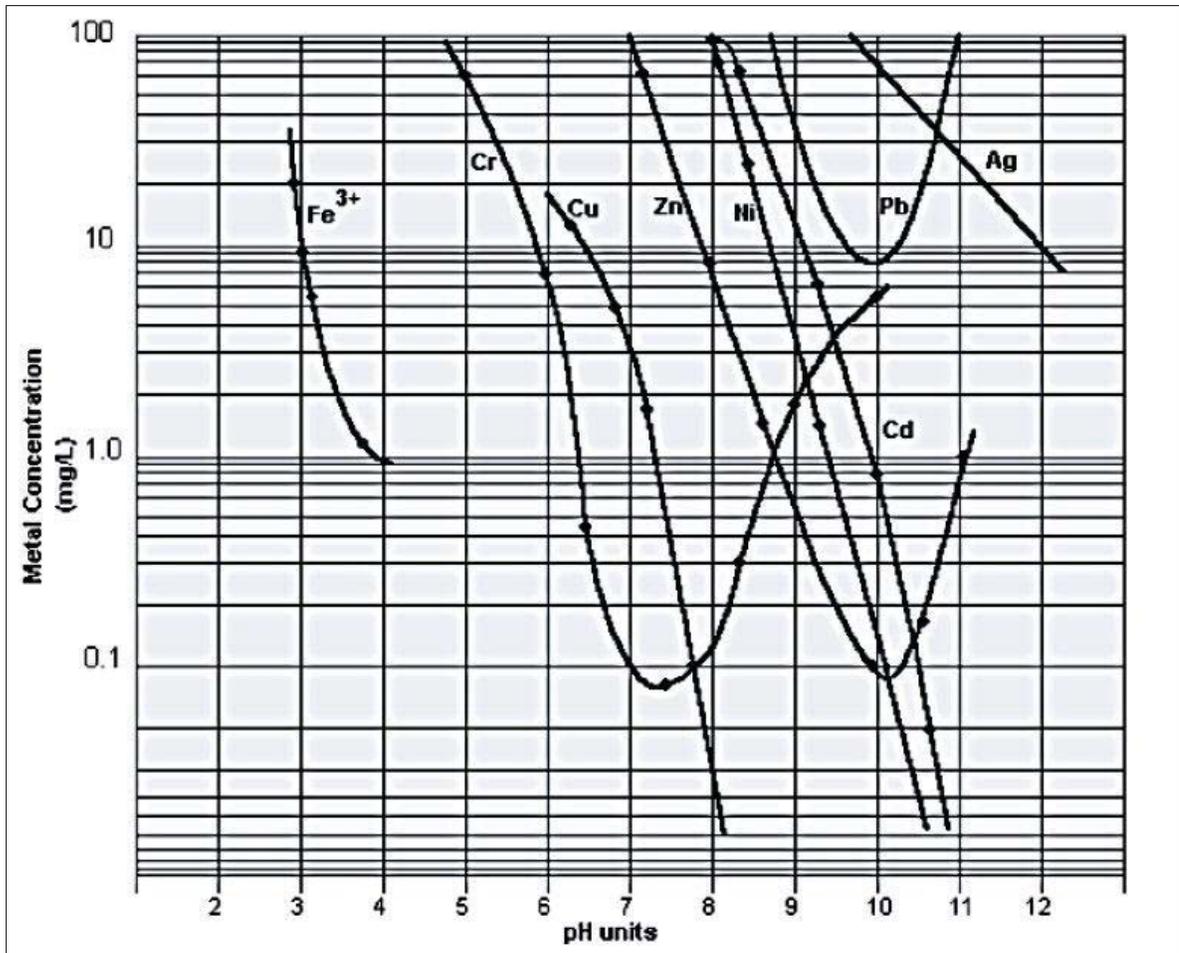
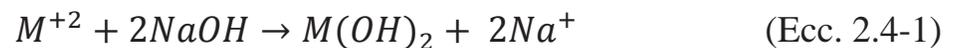


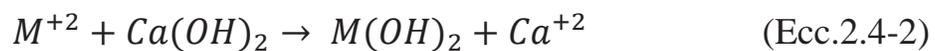
Figura 3: Solubilidad de hidróxidos metálicos vs pH. ^[5]

Los principales hidróxido que se emplean en la precipitación alcalina comúnmente son:

- NaOH (hidróxido de sodio)
- Ca(OH)₂ (hidróxido de calcio)

Las principales reacciones que se llevan a cabo al momento de poner en contacto los metales en solución con el reactivo hidróxido son:





En las ecuaciones anteriores M representa el metal presente en la solución que se precipita por la adición alcalina.

En la Figura 4 se puede observar los rangos de pH a los que precipitan algunos metales.

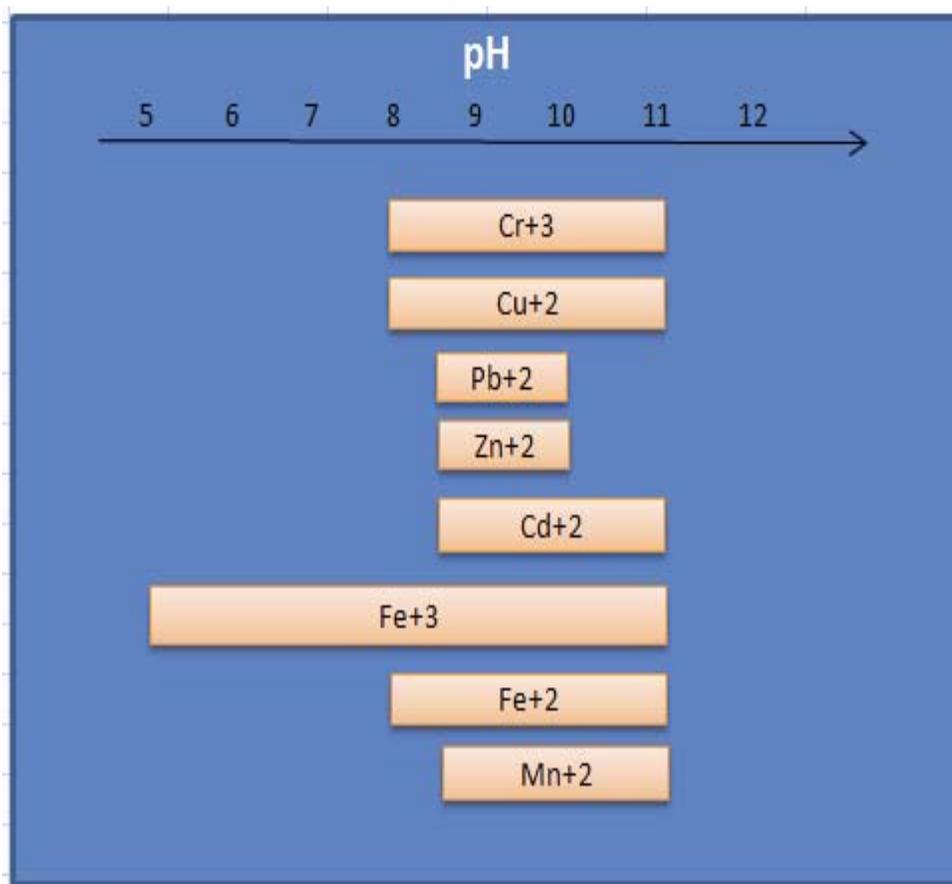
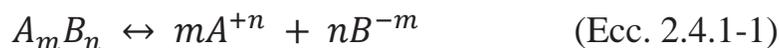


Figura 4: Rangos de pH de precipitación de metales pesados.

2.4.1 Producto de solubilidad

El producto de solubilidad de un compuesto se expresa como el producto de las concentraciones molares de sus iones en una disolución saturada, generalmente para una sal A_mB_n se tiene:



La constante del producto de solubilidad es:

$$Kps = [A^{+n}]^m * [B^{-m}]^n \quad (\text{Ecc. 2.4.1-2})$$

Donde $[A^{+n}]$ y $[B^{-m}]$ son concentraciones en moles por litro.

La constante del producto de solubilidad de un compuesto trata el valor máximo que puede llegar a tener el producto de las concentraciones de los iones que se encuentran disueltos. De la ecuación (2.4.1-2) podemos afirmar que el compuesto será menos soluble mientras más pequeño sea el K_{ps} .

Los Kps para los compuestos que se formaran en este trabajo son los siguientes:

Compuesto	Kps
$Cu(OH)_2$	6×10^{-20}
$Fe(OH)_3$	$1,64 \times 10^{-14}$

2.5 Neutralización

Muchos procesos industriales hoy en día producen efluentes que son ácidos o básicos, la neutralización de una corriente residual excesivamente acida o básica es necesaria en una variedad de situaciones como:

- En la prevención de la corrosión de metales y/o daños a otros materiales en la construcción.
- Para proteger la vida acuática y el bienestar de otros seres vivos.
- Algunas veces como un tratamiento preliminar.
- Para proporcionar un pH neutro en aguas de retroalimentación o en aguas de proceso.

El proceso de neutralización o también conocido como ajuste de pH, también se puede utilizar para romper emulsiones o para controlar la rapidez de una reacción química, como por ejemplo la cloración.

Este es el tipo de tratamiento químico más común, debido a que la corrosión es una característica de varias especies residuales en donde frecuentemente es función del pH. Con ayuda de la neutralización se puede eliminar el peligro específico asociado al residuo. Si bien este tratamiento no produce una destrucción efectiva del residuo, disminuye su peligrosidad y lo hace más accesible a un tratamiento adicional y una consiguiente disposición segura en el ambiente.

La neutralización de un residuo ya sea un ácido o una base, involucra la adición de una sustancia química para cambiar el pH hasta un nivel neutro, en el intervalo de 6 a 8. Frecuentemente las aguas residuales industriales pueden ser acidas o básicas y pueden requerir neutralización antes de cualquier otro tratamiento o ser liberadas al medio ambiente.

2.5.1 Proceso de Operación Neutralización

Para que el proceso ocurra es necesario que la neutralización se lleve a cabo en tanques, lagunas, columnas absorbedoras, etc., en operaciones discontinuas o de flujo continuo, dependiendo del volumen y la velocidad de flujo.

La adición del agente neutralizante se monitorea y justifica por mediciones y control del pH. En el tratamiento discontinuo el operador puede tomar muestra, medir el pH y adicionar la cantidad requerida de ácido o base. En un sistema a flujo continuo, controladores automáticos verifican el pH y controlan la alimentación del agente neutralizante. Al poseer corrientes con grandes fluctuaciones de pH, pueden estar precedidas por un tanque homogenizador que producirá un efluente con un intervalo de pH más reducido.

Un punto importante al momento de la elección del agente neutralizante es la parte económica, la utilidad y la compatibilidad con el proceso.

El proceso de neutralización está sujeto a la influencia de la temperatura. En este proceso la reacción entre una base con un ácido es una reacción exotérmica con un incremento en la temperatura. Controlando la velocidad de adición del reactivo de neutralización se puede minimizar el incremento de la temperatura y disipar el calor producido. Es muy importante una planeación apropiada del esquema de neutralización con respecto al agente neutralizador, la velocidad de adición, tiempo de reacción y diseño del equipo para evitar así problemas de calor.

Los productos de neutralización pueden ser líquidos, sólidos o gases o una combinación de estos. La forma física del producto no está relacionada con la forma física de los reactantes, pero si a su composición química y a su medio. Las especies químicas presentes en las especies neutralizadas pueden incluir componentes originales de la corriente residual, así como el material del agente neutralizante.

La acción más común es la adición de un compuesto químico, en forma sólida o líquida, directamente a la corriente de agua residual, el equipo requerido para esta forma de tratamiento es simple, consta de un tanque de almacenamiento con agitadores y sistemas de distribución, con frecuencia la neutralización se realiza en series de reactores para proporcionar un mejor control de pH final.

2.5.2 Campo de aplicación

La neutralización posee una aplicación ampliamente industrial como es el caso del tratamiento de residuos acuosos que contienen ácidos fuertes o bases fuertes. Las aguas residuales ácidas se pueden neutralizar con cal apagada [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], sosa (NaOH), carbonato sódico (Na_2CO_3). La cal apagada es la más empleada en la neutralización de ácidos ya que es más barata que otras bases. Por el contrario las aguas residuales básicas o alcalinas pueden ser neutralizadas con ácidos fuertes como es el caso del ácido sulfúrico (H_2SO_4) o el ácido clorhídrico (HCl) con CO_2 . Para ambos casos se utilizan recipientes con agitación y sensores de pH que controlan la velocidad de alimentación.

La neutralización puede ser empleada en tratamientos tanto de corrientes orgánicas como de inorgánicas; se utiliza para precipitar iones de metales pesados como Zn, Pb, Cu, o Hg, adicionando principalmente una base (álcali) a una corriente residual. Los compuestos inorgánicos que se pueden tratar incluyen fenoles, ácidos carboxílicos entre muchos otros materiales.

A continuación se muestra en la Figura 5 la curva típica de un proceso de neutralización.

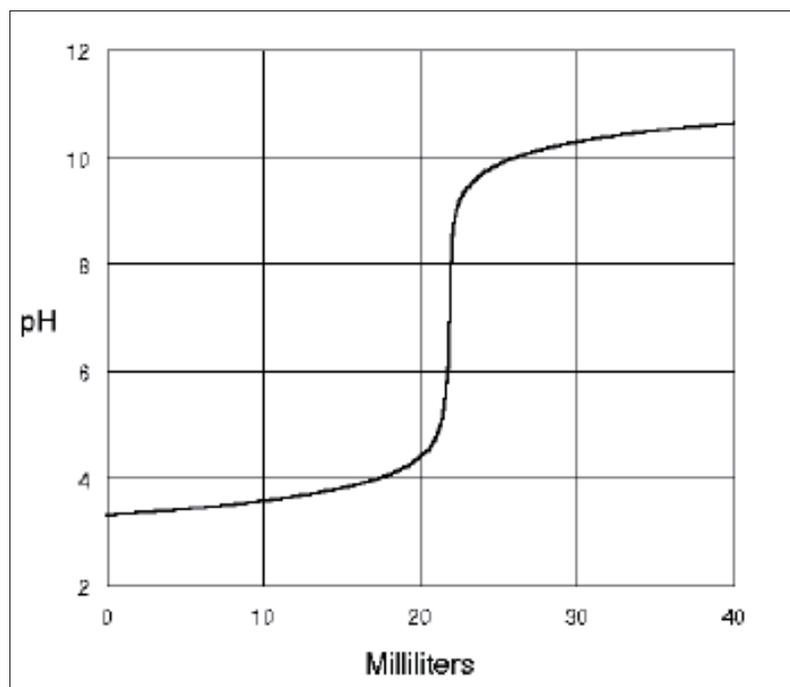


Figura 5: Curva típica de neutralización.

2.6 Reactivo: Hidróxido de Sodio

El hidróxido de sodio también conocido como sosa caustica, es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe humedad del aire (higroscópico), es muy corrosivo generalmente se utiliza en forma sólida o como una solución al 50% concentrada. Su principal uso es industrial, utilizado preferentemente en la fabricación de papel, tejidos y detergentes.

Su obtención se realiza mediante el proceso de caustificación, es decir, juntando otro hidróxido con un compuesto de sodio. Hoy en día se fabrica por electrólisis de una solución acuosa de cloruro de sodio o salmuera.

En la tabla 3 se muestran algunas características químicas y físicas del compuesto, mientras que en la figura 6 podemos observar una imagen del reactivo empleado en las pruebas de laboratorio.

Formula	NaOH
Masa molar	39,99 [g/mol]
Densidad	2,1 [g/cm ³]
Apariencia	Sólido color blanco
Punto de fusión	591 °K (318 °C)
Punto de ebullición	1663 °K (1390 °C)
Solubilidad en agua	111g/100 ml (a 20 °C)

Tabla 3: Características físicas y químicas del NaOH utilizado en experimentación



Figura 6: Muestra de hidróxido de sodio utilizado en laboratorio.

2.7 Reactivo: Hidróxido de Potasio

El hidróxido de potasio, llamado comúnmente como potasa cáustica al igual que el de sodio son bases fuertes de uso común. Posee varios usos tanto industriales como comerciales. La mayoría de las aplicaciones explotan su reactividad con ácidos y la corrosividad natural. Al ser una base fuerte reacciona violentamente con ácidos, y es corrosiva en ambientes húmedos para metales tales como cinc, aluminio estaño y plomo, originando hidrógeno (gas combustible y explosivo). Su principal obtención es mediante electrolisis de una solución concentrada de cloruro de potasio.

La Tabla 4 muestra algunas de las principales características del KOH y en la Figura 7 se puede observar el reactivo utilizado.

Formula	KOH
Masa molar	56,10 [g/mol]
Densidad	2,04 [g/cm ³]
Apariencia	Sólido color blanco
Punto de fusión	633,15 °K (360 °C)
Punto de ebullición	1593 °K (1320 °C)
Solubilidad en agua	119g/100 ml

Tabla 4: Principales características físicas y químicas del KOH utilizado en la experiencia.



Figura 7: Muestra de hidróxido de Potasio en escamas.

2.8 Salinidad de los suelos

La salinidad del suelo se refiere a la cantidad de sales que se encuentran presentes en el suelo, estas se pueden determinar mediante una medición de la conductividad eléctrica (CE) de una solución extraída del suelo. La sal es un compuesto formado por iones con carga negativa enlazados a iones con carga positiva.

El efecto que pueda tener la salinidad sobre el crecimiento de las plantas, se puede observar de las siguientes maneras:

2.8.1 Daños directos

- Disminución de la absorción del agua por las raíces, si existe una concentración alta de sales tiene como resultado potencial osmótico alto de la solución del suelo, por lo que la planta debe utilizar más energía para absorber el agua, marchitándose, incluso cuando el suelo alrededor de las raíces se siente mojado al tacto.
- Toxicidad por iones específicos, la planta al absorber el agua que contiene iones de sales perjudiciales (por ejemplo, sodio, cloruros, exceso de boro etc.), pueden aparecer

síntomas visuales, como puntas y bordes de las hojas quemadas, como también deformaciones de su fruto.

2.8.2 Daños indirectos

- Interferencia con absorción de nutrientes esenciales, un desequilibrio en la composición de las sales en el suelo puede resultar en una competencia perjudicial entre los elementos, esta condición se denomina “antagonismo”, es decir la presencia de un ion limita la absorción de otros iones. Por ejemplo el exceso de cloruro reduce la absorción de nitrato, etc.
- El efecto del sodio en la estructura del suelo, en los suelos que contienen altos niveles de Sodio, el sodio desplaza al Calcio y al Magnesio, como resultado la agregación de las partículas del suelo se reduce, y el suelo tiende a dispersarse. Cuando esta mojado, un suelo sódico tiende a sellarse, su permeabilidad se reduce en gran parte, lo que implica que la capacidad de infiltración de este se reduzca también. Al estar seco un suelo sódico se pone duro y se atterra, esto puede verse enfocado en un daño a las raíces.

2.8.3 Algunos factores que afectan la salinidad de los suelos

- El agua de riego: la cantidad total de sales disueltas en el agua de riego y su composición, influyen en la salinidad del suelo. Por lo tanto varios parámetros deben ser evaluados como la CE de la fuente de agua y su contenido de mineral.
- Abonos: el tipo y la cantidad de fertilizante aplicados al suelo también afectan su salinidad. Algunos fertilizantes al contener altos niveles de sales potencialmente perjudiciales, deben ser evitados, para así evitar la acumulación de sales en los suelos.
- Régimen y métodos de riego: para prevenir la cantidad excesiva de sales, es necesario aplicar una cantidad extra de agua, de manera que supere la cantidad de agua necesaria para la evotranspiración. La frecuencia y la cantidad de lavado dependen de la calidad del agua, del clima y del suelo, y también de la sensibilidad del cultivo a la salinidad.

2.8.4 Metodología de evaluación de sodio porcentual

Altos contenidos de sodio en las aguas de regadío, afecta directamente a la permeabilidad del suelo, lo que conlleva problemas de infiltración. Esto se debe a que la presencia del sodio en los suelos se intercambia con otros iones, el Calcio y el Magnesio al ser cationes que forman parte de los complejos estructurales del suelo, son desplazados debido al exceso de sodio, provocando la dispersión y la disgregación del suelo. El suelo se pone duro y compacto en condiciones secas, y reduce la infiltración de agua a través de los poros que conforman el suelo.

La fórmula para calcular el sodio porcentual presente en las aguas de regadío se muestra a continuación:

$$Na\% = \frac{[Na]}{[Ca] + [K] + [Na] + [Mg]} \times 100$$

Todos los elementos de la ecuación son expresados en [mEq/L].

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo a través de las pruebas que se realizarán, se buscara encontrar los valores de eficiencia de remoción de metales de ambos reactivos, tanto NaOH como KOH, sus respectivas curvas de neutralización, los gastos correspondientes al consumo de estos y principalmente el comportamiento del KOH como agente reductor del sodio porcentual, de esta manera se podrá tener un respaldo a la hora de tomar decisiones con respecto a la efectividad de los reactivos a evaluar.

3.1 Equipos, Materiales y Reactivos

Los equipos, materiales y reactivos utilizados en esta investigación se encuentran disponibles en el laboratorio de control de calidad del Puerto Punta Chungo, a cargo de la empresa Alfred H Knigh (AHK).

La Tabla 5 enumera los equipos con su modelo utilizados en el proceso experimental.

Equipo	Modelo
Absorbedor atómico	Spectra 5, Spectometre Varian
Agitador magnético	Cimarec 2 Thermolyne
Balanza analítica	Cientec, Statorius
Bomba de vacio	Vacuubrad ME4CNT
pHmetro	pHmetro portátil 430
Plancha calefactora	Thermo scientific type 2000

Tabla 5: Equipos utilizados en la experimentación de precipitación de metales.

En la Figura 8 se muestra la imagen del equipo utilizado para el análisis de las concentraciones de las muestras con las que se trabajo.



Figura 8: Absorbedor atómico utilizado para análisis de muestras.

La Tabla 6 contiene los datos de los materiales utilizados en la experimentación con su característica correspondiente

Material	Característica
Bureta	100 [ml]
Matraz Kitasato	1000 [ml]
Vasos precipitados	100 [ml], 1000[ml]
Pipetas	10 [ml] y 50 [ml]
Propipeta	De goma
Papel Filtro	
Pizeta	500 [ml]
Probeta	50 [ml]
Matraz de aforo	50 [ml]
Soporte Universal	

Tabla 6: Materiales utilizados en la experimentación.

En la Figura 9 se presenta los materiales de vidrio utilizados en el desarrollo de la experimentación.



Figura 9: Material de laboratorio utilizado para experimentación.

La siguiente tabla se puede observar los reactivos utilizados en la experimentación, con sus respectivas características.

Reactivos	Característica
Agua destilada	Preparación de reactivos
Agua de efluente	Para la preparación de reactivos
Ácido Nítrico HNO_3	Al 65%
Ácido Clorhídrico HCl	Al 37%
Hidróxido de Sodio NaOH	99,9% pureza (sólido)
Hidróxido de Potasio KOH	92,5% pureza (sólido)
Sulfato de Sodio Na_2SO_4	
Acido Perclórico HClO_4	

Tabla 7: Reactivos utilizados en la experimentación

3.2 Método Experimental

3.2.1 Preparación de NaOH 50%

La preparación de hidróxido de sodio al 50% se lleva a cabo con mucho cuidado y precaución, debido a la generación de gases cáusticos se debe realizar bajo campana extractora.

- ❖ Tomar un vaso precipitado de 100 [ml] y secarlo.
- ❖ Pesar 50 grs de NaOH dentro del vaso precipitado de 100 [ml].
- ❖ Agregar 200 [ml] de agua en un vaso precipitado de 1000 [ml].
- ❖ Colocar dentro del vaso de 1000 [ml], el vaso de 100 [ml] con NaOH. (para evitar que el vaso se caliente debido a la reacción exotérmica entre el NaOH y el agua).
- ❖ Agregar 80 [ml] de agua destilada al vaso que contiene el NaOH.
- ❖ Con un agitador de vidrio agitar la solución hasta notar la dilución del NaOH.
- ❖ Esperar que se enfrié, luego depositarla en un matraz de aforo de 100 [ml], y aforar hasta los 100 [ml] con agua destilada.
- ❖ Agitar el matraz durante 1 minuto.

3.2.2 Preparación de KOH al 50%

La preparación del KOH al 50% al igual que el NaOH es sumamente reactivo, por lo tanto se debe tomar la misma consideración que en el punto anterior. Cabe destacar que se utilizó reactivo KOH sólido con un 92,5% de pureza.

- ❖ Tomar un vaso precipitado de 100 [ml] y secarlo.
- ❖ Pesar 54,05 [gr] de KOH dentro del vaso precipitado de 100 [ml].
- ❖ Agregar 200 [ml] de agua en un vaso precipitado de 1000 [ml].
- ❖ Colocar dentro del vaso de 1000 [ml] el vaso de 100 [ml] con KOH. (para evitar que el vaso se caliente debido a la reacción exotérmica entre el KOH y el agua).
- ❖ Agregar 80 [ml] de agua destilada al vaso que contiene el KOH.
- ❖ Con un agitador de vidrio agitar la solución hasta notar la dilución del KOH.
- ❖ Esperar que se enfrié, luego depositarla en un matraz de aforo de 100 [ml], y aforar hasta los 100 [ml] con agua destilada.

- ❖ Agitar el matraz durante 1 minuto.

3.2.3 Preparación de la lectura de Cu soluble por EAA

La muestra debe ser liberada de todos los sólidos suspendidos mediante filtración, se debe filtrar un volumen superior a los 150 [ml] mediante bomba de vacío a través de una membrana de 0.45 micras, de esta manera se obtiene un volumen suficiente para el análisis por duplicado.

- ❖ Tomar una alícuota de 50 [ml] con pipeta de 50 [ml] previamente homogenizada.
- ❖ Transferir los 50 [ml] a un vaso precipitado de 250 [ml].
- ❖ Agregar 5 [ml] de HNO₃ concentrado.
- ❖ Colocar muestra sobre la plancha para reducir el volumen hasta unos 25 [ml].
- ❖ Enfriar la solución y agregar 2,5 [ml] de HCl.
- ❖ Aforar correctamente en un matraz de aforo de 50 [ml].
- ❖ Homogenizar la mezcla (agitar) y analizar mediante Absorción atómica.

3.2.4 Preparación de la lectura de Mo soluble

Al igual que en el punto 3.2.3 la muestra debe estar liberada de sólidos suspendidos, previamente se debe filtrar un volumen de 150 [ml].

- ❖ Tomar una alícuota de 50 [ml] con pipeta de 50 [ml] previamente homogenizada.
- ❖ Transferir los 50 [ml] a un vaso precipitado de 250 [ml].
- ❖ Agregar 5 [ml] de HNO₃ concentrado.
- ❖ Colocar muestra sobre la plancha para reducir el volumen hasta unos 25 [ml].
- ❖ Enfriar la solución y agregar 2,5 [ml] de HCl.
- ❖ Agregar 5 [ml] de Na₂SO₄ al 10%.
- ❖ Aforar correctamente en un matraz de aforo de 50 [ml].
- ❖ Homogenizar la mezcla (agitar) y analizar mediante Absorción atómica.

3.2.5 Preparación de la lectura de Fe soluble

El hierro soluble se determina de la misma manera que el Cu soluble (ver 3.2.3)

3.2.6 Procedimiento experimental

Durante toda la experimentación se debe tomar todas las medidas de seguridad correspondientes a la manipulación de los distintos reactivos.

- ❖ Extraer agua de la planta de filtros en un bidón de 25 [L]. (agua de lavado de filtros).
- ❖ En un vaso de 1000 [ml] agregar 1000 [ml] del agua extraída de la planta de filtros.
- ❖ Con el pHmetro medir el pH de la muestra.
- ❖ Filtrar en un matraz kitasato de 1000 [ml] con la ayuda de la bomba de vacío y el papel filtro los 1000 [ml] en el vaso precipitado.
- ❖ Tomar 6 vasos precipitados de 200 [ml], lavarlos con agua destilada y cebarlos con el agua filtrada. (3 muestras duplicadas para análisis de Cu, Fe y Mo)
- ❖ Con la probeta de 50 [ml] depositar 50 [ml] de agua filtrada en cada vaso de 200 [ml].
- ❖ Agregar 10 [ml] de HNO_3 a cada vaso precipitado.
- ❖ Colocar los vasos en la plancha calefactora hasta reducirlos a 25 [ml].
- ❖ Una vez reducido el volumen dejar enfriar por alrededor de 15 minutos.
- ❖ Con un embudo agregar los 25 [ml] a cada matraz. (véase preparación de muestras para lectura de Cu, Fe y Mo correspondiente).
- ❖ Agregar la matriz correspondiente a cada matraz.

3.2.7 Procedimiento para el proceso de precipitación

- ❖ Tomar una muestra de agua de 1000 [ml] en un vaso de precipitado de 1000[ml].
- ❖ Calibrar pHmetro.
- ❖ Poner a agitar la muestra.
- ❖ Medir el pH inicial de la muestra.
- ❖ Colocar la bureta en el soporte universal, llenar la bureta con el reactivo precipitante.
- ❖ Armar el equipo (soporte universal, agitador magnético, vaso de precipitado y bureta)
- ❖ Agregar gota a gota el reactivo precipitador.
- ❖ Registrar pH final y gasto de reactivo precipitante.
- ❖ Repetir el procedimiento para pH 10, 10.5, 11, 11.5 y 12.
- ❖ Dejar que sedimente la muestra.

3.2.8 Procedimiento para el procesode sedimentación

- ❖ Una vez adicionado el reactivo y ajustado el pH, dejar sedimentando la muestra.
- ❖ Tomar alícuotas de 50 [ml] cada una hora y medir concentraciones de metales como se explica en los puntos 3.2.3 al 3.2.5.
- ❖ Una vez finalizado el procedimiento repetir las pruebas para los distintos pH 10, 10.5, 11, 11.5 y 12.

3.2.9 Procedimiento para determinar %Cu en precipitado

- ❖ Una vez obtenido el precipitado, filtrar y llevar a horno de secado, a 100 °C.
- ❖ Sacar con cuidado el papel filtro del horno y dejarlo a temperatura ambiente, y posteriormente pesarlos en la balanza analítica.
- ❖ Repetir los pasos anteriores hasta que el peso no varíe.
- ❖ El precipitado ya seco, pesar 0,5000 [g] de este, y depositar en un vaso de precipitado de 400 [ml].
- ❖ Agregar 2 ml de ácido perclórico y 10 ml de ácido nítrico, tapar con un vidrio reloj y colocarlos en la plancha.
- ❖ Retirar los vidrio reloj, una vez que la muestra deje de producir vapores rojos, esperar hasta que se seque completamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Caracterización agua de lavado de filtros

El lavado de las placas de los filtros cerámicos, provoca una lixiviación de ciertos minerales de Cu, debido al uso de ácido nítrico (al 1,5%). Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar las características de estas aguas. El pH del agua y las concentraciones de algunos metales presentes en esta agua de lavado se puede observar en la tabla 8.

pH	1,8 a 2,3
Cu soluble	30 [ppm]
Fe soluble	8 [ppm]
Temperatura	16 °C a 18 °C

Tabla 8: caracterización de aguas de lavado de filtro.

En la figura 10 se puede observar el agua que proviene de los filtros (lavado) la cual contiene una gran cantidad de sólidos solubles provenientes de la pulpa de concentrado.



Figura 10: Agua de lavado de filtros inicialmente, antes de la precipitación.

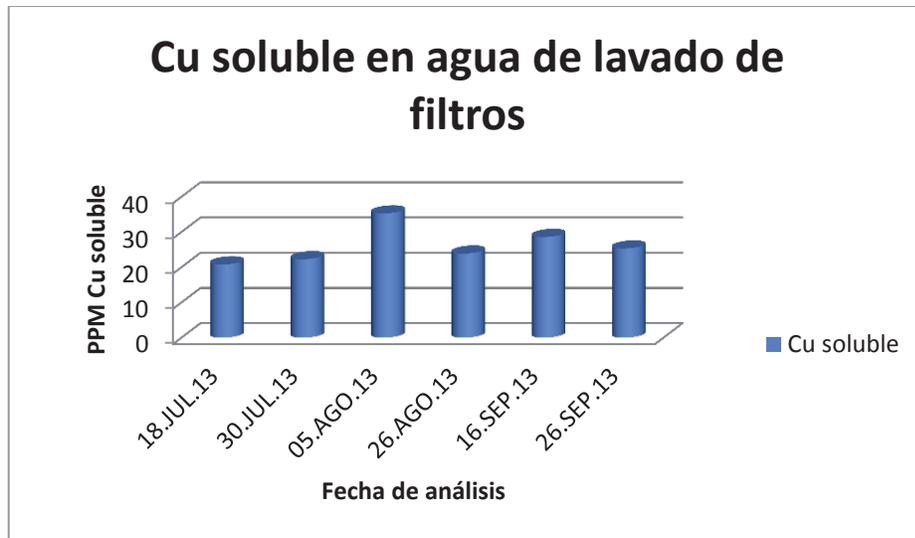


Figura 11: Gráfico de concentraciones de Cu presente en agua de lavado de filtros.

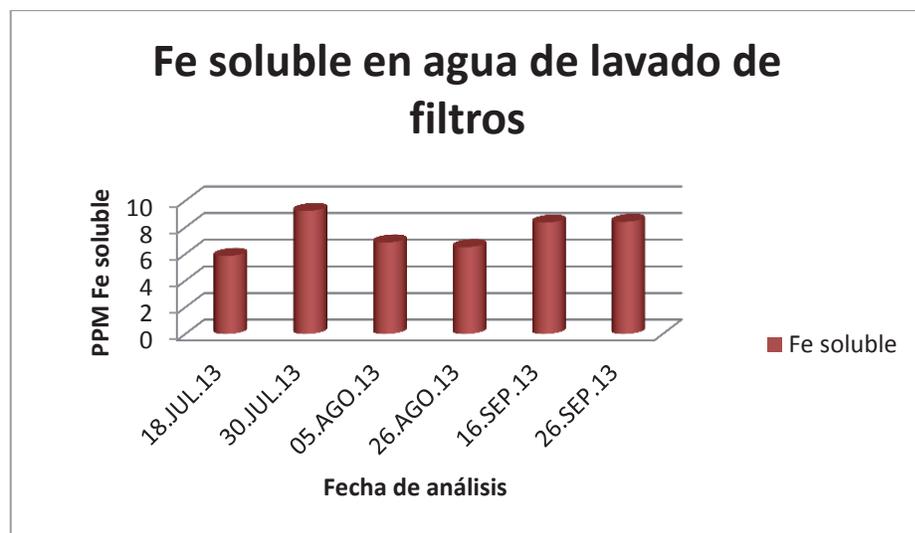


Figura 12: Gráfico de concentraciones de Fe presente en agua de lavado de filtros.

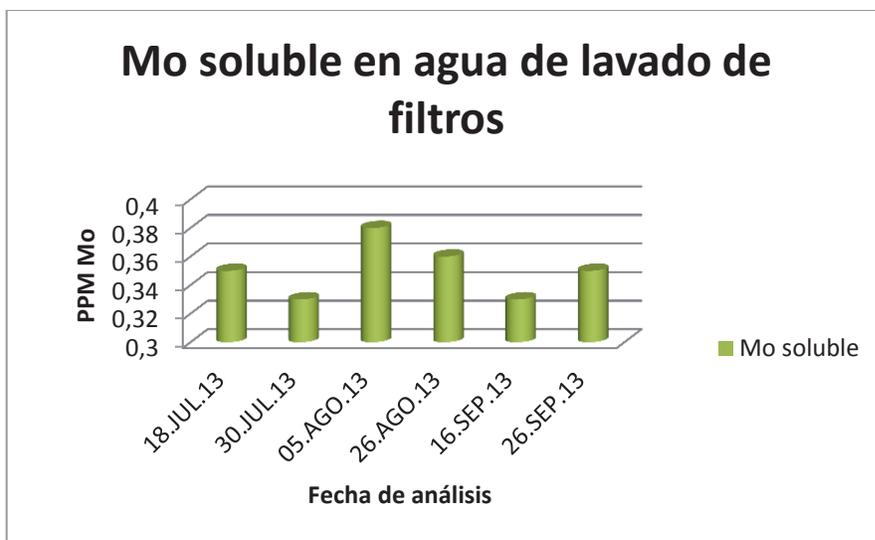


Figura 13: Gráfico de concentraciones de Mo presente en agua de lavado de filtros.

Las Figuras 11,12 y 13 muestran los niveles de concentración que arrojaron los análisis para Cu, Fe y Mo presentes en las aguas de lavado de filtro, principales metales solubles en estas aguas, las fechas de análisis corresponden a las veces que se iba a buscar muestras para trabajar en el laboratorio con las pruebas correspondientes a precipitación y ajuste de pH.

4.2 Proceso Actual de precipitación con NaOH

El actual proceso utiliza NaOH como agente precipitante, la soda es bombeada junto al agua proveniente de los filtros hacia alguno de los estanques, posteriormente se deja decantar alrededor de 6 hrs, el agua decantada es enviada hacia unas piscinas donde se almacenan y son enviadas a la planta FAD, ahí son tratadas para la posterior deposición y riego de bosques.

A continuación en la Tabla 9 de datos, se muestran los análisis realizados a las aguas provenientes de los estanques TK062 y TK063, luego de haber decantado.

Prueba	pH	Cu Soluble	Fe Soluble	Mo Soluble
1	10,96	0,11	0,06	0,33
2	11,34	0,07	0,03	0,31
3	11,5	0,05	0,02	0,29
4	10,68	0,12	0,07	0,33
5	11,12	0,08	0,05	0,34
6	12,1	0,05	0,06	0,45
7	11,7	0,08	0,09	0,33
8	11,3	0,10	0,09	0,38
9	10,89	0,11	0,08	0,35
10	10,96	0,11	0,09	0,38
11	11,44	0,12	0,11	0,40
12	11,21	0,11	0,09	0,33
13	11,68	0,08	0,10	0,37
14	11,12	0,09	0,10	0,35

Tabla 9: Datos obtenidos de análisis de aguas provenientes del proceso de neutralización con NaOH.

La grafica que muestra la Figura 14 registra los resultados que arrojo el análisis de agua para el proceso de neutralización con NaOH, para lo cual se procedió a analizar las aguas provenientes del proceso de sedimentación de los tanques de precipitación, mientras que la de la Figura 15 entrega los niveles de pH que varían desde 10 a 12 en el actual proceso.

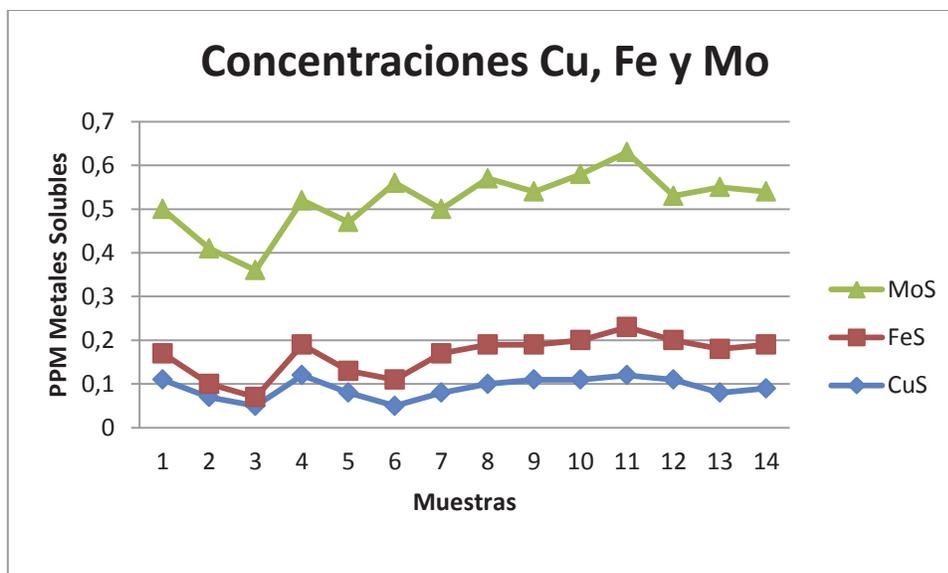


Figura 14: Concentraciones de Cu, Fe y Mo solubles en proceso de neutralización con NaOH.

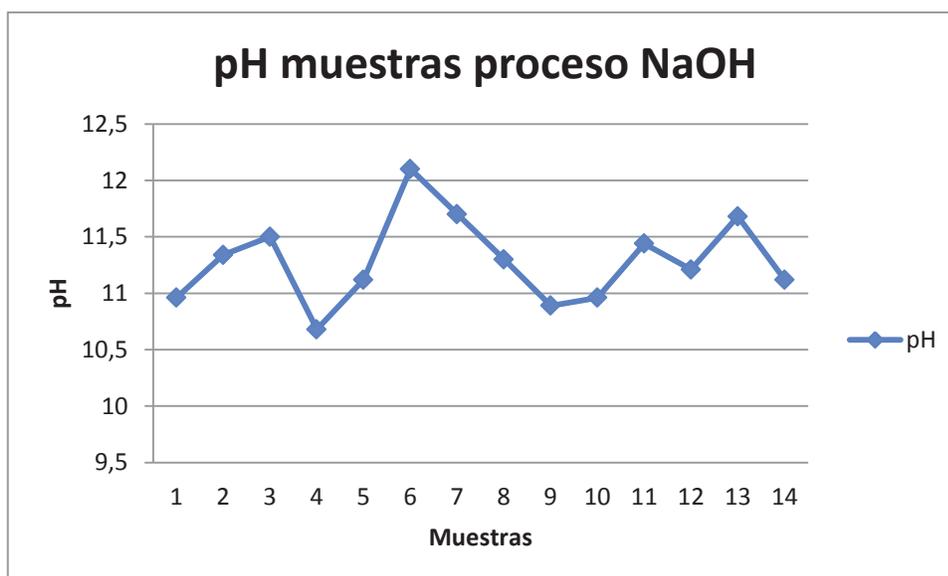


Figura 15: Mediciones de pH para muestras en proceso de neutralización con NaOH.

En la figura 14 se puede observar que los niveles de Cu y Fe soluble presentes en las aguas provenientes del proceso de decantación fluctúan en el nivel de [0,05-0,2].

Los niveles de sodio porcentual detectados en las aguas para riego sobrepasan los parámetros establecidos por la Norma Chilena de riego 1.333, en la figura 16 se pueden observar los resultados arrojados en el análisis que se realiza a estas aguas durante el periodo de julio del 2012 a mayo del 2013 por el Laboratorio Ambiental SGS Chile Ltda

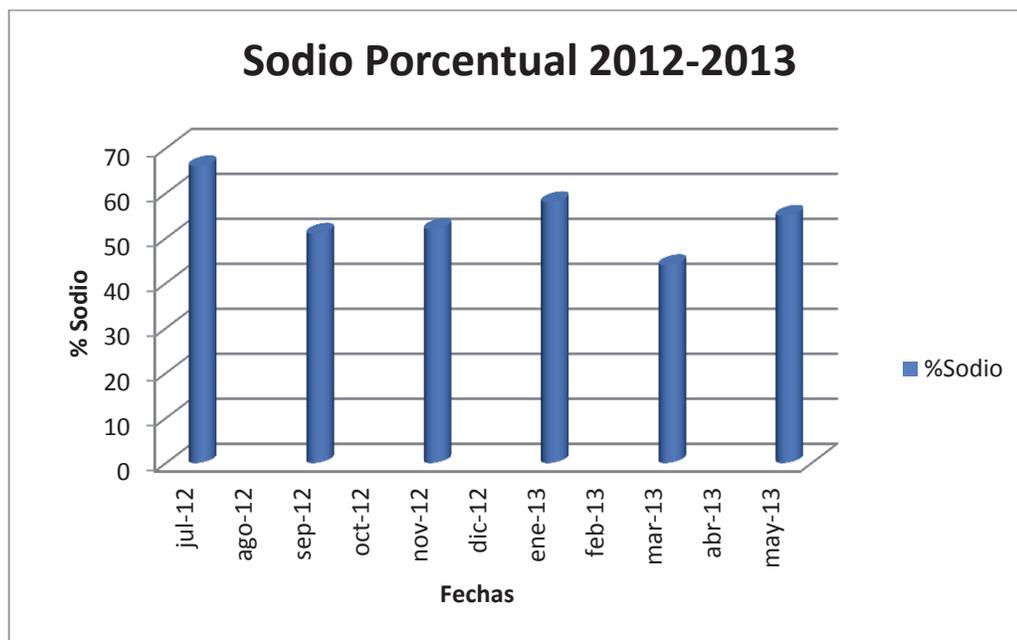


Figura 16: Medición de % Sodio en análisis de aguas para riego por SGS periodo 2012 a 2013.

Los parámetros establecidos por la Norma Chilena de Riego, establecen que los niveles de sodio porcentual (% sodio) no deben exceder el 35%, al analizar los datos entregados por SGS se observa que estos niveles superan los establecidos por la norma en todas las pruebas realizadas, debido a esto se plantea el uso de KOH.

4.3 Curvas de Neutralización para el NaOH y el KOH

En la Tabla 10 se muestran las curvas de neutralización obtenidas en las pruebas realizadas, ambas curvas fueron realizadas con KOH y NaOH mas agua de efluente de la planta FAD. Los gráficos que se muestran fueron obtenidos por pruebas realizadas con la misma muestra, cabe destacar que la prueba con NaOH, fue realizada con NaOH comercial que se utiliza actualmente en el proceso.

NaOH [ml]	pH	KOH [ml]	pH
0	1,89	0	1,96
0,2	1,89	0,2	2,03
0,4	1,89	0,4	2,04
0,6	1,91	0,6	2,04
0,8	1,93	0,8	2,07
1	1,96	1	2,11
1,2	2,01	1,2	2,12
1,4	2,04	1,4	2,12
1,6	2,11	1,6	2,13
1,8	2,45	1,8	2,19
2	10,08	2	2,28
2,2	10,87	2,2	2,45
2,4	11,01	2,4	10,25
2,6	11,14	2,6	10,54
2,8	11,28	2,8	10,89
3	11,39	3	11,04
3,2	11,55	3,2	11,25
3,4	11,64	3,4	11,39
3,6	11,71	3,6	11,48
3,8	11,76	3,8	11,54
4	11,78	4	11,7
4,2	11,85	4,2	11,78
4,4	11,88	4,4	11,86
4,6	11,91	4,8	11,93
4,8	11,93	5	11,94
5	11,98	5,2	11,98
5,2	12,01	5,4	12,01
5,4	12,03	5,8	12,05

Tabla 10: Datos obtenidos para curva de neutralización con NaOH y KOH.

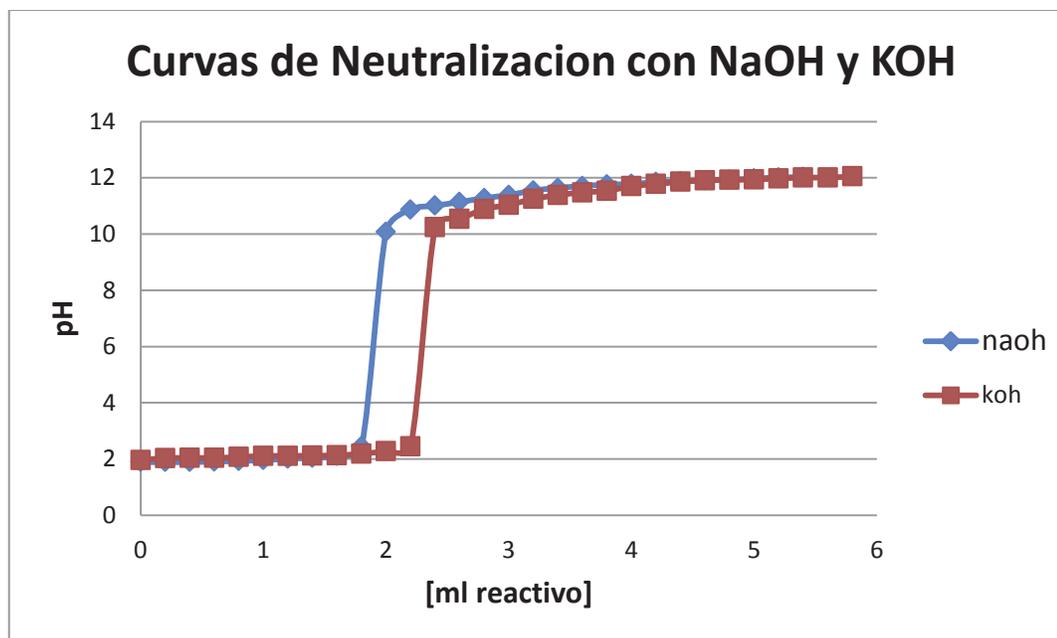


Figura 17: Gráficas de curvas de neutralización con NaOH y KOH.

Las curvas obtenidas se acercan al modelo establecido para una curva de neutralización (ver figura 2.3), se puede observar que la curva con NaOH alcanza un pH de 10,08 antes que con KOH, esta diferencia se debe a que el NaOH posee un porcentaje mayor de OH^- que el presente en el KOH, que influye principalmente en la variación del pH.

4.4 Ajuste de pH

Para que se lleve a cabo la precipitación de metales presentes en las aguas de lavado de filtros, se debe hacer un ajuste de pH como dice el estudio bibliográfico, el pH óptimo para este proceso de precipitación alcalina es de 9,5 a 11, pero la mayoría de los metales presentan un mejor comportamiento a un pH de 10, este ajuste de pH se llevo a cabo mediante la adición de hidróxido de sodio 50% p/v (NaOH) y hidróxido de potasio 50% p/v (KOH).

El ajuste de pH con los agentes precipitantes se llevo a cabo de manera sencilla, la cual consistió en adicionar el agente a la solución de agua de vado de filtros y verificar en el pHmetro (medidor de pH) un pH de 10; 10,5; 11; 11,5; y 12 respectivamente para cada agente.

En las siguientes tablas se pueden observar los resultados obtenidos tras realizar pruebas de precipitación con hidróxido de potasio (KOH) a diferentes valores de pH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	1,9	20,81	10,1	0,12	99,42
Fe [ppm]		5,86		0,2	96,59
Cu [ppm]	1,91	20,81	10,47	0,1	99,52
Fe [ppm]		5,86		0,1	98,29
Cu [ppm]	1,9	20,81	10,96	0,09	99,57
Fe [ppm]		5,86		0,19	96,76
Cu [ppm]	1,9	20,81	11,51	0,36	98,27
Fe [ppm]		5,86		0,09	98,46
Cu [ppm]	1,9	20,81	12,05	1,25	93,99
Fe [ppm]		5,86		0,08	98,63

Tabla 11: Resultados para Muestra 1, Prueba 1 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	1,92	20,81	10,04	0,11	99,47
Fe [ppm]		5,86		0,15	97,44
Cu [ppm]	1,9	20,81	10,52	0,09	99,57
Fe [ppm]		5,86		0,11	98,12
Cu [ppm]	1,91	20,81	11,01	0,1	99,52
Fe [ppm]		5,86		0,13	97,78
Cu [ppm]	1,91	20,81	11,48	0,29	98,61
Fe [ppm]		5,86		0,12	97,95
Cu [ppm]	1,91	20,81	12,03	1,05	94,95
Fe [ppm]		5,86		0,1	98,29

Tabla 12: Resultados para Muestra 1 Prueba 2 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	1,92	20,81	10,08	0,11	99,47
Fe [ppm]		5,86		0,18	96,93
Cu [ppm]	1,91	20,81	10,52	0,07	99,66
Fe [ppm]		5,86		0,09	98,46
Cu [ppm]	1,91	20,81	10,99	0,1	99,52
Fe [ppm]		5,86		0,12	97,95
Cu [ppm]	1,92	20,81	11,47	0,33	98,41
Fe [ppm]		5,86		0,11	98,12
Cu [ppm]	1,91	20,81	11,97	1,12	94,62
Fe [ppm]		5,86		0,11	98,12

Tabla 13: Resultados para Muestra 1 Prueba 3 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	2,19	22,28	9,98	0,13	99,42
Fe [ppm]		9,24		0,18	98,05
Cu [ppm]	2,18	22,28	10,62	0,06	99,73
Fe [ppm]		9,24		0,18	98,05
Cu [ppm]	2,16	22,28	10,85	0,06	99,73
Fe [ppm]		9,24		0,04	99,57
Cu [ppm]	2,19	22,28	11,49	0,14	99,37
Fe [ppm]		9,24		0,09	99,03
Cu [ppm]	2,18	22,28	11,98	0,56	97,49
Fe [ppm]		9,24		0,27	97,08

Tabla 14: Resultados para Muestra 2 Prueba 1 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	2,17	22,28	10,03	0,14	99,37
Fe [ppm]		9,24		0,16	98,27
Cu [ppm]	2,18	22,28	10,55	0,07	99,69
Fe [ppm]		9,24		0,14	98,48
Cu [ppm]	2,17	22,28	10,98	0,09	99,60
Fe [ppm]		9,24		0,1	98,92
Cu [ppm]	2,17	22,28	11,58	0,16	99,28
Fe [ppm]		9,24		0,11	98,81
Cu [ppm]	2,18	22,28	12,01	0,59	97,35
Fe [ppm]		9,24		0,28	96,97

Tabla 15: Resultados para Muestra 2 Prueba 2 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	2,18	22,28	10,08	0,12	99,46
Fe [ppm]		9,24		0,2	97,84
Cu [ppm]	2,19	22,28	10,47	0,06	99,73
Fe [ppm]		9,24		0,1	98,92
Cu [ppm]	2,19	22,28	11,02	0,1	99,55
Fe [ppm]		9,24		0,12	98,70
Cu [ppm]	2,17	22,28	11,55	0,21	99,06
Fe [ppm]		9,24		0,14	98,48
Cu [ppm]	2,19	22,28	11,96	0,51	97,71
Fe [ppm]		9,24		0,26	97,19

Tabla 16: Resultados para Muestra 2 Prueba 3 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	2,28	17,41	10,19	0,1	99,43
Fe [ppm]		8,23		0,69	91,62
Cu [ppm]	2,25	17,41	10,53	0,06	99,66
Fe [ppm]		8,23		0,38	95,38
Cu [ppm]	2,26	17,41	10,98	0,07	99,60
Fe [ppm]		8,23		0,3	96,35
Cu [ppm]	2,28	17,41	11,46	0,17	99,02
Fe [ppm]		8,23		0,04	99,51
Cu [ppm]	2,28	17,41	12,01	0,77	95,58
Fe [ppm]		8,23		0,1	98,78

Tabla 17: Resultados para Muestra 3 Prueba 1 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	2,27	17,41	10,06	0,13	99,25
Fe [ppm]		8,23		0,22	97,33
Cu [ppm]	2,27	17,41	10,47	0,05	99,71
Fe [ppm]		8,23		0,12	98,54
Cu [ppm]	2,25	17,41	11,1	0,07	99,60
Fe [ppm]		8,23		0,13	98,42
Cu [ppm]	2,27	17,41	11,58	0,18	98,97
Fe [ppm]		8,23		0,1	98,78
Cu [ppm]	2,28	17,41	12,06	0,65	96,27
Fe [ppm]		8,23		0,12	98,54

Tabla 18: Resultados para Muestra 3 Prueba 2 de agua de lavado de filtros con KOH.

	pH inicial	Ci	pH final	Cf	% Eficiencia
Cu [ppm]	2,24	17,41	10,04	0,11	99,37
Fe [ppm]		8,23		0,19	97,69
Cu [ppm]	2,24	17,41	10,51	0,06	99,66
Fe [ppm]		8,23		0,09	98,91
Cu [ppm]	2,25	17,41	11,09	0,11	99,37
Fe [ppm]		8,23		0,12	98,54
Cu [ppm]	2,26	17,41	11,56	0,16	99,08
Fe [ppm]		8,23		0,11	98,66
Cu [ppm]	2,26	17,41	12,02	0,68	96,09
Fe [ppm]		8,23		0,1	98,78

Tabla 19: Resultados Muestra 3 Prueba 3 de agua de lavado de filtros con KOH.

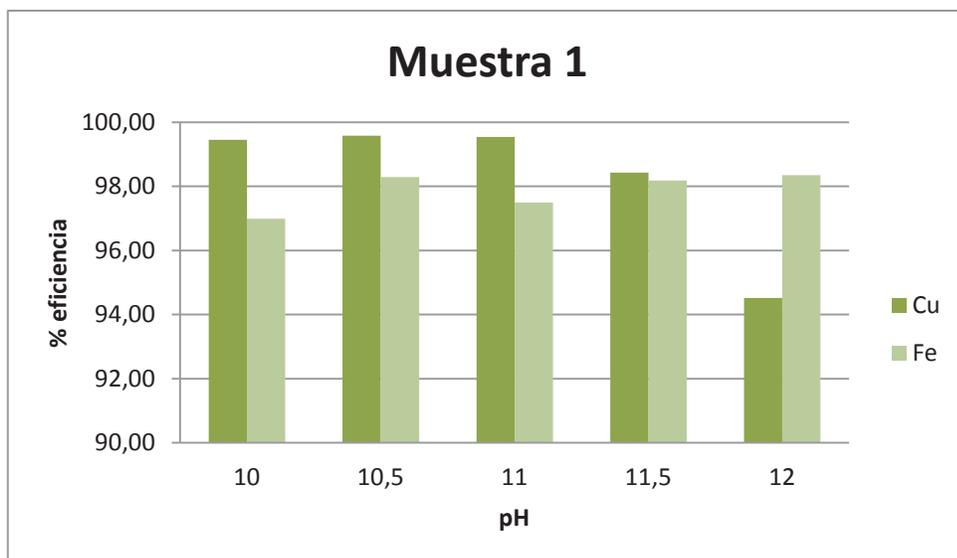


Figura 18: Eficiencia promedio de % remoción de metales Cu y Fe en la Muestra 1 de aguas de lavado de filtros.

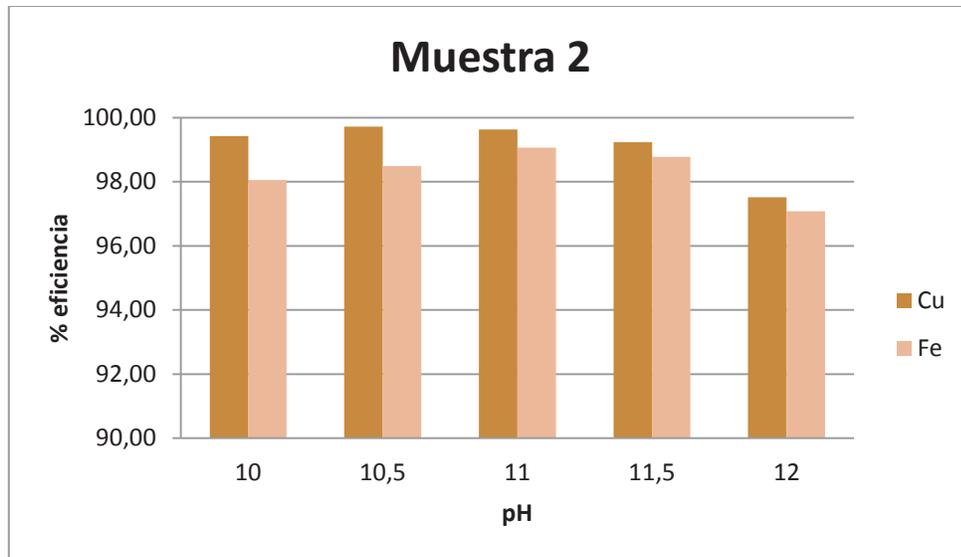


Figura 19: % Eficiencia promedio de remoción de metales Cu y Fe en la Muestra 2 de aguas de lavado de filtros.

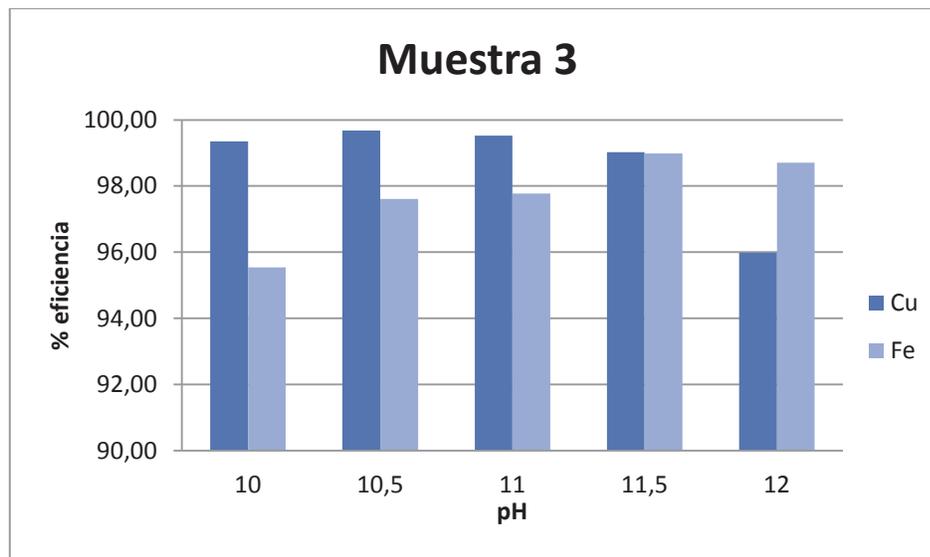


Figura 20: % Eficiencia promedio de remoción de metales Cu y Fe en la Muestra 3 de aguas de lavado de filtros.

Las tablas anteriores representan los resultados obtenidos para la precipitación de metales (Cu y Fe) y su eficiencia, de las 3 muestras que se analizó, a cada una se le realizó 3 pruebas las cuales variaron desde un pH 10 a un pH 12 (5 pruebas). Cabe mencionar que para el Mo no se realizaron pruebas de precipitación debido a que este no reacciona con el OH, de esta manera pasa directo a la planta FAD donde es eliminado en su totalidad de las aguas para riego.

Se puede observar en las tablas anteriores, desde la Tabla 12 a la Tabla 19 que la eficiencia del hidróxido de potasio (KOH) como agente precipitador, es alta, superando el 98% para ambos metales. En el rango de pH de 10 a 11 es donde se obtiene un mejor rendimiento, con este estudio se confirma lo establecido por bibliografía (ver Figura 4).

Las graficas de las figuras 18, 19 y 20 reflejan los resultados de eficiencia obtenidos en el desarrollo experimental.

Siguiendo con las pruebas se realizó un estudio comparativo de precipitación entre el hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH), las pruebas realizadas siguieron lo establecido en el procedimiento 3.2.7, los resultados que se obtuvieron se pueden ver en las siguientes tablas:

Prueba 1 con KOH			
pH	CuS [ppm]	FeS [ppm]	ml KOH/ L Agua
9,9	0,13	0,11	2,3
10,5	0,06	0,07	2,4
11	0,09	0,01	2,8
11,5	0,10	0,03	3,5
12,01	0,16	0,09	5,4

Tabla 20: Gasto promedio de KOH a diferentes pH para prueba 1.

Prueba 1 con NaOH			
pH	CuS [ppm]	FeS [ppm]	ml NaOH/ L Agua
10,3	0,17	0,09	2
10,7	0,05	0,07	2,2
11	0,07	0,03	2,5
11,4	0,09	0,04	3
12,03	0,13	0,08	5

Tabla 21: Gasto promedio de NaOH a diferentes pH para prueba 1.

Prueba 2 con KOH			
pH	CuS [ppm]	Fe S [ppm]	ml KOH/ L Agua
10	0,14	0,11	2,2
10,47	0,07	0,09	2,5
11,03	0,08	0,09	2,8
11,48	0,12	0,06	3,4
12,05	0,14	0,1	5,3

Tabla 22: Gasto promedio de KOH a diferentes pH para prueba 2.

Prueba 2 con NaOH			
pH	CuS [ppm]	FeS [ppm]	ml NaOH/ L Agua
9,99	0,15	0,09	2
10,6	0,06	0,08	2,2
11,01	0,06	0,06	2,6
11,55	0,11	0,07	3,1
11,98	0,12	0,09	5

Tabla 23: Gasto promedio de NaOH a diferentes pH prueba 2.

Prueba 3 con KOH			
pH	CuS [ppm]	FeS [ppm]	ml KOH/ L Agua
10,04	0,12	0,1	2,3
10,55	0,06	0,09	2,6
11,01	0,07	0,06	2,8
11,51	0,13	0,07	3,5
11,98	0,16	0,12	5,4

Tabla 24: Gasto promedio de KOH a diferentes pH para prueba 3.

Prueba 3 con NaOH			
pH	CuS [ppm]	FeS [ppm]	ml NaOH/ L Agua
10,01	0,12	0,09	2
10,5	0,05	0,08	2,2
11,06	0,08	0,07	2,5
11,57	0,11	0,1	3,1
12,01	0,13	0,11	5

Tabla 25: Gasto promedio de NaOH a diferentes pH para prueba 3.

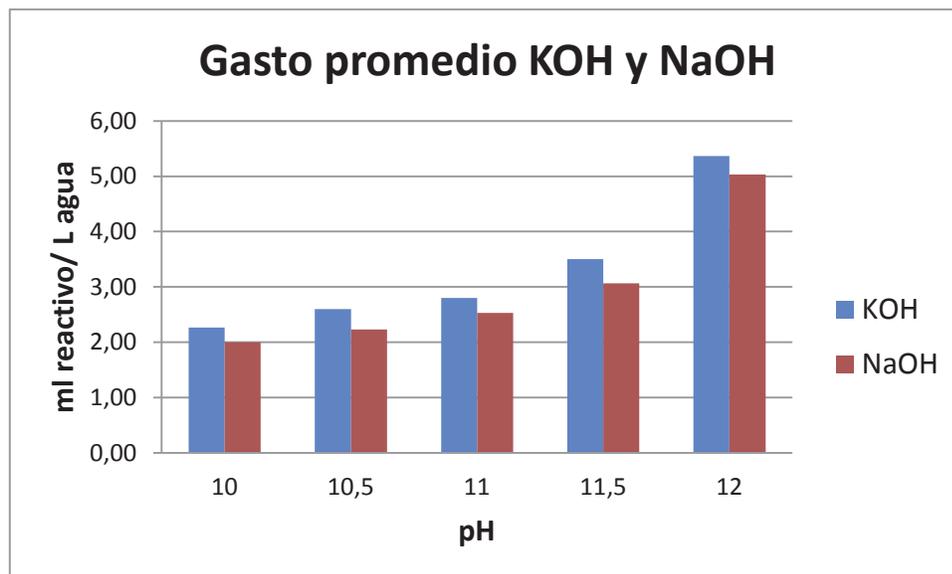


Figura 21: Comparación de gasto promedio de reactivo precipitante por 1L de agua de lavado de filtros para KOH y NaOH.

Las cantidades de metal (Fe y Cu) en solución (ppm) a partir de ambos agentes precipitadores (KOH y NaOH) se observan en las siguientes graficas, mediante las pruebas realizadas se puede establecer un parámetro más efectivo para seguir con el estudio técnico.

Las graficas expresan las ppm del metal presente en solución después de haber agregado el agente precipitador a diferentes niveles de pH.

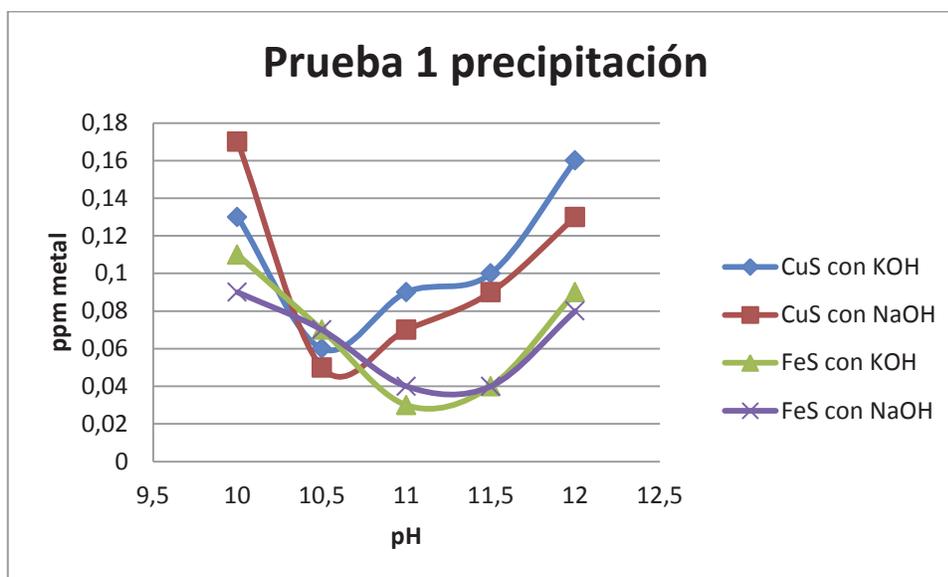


Figura 22: Prueba de precipitación N° 1 con KOH y NaOH a diferentes pH.

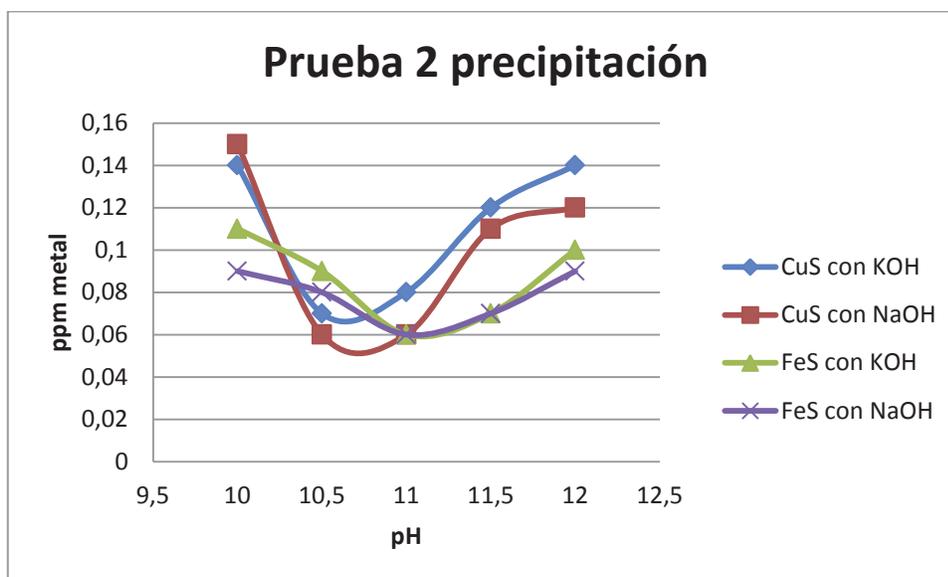


Figura 23: Prueba de precipitación N° 2 con KOH y NaOH a diferentes pH.

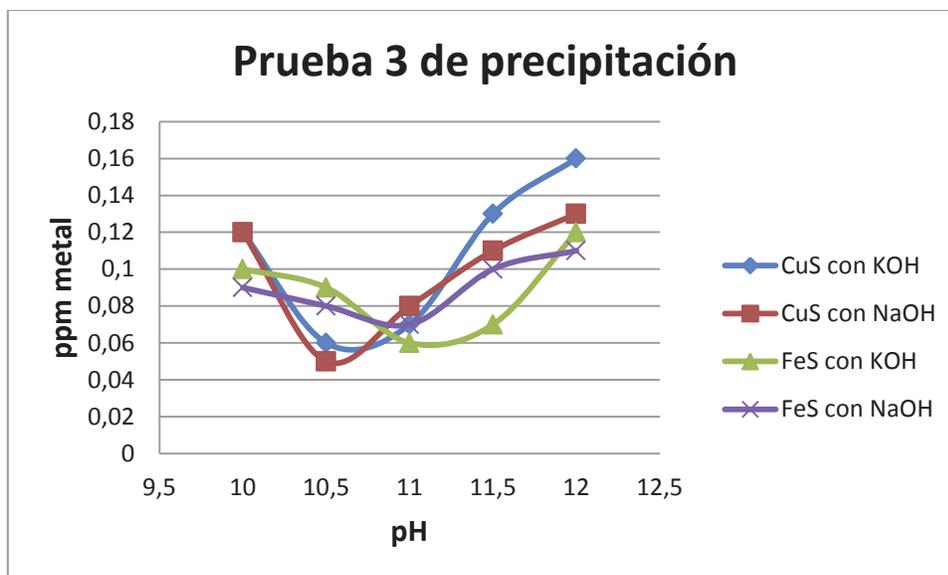


Figura 24: Prueba de precipitación 3 con KOH y NaOH a diferentes pH.

Con los resultados obtenidos después de esta experimentación podemos establecer un rango de pH mas pequeño para realizar pruebas, este rango es de [10 a 11], teniendo en cuenta que en este rango es donde se logra una mejor eficiencia y una buena precipitación de ambos metales.

Los siguientes resultados se obtuvieron a partir de pruebas realizadas en un rango de pH de 10 a 11, con hidróxido de potasio (KOH). Se realizaron 5 pruebas para los diferentes pH.

pH inicial	pH final	Muestras				
2,11	10,02	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,16	0,18	0,18	0,16	0,17
Fe soluble		0,11	0,13	0,1	0,1	0,12

Tabla 26: Prueba 1 de precipitación a pH 10 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
2,11	10,55	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,06	0,07	0,05	0,06	0,05
Fe soluble		0,1	0,07	0,05	0,04	0,1

Tabla 27: Prueba 1 de precipitación a pH 10.5 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
2,11	10,97	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,1	0,11	0,11	0,09	0,11
Fe soluble		0,09	0,09	0,08	0,13	0,09

Tabla 28: Prueba 1 de precipitación a pH 11 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
2,09	10,07	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,13	0,15	0,12	0,13	0,14
Fe soluble		0,1	0,08	0,09	0,11	0,11

Tabla 29: Prueba 2 de precipitación a pH 10 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
2,09	10,52	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,07	0,05	0,04	0,03	0,06
Fe soluble		0,01	0,04	0,03	0,07	0,06

Tabla 30: Prueba 2 de precipitación a pH 10,5 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
2,09	11,03	1	2	3	4	5
0,12	0,14	0,13	0,13	0,11	0,13	0,14
0,11	0,09	0,12	0,06	0,09	0,11	0,11

Tabla 31: Prueba 2 de precipitación a pH 11 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
1,99	10,05	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,11	0,1	0,11	0,09	0,13
Fe soluble		0,09	0,1	0,06	0,07	0,09

Tabla 32 Prueba 3 de precipitación a pH 10 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
1,99	10,55	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,05	0,06	0,05	0,05	0,07
Fe soluble		0,04	0,07	0,04	0,05	0,04

Tabla 33 Prueba 3 de precipitación a pH 10,5 con KOH.

pH inicial	pH final	Muestras				
1,99	11,07	1	2	3	4	5
Cu soluble		0,15	0,17	0,18	0,15	0,15
Fe soluble		0,12	0,1	0,12	0,07	0,09

Tabla 34 Prueba 3 de precipitación a pH 11 con KOH.

Las Figuras 22, 23 y 24 reflejan los resultados realizados en las pruebas de precipitación, las pruebas arrojaron resultados en donde se puede observar que en un rango de pH de 10 a 11, se obtiene una mayor precipitación de metales de Cu y Fe, por lo tanto nos entrega una información importante para seguir analizando el KOH para futuras pruebas.

Los resultados entregados en las tablas anteriores (tabla 26 a tabla 34), se realizaron de manera idéntica que las primeras pruebas, esta vez acotando el rango de pH de 5 pruebas a solo 3 pruebas, de esta manera al trabajar en un rango más pequeño y de mayor eficiencia podemos obtener resultados más cercanos para las 3 muestras a analizar, logrando obtener a un pH cercano a 10,5 los mejores resultados de precipitación para el Cu (<0,05) cumpliendo con lo que exige la norma Chilena de riego.

En las gráficas siguientes se observa la eficiencia en cada prueba para el Cu y el Fe, a diferentes niveles de pH.

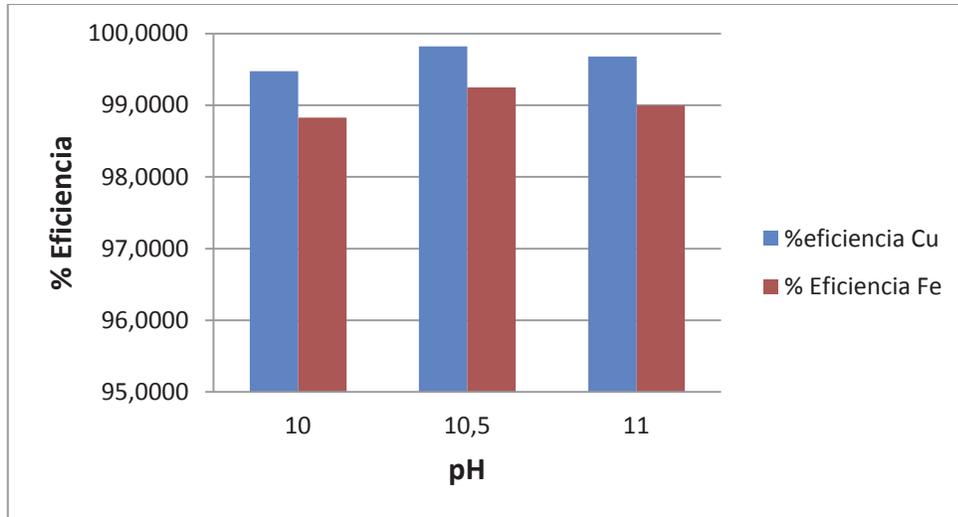


Figura 25: Prueba n° 1: % eficiencia para Cu y Fe a diferentes niveles de pH con KOH.

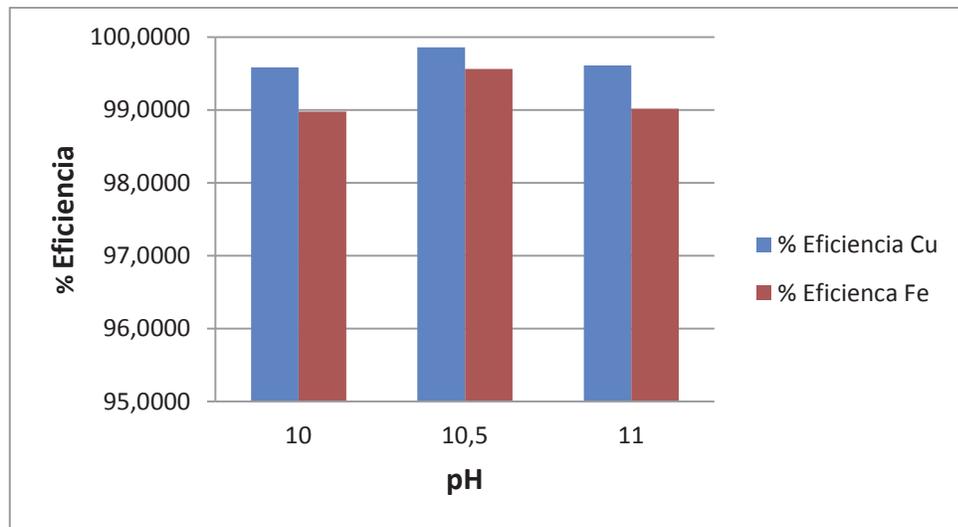


Figura 26: Prueba n° 2: % eficiencia para Cu y Fe a diferentes niveles de pH con KOH.

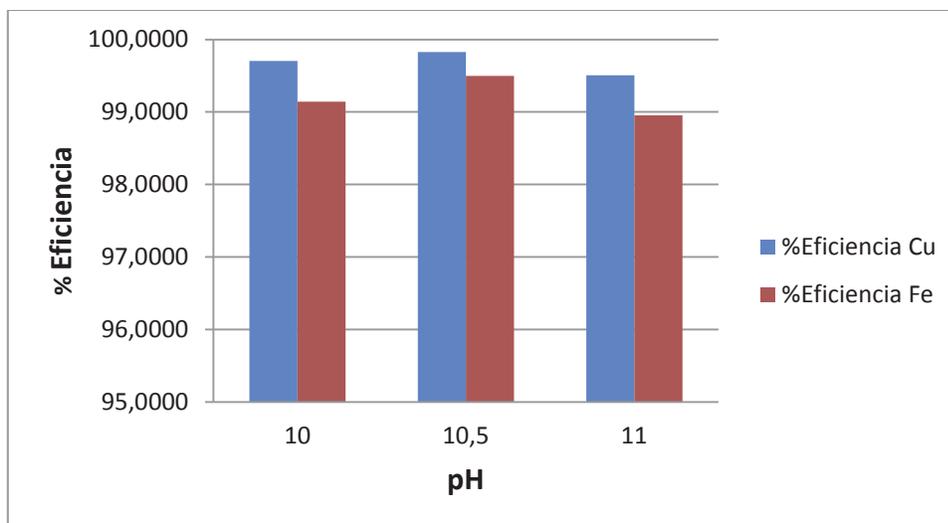


Figura 27: Prueba n° 3: % eficiencia para Cu y Fe a diferentes niveles de pH con KOH.

Como se puede observar en las graficas de las Figuras 25, 26 y 27 la eficiencia para la precipitación del Cu y Fe con KOH es alta y efectiva, al igual que en el proceso actual (con NaOH) llegando a valores del 99% de eficiencia.

Al obtener un pH óptimo de trabajo con las pruebas anteriores se procede a realizar pruebas para establecer un gasto de reactivo, en las cuales se estudia el consumo con ambos reactivos NaOH (uso actual) y KOH (propuesta), las siguientes Tablas 35, 36 y 37 entregan resultados comparativos para gastos de reactivo KOH y NaOH, a ciertos pH.

Prueba	KOH			NaOH		
	pH inicial	pH final	gasto [ml]	pH inicial	pH final	gasto [ml]
1	2,05	10,78	2,5	2,06	10,56	2,2
2	2,06	10,56	2,4	2,06	10,7	2,3
3	2,05	10,54	2,4	2,07	10,49	2,2
4	2,08	10,47	2,4	2,07	10,52	2,2
5	2,05	10,52	2,5	2,06	10,53	2,2

Tabla 35: Gasto en ml de KOH y NaOH para 1 Litro de agua de lavado de filtros.

Prueba	KOH			NaOH		
	pH inicial	pH final	gasto [ml]	pH inicial	pH final	gasto [ml]
1	2,09	10,54	4,7	2,09	10,57	4,2
2	2,08	10,52	4,7	2,08	10,46	4,1
3	2,09	10,48	4,7	2,09	10,55	4,2
4	2,09	10,6	4,8	2,09	10,61	4,2
5	2,08	10,53	4,7	2,08	10,54	4,2

Tabla 36: Gasto en ml de KOH y NaOH para 2 Litros de agua de lavado de filtros.

Prueba	KOH			NaOH		
	pH inicial	pH final	gasto [ml]	pH inicial	pH final	gasto [ml]
1	2,12	10,68	6,7	2,09	10,55	6,2
2	2,13	10,53	6,6	2,08	10,52	6,3
3	2,13	10,45	6,6	2,09	10,47	6,3
4	2,13	10,48	6,6	2,09	10,61	6,3
5	2,12	10,57	6,6	2,08	10,46	6,3

Tabla 37: Gasto en ml de KOH y NaOH para 3 Litros de agua de lavado de filtros.

En la Figura 28, podemos observar la tendencia que se genera al representar los datos obtenidos, en las tablas se puede observar que el consumo de KOH está por sobre el de NaOH, esto como se dijo anteriormente se debe a que el KOH posee menor cantidad de OH, que es el agente principal para elevar el pH de una solución.

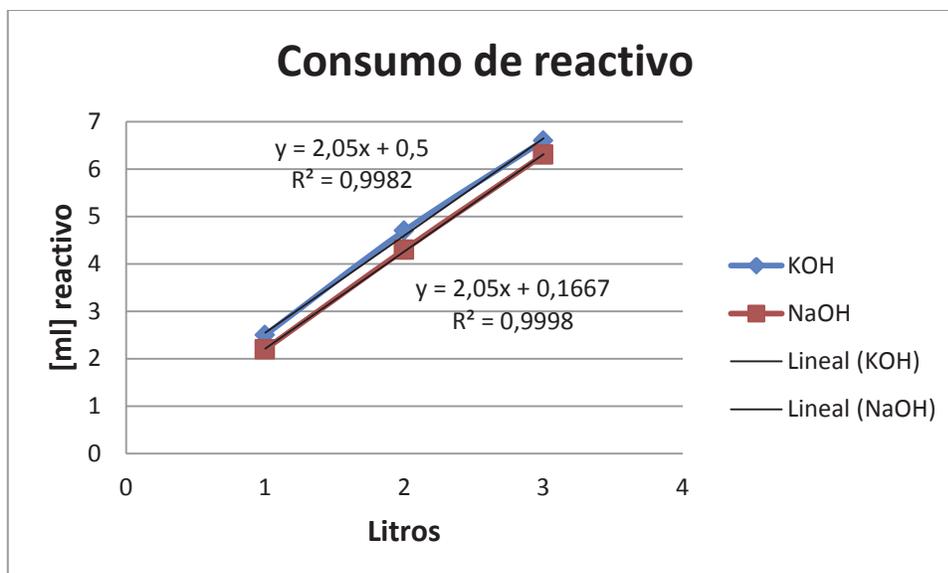


Figura 28: Tendencia del consumo de reactivos KOH y NaOH para diferentes volúmenes.

En el proceso se distinguen 2 etapas importantes, una es la etapa de precipitación que es donde se agrega la mayor parte del reactivo precipitante y la otra es la etapa de flotación, donde se elimina en mayor parte de Mo, para de esta manera cumplir con las normativas vigentes, sin embargo en esta etapa también se adiciona reactivo, esta vez es para elevar o disminuir el pH.

La adición de soda en la etapa de flotación es sin duda menor que en el proceso de precipitación de metales que ocurre antes, menores cantidades son agregadas con el fin de regularizar el pH del efluente que será destinado a regadío en los bosques de eucaliptus.

En las siguientes tablas (38, 39 y 40) se muestran los datos suministrados por la empresa de los niveles de distintos metales en el efluente destinado a regadío en el proceso de flotación por aire disuelto.

Dia	Alimentación PFAD				Efluente PFAD			
	pH	Cobre	Hierro	Molibdeno	pH	Cobre	Hierro	Molibdeno
1	8,04	0,39	1,2	0,70	8,48	0,17	1	0,006
2	8,13	0,14	2,1	0,64	7,99	0,12	2,8	0,008
3	9,06	0,44	1,1	0,56	7,92	0,09	1,8	0,006
4	9,84	0,31	0,8	0,58	7,95	0,13	2,5	0,006
5	9,38	0,19	1,0	0,59	7,64	0,07	1,2	0,005
6	9,38	0,19	0,4	0,55	8,35	0,08	2,1	0,006
7	8,57	0,05	0,5	0,71	8,46	0,06	1,9	0,007
8	7,46	0,00	0,2	0,67	8,28	0,00	2,0	0,007
9	9,05	0,00	0,8	0,67	8,27	0,00	1,6	0,005
10	8,90	0,00	0,6	0,69	8,60	0,00	3,0	0,003
11	9,58	0,00	0,3	0,63	8,38	0,00	1,9	0,002
12	9,94	0,00	0,5	0,64	8,11	0,06	1,7	0,002
13	9,54	0,18	0,3	0,68	8,30	0,25	2,7	0,003
14	10,13	0,00	0,2	0,65	8,20	0,00	1,1	0,003
15	10,65	0,38	0,7	0,41	7,72	0,09	1,6	0,003
16	8,97	0,28	0,9	0,27	7,77	0,10	1,2	0,002
17	8,28	0,24	0,2	0,54	7,85	0,12	1,0	0,005
18	8,31	0,13	0,3	0,55	7,98	0,09	1,2	0,003
19	8,39	0,19	0,4	0,59	7,98	0,07	1,1	0,004
20	8,79	0,29	0,9	0,59	8,11	0,05	1,7	0,005
21	8,79	0,26	0,7	0,64	8,29	0,12	2,1	0,003
22	9,37	0,29	0,3	0,74	8,50	0,19	1,7	0,004
23	9,28	0,00	0,2	0,70	8,21	0,00	2,1	0,002
24	9,58	0,00	0,1	0,59	8,22	0,00	1,8	0,002
25	9,21	0,00	0,2	0,55	8,31	0,00	2,1	0,002
26	9,40	0,06	0,2	0,58	7,95	0,06	1,2	0,003
27	8,74	0,09	0,3	0,58	7,89	0,07	1,3	0,002
28	9,14	0,08	0,3	0,66	8,26	0,06	1,6	0,002
29	9,42	0,05	0,2	0,56	8,65	0,05	3,4	0,005
30	9,11	0,05	0,3	0,55	7,96	0,05	4,1	0,006
31	9,89	0,05	0,6	0,45	8,00	0,05	2,3	0,003

Tabla 38: concentraciones de metales (mg/L) en la alimentación y efluente planta FAD mes de agosto 2013.

En la tabla anterior se puede observar que los niveles de Cu se reducen en el proceso de flotación por aire disuelto (a 0,05), esto se debe a la adición de NaOH en el proceso como principal agente controlador de pH, los niveles de Fe a diferencia que los de Cu se ven aumentados debido a la adición de cloruro férrico (FeCl₃), sin embargo lo más importante de este proceso se puede observar en los niveles de molibdeno, es aquí en donde se reducen considerablemente por el proceso de flotación, para posteriormente ser almacenados en tanques y enviados a deposición de relaves.

4.5 Análisis de sodio porcentual

Las pruebas de análisis de sodio porcentual se realizaron por medio de externos, este se debió a que los implementos necesarios para realizar las pruebas no se encontraban en las dependencias de experimentación.

El estudio estuvo a cargo del laboratorio ambiental SGS Chile Ltda., entidad que trabaja hace años con minera Los Pelambres, entregando una confiabilidad y respaldo altamente profesional.

Las pruebas se realizaron como se estableció en los puntos 3.2.6 y 3.2.7, con la diferencia que esta vez se almacenaron y se enviaron a SGS Chile Ltda.

Los niveles de Na, Ca, K y Mg en el efluente proveniente de la planta FAD durante el 2012-2013 se pueden observar en la siguiente tabla.

		Jul-12	sep-12	nov-12	ene-13	mar-13	may-13
Ca	mg/L	198	310	450	477	240	343
Mg	mg/L	0,16	5,04	4,09	5,30	4,10	2,72
K	mg/L	42,5	33,0	28,2	66,5	37,4	57,3
Na	mg/L	520	472	588	816	294	577

Tabla 39: Niveles de Ca, Mg, K y Na en efluente planta FAD. (SGS)

Según los datos facilitados por la empresa se puede observar que los niveles de sodio porcentual durante el periodo julio del 2012 a mayo 2013 son los siguientes:

	jul-12	sep-12	nov-12	ene-13	mar-13	may-13
sodio porcentual	66,0	51,0	52,0	58,0	55,0	55,0

Tabla 40: Sodio porcentual periodo 2012 a 2013 efluente planta FAD.

Las pruebas realizadas para esta experimentación arrojaron los siguientes resultados

		pH inicial	pH final	Sodio %
KOH	A1	2,02	10,45	34
	A2	2,03	10,51	33
	A3	2,03	10,52	31

Tabla 41: Sodio porcentual prueba con KOH.

		pH inicial	pH final	Sodio %
NaOH	B1	2,05	11,05	76
	B2	2,06	11,10	77
	B3	2,06	11,02	78

Tabla 42: Sodio porcentual prueba con NaOH.

Un claro ejemplo de reducción de sodio porcentual con KOH es el que podemos ver a continuación. Los datos fueron tomados de pruebas realizadas anteriormente por SGS y cambiando los niveles de Na por K, reemplazando teóricamente la alternativa de NaOH por KOH.

Tomando en cuenta los niveles de sodio que se registran al principio del proceso en las aguas de recepción de la pulpa (ARP) hasta el efluente final (EF) tenemos:

	Na en ARP [mg/L]	Na en APFAD [mg/L]	Na en EF [mg/L]	%Na
jul-12	245	480	520	67
sep-12	341	417	472	55
nov-12	364	535	588	52
ene-13	426	759	816	57
mar-13	289	376	294	49
may-13	388	524	577	57

Tabla 43: Niveles de sodio en el proceso de precipitación y ajuste de pH.

Podemos observar en la tabla que los niveles de sodio aumentan a medida que el agua avanza por el proceso (debido la adición de NaOH), si estos niveles se mantienen constantes y se reemplazan el uso de NaOH por KOH, tendríamos niveles de sodio % más bajas que los actuales.

La tabla 44 nos muestra cómo serían los niveles de los metales involucrados en el sodio % al final del proceso (EF).

		jul-12	sep-12	nov-12	ene-13	mar-13	may-13
Ca	mg/L	198	310	450	477	240	343
Mg	mg/L	0,16	5,04	4,09	5,30	4,10	2,72
K	mg/L	520,0	472,0	588,0	816,0	294,0	577,0
Na	mg/L	245	341	364	426	289	388
Na %		31	35	30	29	39	34

Tabla 44: Niveles de sodio porcentual con KOH

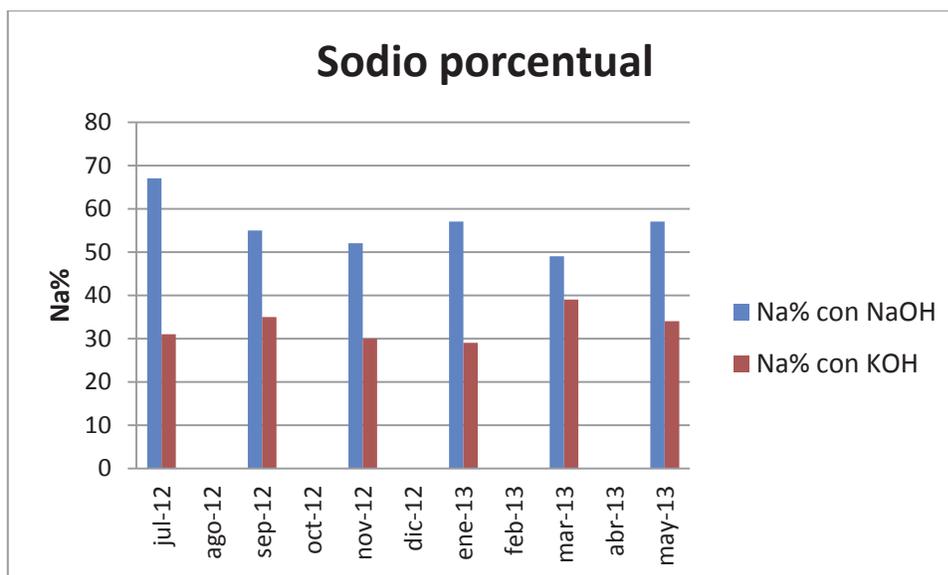


Figura 29: Grafica de sodio % con NaOH y KOH en el proceso de tratamiento de aguas.

Analizando los resultados se puede observar que para ambos casos el sodio % está por sobre la norma (35% según norma chilena), esto se debe a que las pruebas se realizaron con agua de efluente, la cual posee un alto nivel de sodio, esto influye directamente en los niveles finales de sodio en las aguas para riego, pero lo principal es la reducción del sodio que se hace al utilizar KOH.

En el capítulo experimental se pudo obtener importantes resultados, que determinan el comportamiento del reactivo propuesto (KOH) como también el comportamiento del reactivo actual (NaOH), se pudo establecer márgenes significativos como eficiencia de precipitación, donde se obtuvo un muy buen resultado en comparación con la del proceso actual, tanto la propuesta con KOH como la del actual proceso con NaOH poseen eficiencias que superan el 98% de remoción de metales como Cu y Fe de las aguas, con respecto al pH óptimo de trabajo, las pruebas arrojaron resultados satisfactorios en comparación con el estudio bibliográfico, un valor de 10,5 es el pH que se obtuvo como óptimo para la propuesta con KOH, similar al utilizado en el actual proceso que se mueve entre 10 y 11.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica para el actual proceso y la nueva propuesta, en un principio se ve asociado principalmente al gasto en consumo de reactivos (Tabla 46), ya que no requiere de la compra de nuevos equipos ni construcción de nuevas áreas, sin embargo la propuesta de nuevas alternativas que se ajusten a los actuales gastos de proceso, influirá en la toma de decisiones para la creación de un nuevo equipo para contrarrestar de alguna manera el aumento de estos. Se cotizo los precios de los reactivos con la empresa Química del Sur (Tabla 45), actual proveedor de la minera (sector Puerto Punta Chungo), que cumple con los aspectos de legislación y normativas vigentes para el transporte de sustancias y residuos peligrosos. Los precios de los reactivos que se solicitó fueron los siguientes:

Reactivo	Formula	Precio US\$/TON
Hidróxido de Sodio	NaOH (s)	700 + IVA
Hidróxido de Sodio 50%	NaOH (l)	390 + IVA
Hidróxido de Potasio	KOH (s)	1.680 + IVA
Hidróxido de Potasio 50%	KOH (l)	1.300 + IVA

Tabla 45: Valores de reactivos Química del Sur.

Los siguientes datos fueron entregados por la empresa para el consumo, de NaOH.

	Planta Filtros		Planta FAD		Totales Puerto	
	[Litros]	[Kilos]	[Litros]	[Kilos]	[Litros]	[Kilos]
jul-12	4.958	7.586	7.528	11.518	12.486	19.104
ago-12	11.121	17015	6.744	10.318	17.865	27.333
sep-12	6.517	9.971	6.310	9.654	12.827	19.625
oct-12	6.230	9.532	5.976	9.143	12.206	18.675
nov-12	6.686	10.230	7.971	12.196	14.657	22.425
dic-12	7.716	11.805	9.595	14.680	17.311	26.486
ene-13	7.025	10.748	7.803	11.939	14.828	22.687
feb-13	2.721	4.163	8.704	13.317	11.425	17.480
mar-13	7.161	10.956	8.266	12.647	15.427	23.603
abr-13	5.540	8.476	7.283	11.143	12.823	19.619
may-13	6.683	10.225	4.478	6.851	11.161	17.076
jun-13	5.902	9.030	4.796	7.338	10.698	16.368

Tabla 46: Consumo de reactivo NaOH Puerto Punta Chungo 2012 a 2013.

Los gastos en US\$ de NaOH durante el periodo de Julio del 2012 a Junio del 2013 se pueden observar en la siguiente tabla, los valores corresponden al valor del US\$ a la fecha del 4 de marzo del 2014.

	Totales Puerto		Total	
	[Litros]	[Kilos]	US\$	\$
jul-12	12.486	19.104	8.866	4.978.420
ago-12	17.865	27.333	12.685	7.123.136
sep-12	12.827	19.625	9.108	5.114.384
oct-12	12.206	18.675	8.667	4.866.778
nov-12	14.657	22.425	10.407	5.844.042
dic-12	17.311	26.486	12.292	6.902.245
ene-13	14.828	22.687	10.529	5.912.223
feb-13	11.425	17.480	8.113	4.555.378
mar-13	15.427	23.603	10.954	6.151.056
abr-13	12.823	19.619	9.105	5.112.789
may-13	11.161	17.076	7.925	4.450.116
jun-13	10.698	16.368	7.596	4.265.508

Tabla 47: Gastos en NaOH periodo 2012 a 2013.

Con los datos de la tabla 46 y los datos obtenidos en el estudio experimental podemos establecer 2 escenarios de análisis económico para el consumo de reactivo.

5.1 Utilización de KOH 50% comercial

La alternativa al uso del NaOH, es la utilización del KOH 50% comercial, para este caso se tomaron los mismos consumos durante el periodo 2012 a 2013, y se calculó el gasto en US\$ que se tendría si se utilizara esta alternativa.

	Planta Filtros		Planta FAD		Totales Puerto	
	[Litros]	[Kilos]	[Litros]	[Kilos]	[Litros]	[Kilos]
jul-12	5.409	8.275	8.212	12.565	13.621	20.840
ago-12	12.132	18.562	7.357	11.256	19.489	29.818
sep-12	7.109	10.877	6.884	10.532	13.993	21.409
oct-12	6.796	10.398	6.519	9.974	13.316	20.373
nov-12	7.294	11.160	8.696	13.304	15.989	24.464
dic-12	8.417	12.879	10.467	16.015	18.885	28.894
ene-13	7.664	11.725	8.512	13.024	16.176	24.749
feb-13	2.968	4.542	9.495	14.528	12.464	19.069
mar-13	7.812	11.952	9.017	13.797	16.829	25.749
abr-13	6.044	9.247	7.945	12.156	13.989	21.403
may-13	7.291	11.155	4.885	7.474	12.176	18.629
jun-13	6.439	9.851	5.232	8.005	11.671	17.856

Tabla 48: Consumo de reactivo KOH Puerto Punta Chungo 2012 a 2013.

Los gastos para esta alternativa se pueden apreciar en la siguiente tabla.

	Totales Puerto		Total	
	[Litros]	[Kilos]	US\$	\$
jul-12	13.621	20.840	32.240	18.103.347
ago-12	19.489	29.818	46.129	25.902.313
sep-12	13.993	21.409	33.120	18.597.760
oct-12	13.316	20.373	31.517	17.697.377
nov-12	15.989	24.464	37.846	21.251.061
dic-12	18.885	28.894	44.698	25.099.074
ene-13	16.176	24.749	38.287	21.498.993
feb-13	12.464	19.069	29.500	16.565.012
mar-13	16.829	25.749	39.834	22.367.478
abr-13	13.989	21.403	33.110	18.591.960
may-13	12.176	18.629	28.819	16.182.240
jun-13	11.671	17.856	27.623	15.510.940

Tabla 49: Gastos de reactivo KOH comercial para periodo 2012 a 2013.

5.2 Utilización de KOH sólido

La otra alternativa que se plantea es comprar el KOH sólido y prepararlo con agua de procesos en la planta, para ello se muestra el escenario de consumos y gastos que existiría si se empleara esta alternativa. Se toman los mismos consumos de NaOH durante el periodo 2012 a 2013.

	Planta Filtros		Planta FAD		Totales Puerto	
	[Litros]	[Kilos] KOH	[Litros]	[Kilos] KOH	[Litros]	[Kilos]
jul-12	5.409	2.924	8.212	4.439	13.621	7.363
ago-12	12.132	6.558	7.357	3.977	18.690	10.535
sep-12	7.109	3.843	6.884	3.721	10.952	7.564
oct-12	6.796	3.674	6.519	3.524	10.470	7.198
nov-12	7.294	3.943	8.696	4.700	11.236	8.643
dic-12	8.417	4.550	10.467	5.658	12.967	10.208
ene-13	7.664	4.143	8.512	4.601	11.806	8.744
feb-13	2.968	1.605	9.495	5.133	4.573	6.737
mar-13	7.812	4.223	9.017	4.874	12.035	9.097
abr-13	6.044	3.267	7.945	4.295	9.310	7.561
may-13	7.291	3.941	4.885	2.641	11.231	6.581
jun-13	6.439	3.480	5.232	2.828	9.919	6.308

Tabla 50: Consumo de reactivo KOH (sólido) periodo 2012 a 2013..

	Totales Puerto		Total	
	[Litros]	[Kilos]KOH	US\$	\$
jul-12	13621	7363	14720	8.265.357
ago-12	18690	10535	21061	11.826.094
sep-12	10952	7564	15122	8.491.089
oct-12	10470	7198	14390	8.080.006
nov-12	11236	8643	17279	9.702.494
dic-12	12967	10208	20408	11.459.363
ene-13	11806	8744	17481	9.815.691
feb-13	4573	6737	13469	7.563.007
mar-13	12035	9097	18187	10.212.211
abr-13	9310	7561	15117	8.488.441
may-13	11231	6581	13158	7.388.247
jun-13	9919	6308	12612	7.081.755

Tabla 51: Gastos de reactivo KOH (sólido) periodo 2012 a 2013.

Haciendo una comparación en cuanto a costos de reactivos de las 2 alternativas tenemos:

	NaOH 50% comercial		KOH 50% comercial		KOH 50% con Agua proc.	
	US\$	\$	US\$	\$	US\$	\$
jul-12	8.866	4.978.420	32.240	18.103.347	14.720	8.265.357
ago-12	12.685	7.123.136	46.129	25.902.313	21.061	11.826.094
sep-12	9.108	5.114.384	33.120	18.597.760	15.122	8.491.089
oct-12	8.667	4.866.779	31.517	17.697.377	14.390	8.080.006
nov-12	10.408	5.844.042	37.846	21.251.061	17.279	9.702.494
dic-12	12.292	6.902.245	44.698	25.099.074	20.408	11.459.363
ene-13	10.529	5.912.223	38.287	21.498.993	17.481	9.815.691
feb-13	8.113	4.555.378	29.500	16.565.012	13.469	7.563.007
mar-13	10.954	6.151.056	39.834	22.367.478	18.187	10.212.211
abr-13	9.105	5.112.789	33.110	18.591.960	15.117	8.488.441
may-13	7.925	4.450.116	28.819	16.182.240	13.158	7.388.247
jun-13	7.596	4.265.509	27.623	15.510.940	12.612	7.081.755

Tabla 52: gastos de actual reactivo (NaOH) y propuestas con KOH.

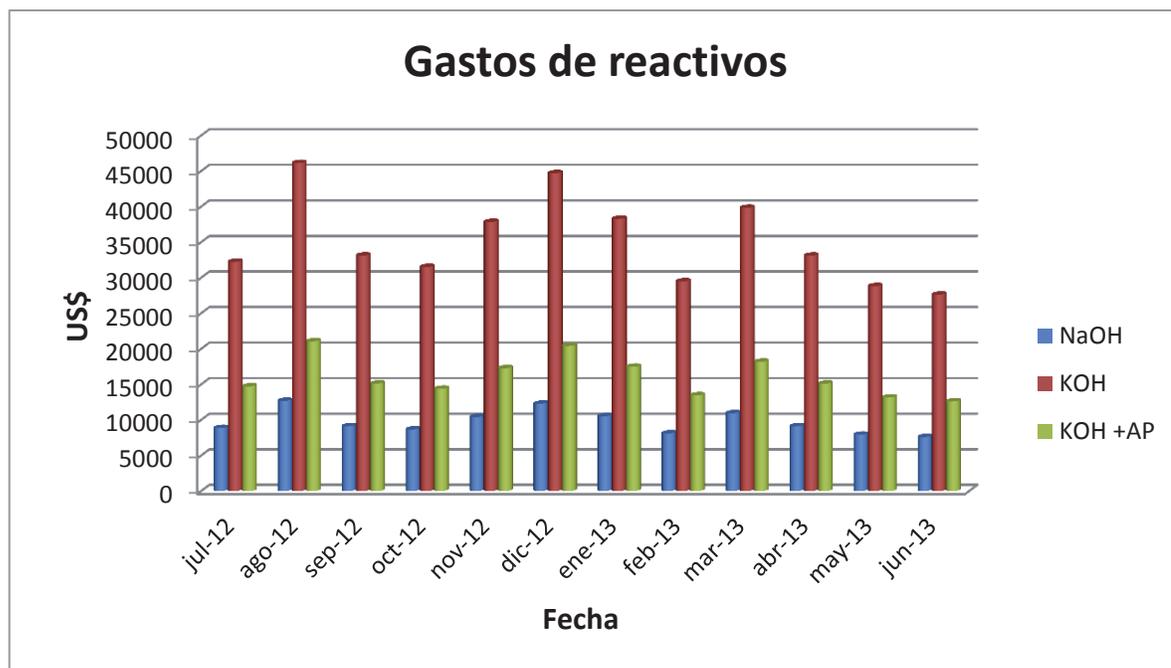


Figura 30: Comparación de gastos para las alternativas vs proceso actual.

Analizando los valores obtenidos en este análisis económico podemos observar que el actual proceso con NaOH no posee rival con respecto a las alternativas presentadas, debido a que ambas alternativas aumentarían los costos, sin embargo la posibilidad de reducción del Sodio% por medio de las dos alternativas es muy efectiva, ahora bien, se debe elegir entre las dos alternativas, una es comprarlo de manera líquida (KOH 50%) y la otra es comprarlo sólido y prepararlo en la planta, esta alternativa es la que mejor se acomoda a parámetros de capital.

Ambos reactivos aumentan los costos, en el caso del KOH 50% comercial los costos de tratamiento de aguas aumentan casi 3 veces más de lo que actualmente se consume, en cambio con el KOH sólido los costos aumentan alrededor de un 66% de lo que actualmente se gasta.

Para la preparación del reactivo en la planta se requerirán algunos equipos que no están disponibles, por lo tanto para esto se realizó el diseño de estos equipos (ver anexo A), y se consultó por sus respectivos precios para realizar un análisis más detallado de la inversión necesaria para la alternativa de preparación del reactivo.

5.3 Capital de inversión

El capital de inversión está conformado principalmente por todas las inversiones necesarias para dejar en condiciones operativas una planta industrial, se compone principalmente por dos ítems, *el capital fijo y el capital de trabajo*.

Para este trabajo de tesis se planteo la alternativa de preparar en la planta el reactivo KOH al 50%, debido a esto se debió elaborar un diseño para un tanque (ver anexo A) en el cual se llevara a cabo el proceso, los gastos asociados al capital de inversión se estimaran principalmente a partir del costo de este equipo.

Para realizar este cálculo se utilizo el método de porcentajes del costo de los equipos principales (apuntes Luis vega, Ingeniería Económica), necesarios para la elaboración de KOH al 50%, el cual arrojo la siguiente tabla de datos.

CAPITAL FIJO DIRECTO	%	US\$
Costo de equipos principales	100	14674,98
Instalación de equipos	47	6897,24
Instrumentación y control (instalado)	36	5282,99
Cañerías (instaladas)	68	9978,98
Sistema eléctrico	11	1614,24
Construcciones	10	1467,50
Preparación de terrenos (0%)	10	0
Servicios (0%)	70	0
TOTAL CAPITAL FIJO DIRECTO		39915,93

Tabla 53: Capital fijo directo

CAPITAL FIJO INDIRECTO	%	
Ingeniería y supervisión	33	4842,74
Gastos de construcción	41	6016,74
Gastos legales	4	586,99
Honorario contratista	22	3228,49
Contingencias	44	6456,99
TOTAL CAPITAL FIJO INDIRECTO		21131,95

Tabla 54: Capital Fijo Indirecto.

CAPITAL FIJO DIRECTO	31908,26
CAPITAL FIJO INDIRECTO	21131,95
TOTAL	53040,21

Tabla 55: Capital de Trabajo

CAPITAL DE TRABAJO		
15% Capital total de inversión		9360,03
CAPITAL TOTAL DE INVERSION		62400,24

Tabla 56: Capital Total de Inversión

La alternativa de comprar el KOH sólido y producirlo en la planta, tiene un costo de inversión total de US\$ 62400,24 para comprar los principales equipos y dejar funcionando estos.

6. CONCLUSIONES

El trabajo realizado en esta tesis, enfocado al cambio de reactivo para la reducción del sodio porcentual en las aguas de riego de Minera Los Pelambres, arroja resultados satisfactorios desde el punto de vista técnico.

El estudio comparativo entre el proceso actual (NaOH) con la propuesta (KOH), es similar, los resultados obtenidos para ambos procesos arrojan resultados de eficiencia de remoción de metales (Cu, Fe) sobre el 98%, actuando en un pH óptimo de 10,5. El estudio que se realizó tiene como resultado establecer un parámetro de trabajo para la nueva propuesta y compararlos con la actual, por lo tanto se puede establecer que el KOH es tan eficiente como el NaOH en la remoción de metales.

Ahora bien, las ventajas que ofrece el KOH sobre el NaOH, es la reducción de los niveles del sodio porcentual, niveles que se encuentran sobre un 50%, el cual por el compromiso de Minera Los Pelambres no debiese superar el 35%, el KOH actúa como reductor de estos niveles respetando los estándares establecidos por la Norma Chilena de Riego, disminuyendo hasta valores por debajo de la Norma.

Sin embargo, en el ámbito económico es donde se ve complicada la propuesta, debido a los altos valores en el precio del KOH. Ambas alternativas, la compra del reactivo listo (KOH 50% comercial) tanto como comprarlo sólido, aumentan significativamente los costos del proceso. Pero aunque ambas alternativas aumenten los costos del proceso, su beneficio es la reducción del sodio porcentual, tomando en cuenta que la alternativa de prepararlo en la planta es la que, en teoría aumentaría los costos en menor cantidad, pues entonces es la propuesta que más se acerca a una alternativa al NaOH.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Archivos Minera Los Pelambres, disponible en: <http://www.mlp.cl/la-compania-quien-es-mlp.html>.
- [2] Declaración de impacto ambiental (DIA), “Planta Tratamiento FAD, Minera Los pelambres”, año 2000.
- [3] W. Wesley Eckenfelder Jr. “Industrial water pollution control”, 3^a Edition, Cap IV Coagulation, Precipitation and Metals Removal.
- [4] L. Cardorin, Erico Tobosa, Meise Paiva y Jorge Rubio “Tratamiento de riles mineros ácidos por precipitación química y flotación por aire disuelto”, Depto. Ingeniería en Minas, Universidad Federal de Rio grande.
- [5] Hoffland Enviromental Inc, “Hidroxyde Precipitation”, disponible en: <http://hoffland.net/treatment-processes-chemistry-2/hydroxide-precipitation/>
- [6] American Petroleum Institute: “API 650: Welded Steel Tanks for Oil storage”, ELEVENTH EDITION, Junio 2007

ANEXOS

ANEXO A Diseño de un estanque agitador para NaOH^[6]

Diseño del tanque (VER FIG. 33):

Se tiene un volumen máximo de reactivo a partir de los consumos mensuales durante el periodo 2012 a 2013 (periodo de trabajo).

$$V = 12[m^3]$$

Tomamos como dato que la altura del tanque tendrá el doble de medida que el diámetro

$$H = 2D$$

Según la ecuación de volumen de un cilindro tenemos:

$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times H$$

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times H = 2 \times \frac{\pi \times D^3}{4}$$

Lo que nos da:

$$D = 1,969 [m] \sim 2[m]$$

$$H = 3,938[m] \sim 4[m]$$

Datos y condiciones generales de diseño

Norma de Referencia: API STANDARD 650, Welded Steel.

Líquido a Almacenar: soda o potasa

Densidad: 1,47 a 1,52 Kg/L

Gravedad Específica (NaOH): 1,53

Volumen Máximo a Almacenar: 12 m³

Diámetro interior: 2 m

Diámetro exterior: 2.10 [m]

Altura: 4 m

Altura de Líquido: 3,82 m

Presión de diseño: Atmosférica equivalente a 14.7Psia o 101.352 KPa o 1 atm

Temperatura máxima de operación 40°C.

Material a utilizar: Acero Carbono A-36.

Esfuerzo para prueba de diseño (Sd): 1631,1 [Kg/cm²]

Esfuerzo para prueba hidrostática (St): 1750,6 [Kg/cm²]

Esfuerzo de fluencia del material (Sy): 2531 [Kg/cm²]

Determinación del número de anillos del cuerpo

Para realizar este cálculo se necesita conocer las dimensiones de la plancha de acero A-36 las cuales corresponden a:

Largo	6.096 [m]
Ancho	1.829 [m]

$$\frac{H}{\text{ancho}} = \frac{4 [m]}{1,829 [m]} = 2,18 \sim 2 \text{ anillos}$$

Calculo del espesor del cuerpo

El espesor de la pared del cuerpo requerido para resistir la carga hidrostática será mayor que el calculado por condiciones de diseño o que el calculado por condiciones de prueba hidrostática pero en ningún caso será menor que el que se muestra en la siguiente tabla.

Diámetro nominal del tanque		Espesor mínimo	
M	Ft	Mm	In
< 15	< 50	5	3/16
15 < 36	50 < 120	6	¼
36 < 60	120 < 200	8	5/16
> 60	> 200	10	1/8

Tabla 57: Espesor mínimo de cuerpo para diseño de tanques según norma A.P.I.

El espesor de pared por condición de diseño se calculara con base al nivel del líquido, tomando en cuenta la densidad relativa del líquido establecido, en cambio el espesor por condiciones de prueba hidrostática se calculara en base al mismo nivel del líquido pero con densidad relativa del agua.

El espesor mínimo especificado en la tabla anterior es de 4.76 mm (t_{min}), utilizando el método de un pie procedemos al cálculo de espesor para diseño:

Para diseño:

$$t_d = \frac{0.0005D(H - 30.48)G}{S_d} + CA$$

Para prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{0.0005D(H - 30.48)}{S_t} + CA$$

t_d : espesor de diseño del anillo en cm

t_t : espesor por prueba hidrostática en cm

D: diámetro nominal del tanque en cm

H: nivel del líquido de diseño

G: gravedad especifica de diseño del líquido a almacenar (prueba con agua)

CA: corrosión admisible en mm

S_d : Esfuerzo admisible para diseño en kg/cm^2

S_t : Esfuerzo admisible para prueba hidrostática, en Kg/cm^2

Primer anillo:

$$t_d = \frac{0.0005(200)(382 - 30.48)1}{1631,1} + 0.16$$

$$t_d = 0.1815$$

$$t_t = \frac{0.0005(200)(382 - 30.48)}{1750,6} + 0,16$$

$$t_t = 0.1801$$

Segundo anillo:

$$t_d = \frac{0.0005(200)(382 - 182,9 - 30.48)1}{1631,1} + 0.16$$

$$t_d = 0.1703$$

$$t_t = \frac{0.0005(200)(382 - 182,9 - 30.48)}{1750,6} + 0,16$$

$$t_t = 0.1696$$

Debido a que ambos anillos su espesor es menor al mínimo establecido según la tabla X se deberá adoptar el espesor mínimo que se establece para diseños de tanques con diámetro menores a 15 [m] el cual es 5 [mm] sin embargo por cálculos el espesor es de 5 [cm].

Diseño del fondo del tanque

Los espesores especificados en la siguiente tabla son los indicados y están basados en una buena cimentación que proporcione un soporte uniforme debajo de toda la placa anular. La cimentación debe ser bien compactada para evitar esfuerzos adicionales de la placa anular.

Espesor mínimo (mm) del primer anillo del cuerpo	Esfuerzo calculado para Prueba Hidrostática en el Primer anillo del Cuerpo (kg/cm ²)			
	< 1989	< 2109	< 2320	< 2530
t < 19.05	6.35	6.35	7.14	8.73
19.05 < 25.4	6.35	7.14	9.52	11.11
25.4 < 31.75	6.35	8.73	11.91	14.28
31.75 < 38.10	7.93	11.11	14.28	17.46
38.10 < 44.45	8.73	12.7	15.87	19.05

Tabla 58: Espesores para fondo de tanques según prueba hidráulica.

Tomando en cuenta que el esfuerzo de prueba hidrostática corresponde a 1750 Kg/cm² para el material A-36 y que el espesor de diseño para el primer anillo será de 5 [cm], por lo tanto el espesor mínimo de diseño para el fondo del tanque será de 6.35 [cm].

Calculo del espesor del techo del tanque

Al tener un diámetro del tanque menor a 60 [pies] (diámetro igual 2 [m] igual a 6,56 [pies]), el tipo de techo del tanque podrá ser cónico autosoportado, de esta manera descansara en todo el perímetro de las paredes del tanque.

Estos techos son diseñados para tanques que no excedan de un diámetro de 60 pies, pero por factibilidad es recomendable que el diámetro no supere los 40 pies.

Los techos cónicos auto soportados tendrán como máximo una pendiente de 9:12 (37°) y como mínimo 2:12 (9.5°), con respecto a la horizontal.

El espesor está determinado por la siguiente expresión, pero no deberá ser menor de 4.76 [mm] (3/16 pulg.) y no mayor a 12.7 [mm] (1/2 pulg.).

$$T_t = \frac{D}{4800 \text{sen}\theta}$$

Donde:

T_t = Espesor mínimo requerido (cm)

D = Diámetro del tanque (cm)

θ = Angulo con respecto a la horizontal (°)

Este espesor será incrementado en la siguiente relación cuando la suma de las cargas muertas mas las cargas vivas excedan 220 [Kg/m] (45 lb/pie) mas cualquier corrosión permisible.

$$\sqrt{\frac{C_m + C_v}{220}}$$

Donde:

$C_m = \text{carga muerta [Kg/m}^2\text{]}$

$C_v = \text{carga viva [Kg/m}^2\text{]}$

Para este tipo de techos se recomienda un espesor entre 4.76 [mm] y 9.52 [mm], y en base a este espesor se obtiene la pendiente más conveniente, dentro las limitantes mencionadas anteriormente.

Para este caso de diseño se adoptara un espesor de techo con un valor de 5 [mm].

Diseño de escaleras helicoidales

Alguno de los requerimientos necesarios para la construcción de escaleras helicoidales para tener en consideración es la siguiente:

- Todas las partes de la escalera deberán ser metálicas.
- El mínimo ancho de las escaleras será 610 mm.
- El ángulo máximo entre las escaleras y una línea horizontal será de 50°.
- El mínimo ancho de los peldaños será de 203 mm.
- Los peldaños deberán estar hechos de material antideslizante.
- La reja superior deberá estar unida al pasamano de la plataforma sin margen, y la altura deberá ser de 762 mm a 864 mm.
- La estructura completa será capaz de soportar una carga viva concentra de 453 Kg. Y la estructura de los pasamanos deberá soportar una carga de 90 Kg. Aplicada a cualquier dirección y punto del barandal.
- Los pasamanos deberán estar colocados en ambos lados de las escaleras.

Resumen de las dimensiones del diseño del tanque

La siguiente tabla describe el resumen de las dimensiones calculadas para el diseño del tanque para almacenar y preparar soda (o potasa) (Figura 33).

Espesores de planchas en (mm)	
Piso	5
Cuerpo (1° y 2° anillo)	5
Techo	5
Área partes del tanque (m²)	
Piso	3,14
Cuerpo (1° y 2° anillo)	25
Techo	3,29
Volúmenes partes del tanque (m³)	
Piso	0,0157
Cuerpo (1° y 2° anillo)	0,125
Techo	
Pesos partes del tanque (kg)	
Piso	123,25
Cuerpo (1° y 2° anillo)	981,25
Techo	

Tabla 59: Dimensiones para diseño del Tanque de preparación de Soda (o potasa).

Diseño del agitador

Para el diseño de agitador se empleara una turbina con 6 palas, esto es debido a que este tipo de agitador puede operar en un rango amplio de viscosidades de líquidos que se desea agitar y su construcción es bastante sencilla.

En base al diámetro calculado se dimensiona el agitador siguiendo la siguiente tabla de proporciones básicas.

Proporciones básicas			
$D_a/D_t = 0.3 \text{ a } 0.5$	$H/D_t = 1$	$C/D_t = 1/3$	
$W/D_a = 1/5$ $D_d/D_a = 2/3$	$L/D_a = 1/4$	$J/D_t = 1/12$	

Tabla 60: Proporciones básicas para cálculo de agitadores.

En la Figura 31 se muestra un agitador tipo en el cual se indican cada una de las proporciones que deben ser calculadas en base a la tabla anterior.

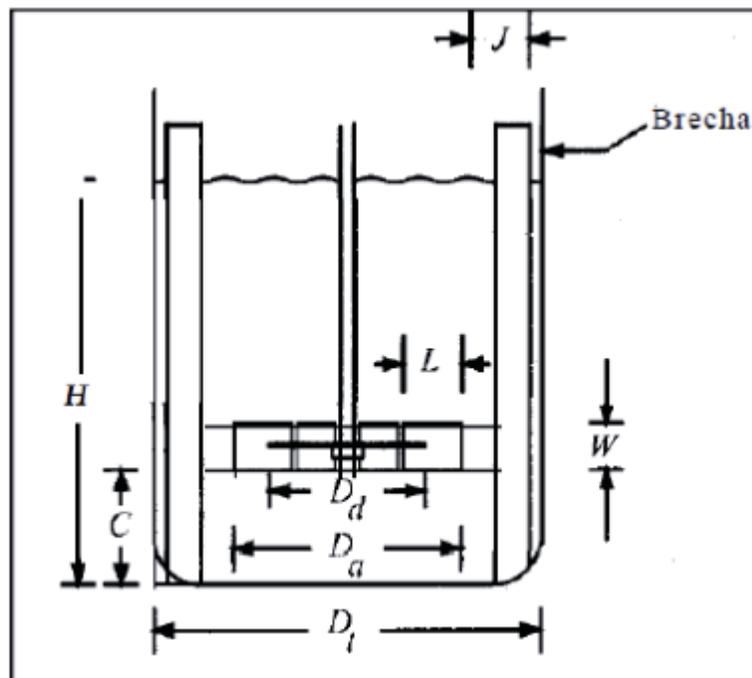


Figura 31: Dimensiones para el cálculo del agitador.

$$C = \frac{1}{3}D_t = \frac{1}{3} \times 2 = 0.667 [m]$$

$$D_a = 0.5D_t = 0.5 \times 2 = 1 [m]$$

$$W = \frac{1}{5}D_a = \frac{1}{5} \times 1 = 0.2 [m]$$

$$D_a = \frac{2}{3}D_a = \frac{2}{3} \times 1 = 0.667 [m]$$

$$L = \frac{1}{4}D_a = \frac{1}{4} \times 1 = 0.25 [m]$$

$$J = \frac{1}{12}D_t = \frac{1}{12} \times 2 = 0.167 [m]$$

En la siguiente figura podemos observar de mejor manera las medidas determinadas para el tanque agitador.

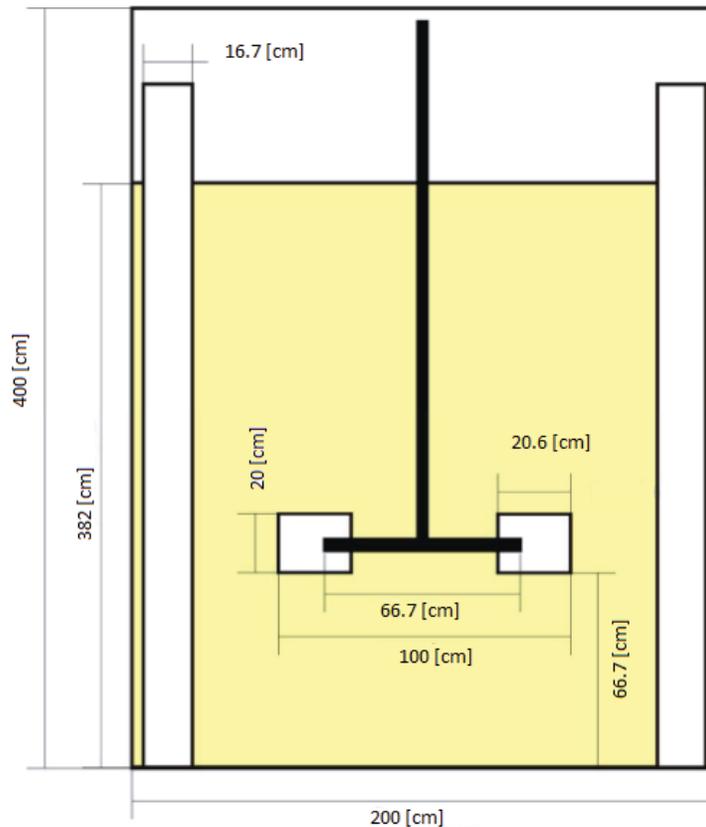


Figura 32: Dimensiones del tanque agitador.

Calculo potencia del agitador

La mezcla del NaOH(s) y el agua de procesos debe ser homogénea, la densidad del NaOH es de 1530 kg/m^3 y una viscosidad 20 cps. Teniendo en cuenta que el numero de Reynolds (NRe) se encuentre al principio del régimen turbulento (NRe=10.000).

$$NRe = \frac{D_a^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

Donde:

NRe: Numero de Reynolds

D_a : Diámetro del agitador [m].

N: Revoluciones por segundo [rps]

ρ : Densidad [Kg/m^3]

μ : Viscocidad [$\text{Kg/m}^*\text{seg}$]

Despejando para N tenemos:

$$N = \frac{NRe \times \mu}{D_a^2 \times \rho} = \frac{10000 \times 0,03}{1^2 \times 1530} = 0.1961[rps]$$

Para el cálculo de la potencia se emplea la siguiente fórmula:

$$P = K_T \times N^3 \times D_a^5 \times \rho$$

Para esto es necesario tener el valor de K_T el cual se busca en la siguiente tabla de acuerdo al tipo de régimen con el que se desea trabajar (K_T :Turbuleto ; K_L :Laminar), el tipo de agitador empleado y el numero de palas.

Valores para K_T y K_L		
Tipo de impulsor	K_T	K_L
Impulsor de hélice, tres palas		
• Paso 1.0	41	0.32
• Paso 1.5	48	0.87
Turbina		
• Disco de 6 palas	65	5.75
• 6 palas inclinadas	-----	1.63
• 4 palas inclinadas	44.5	1.27
Paleta plana 2 palas	36.5	1.70
Impulsor HE-3	43	0.28
Ancla	300	0.35

Tabla 61 Valores para K_T y K_L , calculo de potencia de agitador.

El valor de K_T para una turbina de 6 palas es de 5.75, por lo tanto reemplazando tenemos:

$$P = 5.75 \times 0.1961^3 \times 1^5 \times 1530 = 66.33[W]$$

Dimensionamiento de bombas

Bomba alimentación a tanque agitador (envío de agua)

Para el llenado del tanque mezclador se utilizaran los siguientes datos:

Sustancia a transportar	Agua procesos
Densidad	1000 [kg/m ³]
Viscosidad	1,007 x10 ⁻⁶
Caudal	0,0202 m ³ /s
Tiempo llenado tanque	15 min
Velocidad succion	2/3 V _d
Velocidad descarga	2,5 m/s
Diametro cañería	0,101 m
Material cañería	Acero al carbono A-53

Tabla 62: Características de la bomba de succión.

Para determinar la potencia de las bombas se utilizaran las siguientes ecuaciones

Balance de energía:

$$-W = (B_2 - B_1) + (h_{fs} + h_{fd})$$

$$B_2 - B_1 = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta V^2}{2 \times g_c} + \Delta Z$$

$$h_{fs} = f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_s^2}{2 \times g_c} \right)$$

$$h_{fd} = f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_d^2}{2 \times g_c} \right)$$

Reemplazando nos queda:

$$-W = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta V^2}{2 \times g_c} + \Delta Z + f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_s^2}{2 \times g_c} \right) + f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_d^2}{2 \times g_c} \right)$$

Donde:

W = trabajo realizado por la bomba [$\text{kg}_f \cdot \text{m}/\text{kg}$]

$\frac{\Delta P}{\rho}$ = Diferencia de presión [Pa]

ΔV^2 = Diferencia de velocidades de flujo

g_c = Constante de gravedad [$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{kg}_f \cdot \text{s}$]

L_{eq} = Largo equivalente [m]

D = Diámetro nominal de la cañería [m]

ΔZ = Diferencia de altura [m]

f = factor de fricción

Perdidas para la succión

Para la determinación de las pérdidas en la succión se debe calcular el número de Reynolds (NRe) y la rugosidad absoluta (E/D), para luego calcular el factor de fricción que está en función de ambas $f(\text{NRe}, E/D)$.

$$NRe = \frac{D \times V}{\mu}$$

Donde:

NRe = Numero de Reynolds

V = Velocidad de succión

D = Diámetro cañería

μ = Viscosidad líquido

Reemplazando los valores en la ecuación tenemos:

$$NRe = \frac{0,101 \times 1,667}{1,007 \times 10^{-6}} = 168156,24$$

Para el (E/D) nos metemos a la fig. C.2 (ANEXO C), donde tenemos que la rugosidad absoluta para el acero comercial es de $\varepsilon = 0,05$, junto con el diámetro de la cañería $D= 101$ [mm] nos da:

$$Rugosidad\ absoluta = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,05}{101} = 0,0005$$

El factor de fricción está en función de $f(NRe, E/D)$, ingresando al diagrama de Moody fig. C.1 (ANEXO C), obtenemos:

$$f = 0,02$$

Para el cálculo del largo equivalente tenemos la siguiente tabla donde se detalla cada elemento ubicado en la línea de proceso (VER FIG. C.3 ANEXO C)::

Elemento	Cantidad	Valor [m]	Total [m]
Codo ° 4"	1	1,5	1,5
Valvula de bola 4"	1	2	2
Cañería 4"	1	6	6
			9,5

Tabla 63: valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.

Ahora procedemos al cálculo para las perdidas por succión:

$$h_{fs} = f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_s^2}{2 \times g_c} \right) = 0,02 \times \left(\frac{9,5}{0,101} \times \frac{1,667^2}{2 \times 9,8} \right)$$

$$h_{fs} = 0,2667 \left[kg_f * m/kg \right]$$

Perdidas para la descarga

Para la determinación de las perdidas en la succión se debe calcular el número de Reynolds (NRe) y la rugosidad absoluta (E/D), para luego calcular el factor de fricción que está en función de ambas $f(NRe,E/D)$.

$$NRe = \frac{D \times V}{\mu}$$

Donde:

NRe = Numero de Reynolds

V = Velocidad de succión

D = Diámetro cañería

μ = Viscosidad líquido

Reemplazando los valores en la ecuación tenemos:

$$NRe = \frac{0,101 \times 2,5}{1,007 \times 10^{-6}} = 252234,36$$

Para el (E/D) nos metemos a la fig. C.2 (ANEXO C) donde tenemos que la rugosidad absoluta para el acero comercial es de E=0,05, junto con el diámetro de la cañería D= 101 [mm] nos da:

$$Rugosidad\ absoluta = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,05}{101} = 0,0005$$

El factor de fricción está en función de $f(NRe, E/D)$, ingresando al diagrama de Moody fig. C.1 (ANEXO C), obtenemos:

$$f = 0,018$$

Para el cálculo del largo equivalente tenemos la siguiente tabla donde se detalla cada elemento ubicado en la línea de proceso (VER FIG. C.3 ANEXO C):

Elemento	Cantidad	Valor [m]	Total [m]
Codo ° 4"	3	1,5	4,5
Valvula de bola 4"	3	2	6
Te 4"	1	6	6
Cañería 4"	1	85	85
			101,5

Tabla 64: valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.

Ahora procedemos al cálculo para las pérdidas por succión:

$$h_{fd} = f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_d^2}{2 \times g_c} \right) = 0,018 \times \left(\frac{101,5}{0,101} \times \frac{2,5^2}{2 \times 9,8} \right)$$

$$h_{fd} = 5,7682 \left[kg_f * m / kg \right]$$

Balance de energía para carga del tanque agitado

Para el balance de energía hemos obtenido los siguientes datos:

Datos	Valor	Unidad
$\frac{\Delta P}{\rho}$	0	-----
$\frac{\Delta V^2}{2 \times g_c}$	0,2	$kg_f * m / kg$
ΔZ	4,1	M
h_{fs}	0,2667	$kg_f * m / kg$
h_{fd}	5,7682	$kg_f * m / kg$

Tabla 65: datos para el cálculo de balance de energía.

$$-W = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta V^2}{2 \times g_c} + \Delta Z + f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_s^2}{2 \times g_c} \right) + f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_d^2}{2 \times g_c} \right)$$

Reemplazando los datos en la ecuación anterior nos entrega:

$$-W = 0 + 0,2 + 4,1 + (0,2246 + 5,7682) = 10,2928 \left[kg_f * m / kg \right]$$

Calculo de potencia de la bomba

Para el cálculo de la potencia tenemos los siguientes datos que se pueden observar en la siguiente tabla:

Datos	Valor	Unidad
$-W$	10,2928	$Kg_f * m / Kg$
ρ	1000	Kg / m^3
Q	0,013	m^3 / s
N	0,8	-----

Tabla 66: Datos para el cálculo de la potencia de la bomba.

Por formula tenemos que:

$$P = \frac{-W * \rho * Q}{\eta}$$

Reemplazando obtenemos:

$$P = \frac{10,2928 * 1000 * 0,013}{0,8} = 167,26 \left[kg_f * m / s \right]$$

$$P = \frac{167,26 \left[kg_f * m / s \right]}{75 \left[kg_f * m / s \right]} = 2,2301 [HP]$$

Consideramos un 10% de sobredimensionamiento:

$$P = 2,5486 * 1,1 = 2,2392 [HP] \approx 3[HP]$$

Bomba para descarga de tanque agitador

Perdidas para la succión

Para la determinación de las pérdidas en la succión se debe calcular el número de Reynolds (NRe) y la rugosidad absoluta (ε / D), para luego calcular el factor de fricción que está en función de ambas $f(NRe, \varepsilon / D)$.

$$NRe = \frac{D \times V}{\mu}$$

Donde:

NRe = Numero de Reynolds

V = Velocidad de succión

D = Diámetro cañería

μ = Viscosidad líquido

Reemplazando los valores en la ecuación tenemos:

$$NRe = \frac{0,101 \times 1,667}{20 \times 10^{-6}} = 8418,35$$

Para el (E/D) nos metemos a la fig. C.2 (ANEXO C) donde tenemos que la rugosidad absoluta para el acero comercial es de $E=0,05$, junto con el diámetro de la cañería $D= 101$ [mm] nos da:

$$Rugosidad\ absoluta = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,05}{101} = 0,0005$$

El factor de fricción está en función de $f(NRe, E/D)$, ingresando al diagrama de Moody fig. C.1 (ANEXO C), obtenemos:

$$f = 0,035$$

Para el cálculo del largo equivalente tenemos la siguiente tabla donde se detalla cada elemento ubicado en la línea de proceso (VER FIG. C.3 ANEXO C)

Elemento	Cantidad	Valor [m]	Total [m]
Codo ° 4"	1	1,5	1,5
Válvula de bola 4"	3	2	6
Cañería 4"	1	5	5
			12,5

Tabla 67: valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.

Ahora procedemos al cálculo para las pérdidas por succión:

$$h_{fs} = f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_s^2}{2 \times g_c} \right) = 0,035 \times \left(\frac{12,5}{0,101} \times \frac{1,667^2}{2 \times 9,8} \right)$$

$$h_{fs} = 0,6141 \left[kg_f * m/kg \right]$$

Perdidas para la descarga

Para la determinación de las perdidas en la succión se debe calcular el número de Reynolds (NRe) y la rugosidad absoluta (E/D), para luego calcular el factor de fricción que está en función de ambas $f(NRe, E/D)$.

$$NRe = \frac{D \times V}{\mu}$$

Donde:

NRe = Numero de Reynolds

V = Velocidad de succión

D = Diámetro cañería

μ = Viscosidad líquido

Reemplazando los valores en la ecuación tenemos:

$$NRe = \frac{0,101 \times 2,5}{20 \times 10^{-6}} = 12625$$

Para el (E/D) nos metemos a la fig. C.2 (ANEXO C) donde tenemos que la rugosidad absoluta para el acero comercial es de E=0,05, junto con el diámetro de la cañería D= 101 [mm] nos da:

$$Rugosidad\ absoluta = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,05}{101} = 0,0005$$

El factor de fricción esta en función de $f(NRe, E/D)$, ingresando al diagrama de Moody fig. C.1 (ANEXO C), obtenemos:

$$f = 0,027$$

Para el cálculo del largo equivalente tenemos la siguiente tabla donde se detalla cada elemento ubicado en la línea de proceso (VER FIG. C.3 ANEXO C)

Elemento	Cantidad	Valor [m]	Total [m]
Codo ° 4"	2	1,5	3
Válvula de bola 4"	3	2	6
Te 4"	1	6	6
Cañería 4"	1	20	20
			35

Tabla 68: Valores de pérdidas en accesorios en succión de la bomba.

Ahora procedemos al cálculo para las pérdidas por succión:

$$h_{fd} = f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_d^2}{2 \times g_c} \right) = 0,027 \times \left(\frac{35}{0,101} \times \frac{2,5^2}{2 \times 9,8} \right)$$

$$h_{fd} = 2,9835 \left[Kg_f * m / Kg \right]$$

Balance de energía para descarga del tanque agitado

Para el balance de energía hemos obtenido los siguientes datos:

Datos	Valor	Unidad
$\frac{\Delta P}{\rho}$	0	-----
$\frac{\Delta V^2}{2 \times g_c}$	0,2	$kg_f * m / kg$
ΔZ	5	M
h_{fs}	0,6141	$kg_f * m / kg$
h_{fd}	2,9835	$kg_f * m / kg$

Tabla 69: datos para el cálculo de balance de energía.

$$-W = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta V^2}{2 \times g_c} + \Delta Z + f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_s^2}{2 \times g_c} \right) + f \times \left(\frac{L_{eq}}{D} \times \frac{V_d^2}{2 \times g_c} \right)$$

Reemplazando los datos en la ecuación anterior nos entrega:

$$-W = 0 + 0,2 + 5 + (0,6141 + 2,9835) = 8,7976 \left[\frac{kg_f * m}{kg} \right]$$

Calculo de potencia de la bomba

Para el cálculo de la potencia tenemos los siguientes datos que se pueden observar en la siguiente tabla:

Datos	Valor	Unidad
$-W$	8,7976	$Kg_f * m / Kg$
ρ	1530	Kg / m^3
Q	0,013	m^3 / s
N	0,70	-----

Tabla 70: Datos para el cálculo de la potencia de la bomba.

Por formula tenemos que:

$$P = \frac{-W * \rho * Q}{\eta}$$

Reemplazando obtenemos:

$$P = \frac{8,7976 * 1530 * 0,013}{0,70} = 249,98 \left[\frac{Kg_f * m}{s} \right]$$

$$P = \frac{249,98 \left[\frac{Kg_f * m}{s} \right]}{75 \left[\frac{Kg_f * m}{s} \right]} = 3,3330 [HP]$$

Consideramos un 10% de sobredimensionamiento:

$$P = 3,3330 * 1,1 = 3,6663 [HP] \approx 4[HP]$$

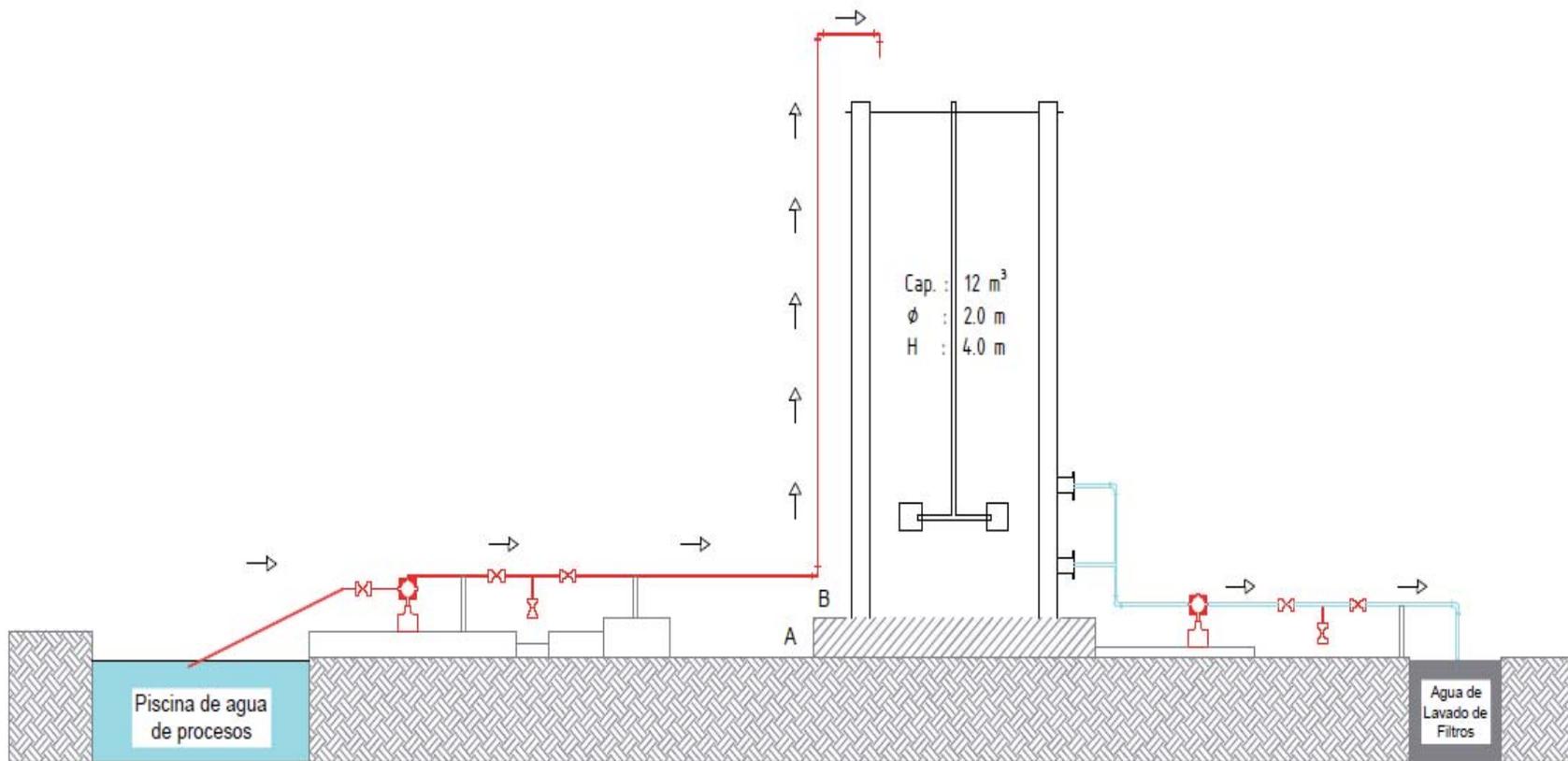


Figura 33: Diagrama de tanque para preparación de reactivo.

ANEXO B Estimación de costos de equipos principales

De acuerdo a la potencia requerida por cada equipo, cálculo realizado en el anexo A, se consulto el catalogo 2014 de la empresa española EBARA BOMBAS S.A. la cual entrega los siguientes valores:

ELECTROBOMBA CENTRIFUGA NORMALIZADA 3M		
MODELO	POTENCIA	COSTO
50-125/3.0	2,2 [kW]	1.223 €
50-125/4.0	3 [kW]	1.318 €

Tabla 71: Datos de electrobombas seleccionadas.

Los precios al ser consultados en el extranjero se deben pasar a precios CIF, para lo cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$CIF = \frac{FOB}{0,8}$$

Reemplazando los valores en la ecuación nos queda:

ELECTROBOMBA CENTRIFUGA NORMALIZADA 3M			
MODELO	POTENCIA	COSTO FOB	COSTO CIF
50-125/3.0	2,2 [kW]	1.223 €	1.528,75 €
50-125/4.0	3 [kW]	1.318 €	1.647,50 €

Tabla 72: Valores CIF para electrobombas seleccionadas.

En consecuencia, consultando Euro en la fecha 24/abril/2014 tenemos:

$$1€ = 1,3825 US\$$$

ELECTROBOMBA CENTRIFUGA NORMALIZADA 3M		
MODELO	POTENCIA	COSTO
50-125/3.0	2,2 [kW]	2.113,50 US\$
50-125/4.0	3 [kW]	2.277,67 US\$

Tabla 73: valores en US\$ para electrobombas seleccionadas.

Tanque Agitado

De acuerdo a los requerimientos necesarios especificados en el anexo A para el diseño del tanque de preparación de la soda, se encontró una cotización facilitada por la empresa EQUIPNET, en la cual se establece el siguiente precio (FOB) de un equipo de las siguientes características:

Estanque de Soda	
Material	Acero al carbono
Capacidad	52 m ³
Año cotización	2014
Costo	US\$ 15.683,60

Tabla 74: Datos de cotización de tanque agitado.

Con los datos facilitados anteriormente podemos obtener un precio que se acerque al tipo de estanque que necesitamos, para eso debemos hacer un cálculo de escalamiento por capacidad según la formula:

$$C_f = C_i * \left(\frac{Q_f}{Q_i}\right)^x$$

Donde :

C_f = Costo final del equipo

C_i = Costo inicial del equipo

Q_f = Capacidad final

Q_i = Capacidad inicial

X = Factor de escalamiento (0,44 Tanks Carbon Steel)

$$C_f = 15683,6 * \left(\frac{12}{52}\right)^{0,44}$$

$$C_f = 8227,05 \text{ US\$}$$

Al igual que las bombas, al ser precios consultados en el extranjero deben de ser recalculados de acuerdo a la fórmula del precio (CIF), lo que nos da un precio de:

$$CIF = \frac{8277,05}{0,8}$$

$$CIF = 10283,81 \text{ US\$}$$

Resumiendo los costos de los equipos principales obtenidos en este anexo tenemos la siguiente tabla:

Principales Equipos	
Equipo	Valor US\$
Bomba 2,2 [kW]	2113,50
Bomba 3 [kW]	2277,67
Tanque Agitado	10283,81
Total	14674,98

Tabla 75: Valores de los principales equipos para la inversión inicial.

ANEXO C FIGURAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS

Las siguientes figuras fueron utilizadas para el cálculo del dimensionamiento de equipos (bombas centrífugas), en el desarrollo de este trabajo

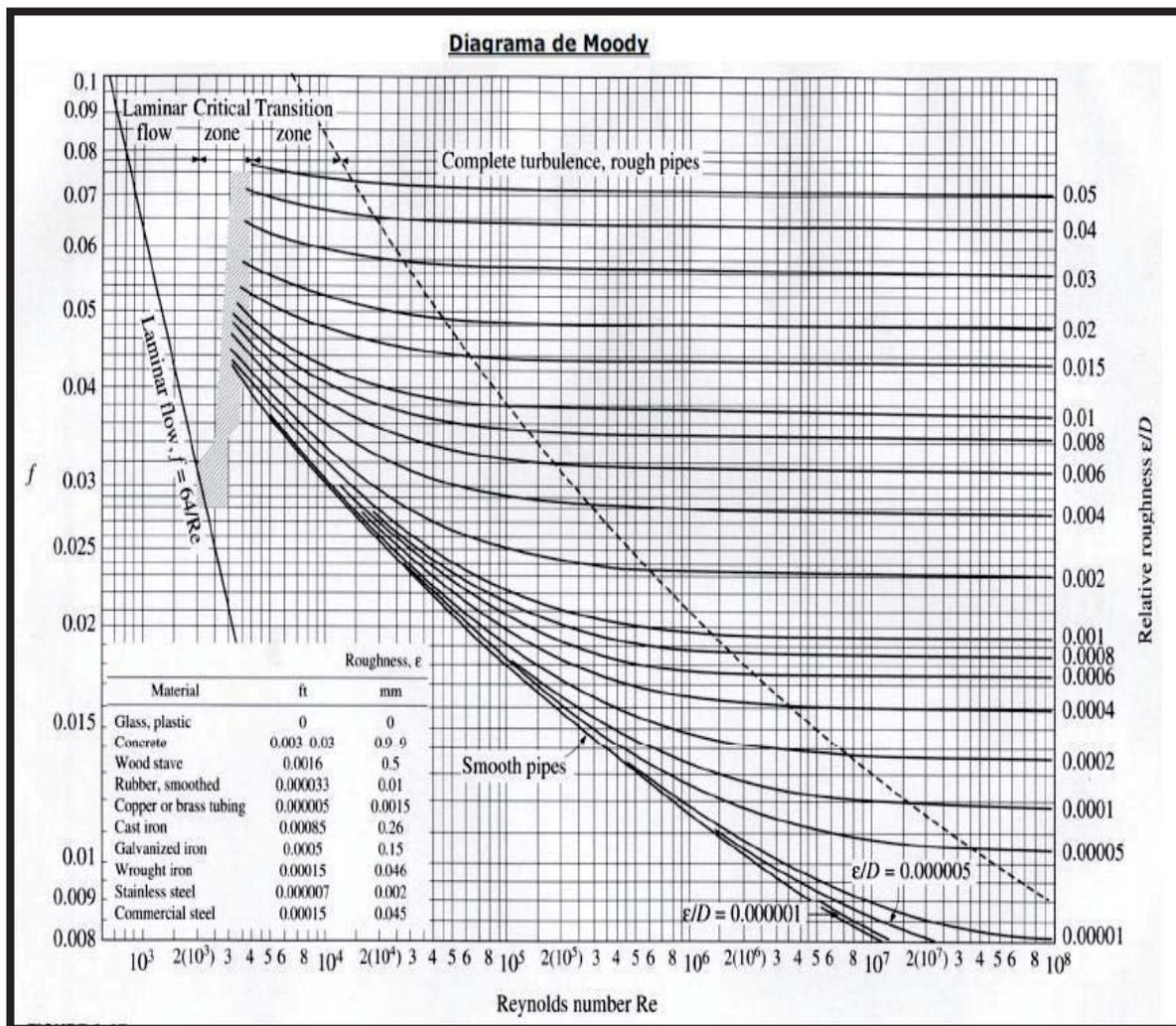


Figura 34: Diagrama de Moody para el diseño de equipos principales.

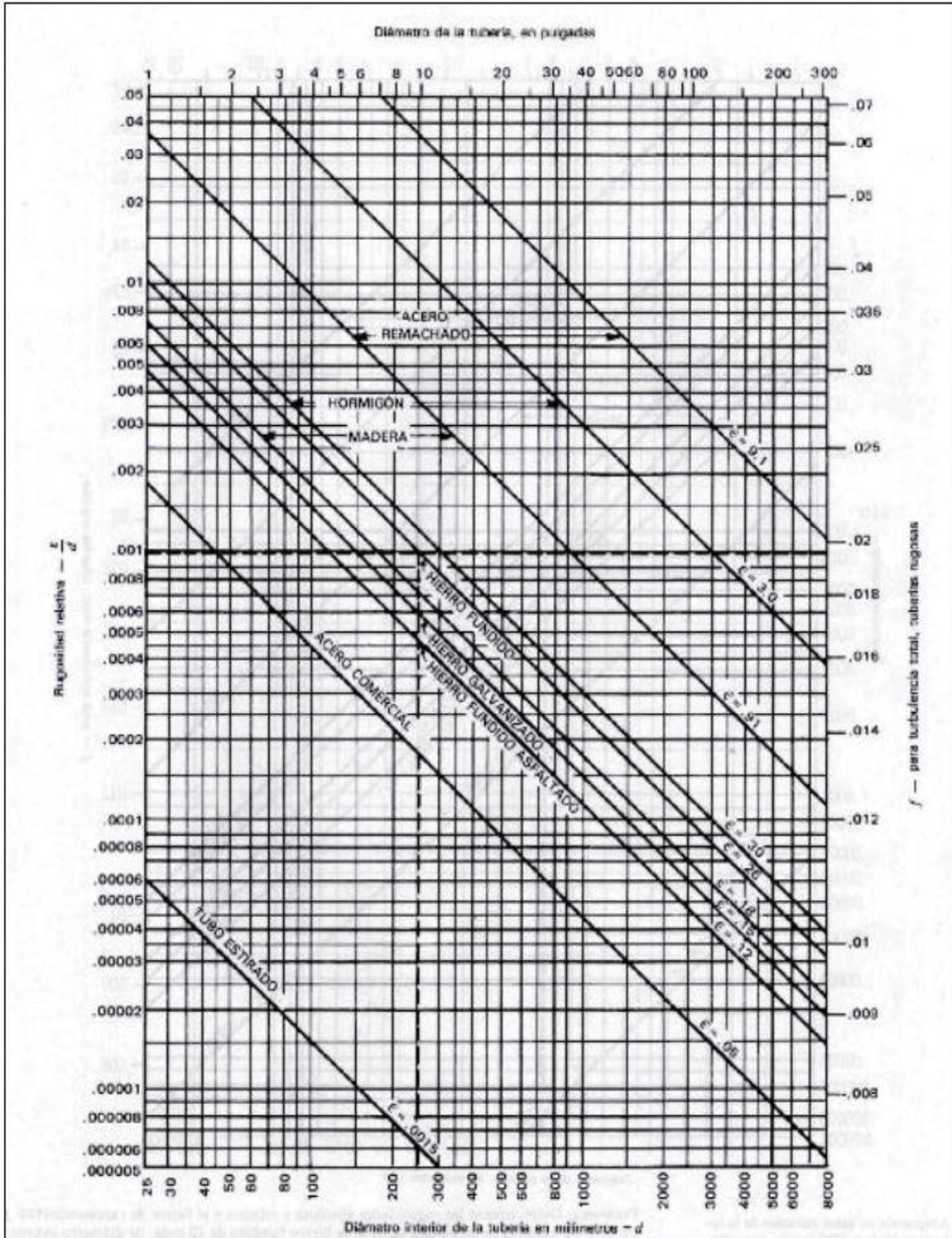


Figura 35: Rugosidad Relativa de los materiales y factor de fricción (f) para flujo en régimen turbulento.

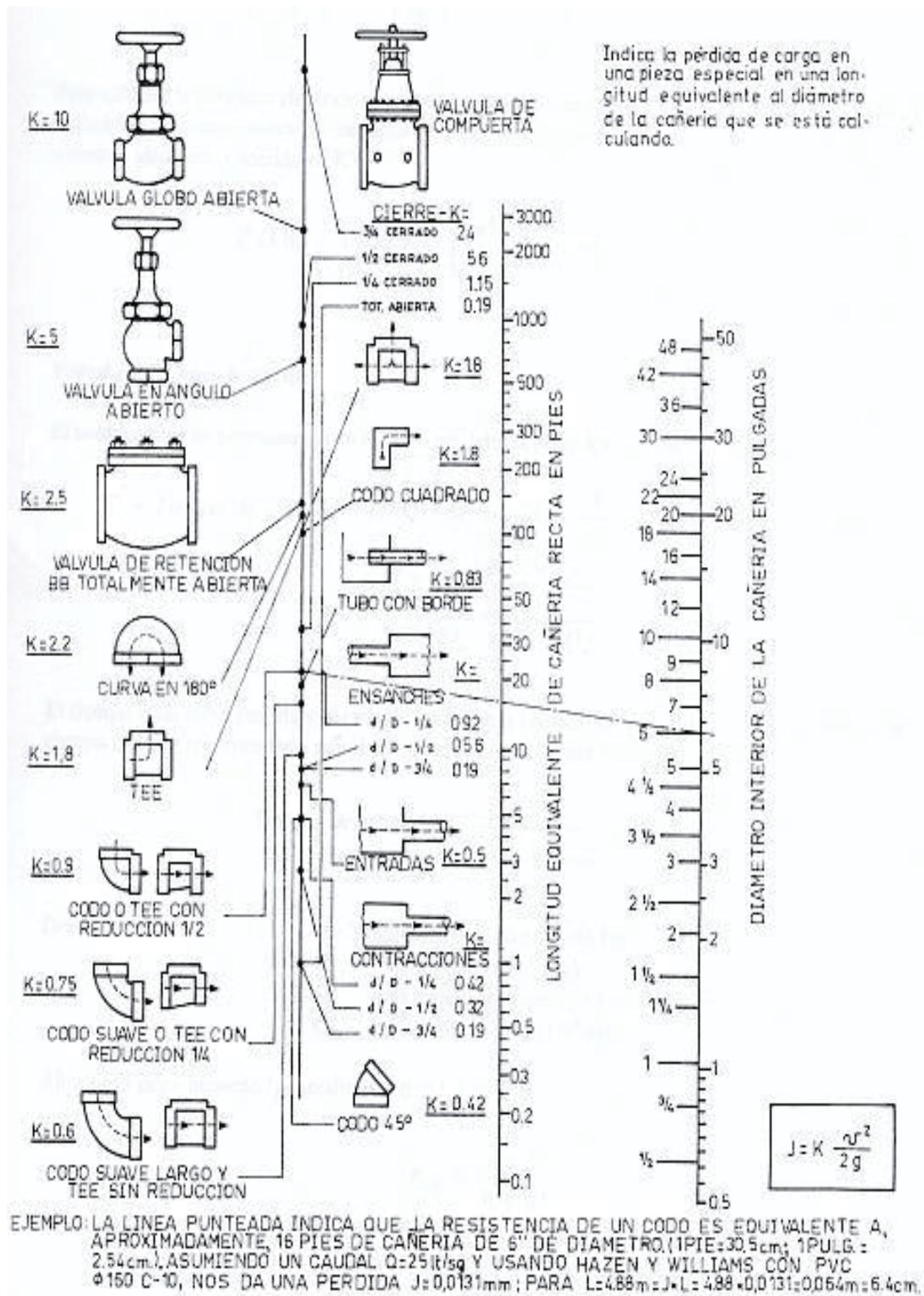


Figura 36: Perdidas locales para accesorios en línea hidráulica.

ANEXO D NORMA CHILENA DE RIEGO

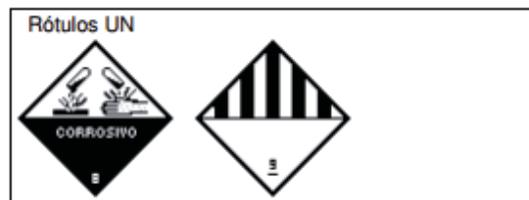
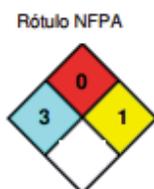
La norma chilena de riego 1.333 establece ciertos parámetros para aguas destinadas a riego, estos se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Elemento	Unidad	Limite
Aluminio (Al)	mg/l	5.00
Arsenico (As)	mg/l	0.10
Bario (Ba)	mg/l	4.00
Berilio (Be)	mg/l	0.10
Boro (B)	mg/l	0.75
Cadmio (Cd)	mg/l	0.01
Cianuro (CN ⁻)	mg/l	0.20
Cloruro (Cl ⁻)	mg/l	200
Cobalto (Co)	mg/l	0.05
Cobre (Cu)	mg/l	0.20
Cromo (Cr)	mg/l	0.10
Fluoruro (F ⁻)	mg/l	1.00
Hierro (Fe)	mg/l	5.00
Litio (Li)	mg/l	2.50
Manganeso (Mn)	mg/l	0.20
Mercurio (Hg)	mg/l	0.001
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,01
Niquel (Ni)	mg/l	0.20
Plata (Ag)	mg/l	0.20
Plomo (Pb)	mg/l	5.00
Selenio (Se)	mg/l	0.02
Sodio porcentual	%	35
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	mg/l	250
Vanadio (V)	mg/l	0.10
Zinc (Zn)	mg/l	2.00

Tabla 76: Parámetros para aguas de riego según la Norma Chilena de Riego 1333.

ANEXO E ASPECTOS DE SEGURIDAD MANIPULACION DE REACTIVOS

Hidróxido de Potasio (Potasa Caustica)



IDENTIFICACION

SINONIMOS : HIDROXIDO DE POTASIO, POTASA CAUSTICA, LEJIA

FOMULA : KOH

COMPOSICION : 85-100% PUREZA

NUMERO CAS : 1310-58-3

NUMERO UN : 1813

USOS :

Elaboración de jabón; blanqueador; elaboración de ácido oxálico y sales potásicas; reactivo en química analítica; medicina (caústica); cerillas; grabados; en alimentos, en forma de álcali; electrólito en baterías alcalinas de almacenaje y algunas pilas de combustible; absorbente de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno; reactivo de laboratorio.

EFFECTOS PARA LA SALUD

TWA : N.R

STEL : N.R

TECHO(C) : 2 mg/m³

IPVS : N.R

INHALACION :

El polvo o niebla, puede causar síntomas en el tracto respiratorio, posiblemente incluye tos, sofoco, dolor en la nariz, boca y garganta. Lesiones en el tabique nasal y quemaduras en las

membranas mucosas. Si las cantidades inhaladas son grandes, se puede presentar edema pulmonar, a menudo con un período latente de 5 a 72 horas. Los síntomas pueden incluir tensión en el pecho, disnea, salivación espumosa, cianosis y desvanecimiento.

INGESTION :

Quemaduras severas en los labios, lengua, boca, garganta, esófago y estómago, puede producir vómito con sangre y mucosa, severo dolor abdominal. La caída rápida de la presión sanguínea indica efecto gástrico y perforación del esófago. El daño del estomago y esófago puede avanzar por 2 o 3 semanas. La muerte puede ocurrir por peritonitis después de un mes de la ingestión. Cuando el paciente se recupera de los efectos inmediatos, contracción del esófago puede ocurrir semanas, meses o varios años después.

PIEL :

El contacto directo con solución al 4% puede causar sensación irritación severa en horas siguientes al contacto. La extensión del daño depende de la duración del contacto. Si no es removido de la piel puede causar ulceración. Se presentan dolor y quemaduras en general.

OJOS :

El contacto directo con el sólido o soluciones pueden causar dolor, quemaduras posiblemente severas. El grado de daño depende de la concentración y duración del contacto, puede causar edema, destrucción y opacificación del epitelio corneal e iritis.

EFECTOS CRONICOS:

Inhalación: Dependiendo de la concentración y duración de la exposición, repetida o prolongada puede causar inflamación y cambios ulcerativos en la boca y posiblemente malestares gastrointestinales y bronquiales, daño pulmonar. Piel: Contacto repetido o prolongado puede causar dermatitis. Ojos: Contacto repetido o prolongado en bajos niveles puede causar conjuntivitis. Ingestión: N.R.

PRIMEROS AUXILIOS

INHALACION :

Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial (En lo posible evitar el método boca a boca). Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo. Buscar atención médica inmediatamente.

INGESTION :

Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito, si éste se presenta inclinar la víctima hacia adelante. Si está inconsciente no dar a beber nada. Buscar atención médica inmediatamente.

PIEL :

Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica inmediatamente.

OJOS :

Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.

RIESGOS DE INCENDIO Y/O EXPLOSION

PUNTO INFLAMACION: N.R.

TEMP. AUTOIGNICION: N.R.

LIMITES INFLAMABILIDAD: N.R.

PELIGROS DE INCENDIO Y/O EXPLOSION:

Los materiales corrosivos en contacto con metales y agua pueden generar hidrógeno el cual es inflamable. Puede resultar incendio por el calor liberado cuando entra en contacto con materiales combustibles. El material es higroscópico, absorbe agua y dióxido de carbono de la atmósfera.

PRODUCTOS DE LA COMBUSTION:

Óxido de potasio, hidrógeno.

PRECAUSIONES PARA EVITAR INCENDIOS Y/O EXPLOSION:

Evitar que los contenedores se calienten, proteger contra la humedad y ventilar el área. Evitar el contacto con materiales incompatibles. Mantener alejado de productos combustibles. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de corrosión.

PROCEDIMIENTOS EN CASO DE INCENDIOS Y/OEXPLOSION:

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Estar a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Retirar los contenedores expuestos al fuego si es posible.

AGENTES EXTINTORES DEL FUEGO:

Polvo químico seco, dióxido de carbono, halón, agua en forma de niebla o espuma. Elegir el agente adecuado según el tipo de fuego de los alrededores.

ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION

ALMACENAMIENTO:

Lugares ventilados, frescos, secos y señalizados. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. Rotular los recipientes adecuadamente y mantenerlos bien cerrados. Inspeccione periódicamente las áreas de almacenamiento para detectar daños y fugas en los contenedores. Almacenar los contenedores por debajo del nivel de los ojos en caso de ser posible. Restringir el acceso a personas no autorizadas. Envasar en botellas, cajas, barriles, toneles y vagones cisterna.

MANIPULACION:

Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. No permita que el material alcance temperaturas superiores a los 360°C. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente.

PROCEDIMIENTOS EN CASO DE ESCAPE Y/O DERRAME

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección personal establecida.

EQUIPO PROTECCION PERSONAL/CONTROL EXPOSICION

USO NORMAL :

Gafas de seguridad para químicos a prueba de polvo o salpicaduras, o protector facial de 20 cm como mínimo. Guantes, overol, delantal o protector de calzado según la operación que se esté realizando. Materiales resistentes: Buenos: Caucho de butilo, caucho natural, neopreno, PVC, nitrilo, neopreno/estireno/butadieno caucho (SBR), SBR. Regulares/malos: Vitón, poliuretano.

CONTROL DE EMERGENCIAS:

Equipo de respiración autónomo (SCBA) y ropa de protección TOTAL.

CONTROLES DE INGENIERIA:

Ventilación local y general, para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional. Considerar la posibilidad de encerrar el proceso. Garantizar el control de las condiciones del proceso. Disponer de duchas y estaciones lavaojos.

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

APARIENCIA :

Sólido en fragmentos, terrones, barras, lentejas o escamas con fractura cristalina o rombohedral, sin olor, de color blanco - amarillo claro, delicuescente.

GRAVEDAD ESPECIFICA: 2.044 (AGUA=1)

P. EBULLICION (°C) : 1370

P.FUSION (°C) : 360

D. RELATIVA AL VAPOR : N.R.

PRESION VAPOR (mmHg) : 1 mmHg/719 °C

VISCOCIDAD : N.R.

PH : 13,5 (SOLUCION 0,1 M)

SOLUBILIDAD :

Apreciable en Agua, soluble en alcohol y glicerina, insoluble en éter y amonio.

ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

ESTABILIDAD : ESTABLE BAJO CONDICIONES NORMALES

MATERIALES A EVITAR : AGUA (SI), AIRE (NO)

OTRAS :

La reacción con agua puede generar suficiente calor para encender materiales combustibles.

Con ácidos fuertes: puede ocurrir reacción violenta con liberación de calor y presión que podrá explotar el contenedor. Con metales: su reacción puede producir hidrógeno que es inflamable.

Con materiales combustibles, materiales orgánicos, zinc, aluminio, estaño, dióxido de carbono; componentes organohalógenados: puede reaccionar para formar espontáneamente componentes combustibles. Con anhídrido maléico y componentes orgánicos nitro y cloro puede reaccionar explosivamente.

INFORMACION TOXICOLOGICA

DL50 (oral, rata) = 273 mg/kg; DL50 (oral, rata macho) = 365 mg/kg; severa irritación en piel de humano = 50 mg/24 horas; DL50 (piel, conejo) = 5 mg/24 horas. No hay información disponible sobre cancerogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad y efectos reproductivos.

INFORMACION DE TRANSPORTE

Etiqueta blanco y negro con el número 8 y la leyenda "Corrosivo". No transporte con sustancias explosivas, sólidos que liberan gases inflamables en contacto con el agua, comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos, ni alimentos. Etiqueta blanca y negra con el número 9 y la leyenda: Sustancia peligrosa para el medio ambiente.