

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



PROPUESTA DE SISTEMA ALTERNO PARA EL REUSO DE AGUA Y  
MINIMIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN UNA PLANTA DE RECICLADO  
DE PLOMO Y POLIPROPILENO A PARTIR DE BATERÍAS  
AUTOMOTRICES USADAS

TESIS  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO(A) EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

POR:  
EMMA COLLADO ARREDONDO

MONTERREY, N.L

MAYO DE 2007.

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por la Ing. Emma Collado Arredondo sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**Maestro(a) en Ciencias en Sistemas Ambientales  
Especialidad Ingeniería Ambiental**

Comité de Tesis

---

Dr. Miguel Angel López Zavala  
Asesor

---

Dr. Enrique Cázares Rivera  
Sinodal

---

Dr. Jorge H. García Orozco  
Sinodal

Aprobado

---

Dr. Francisco Román Ángel Bello Acosta  
Director del Programa de Graduados en Ingeniería  
Mayo, 2007.



Monterrey N.L., Miércoles 9 de Mayo del 2007.


Ing. Luis Francisco Vázquez del Mercado Valenzuela  
/Ing. Luis David Silva Galván  
Gerencia de Investigación y Desarrollo  
Johnson Controls Inc., Planta Monterrey  
Presente

Estimados Ingenieros:

Anexo a la presente encontrarán una copia de la tesis de maestría de la Ing. Emma Collado Arredondo. El motivo del presente escrito es para solicitarles su aprobación y realizar la impresión y distribución de la tesis, única y exclusivamente para fines académicos y así cumplir con los requisitos necesarios para la emisión del grado.

Sin más que comunicarles me despido. Para cualquier comentario estoy a sus órdenes.


Atentamente,



---

Dr. Miguel Ángel López Zavala  
Profesor Investigador  
Centro de Estudios del Agua  
ITESM Campus Monterrey


Vobo,



---

Ing. Luis Francisco Vázquez del Mercado V.  
Gerente de Investigación y Desarrollo  
Johnson Controls Inc.

Vobo



---

Ing. Luis David Silva Galván  
Gerente de Investigación  
Johnson Controls Inc.

A DIOS:

Por darme salud, una gran familia y la fuerza necesaria para luchar por mis sueños.

A MIS PADRES, ANGEL Y REYNA:

Por su infinito amor y su apoyo incondicional desde el momento en que nací.

A MIS ABUELOS, MARÍA Y JOSÉ:

Dedico esta tesis. Por darme lo mejor de su vida, por su amor incondicional, ternura y cariño. Por su gran esfuerzo y por todo el camino que hemos recorrido juntos.

A MI ESPOSO, EDUARDO:

Con todo cariño, por iluminar cada momento de mi vida con su amor y ternura.

A MI HERMANA, ESTHER:

Por ser un ejemplo a seguir y una motivación para esforzarme. Mucha suerte.

A MI ASESOR:

Dr. Miguel Ángel López por su paciencia, apoyo y dedicación otorgados durante la realización de la presente tesis.

A MIS SINODALES:

Dr. Enrique Cázares Rivera y Dr. Jorge García Orozco, doy gracias por su tiempo, por sus comentarios acertados y su valiosa experiencia compartida durante la realización de la presente tesis.

A la Ing. Lorena Cruz Matus por sus consejos y su apoyo.

Al Dr. Mario Alberto Martínez por el apoyo y la confianza brindada en la realización del proyecto.

A la Empresa JCI y a su personal por las facilidades brindadas para la realización de la investigación y de la parte experimental del presente trabajo. En especial a los operarios de la planta de tratamiento los señores Jaime Rodríguez, Juan Carlos Acosta, Valente Jaramillo y Víctor Herrera por la ayuda y el apoyo incondicional.

Al Ing. Humberto C. Rodríguez por su valiosa orientación y apoyo incondicional en la realización del presente trabajo. Mil gracias.

## CONTENIDO

RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1. Experiencias a nivel internacional en el reciclaje de baterías de plomo usadas.	3
3.1.1. Canadá.	3
3.1.2. Estados Unidos.	3
3.1.3. Europa (Proyecto CLEANLEAD).	3
3.1.4. Isla Reunion (Francia).	7
3.2. Proyectos convencionales de reuso de agua.	8
3.3. Estrategias para el reuso del agua utilizadas por “water pinch”.	9
3.4. Conceptos de la tecnología “water pinch”.	10
3.4.1. Etapas en la tecnología del “water pinch”.	11
3.4.2. Representación de la corriente de agua concentrada en contaminante para una operación de uso de agua.	11
3.4.3. Concentraciones limitantes.	12
3.4.4. Regeneración, cambios de flujo y sistemas multicontaminantes.	13
3.5. Manejo de las aguas residuales en la Planta de Ciénega de Flores.	14
3.5.1. Planta de tratamiento biológico.	14
3.5.2. Planta de tratamiento fisicoquímico.	15
4. METODOLOGÍA	18
4.1. Identificación de corrientes de agua y de agua residual en la planta.	18
4.2. Selección de puntos de muestreo.	18
4.3. Determinación de flujos en los puntos de muestreo.	18
4.4. Caracterización fisicoquímica de corrientes.	20
4.5. Balances volumétricos de agua.	21
4.6. Balances de masa de contaminantes.	22
4.7. Propuestas de reuso de agua y minimización de aguas residuales.	22
4.8. Evaluación económica de las propuestas.	35
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
5.1. Identificación de corrientes de agua y de agua residual en la planta.	26
5.2. Selección de puntos de muestreo.	27

5.3	Determinación de flujos en los puntos de muestreo.	28
5.4	Caracterización fisicoquímica de corrientes.	30
5.5	Balances volumétricos de agua.	47
5.6	Balances de masa de contaminantes.	50
5.7	Propuestas de reuso de agua y minimización de aguas residuales.	55
5.8	Evaluación económica de propuestas.	66
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
6.1	Conclusiones.	70
6.2	Recomendaciones.	71
	ANEXOS	73
	BIBLIOGRAFÍA	137
	VITA	139

## LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1	Resultados de las mediciones de flujo con equipo ultrasónico.	73
Anexo 2	Metodologías aplicadas en la determinación de parámetros.	77
Anexo 3	Resultados de análisis fisicoquímicos de muestras.	78
Anexo 4	Normatividad mexicana vigente para agua potable, descargas de aguas residuales y aguas residuales tratadas.	91
Anexo 5	Cálculos realizados para las determinaciones de flujos.	93
Anexo 6	Cálculo del porcentaje en peso del ácido sulfúrico en el electrolito de las baterías usadas.	100
Anexo 7	Cálculo de las cargas másicas por constituyente.	101
Anexo 8	Balances volumétricos de agua.	103
Anexo 9	Información relevante del balance volumétrico de agua.	105
Anexo 10	Carga másica por contaminante.	107
Anexo 11	Tablas comparativas para propuestas de reuso.	117
Anexo 12	Isométricos de líneas de reuso de agua.	125
Anexo 13	Detalle de cálculos realizados para la evaluación económica.	126
Anexo 14	Detalle de los flujos de efectivo anuales por alternativa.	134

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Diagrama conceptual del proceso de CLEANLEAD.	4
Figura 3.2	Celda de una membrana de electrodiálisis.	5
Figura 3.3	Diagrama de la secuencia de biotratamiento para el ácido drenado.	5
Figura 3.4	Horno de Isasmelt.	6
Figura 3.5	Diagrama de flujo de la operación de reciclaje de baterías usadas en la planta de VERDI.	8
Figura 3.6	Configuración de estrategias de reuso, tratamiento/reuso y tratamiento/reciclaje.	9
Figura 3.7	Contacto a contra corriente entre una corriente concentrada en contaminante y una corriente de agua.	12
Figura 3.8	Representación de las concentraciones limitantes de contaminante en el modelo de transferencia de masa.	13
Figura 3.9	Diagrama de flujo de la planta de tratamiento biológico.	14
Figura 3.10	Diagrama de flujo de la planta de tratamiento fisicoquímico.	16
Figura 5.1	Diagrama de flujo con los principales influentes y efluentes de agua de la planta.	26
Figura 5.2	Diagrama indicando los puntos de muestreo y numeración.	28
Figura 5.3	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la fosa del MA-51.	31
Figura 5.4	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la fosa multiusos.	32
Figura 5.5	Carga másica promedio de constituyentes del efluente del tratamiento biológico.	33
Figura 5.6	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la laguna de agua ácida.	34
Figura 5.7	Carga másica promedio de constituyentes del efluente del tratamiento fisicoquímico.	35
Figura 5.8	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la fosa del Apron Feeder.	36
Figura 5.9	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de filtro prensa del MA-51.	37
Figura 5.10	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de agua tratada de cisterna.	38
Figura 5.11	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de lavado de plásticos.	39
Figura 5.12	Carga másica promedio de constituyentes del agua de pozo.	40
Figura 5.13	Carga másica promedio de constituyentes del agua purificada.	41
Figura 5.14	Carga másica promedio de constituyentes del agua de pipa (potable).	41
Figura 5.15	Carga másica promedio de constituyentes del efluente del comedor.	42
Figura 5.16	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de lavado de móviles.	43
Figura 5.17	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de regaderas.	44
Figura 5.18	Carga másica promedio de constituyentes del efluente de lavandería.	45
Figura 5.19	Carga másica promedio de constituyentes del influente del tratamiento biológico.	46
Figura 5.20	Carga másica promedio de constituyentes del electrolito contenido en baterías usadas.	47



Figura 5.21	Balance volumétrico de agua actual.	48
Figura 5.22	Balance de masa para los sólidos suspendidos totales.	51
Figura 5.23	Balance de masa para los sólidos disueltos totales.	52
Figura 5.24	Balance de masa para los cloruros.	53
Figura 5.25	Diagrama de flujo del balance de masa para los sulfatos.	54
Figura 5.26	Diagrama de flujo del balance de masa para el plomo.	55
Figura 5.27	Configuración de influentes y efluentes para la Opción 1 de reuso de agua y minimización de aguas residuales.	61
Figura 5.28	Configuración de influentes y efluentes para la Opción 2 de reuso de agua y minimización de aguas residuales.	64

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Caracterización del efluente tratado biológicamente y normatividad vigente.	15
Tabla 3.2	Caracterización del efluente tratado fisicoquímicamente y normatividad vigente.	17
Tabla 4.1	Condiciones particulares de descarga de la planta.	21
Tabla 5.1	Determinación de caudales en los puntos de muestreo.	29
Tabla 5.2	Resultados de análisis fisicoquímicos por parámetro para las diferentes corrientes.	30
Tabla 5.3	Composición de los lodos del tratamiento fisicoquímico.	48
Tabla 5.4	Información relevante del balance volumétrico de agua.	49
Tabla 5.5	Indicadores para la evaluación del uso del agua sistema actual.	49
Tabla 5.6	Comparación efluente tratamiento biológico y agua de pozo.	56
Tabla 5.7	Comparación efluente tratamiento biológico y agua de pozo.	56
Tabla 5.8	Comparación agua de pozo y norma NOM-127-SSA1-1994.	57
Tabla 5.9	Comparación efluente de regaderas y agua de pozo.	57
Tabla 5.10	Comparación del efluente de lavandería y agua de pozo.	58
Tabla 5.11	Comparación efluente de lavandería y agua pozo.	59
Tabla 5.12	Comparación efluente lavado móviles y agua de pozo.	59
Tabla 5.13	Comparación del efluente tratado fisicoquímicamente (cisterna) y el efluente del lavado de plásticos.	60
Tabla 5.14	Comparación efluente cisterna-efluente tratamiento biológico.	60
Tabla 5.15	Información relevante del balance volumétrico de agua para la Opción 1 en comparación al sistema actual.	62
Tabla 5.16	Indicadores para la evaluación del uso del agua para la Opción 1 en comparación al sistema actual.	62
Tabla 5.17	Información relevante del balance volumétrico de agua para la Opción 2 en comparación al sistema actual.	64
Tabla 5.18	Indicadores para la evaluación del uso del agua para la Opción 2 en comparación al sistema actual.	65
Tabla 5.19	Resumen de la evaluación económica para las propuestas de reuso (5 años).	67
Tabla 5.20	Resumen de la evaluación económica para las propuestas de reuso (10 años).	68

## **RESUMEN**

El aumento en la capacidad de producción de plomo en la planta de Ciénega de Flores, aunado a la creciente preocupación a nivel mundial por el ahorro de agua y la minimización de aguas residuales, hicieron que la Empresa emprendiera la búsqueda de soluciones efectivas para reducir los consumos de agua y la generación de aguas residuales dentro de sus procesos productivos, con el fin de reducir costos de operación.

A través del tiempo la Empresa ha emprendido diversas acciones a favor del medio ambiente y del entorno laboral, a tal grado que hoy en día cuenta con la certificación de Industria Limpia y este estudio es parte del esfuerzo a favor de medio ambiente.

La planta de Ciénega de Flores cuenta con una planta para el tratamiento de las aguas residuales generadas (PTAR). Con la configuración actual la PTAR trata fisicoquímicamente un caudal promedio de 17,209 m<sup>3</sup>/mes, de los cuales aproximadamente el 82.38% se reciclan en el proceso industrial y el resto se dispone al ambiente a través de lagunas de infiltración. La planta enfrenta actualmente serios problemas debido a que el efluente tratado tiene altas concentraciones de sólidos suspendidos, sólidos y sales disueltas.

El presente estudio busca soluciones a los problemas anteriores mediante la identificación de alternativas que fomenten el reuso directo del agua y la minimización de las aguas residuales, enfocándose en las fuentes generadoras de contaminantes.

Además, se realizó la evaluación económica de las configuraciones propuestas, con el fin de valorar la factibilidad de su aplicación.

Finalmente, se presentan los resultados y conclusiones derivadas de este trabajo, al igual que las recomendaciones para futuros proyectos a realizar dentro de esta línea de investigación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Son pocas las experiencias referentes a la recuperación de los componentes de las baterías automotrices. A nivel internacional se tienen experiencias en países como Canadá, Estados Unidos, Isla Reunion (Francia) y un proyecto iniciado por países de la Unión Europea, denominado CLEANLEAD. En México, actualmente las baterías automotrices son colectadas y recicladas separando los componentes principales como el plomo y el plástico, para refinarlos y reprocesarlos, pero no así el electrolito, pues éste se neutraliza con hidróxido de magnesio y los lodos generados se disponen como residuos no peligrosos.

La Empresa en donde se realizó el presente proyecto se dedica a la fabricación y comercialización de baterías automotrices y cuenta con una planta de reciclaje ubicada en el municipio de Ciénega de Flores, Nuevo León, en donde se recuperan el plomo y el polipropileno contenidos en las baterías usadas. El propósito de la planta es recuperar dichas materias primas para posteriormente integrarlas en sus procesos productivos y así disminuir sus costos de manufactura.

Actualmente la planta cuenta con un sistema para el tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales, generadas principalmente en la sección denominada MA-51(molino de baterías), que le permite tratar mensualmente un volumen de 17,209 m<sup>3</sup> de los cuales 14,177 m<sup>3</sup> se reciclan en el proceso industrial y 3,151 m<sup>3</sup> se infiltran en el suelo mediante lagunas de infiltración. El sistema de tratamiento fisicoquímico consiste en procesos de neutralización (con hidróxido de magnesio), precipitación-coagulación (con coagulante MR-3000 y polímero SWT-1924) y sedimentación.

El sistema de tratamiento remueve de manera aceptable metales pesados (plomo, arsénico, mercurio, cadmio, cobre, cromo, zinc y níquel), nitrógeno total, fósforo total, grasas y aceites; sin embargo, en la actualidad el efluente tratado tiene un alto contenido de sólidos suspendidos totales y de sales, alcanzando valores que pueden superar los 1,085 mg/L para los sólidos suspendidos totales; lo cual constituye una preocupación para los responsables de la planta, al no cumplir con la normatividad vigente (NOM-ECOL-001-1996).

Por otro lado, la Empresa tiene planeado un aumento en la capacidad de producción de plomo, con lo cual de acuerdo a las expectativas de la planta, el volumen de agua a disponer en las lagunas de infiltración se incrementará en un 30% a partir del 2006; por tal razón, la Empresa busca una solución sustentable para tratar y reciclar toda el agua residual generada.

Debido al aumento en la capacidad de producción en la planta, el principal reto consiste en la remoción efectiva de las altas concentraciones de sales y el diseño de un sistema apropiado para el reuso del agua tratada que permita satisfacer los requerimientos de agua en la planta, además de ser económica y científicamente viable.

La finalidad del presente trabajo fue generar una estrategia para el reuso del agua que permitiera minimizar la generación de aguas residuales al reducir los volúmenes de agua fresca que ingresan al proceso, los volúmenes de agua residual a tratar, la cantidad de agua a disponer en las lagunas de infiltración y la concentración de contaminantes en el efluente a disponer. Adicionalmente, se incluye en este trabajo una valoración económica de dicha estrategia, que sirva como una herramienta que facilite la toma de decisiones a los responsables de la planta.

## **2. OBJETIVOS**

Los objetivos planteados en la realización del presente trabajo fueron:

1. Identificación y caracterización de influentes y efluentes del proceso industrial.
2. Configuración de un sistema alterno para el reuso de agua y la minimización de aguas residuales.
3. Evaluación económica de los sistemas alternos configurados.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Experiencias a nivel internacional en el reciclaje de baterías de plomo usadas.

En esta sección se explican brevemente, las tecnologías o procesos que algunos países están utilizando en el reciclaje de baterías ácidas de plomo para la recuperación de sus componentes.

##### 3.1.1 Experiencias en Canadá

En este país, actualmente, el 90% de las baterías ácidas de plomo son recicladas. El proceso comercial de reciclaje está diseñado para recuperar la pasta, rejillas y postes de plomo, el polipropileno y el sulfato de sodio anhidro. La pasta de plomo es una mezcla de sulfatos y óxidos de plomo.

Las principales etapas del proceso de reciclaje son:

1. Pre-molienda de las baterías para remover la solución de ácido sulfúrico.
2. Separación inicial del fierro por medio de un separador magnético.
3. Filtrado o tamizado húmedo para separar la pasta.
4. Separación del plomo metálico y plásticos en un separador hidrodinámico, por diferencia de densidades. El polipropileno flota en el agua mientras que el plomo se hunde. El agua usada en el separador hidrodinámico se almacena en tanques de sedimentación para ser reusada.

En este proceso, la pasta recuperada es tratada con una solución de carbonato de sodio, para desulfurizarla y convertir el sulfato de plomo a carbonato de plomo y sulfato de sodio. El carbonato de plomo se utiliza en la producción de plomo metálico, el proceso de fundición opera a menor temperatura (en comparación a la obtención de plomo a partir de sulfato de plomo) y sin emisiones de óxidos de azufre. Las rejillas y postes de plomo son tratados en un horno de fundición para producir plomo metálico, con un rendimiento del 90%. El polipropileno puede venderse directamente o mejorarse para producir pellets de alta calidad. La solución de sulfato de sodio se cristaliza y seca para producir sulfato de sodio en polvo, para la fabricación de detergentes (Natural Resources Canada, 2006).

##### 3.1.2 Experiencias en Estados Unidos

En Estados Unidos las baterías ácidas de plomo son recicladas para recuperar el plomo y el plástico (polipropileno). Las baterías usadas tienen la tasa más alta de reciclaje que cualquier producto vendido en los Estados Unidos debido a la facilidad para devolver la batería usada al comprar una batería nueva.

Las baterías automotrices son baterías ácidas de plomo y tienen una vida útil promedio de 4 años. El contenido de plomo es de 9.7 kilogramos por batería y pesan alrededor de 17.7 kilogramos.

Una batería ácida de plomo contiene una cubierta o caja de polipropileno, terminales y placas internas (positivas y negativas) de plomo, óxido de plomo en pasta, electrolito (que es una solución diluida de ácido sulfúrico en agua) y separadores de plástico. Las cajas de polipropileno son procesadas para producir nuevas cajas para baterías, el ácido del electrolito es neutralizado y tratado para ser descargado al drenaje o bien procesado para obtener sulfato de sodio, el cual es un polvo que se utiliza en la manufactura de detergentes para lavandería, textiles y vidrio (Miller, 2004).

##### 3.1.3 Europa (Proyecto CLEANLEAD)

Es un proyecto fundado por la Unión Europea en el cual participaron países como España, Reino Unido, Polonia, Portugal, Holanda, Republica Checa y Rumania. Este proyecto se

completó exitosamente en Abril del 2004 y su objetivo era proporcionar una opción de tecnología sustentable, con bajo consumo de energía y cero residuos, la cual permitiera mejorar substancialmente las operaciones de fundición de plomo. El proceso fue desarrollado para manejar eficientemente las baterías usadas, incluyendo el tratamiento del ácido drenado, la optimización de la etapa de fundición y el tratamiento hidrometalúrgico de la pasta. En la Figura 3.1 se observa un diagrama general del proceso del CLEANLEAD.

El consumo secundario de plomo ha aumentado debido a la creciente demanda de baterías ácidas de plomo para la industria automotriz, a los nuevos usos relacionados tales como los vehículos eléctricos y los vehículos híbridos, fuentes de almacenamiento de energía de energía solar y renovable, las baterías portátiles y auxiliares de sistemas de emergencia, etc.

La industria del reciclaje de baterías de plomo, enfrenta actualmente el reto de mejorar los procesos convencionales para eliminar la generación de residuos tóxicos (escorias, gases de emisión, etc.) y cumplir con estrictas normas ambientales.

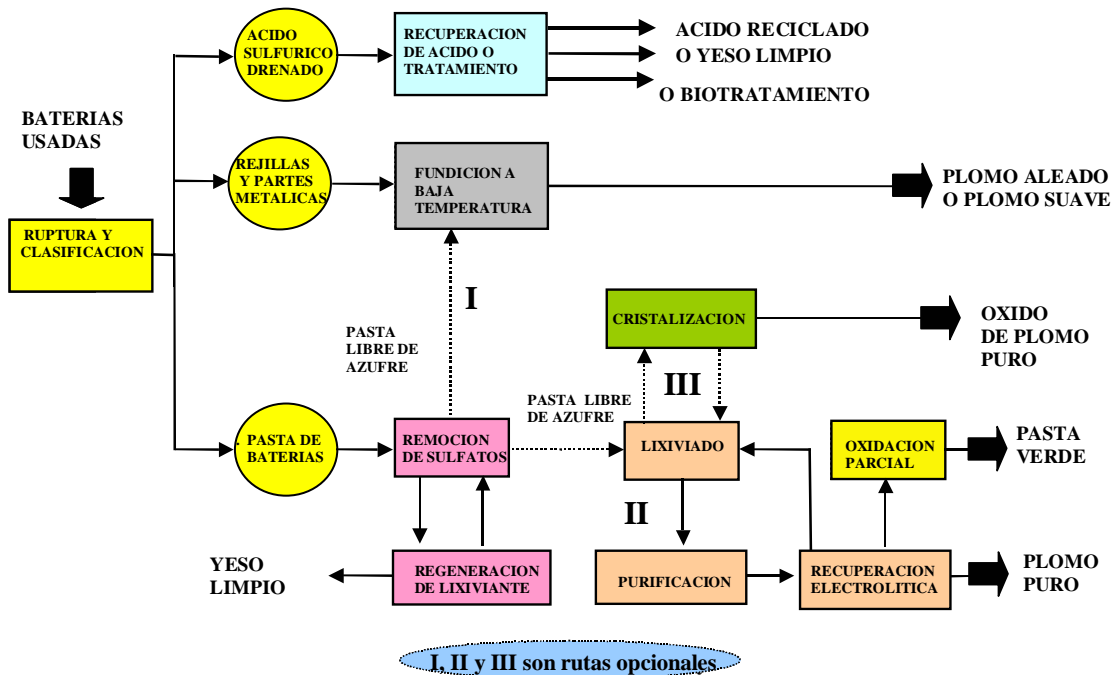


Figura 3.1 Diagrama conceptual del proceso de CLEANLEAD.

Fuente: CLEANLEAD Project, 2006.

### 3.1.3.1 Tratamiento para el ácido drenado

Este tratamiento no sólo previene la producción de lodos que posteriormente deben disponerse como residuos peligrosos, sino que además convierte al ácido en productos reusables. Dependiendo de la opción de proceso que se aplique, puede producirse yeso sintético comercial, ácido para baterías nuevas o emplear un biotratamiento para los efluentes.

Los procesos actuales convierten al ácido drenado (que contiene impurezas metálicas) en un lodo de desecho, que requiere disposición, al agregarle cal o hidróxido de sodio. La opción de tratamiento anterior tiene severos costos ambientales asociados. A diferencia del tratamiento

con hidróxidos, el proceso CLEANLEAD produce yeso comercial, que cumple con las especificaciones de materia prima en la industria de los tableros de yeso, como aditivo en la industria del cemento y también como cubierta en la preparación de pisos para recubrimiento, debido a que el proceso puede ser ajustado para obtener diferentes productos del yeso. Además de los beneficios ambientales, producir yeso comercial, en lugar de un lodo ácido, es un proceso económicamente atractivo.

El proceso electroquímico desarrollado puede producir ácido sulfúrico limpio y concentrado (30% peso), conveniente para llenar baterías nuevas. Esto se logró con una tecnología de electrodiálisis, la cual dio, una remoción eficiente de las impurezas metálicas. En la Figura 3.2 se muestra la celda de una membrana de electrodiálisis:

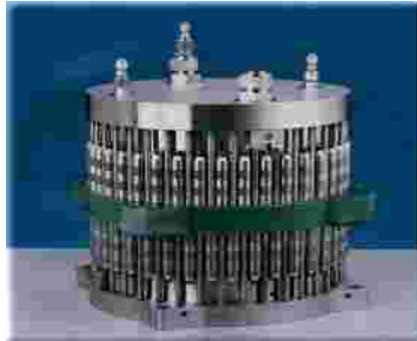


Figura 3.2 Celda de una membrana de electrodiálisis.  
Fuente: CLEANLEAD Project, 2006.

El proceso CLEANLEAD también incluye un biotratamiento del ácido drenado mezclado con otros efluentes alcalinos (lixiviados de rellenos, etc.) por medio de  $H_2S$  producido biológicamente, para remover las impurezas y dar un producto final no contaminado. En la Figura 3.3 se muestra un diagrama de la secuencia de este biotratamiento:

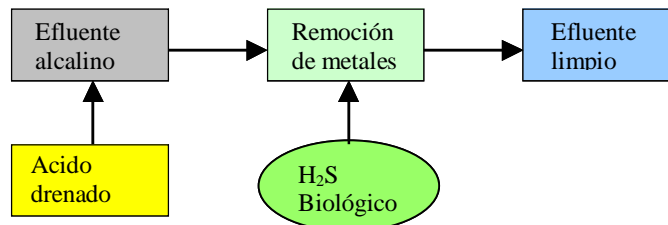


Figura 3.3 Diagrama de la secuencia de biotratamiento para el ácido drenado.  
Fuente: CLEANLEAD Project, 2006.

### 3.1.3.2 Optimización de las operaciones de fundición

Los métodos de fundición de la pasta desulfurizada fueron desarrollados como una alternativa a la fundición convencional. En pruebas realizadas en hornos rotarios con de 500 kilogramos, se han obtenido resultados muy positivos los cuales, se resumen a continuación:

1. Disminución de la temperatura de fundición por debajo de los  $900^{\circ}C$ .
2. El tiempo de fundición es de 3 a 4 veces menor.
3. Reducción de escorias entre un 65 y 75%.
4. Reducción en el volumen de polvo y baja emisión de  $SO_2$ .
5. Rendimiento en la producción de plomo por arriba del 75% de la carga másica.
6. Reducción en el consumo de reductores.
7. Producción de escoria estable de sílice.



Logros posteriores, en la prevención de la formación de escorias inestables están disponibles en la tecnología de CLEANLEAD. Como por ejemplo el proceso en el cual la escoria convencional inestable de sodio puede ser refundida en un horno de arco eléctrico. La refundición de la escoria en presencia de óxidos de hierro y arena, produce una escoria estable no tóxica de ferrosilicatos, confirmado a partir de pruebas realizadas en una unidad piloto de 80 kVA.

Otro proceso desarrollado usa la escoria de sulfato de sodio de un horno Isasmelt como flujo en horno rotatorio. En esta prueba la escoria funcionó tan bien como el flujo de carbonato de sodio que actualmente se utiliza, por lo cual puede reemplazarlo y reducir de esta manera, los costos de operación. En la Figura 3.4 se muestra la fotografía de un horno de Isasmelt:



Figura 3.4 Horno de Isasmelt.  
Fuente: CLEANLEAD Project, 2006.

La optimización a los procesos de fundición que considera el CLEANLEAD proporciona gran flexibilidad e importantes mejoras para satisfacer los requerimientos locales de operación.

Los beneficios derivados de la optimización de las operaciones de fundición son:

1. Producción de una escoria de ferrosilicato estable, que cumple con regulaciones ambientales actuales y futuras, además de que permite eliminar la generación de escorias de sodio tóxicas e inestables.
2. Eliminación o reducción substancial de la emisión de gas  $\text{SO}_2$ .
3. Disminución en el consumo de energía eléctrica y de los costos totales de operación.
4. Mejora en el desempeño del proceso y en el impacto ambiental de las operaciones de fundición.

### 3.1.3.3 Tratamiento hidrometalúrgico

Un nuevo proceso en la tecnología del CLEANLEAD comprende el tratamiento hidrometalúrgico de la pasta de la batería para obtener plomo puro. Este método es una alternativa superior a la fundición y produce cero residuos además de ser una tecnología sustentable de bajo costo. En este proceso la pasta es reducida y desulfurizada primero, para posteriormente alimentar a un proceso electrolítico de producción de plomo a bajo costo. La reducción se realiza añadiendo ácido drenado de la batería junto con pequeñas cantidades de sulfuro de plomo (en forma de mates, concentrados o humos), como agentes reductores, con lo cual disminuyen los costos y mejora la recuperación del plomo. La desulfuración se realiza con hidróxido de sodio, el cual se regenera en una etapa posterior, reduciendo el costo de consumibles y produciendo yeso valioso. La pasta desulfurizada es lixiviada con hidróxido de sodio a  $60^\circ\text{C}$  y la solución impregnada que contiene plomo disuelto, pasa a un proceso recuperación electrolítica de plomo en medio alcalino, el cual tiene un consumo de energía de

0.5 kWh/Kg de plomo y eficiencias cercanas al 100%. El proceso electrolítico desarrollado muestra ventajas técnicas y ambientales además de ofrecer bajos costos de operación en comparación a la tecnología convencional de fundición de plomo.

Como una alternativa a la recuperación electrolítica, el proceso CLEANLEAD también permite la producción de óxido de plomo a costo competitivo, lo cual es muy conveniente para la manufactura de nueva pasta para baterías o en otras aplicaciones industriales.

De manera general el proceso CLEANLEAD representa una innovación radical y una solución definitiva a los problemas que la industria del uso secundario de plomo, actualmente está enfrentando en Europa y el mundo entero. Las nuevas tecnologías manejan eficientemente todos los componentes de la batería (ácido drenado, plomo metálico y pastas) dando la mejor solución en cada caso.

El proceso CLEANLEAD da versatilidad y flexibilidad, puede ser implementado por completo o paso a paso además de ser fácilmente adaptado a las condiciones o requerimientos industriales locales.

### **3.1.4 Isla Reunion (Francia)**

Isla Reunion, es una pequeña isla que pertenece a Francia y que está ubicada en el Océano Índico (con una población de 700,000 habitantes y 250,000 vehículos). En Isla Reunion cada año se reemplazan 120,000 baterías. Esta isla cuenta actualmente con una planta de reciclaje de baterías ácidas de plomo. Anterior a Septiembre del 2001 se reciclaban menos del 5% de las baterías usadas, enviándolas de regreso a Francia. Por lo general, la mayoría de las baterías usadas se tiraban en la isla.

Debido a que las baterías usadas representaban un daño a la ecología de la isla y una fuente de residuos peligrosos, en Septiembre del 2001 se instaló una planta de reciclaje en La Possession, localidad cercana a Saint Denis, capital de Isla Reunion. La compañía VERDI en cooperación con el gobierno (incluyendo a DRIRE, Direction Regional de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement) y los importadores locales de baterías, decidieron construir una planta que fuera compatible con el tamaño de la isla y que cumpliera con los estándares ambientales.

La forma en que opera esta estructura es la siguiente, los importadores de baterías de la isla se subscriben a la asociación de acuerdo al número de baterías que importan. La asociación paga una cuota (o subsidio) al reciclador local VERDI. VERDI recibe las tarimas de baterías usadas y conservan el plomo, en este caso VERDI asume la responsabilidad de cumplir con la legislación ambiental bajo la supervisión de DRIRE. El diagrama de flujo de la operación de reciclaje en la planta de VERDI se muestra en la Figura 3.5.

Las baterías usadas son almacenadas antes de separar los componentes. La separación de los componentes se realiza por medio de sierras o de cualquier otro equipo de separación. Las placas y la pasta de plomo se reducen usando aditivos químicos en un horno rotatorio con capacidad de 3,000 kilogramos. Posteriormente, el plomo crudo se transfiere a un horno de refinación donde se vuelve a fundir y recibe una limpieza mínima, antes de ser moldeado en lingotes de 25 kilogramos y vendido para exportación. Los gases de emisión provenientes de los hornos, pasan a través de un ciclón y un filtro, mientras que las escorias se disponen en rellenos.

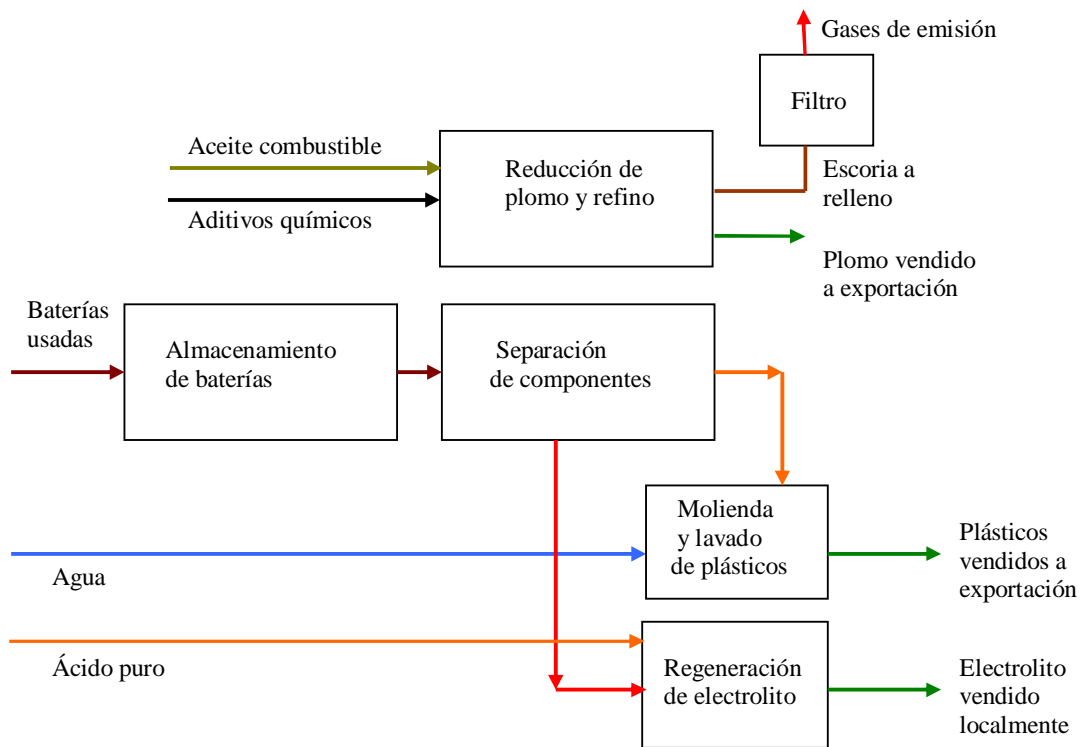


Figura 3.5 Diagrama de flujo de la operación de reciclaje de baterías usadas en la planta de VERDI. Fuente: Dross Engineering, 2001.

En el caso de los plásticos, estos son molidos y lavados antes de venderse para exportación. En este proceso se añade ácido puro para regenerar el electrolito recuperado y posteriormente el electrolito se vende localmente. De manera general, la planta tiene una capacidad de procesar entre 145,000 y 150,000 baterías al año con una producción de aproximadamente 1,000 toneladas de plomo.

Con el esquema de reciclaje antes descrito, es posible convertir residuos peligrosos, como son las baterías de plomo usadas, en una fuente de materias primas valiosas (Dross Engineering, 2001).

### 3.2 Proyectos convencionales de reuso de agua

Por conveniencia a menudo los proyectos convencionales de reuso de agua son agrupados de acuerdo a 3 estrategias para el ahorro de agua “fresca” y la “minimización” de aguas residuales: reuso en cascada, minimización de residuos y reducción en la fuente. El reuso en cascada involucra el reuso directo de agua con poco tratamiento. La minimización de residuos se refiere a los esfuerzos para reducir los requerimientos de agua “fresca” fuera del proceso, tales como usar limpieza mecánica más que agua para reducir significativamente la generación de agua residual. Por último, la reducción en la fuente intenta reducir la necesidad de agua que tiene el proceso; por ejemplo, las etapas de lavado a contra corriente pueden reducir grandemente la demanda de agua fresca en las operaciones de enjuague o lavado.

El método convencional para cumplir las metas de reuso de agua involucra varios pasos o etapas claves que son:

1. Establecer los alcances o límites del proyecto.
2. Identificar las fuentes de agua y los sumideros.
3. Identificar y evaluar los factores que limitan el reuso de agua.

#### 4. Preparar un diseño ingenieril y una evaluación económica para la red de uso de agua.

Al elaborar un diseño de una red de uso de agua y realizar la evaluación económica también se debe considerar:

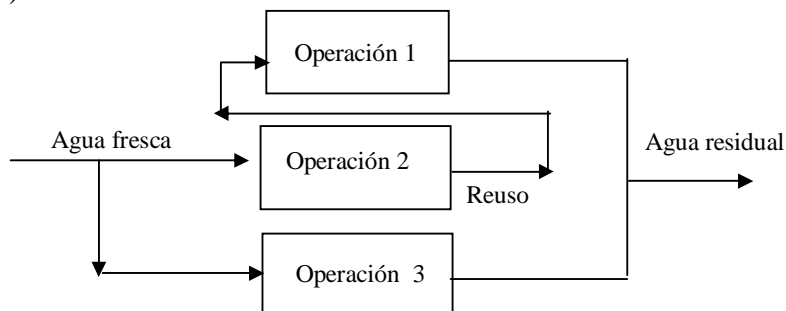
1. La efectividad en costos: ¿Es realmente efectivo reusar el agua? ¿Realmente los ahorros por reducir el consumo de agua fresca y el volumen a tratar de agua residual, superan el aumento en capital y en los costos de operación?. ¿Cuál es el período de retorno de la inversión?. En este punto es importante incluir todos los ahorros al justificar un proyecto de reuso de agua.
2. La calidad del agua: ¿Cómo se afecta la calidad del agua con el uso de corrientes de agua más contaminadas?. ¿Las fluctuaciones periódicas en la calidad del agua ocasionan fluctuación en la calidad del producto?
3. La complejidad de la operación: ¿ Se harán más complejas la operaciones en la planta con el reuso de agua?. Cualquier incremento en el reuso de agua incrementará los costos de operación y de entrenamiento del personal por el incremento en la complejidad.
4. Las regulaciones ambientales: ¿Influenciarán las modificaciones propuestas los límites actuales de descarga ?. Al reusar el agua se genera un menor volumen de agua residual con una concentración mayor de contaminantes. Los cambios de flujos o concentraciones de contaminantes del efluente pueden ocasionar reducciones en los flujos o concentraciones permitidas para el efluente.

La tecnología del “water pinch” tiene un papel importante en los proyectos de reuso de agua pues complementa la experiencia pasada, al identificar el mínimo flujo de agua fresca y señalar las oportunidades de reuso. Esta tecnología no se opone a los proyectos convencionales de reuso de agua sino que es una herramienta que identifica, valida y refuerza el diseño de la red de eficiente de uso de agua para el éxito del proyecto mismo.

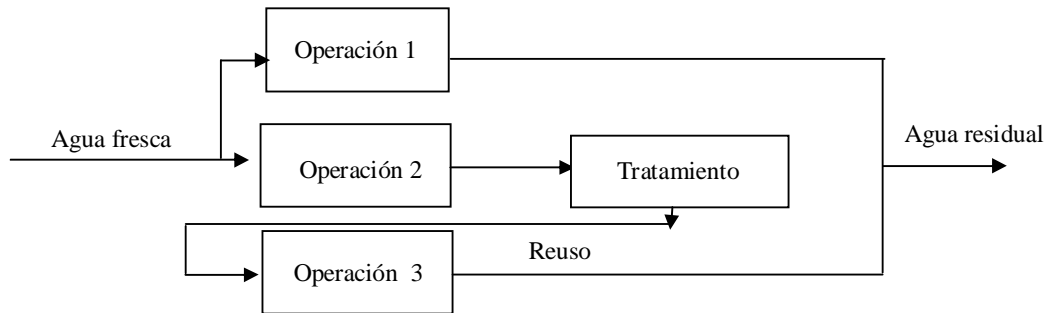
### 3.3 Estrategias para el reuso del agua utilizadas por “water pinch”

Las tres estrategias más comunes para el reuso del agua y la minimización del agua residual utilizadas por la tecnología del “water pinch” son: el reuso, el tratamiento/reuso y el tratamiento/reciclaje. El tratamiento, a diferencia del reuso y del reciclaje implica, el manejo del agua residual por algún proceso de tratamiento (sea fisicoquímico o biológico). En los siguientes diagramas, se muestra la configuración para cada una de estas estrategias, en donde puede observarse directamente la diferencia entre ellas:

#### a) Reuso



## b) Tratamiento/reuso



## c) Tratamiento/reciclaje

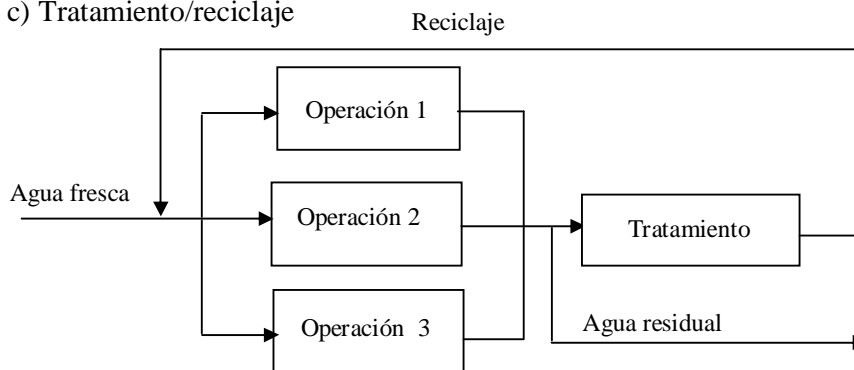


Figura 3.6 Configuración de estrategias de reuso, tratamiento/reuso y tratamiento/reciclaje. Fuente: Mann G. J. et al, 1999.

Un proyecto de reuso de agua es un esfuerzo sistemático para aumentar el reuso del agua dentro de una planta, aplicando métodos convencionales. El uso de la tecnología del water pinch en proyectos de reuso de agua no reemplaza a los principios fundamentales del reuso, por el contrario, esta tecnología proporciona los medios o herramientas para identificar primero un objetivo en el reuso del agua y posteriormente señala las oportunidades claves de reuso, que permitirán diseñar una red eficiente de uso de agua y lograr el mínimo flujo de agua posible (Mann G. J. et al, 1999).

### 3.4 Conceptos de la tecnología “water pinch”

La tecnología “water pinch” es un tipo de integración de intercambio de masa la cual involucra operaciones donde se usa agua. El desarrollo del campo de la tecnología del water pinch evolucionó a partir del concepto de la integración de procesos, rama importante de la ingeniería de procesos que surgió en los años 70's y está basada en el análisis, la síntesis y la retroalimentación de los procesos usando principios de termodinámica (intercambio de calor) y de balances de materia (intercambio de masa).

A nivel de procesos industriales la integración de procesos permite integrar el uso de la materia y de la energía además de minimizar las emisiones de contaminantes y de residuos. Un buen diseño ingenieril, emplea esta herramienta, al integrar de manera eficiente los recursos dentro de sus operaciones.

La tecnología del “water pinch”, está incluida en la integración de procesos, al ser un tipo de intercambio de masa entre corrientes de agua que entran y salen de las operaciones (Mann G. J. et al, 1999).

Esta tecnología permite resolver varias preguntas durante la retroalimentación de instalaciones existentes o durante el diseño de nuevas redes de uso de agua en procesos de manufactura, las cuales incluyen:

1. ¿Cuál es el máximo objetivo de reuso de agua y el mínimo objetivo de generación de aguas residuales en el proceso de manufactura?
2. ¿Cómo puede diseñarse una nueva red de uso de agua? ó ¿cómo retroalimentar la existente para cumplir con estos objetivos?
3. ¿Cuál es el mínimo flujo objetivo de agua a tratar en el sistema de tratamiento de efluentes del proceso de manufactura?
4. ¿Cómo se puede diseñar un nuevo sistema de tratamiento de efluentes o retroalimentar el existente para lograr el mínimo flujo de agua a tratar?
5. ¿Cómo puede modificarse el proceso de manufactura para maximizar el reuso de agua y minimizar la generación de agua residual?

#### **3.4.1 Etapas en la tecnología del “water pinch”**

Para poder aplicar esta tecnología es necesario antes realizar las siguientes etapas:

1. Análisis: Consiste en identificar primero cuál es el mínimo consumo de agua fresca y cuáles son las operaciones en donde se generan aguas residuales.
2. Síntesis: En esta etapa se realiza el diseño de una red de uso de agua que cumpla con los objetivos ya identificados, para los flujos de agua fresca y agua residual a través de estrategias como son el reuso, la regeneración y el reciclaje.
3. Retroalimentación: Por último, modificar la red (o configuración existente de uso de agua) para maximizar su reuso y minimizar la generación de residuos realizando cambios al proceso.

#### **3.4.2 Representación de la corriente de proceso concentrada en contaminante para una operación de uso de agua**

En la tecnología de “water pinch” se define una operación de uso de agua como una fuente de contaminante la cual requiere de agua. Los contaminantes incluyen a parámetros físicos como los sólidos suspendidos, los sólidos disueltos o especies químicas, así como otras propiedades como el pH, la conductividad, etc.

El principal reto en el análisis del “water pinch” es considerar todas las operaciones de uso de agua en una sola instalación o planta, de manera simultánea, aún y cuando puedan involucrar partes o equipos que no están relacionados. Un problema puede involucrar una serie de operaciones químicas y mecánicas. Además, existen factores tales como los límites de solubilidad, la reactividad y otras condiciones que pueden limitar el reuso de agua.

Al considerar los mínimos requerimientos de “agua fresca” y las opciones de reuso de agua en varias operaciones, de manera simultánea, se debe aplicar un modelo común para cada operación. Este modelo, denominado “modelo de la corriente concentrada en contaminante”, en su forma más simple, representa a la operación como el contacto a contra corriente entre una corriente concentrada en contaminante y una corriente de agua, tal como se muestra en la Figura 3.7:

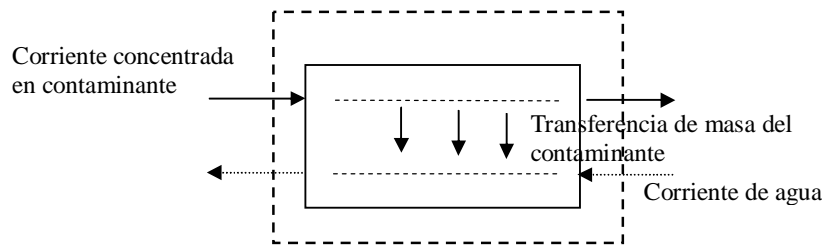


Figura 3.7 Contacto a contra corriente entre una corriente concentrada en contaminante y una corriente de agua. Fuente: Mann G. J. et. al, 1999.

La remoción de contaminante dentro de la operación se representa como una carga másica fija de contaminante transferida desde la corriente de proceso (o corriente concentrada en contaminante) hacia la corriente de agua, en un contacto a contra corriente. La carga másica del contaminante transferida hacia la corriente de agua es igual a la masa transferida desde la corriente concentrada hacia la corriente de agua, en un intervalo de tiempo (comúnmente expresada en kilogramos por hora, kg/hr).

El modelo de la corriente de proceso concentrada en contaminante, permite analizar los mínimos requerimientos de agua de un proceso de manufactura al tratar todas las operaciones de uso de agua como un “sistema integrado”. El desarrollo de este modelo permite determinar el “pinch” de agua fresca (concepto similar a la “temperatura de pinch” o “punto pinch” en la integración de calor) el cual define la concentración de contaminante por arriba de la cual no se debe usar agua fresca y se debe depender en el reuso de agua.

El incorporar el concepto de “pinch” de agua fresca en el análisis, síntesis y retroalimentación en operaciones de uso de agua, permite maximizar el reuso de agua y minimizar la generación de aguas residuales.

El modelo de la corriente concentrada en contaminante proporciona además la guía conceptual para desarrollar sistemas distribuidos para el tratamiento de efluentes que logren los mínimos flujos de agua a tratar. En los sistemas de tratamiento de efluentes, las corrientes de agua residual generadas por las operaciones de uso de agua son corrientes concentradas en contaminante, la meta es remover los contaminantes por tratamientos, más que por transferencia de contaminantes hacia el agua “fresca” (Mann G. J. et al, 1999).

### 3.4.3 Concentraciones limitantes

El modelo de la corriente concentrada en contaminante, es un método muy conveniente para analizar las operaciones industriales en donde se usa agua, ilustrando la transferencia de masa, desde una corriente de proceso concentrada en contaminante hacia una corriente de agua. En este modelo, el contaminante se transfiere desde la fase concentrada en contaminante hacia la corriente de agua y se representan los límites de la concentración del mismo en la corriente de agua, a la entrada y a la salida, como las concentraciones limitantes a la salida y a la entrada para la corriente de proceso, respectivamente. Las únicas condiciones del modelo son que la corriente de agua que entre a la operación de uso de agua tenga una concentración de contaminante menor que la concentración limitante de salida para la corriente de proceso  $C_{i,out}^{lim}$  y que la concentración del contaminante para el agua que deja la operación, sea menor que la de la entrada para la corriente de proceso  $C_{i,in}^{lim}$ .

Como en muchos casos la operación de uso de agua no consiste de una corriente de agua en contacto con una corriente de proceso concentrada en contaminante, dentro de una unidad en un arreglo a contra corriente, los límites de concentración a la entrada y salida de la operación, se representan como una corriente de proceso concentrada en contaminante, “aparente” o “imaginaria”. La corriente de proceso “imaginaria” refleja los límites de concentración del contaminante para el reuso de agua. La concentración del contaminante a la entrada y salida de la operación de uso de agua debe ser menor que las concentraciones limitantes. En la Figura 3.8 se observa un diagrama de las concentraciones limitantes de contaminante representadas en el modelo de transferencia de masa:

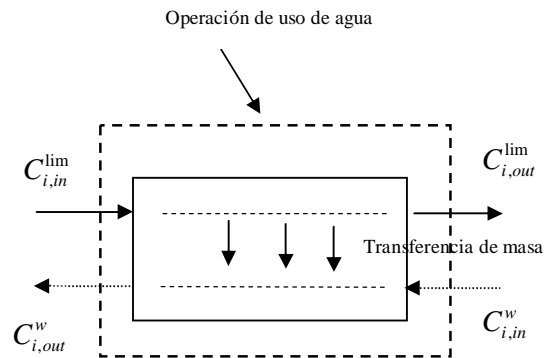


Figura 3.8 Representación de las concentraciones limitantes de contaminante en el modelo de transferencia de masa. Fuente: Mann G. J. et al, 1999.

En la Figura anterior  $C_{i,in}^w$  y  $C_{i,out}^w$  representan las concentraciones del contaminante, en la corriente de agua a la entrada y salida de la operación.  $C_{i,in}^{lim}$  y  $C_{i,out}^{lim}$  son las concentraciones limitantes del contaminante, para la corriente de proceso, a la entrada y salida de la operación, respectivamente (Mann G. J. et al, 1999).

La tecnología del “water pinch” hace uso de este modelo como herramienta para plantear y resolver los problemas de redes de uso de agua (que minimicen el consumo de agua y la generación de contaminantes) vía gráfica o mediante optimización matemática, en un sistema de uno o varios contaminantes.

#### 3.4.4 Regeneración, cambios de flujo y sistemas multicontaminantes

El análisis del “water pinch” es capaz de evaluar una amplia variedad de operaciones de uso de agua que no se ajustan en un modelo simple de “corriente de proceso concentrada en contaminante” y que a menudo son vistas en la industria. El análisis del “water pinch” es suficientemente flexible para tratar con operaciones de uso de agua en donde los flujos son difíciles de cuantificar, es decir, aquellas donde existan cambios (como por ejemplo por pérdidas de agua) o restricciones en el flujo (flujos fijos).

La tecnología del “water pinch” puede utilizarse para analizar procesos de regeneración, también llamados “procesos de tratamiento de aguas” o “procesos de recuperación de aguas”. El contaminante es removido de la corriente de agua para permitir el reuso, lo cual origina ahorros de agua “fresca” y reducción de agua “residual”.

Esta tecnología ayuda a determinar las condiciones óptimas de operación para un proceso de regeneración (como por ejemplo el flujo óptimo de regeneración y la concentración de regeneración del contaminante), a diseñar y a retroalimentar la operación de uso de agua, involucrando estrategias como el reuso, la regeneración y el reciclaje.



Además de señalar los cambios a proceso o procesos de retroalimentación que maximizan el reuso de agua y minimizan la generación de aguas residuales en un proceso de manufactura, la tecnología del “water pinch” proporciona los medios para manejar la presencia de factores múltiples que afectan la calidad del agua (por ejemplo múltiples contaminantes) y limitan el reuso de la misma (Mann G. J. et al, 1999).

### 3.5 Manejo de las aguas residuales en la planta Ciénega de Flores

La Empresa tiene actualmente dos plantas de tratamiento de aguas residuales, en donde se tratan en promedio, 18245 m<sup>3</sup>/mes. La planta de tratamiento biológico trata 1,036 m<sup>3</sup>/mes de aguas residuales provenientes de sanitarios y del comedor. La planta de tratamiento fisicoquímico trata 17,209 m<sup>3</sup>/mes de aguas residuales de las diferentes operaciones industriales.

#### 3.5.1 Planta de tratamiento biológico

La planta de tratamiento biológico trata los efluentes provenientes de las áreas de sanitarios y comedor de la planta (aguas sanitarias). El tipo de tratamiento utilizado es un proceso biológico de lodos activados, diseñado para tratar 43m<sup>3</sup> diarios de agua, que representan un flujo continuo de aproximadamente 0.5 lt/s.

En promedio la planta trata mensualmente un flujo de 1036 m<sup>3</sup>, de los cuales 755 m<sup>3</sup> son enviados directamente a la laguna de agua ácida. Actualmente la planta no opera de manera continua y el efluente tratado se mezcla con los demás efluentes de la planta, en la laguna de agua ácida, para ser tratado en la planta de tratamiento fisicoquímico.

La Figura 3.9 representa el diagrama de flujo para la planta de tratamiento biológico, en donde se observa la secuencia de operaciones del tratamiento:

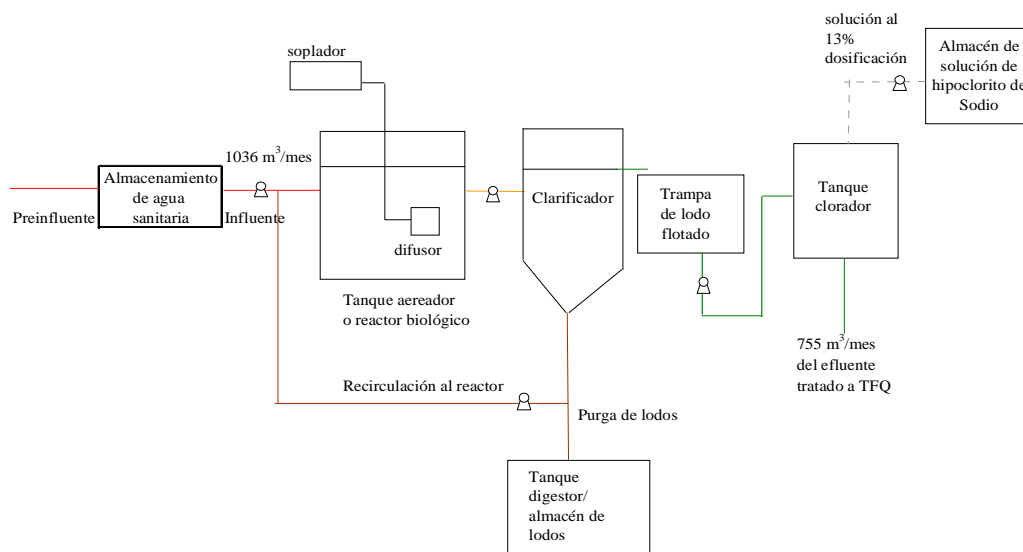


Figura 3.9 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento biológico.

En la Tabla 3.1 se resume el promedio observado en los análisis del efluente tratado y la normatividad vigente.

Tabla 3.1 Caracterización del efluente tratado biológicamente y normatividad vigente.

Parámetro	NOM-ECOL-001-1996 <sup>(1)</sup>	Parámetro	ETB
Temperatura °C	40	Temperatura °C	22.40
pH	5-10	pH	7.70
Densidad (g/ml)	NR*	Densidad (g/ml)	1.001
Conductividad eléctrica (mS/cm)	NR*	Conductividad eléctrica (mS/cm)	4.79
SO <sub>4</sub> (mg/L)	NR*	SO <sub>4</sub> (mg/L)	1,185.01
Cl (mg/L)	NR*	Cl (mg/L)	467.94
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	Sólidos sedimentables (ml/l)	0.1-0.5
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	20 <sup>(2)</sup>	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	28.70
Sólidos disueltos totales (mg/L)	NR*	Sólidos disueltos totales (mg/L)	3,739.46
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub> (mg/L)	20 <sup>(2)</sup>	Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	128.20
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	240 <sup>(2)</sup>	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	3-150
Huevos de helminto (h/l)	<1 <sup>(2)</sup>	Huevos de helminto (h/l)	ND*
Pb (mg/L)	0.50	Pb (mg/L)	<0.182
As (mg/L)	0.20	As (mg/L)	<0.1
Cd (mg/L)	0.20	Cd (mg/L)	<0.1
Cr (mg/L)	1	Cr (mg/L)	<0.1
Cu (mg/L)	4	Cu (mg/L)	<0.1
Fe (mg/L)	NR*	Fe (mg/L)	<0.183
Hg (mg/L)	0.010	Hg (mg/L)	<0.1
Ni (mg/L)	2	Ni (mg/L)	<0.1
Zn (mg/L)	10	Zn (mg/L)	<0.154
Ca (mg/L)	NR*	Ca (mg/L)	57
Mg (mg/L)	NR*	Mg (mg/L)	15
Na (mg/L)	NR*	Na (mg/L)	56
Cianuros (mg/L)	2	Cianuros (mg/L)	<0.01
S total (mg/L)	NR*	S total (mg/L)	89
Fósforo total (mg/L)	20	Fósforo total (mg/L)	<1.004
Nitratos (mg/L)	NR*	Nitratos (mg/L)	46
Nitrógeno total (mg/L)	40	Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	38
Grasas y aceites (mg/L)	15 <sup>(2)</sup>	Grasas y aceites (mg/L)	<1.43

<sup>1</sup> Valores tomados de la norma NOM-001-ECOL-1996 (Límites de descargas de contaminantes en embalses naturales y artificiales para uso en riego agrícola, promedio mensual).

<sup>2</sup> Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual).

NR\* (no regulado), \* ND (no disponible), ETB (Efluente del tratamiento biológico).

De la tabla anterior se observa que existen parámetros que no están regulados por la normatividad. Los sulfatos, cloruros, sólidos disueltos se encuentran en altas concentraciones, al igual que el calcio, sodio y el azufre total. Respecto al mercurio el valor reportado de <0.1 mg/L no es representativo pues éste es el límite de detección del equipo utilizado para su determinación.

### 3.5.2 Planta de tratamiento fisicoquímico

Para el manejo de las aguas residuales industriales, generadas en cada una de las operaciones del proceso industrial, la Empresa cuenta con una planta de tratamiento fisicoquímico, en la cual se tratan las descargas de las mismas, para su posterior reuso y disposición.

La planta de tratamiento fisicoquímico opera de lunes a domingo y trata en promedio un volumen mensual de 17209 m<sup>3</sup>, de los cuales aproximadamente el 4.39% corresponde al

efluente de agua tratada biológicamente que es descargado directamente a la laguna de agua ácida, para ser tratado, junto con los demás efluentes de aguas residuales.

En la Figura 3.10 se presenta el diagrama de flujo de la planta de tratamiento fisicoquímico:

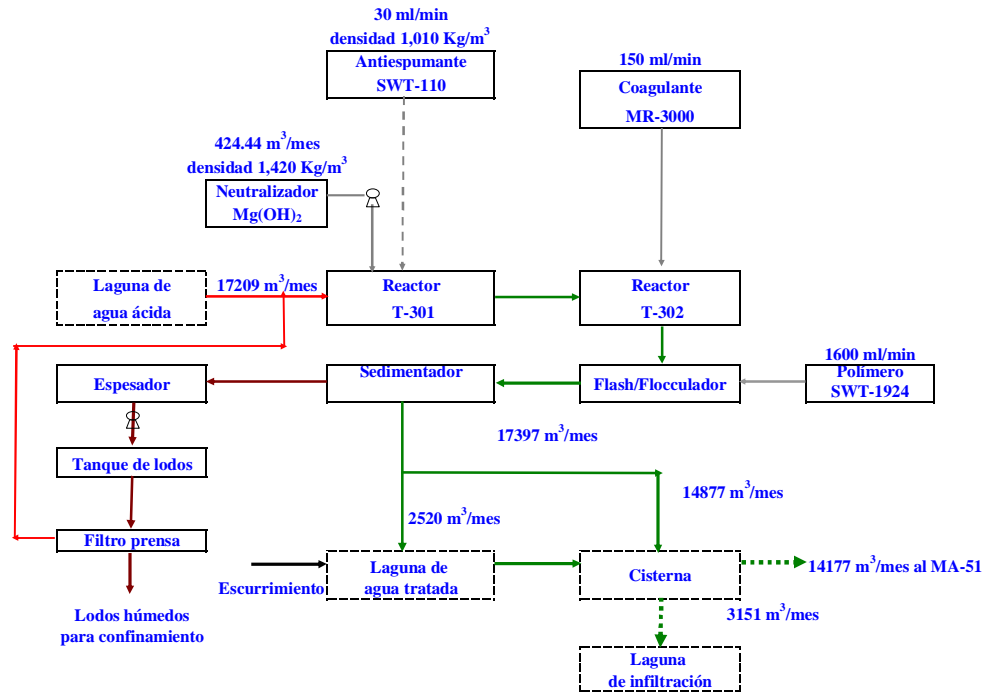


Figura 3.10 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento fisicoquímico.

En el diagrama anterior se observa que el tipo de tratamiento fisicoquímico es un sistema de neutralización-coagulación-floculación-sedimentación. Primero se añade el químico para neutralizar el efluente de la laguna de agua ácida, en este caso, el hidróxido de magnesio en solución (densidad 1,420 kg/m<sup>3</sup>) y posteriormente el antiespumante (SWT-110) y el coagulante (MR-3000). Como última etapa para completar el proceso de coagulación/floculación, se adiciona el polímero (SWT-1924), el cual ayuda a la floculación.

Del efluente tratado, 14177 m<sup>3</sup>/mes se reciclan directamente en el molino de baterías (sección MA-51) mientras que el resto, aproximadamente 3,151 m<sup>3</sup>/mes se disponen en lagunas de infiltración. Con esta configuración de operación, el esquema actual permite reusar solamente en promedio, el 82.38% del total de agua tratada.

La Tabla 3.2 resume el promedio observado en los análisis del efluente tratado y la normatividad vigente.

De los valores indicados en la Tabla 3.2, se observa que hay parámetros que no están regulados por las condiciones particulares de descarga ni por la normatividad vigente. Este efluente tiene altas concentraciones de sulfatos, cloruros, sólidos disueltos, nitratos, fierro, calcio, magnesio, sodio y azufre total. Las concentraciones de sólidos suspendidos y ocasionalmente de plomo, exceden los límites establecidos por las condiciones particulares de

descarga. La alta concentración de magnesio (2,837.18 mg/L) en el efluente tratado fisicoquímicamente es resultado de la adición del hidróxido de magnesio para la neutralización.

Tabla 3.2 Caracterización del efluente tratado fisicoquímicamente y normatividad vigente.

Parámetro	*CPD	NOM-001-ECOL-1996 <sup>(1)</sup>	ETFQ
Temperatura °C	NR	40	35.25
pH	5-10	5-10	7.50
Densidad (g/ml)	NR	NR	1.13
Conductividad eléctrica (mS/cm)	NR	NR	53.53
SO <sub>4</sub> (mg/L)	NR	NR	28,461.22
Cl (mg/L)	NR	NR	510.09
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	150	75	712
Sólidos disueltos totales (mg/L)	NR	NR	184,733.78
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub> (mg/L)	150	75	344.25 <sup>(2)</sup>
Pb (mg/L)	0.50	0.50	<0.76
As (mg/L)	0.20	0.20	<0.1
Cd (mg/L)	0.20	0.20	<0.1
Cr (mg/L)	1	1	<0.1
Cu (mg/L)	4	4	<0.1
Fe (mg/L)	NR	NR	0.61
Hg (mg/L)	0.01	0.010	<0.1
Ni (mg/L)	2	2	0.51
Zn (mg/L)	10	10	0.29
Ca (mg/L)	NR	NR	44.32
Mg (mg/L)	NR	NR	2,837.18
Na (mg/L)	NR	NR	547.90
CN (mg/L)	2	2	0.20
S total (mg/L)	NR	NR	5,555.92
Fósforo total (mg/L)	20	20	<0.1675
Nitratos (mg/L)	NR	NR	0.71
Nitrógeno total (mg/L)	40	40	12 <sup>(3)</sup>
Grasas y aceites (mg/L)	15	15	2.67

<sup>1</sup> Valores tomados de la norma NOM-001-ECOL-1996 (Límites descargas de contaminantes en embalses naturales y artificiales para uso en riego agrícola, promedio mensual).

<sup>2</sup> Demanda Química de Oxígeno en lugar de Demanda Bioquímica de Oxígeno.

<sup>3</sup> Nitrógeno Kjeldhal en lugar de Nitrógeno total.

\* CPD (Condiciones particulares de descarga, promedio mensual), \*NR (No regulado).

Con referencia a la concentración de mercurio en el efluente tratado, el valor reportado de <0.1 mg/L no es representativo, pues es el límite de detección del equipo de análisis.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, el propósito del presente trabajo fue la realización de una propuesta de reuso de agua que le permitiera a la planta reducir sus consumos de agua fresca (agua potable y de pozo), minimizar la generación de sales y de aguas residuales y mejorar la disposición de las aguas residuales tratadas. El efluente tratado fisicoquímicamente está regulado por las condiciones particulares de descarga, sin embargo no las cumple porque tiene altas concentraciones de sólidos suspendidos, además de sólidos disueltos y sales, que no están regulados, pero que ocasionan daños a tuberías y equipo de bombeo y que pueden significar un riesgo de contaminación del acuífero de la zona, potencialmente por metales pesados, los cuales no son removidos en su totalidad durante el tratamiento fisicoquímico.

#### **4. METODOLOGÍA**

El trabajo de investigación comenzó en el mes de Noviembre del 2005 y terminó en el mes de Junio del 2006, abarcando varias etapas, desde la identificación de corrientes de agua y de agua residual en la planta, hasta la presentación de las opciones de reuso de agua a la Empresa. A continuación se describe cada etapa de la presente investigación así como una breve discusión de las principales observaciones y resultados obtenidos en cada una.

##### **4.1 Identificación de corrientes de agua y de agua residual en la planta**

Primeramente se integró un diagrama de flujo con las principales operaciones y los principales influentes y efluentes de agua de la planta. Para tal propósito, se realizaron varias visitas guiadas con personal de la planta, siguiendo los flujos de agua, comenzando con las fuentes de alimentación, luego el molino de baterías (en la sección del MA-51), las descargas de efluentes de aguas residuales, y las plantas de tratamiento biológico y fisicoquímico. La información se obtuvo en varias visitas y recorridos en áreas claves como son: la sección MA-51 con sus correspondientes operaciones, el área de plásticos, el lavado de móviles (montacargas, barredoras) y de transportes (trailers y thortons), la fosa multiusos, la laguna de agua ácida, las plantas de tratamiento biológico y fisicoquímico, además de las lagunas de agua tratada y de infiltración.

El diagrama generado se presentó al personal clave de la planta y una vez aprobado sirvió como base para determinar, también junto con dicho personal, los puntos necesarios para el monitoreo de caudales y la toma de muestras. Las operaciones identificadas en el diagrama son las principales operaciones de uso de agua en todo el proceso de reciclaje.

La información sobre el lavado de transportes no se integró en los balances (volumétricos de agua y de masa por constituyente) ni en las propuestas de reuso de agua del presente trabajo, debido a que el personal informó que esta operación se realizará fuera de las instalaciones de la planta.

##### **4.2 Selección de puntos de muestreo**

Los puntos de muestreo se seleccionaron estratégicamente. El criterio usado para su selección fue que los influentes y efluentes de todas las operaciones del proceso industrial identificadas, en donde se usa agua y hay transferencia de masa, pudieran ser monitoreados, para determinar la magnitud de los caudales y las concentraciones de contaminantes.

##### **4.3 Determinación de flujos en los puntos de muestreo**

La determinación de caudales se realizó mediante recopilación de información histórica, estimación de caudales (con base en registros de operación disponibles o en registros diseñados para tal propósito) y medición de los flujos en ciertos puntos. Para las mediciones se utilizó un medidor de flujo ultrasónico portátil, modelo DCT7088, marca Polysonics. La información generada en esta etapa se utilizó en la integración de los balances de agua y de masa de los contaminantes.

Los caudales en los puntos 1,2,4,5,6,7 y 8, se obtuvieron por mediciones con el equipo ultrasónico. La información y el análisis estadístico de las mismas se muestra a detalle en el

Anexo 1. Para los demás puntos (3 y del 9 al 18) los caudales fueron estimados, como se describe a continuación:

1. Efluente de tratamiento biológico: se registraron diariamente, durante casi un mes, las lecturas de los medidores instalados en las descargas de agua tratada a laguna de agua ácida y a riego escorias y el nivel de agua tratada en un tanque de almacenamiento. El volumen de agua en el tanque fue calculado conociendo el tirante de agua y el diámetro del tanque. La información anterior sirvió para calcular las descargas máximas por día, que se promediaron para obtener la descarga diaria promedio en  $\text{m}^3/\text{día}$ . La descarga promedio se multiplicó por 30 días para convertir el flujo promedio a  $\text{m}^3/\text{mes}$  (Ver Anexo 5).
2. Efluente del lavado de plásticos: se calculó el consumo semanal de agua en  $\text{m}^3$ , utilizando información proporcionada por personal de la planta en relación al número de tanques empleados, capacidad de cada tanque en  $\text{m}^3$  y la frecuencia de vaciado por semana. El consumo semanal se multiplicó por 4 semanas, para estimar el consumo mensual de agua empleada en la operación en  $\text{m}^3/\text{mes}$  (Ver Anexo 5).
3. Agua de pozo y agua purificada: los volúmenes promedio se calcularon con los datos históricos proporcionados por personal de la planta, sobre los consumos mensuales para cada tipo de agua, correspondientes al período Ene-Diciembre del 2005 (Ver Anexo 5).
4. Agua potable de pipa: el volumen mensual promedio se estimó a partir de los datos de consumos mensuales del 2005 para enfriamiento y regaderas, a los cuales se le sumó el consumo de agua estimado para el lavado de vehículos y móviles (Ver Anexo 5).
5. Efluente de comedor: se estimó similarmente al consumo mensual de agua purificada, considerando que el agua que ingresa al comedor, se descarga directamente al registro, posterior a su uso (Ver Anexo 5).
6. Efluente de lavado de vehículos: para calcular este caudal se multiplicó el gasto de agua en la pistola de lavado por el tiempo total de lavado al día para trailers y thortons. El flujo de agua en la pistola se midió volumétricamente con cronómetro y un recipiente graduado y se consideró un tiempo de lavado aproximado de 30 minutos por vehículo, con un número máximo de 6 vehículos al día (que representa un tiempo total de lavado de 3 horas, máximo).(Ver Anexo 5).
7. Efluente de lavado de móviles: para el caso de barredoras y montacargas, se consideró el gasto, tiempo de lavado y número de unidades lavadas al día, similares al lavado de trailers y thortons (Ver Anexo 5).
8. Efluente de lavandería: se estimó a partir del número de cargas al día y del volumen de agua gastado por carga. El número de cargas por día fue proporcionado por personal de la lavandería y el volumen gastado se midió directamente con cronómetro y recipiente de volumen conocido. El consumo de agua en lavandería en  $\text{m}^3/\text{día}$  se multiplicó por 30 días para expresarlo en  $\text{m}^3$  por mes (Ver Anexo 5).
9. Efluente de regaderas: Al consumo mensual de agua potable de pipa calculado, se le restaron los consumos estimados de agua para lavado de vehículos, enfriamiento y lavandería (Ver Anexo 5).

10. Influyente al tratamiento biológico: este valor se estimó a partir de los efluentes de agua tratada a laguna de agua ácida y a riego de escorias que se obtuvieron por lecturas de medidores y diferencias de nivel en el tanque de agua tratada (Ver Anexo 5).
11. Electrolito de las baterías: El volumen mensual se calculó mediante la multiplicación del volumen promedio de electrolito por batería (estimado en una muestra de 5 baterías usadas) por el número promedio de baterías procesadas al mes. Las baterías usadas fueron seleccionadas en conjunto con el personal de la planta y la mezcla sugerida fue de 3 baterías usadas correspondientes al mercado nacional y 2 al mercado internacional. El número promedio de baterías usadas procesadas al mes, fue obtenido a partir de los datos de baterías procesadas mensualmente en el 2005, proporcionados por la Empresa (Ver Anexo 5).

#### **4.4 Caracterización fisicoquímica de corrientes**

Se tomaron muestras de agua en cada uno de los puntos seleccionados y se realizaron análisis fisicoquímicos, considerando los parámetros establecidos en las condiciones particulares de descarga y otros de interés, definidos con base en los objetivos del proyecto. El número de muestras por punto se calculó con base en la norma NOM-ECOL-001-1996, dependiendo de la frecuencia de la descarga y de la duración de la misma. En el Anexo 2, se incluye la Tabla A.2 en donde se indica el parámetro y la norma utilizada para su determinación.

En la Tabla 4.1 se indican los parámetros que están regulados por las condiciones particulares y los límites para los promedios de descargas diario y mensual.

Los resultados de los análisis para los parámetros muestreados en cada punto se presentan en las Tablas 5.2a, 5.2b y 5.2c, en el apartado de Análisis de Resultados. Para mayor detalle, el resumen estadístico de los mismos con el promedio, la desviación estándar y el rango se incluye en el Anexo 3.

Se compararon las condiciones particulares de descarga y la normatividad vigente (mostrada en el Anexo 4) con los parámetros analizados en las muestras.

La información de los análisis fisicoquímicos se utilizó para generar las gráficas con las cargas másicas promedio por constituyente en los puntos de muestreo. Las cargas másicas por promedio por constituyente se determinaron a partir de las concentraciones individuales y del caudal estimado por punto. Los cálculos correspondientes, se muestran a mayor detalle en el Anexo 7.

Las gráficas antes mencionadas y los resultados de los análisis fueron de utilidad para realizar las observaciones y comentarios por punto de muestreo, mismos que se presentan en la sección 5.4, dentro del Análisis de Resultados. En algunos casos, fue necesario comparar los valores de los parámetros fisicoquímicos con la normatividad y las condiciones particulares de descarga, para fundamentar las observaciones y comentarios emitidos.

Tabla 4.1 Condiciones particulares de descarga aplicadas a la planta.

Parámetro	Unidades	Promedio diario	Promedio mensual	Carga máxima (Kg/día)
Temperatura	°C	NA	NA	-
Potencial de Hidrógeno (pH)	unidades de pH	5<pH<10	5<pH<10	-
Sólidos Sedimentables	mg/l	2	1	-
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	200	150	56.4
Materia Flotante	cualitativa, malla 3 mm de abertura	Ausente	Ausente	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	200	150	56.4
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	2,000	1,000	-
Nitrógeno total	mg/l	60	40	-
Fósforo Total	mg/l	30	20	-
Cianuros	mg/l	3	2	-
Grasas y Aceites	mg/l	25	15	7.050
Arsénico	mg/l	0.4	0.2	-
Cadmio	mg/l	0.4	0.2	-
Cobre	mg/l	6	4	-
Cromo	mg/l	1.5	1	-
Mercurio	mg/l	0.02	0.01	-
Níquel	mg/l	4	2	-
Plomo	mg/l	1	0.5	-
Zinc	mg/l	20	10	-

Fuente: CPD, 2006.

#### 4.5 Balances volumétricos de agua

Con los caudales mensuales estimados se determinaron los balances volumétricos de agua fresca y de agua residual por operación y se integró la información en un diagrama de flujo que muestra las entradas y salidas de agua del sistema. En las Tablas A8.1a y A8.1b, correspondientes al Anexo 8, se resume el balance de agua por operación, expresado en m<sup>3</sup>/mes.

La información generada a partir del balance volumétrico de agua, permitió analizar y cuantificar las entradas y salidas de agua por operación y determinar las posibles opciones de reuso de efluentes. En el Anexo 8, en las Tablas 8.1a y 8.1b, se presenta el balance volumétrico de agua por operación, expresado en m<sup>3</sup>/mes.

Con base en el análisis del balance volumétrico, se generaron indicadores para evaluar el estado actual que guarda el reuso del agua, minimización de aguas residuales y el tratamiento del agua residual en la planta de Ciénega de Flores.

Los indicadores para la evaluación del uso del agua se clasificaron en 3 categorías: para minimización de aguas residuales, para reuso de agua y costo del agua. Cada uno de los indicadores establecidos cuantificaba cierto consumo o caudal a través de una relación o una tasa, en comparación a otro caudal o como una razón de consumo o de generación por unidad de batería usada procesada. El valor utilizado en el cálculo de los consumos de agua y



generación de aguas residuales por unidad de batería fue de 803,145 baterías/mes, el cual corresponde al promedio de baterías usadas procesadas mensualmente.

#### **4.6 Balances de masa de contaminantes**

Se realizaron balances de masa para cada contaminante. Para los principales contaminantes como son los sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, cloruros, sulfatos y el plomo se integraron diagramas de flujo. Las cargas másicas por contaminante se calcularon multiplicando el flujo por la concentración correspondiente, el detalle del cálculo se observa en el Anexo 10 en donde se presentan las tablas con las cargas másicas por operación para cada uno de los contaminantes o constituyentes analizados.

En el caso de los principales contaminantes se realizaron observaciones y comentarios relevantes sobre su origen y transporte, con base en la interpretación de los análisis fisicoquímicos, información proporcionada por la planta y la observación directa de los influentes y efluentes de agua. Las observaciones y/o comentarios emitidos fueron de utilidad para el entendimiento del proceso y la identificación de las fuentes de generación de contaminantes.

#### **4.7 Propuestas de reuso de agua y minimización de aguas residuales**

Haciendo uso de los conceptos de la tecnología del “water pinch” y a partir de los resultados de la caracterización de las corrientes y de los balances de agua y de masa de constituyentes, se integraron dos propuestas para el reuso del agua y la minimización de aguas residuales.

Con el propósito de definir las propuestas y realizar los correspondientes diagramas de flujo con las opciones de reuso, fue necesario comparar las concentraciones de contaminantes de la corriente propuesta para reuso con las concentraciones de contaminantes en la corriente de agua que actualmente se emplea y con la normatividad aplicable. El criterio general para reusar fue que la concentración del contaminante en la operación propuesta para reuso fuera menor o igual que la concentración límite establecida como promedio mensual en la norma aplicable y/o menor o igual que la concentración del contaminante en el agua utilizada actualmente en la operación en donde se iba a reusar el agua.

Para estimar los caudales de reuso simplemente se determinó el caudal requerido en cada operación de interés, buscando aprovechar los caudales de las operaciones seleccionadas para reuso o reciclaje lo más posible, de acuerdo a los lineamientos definidos por la metodología del “water pinch”.

Los lineamientos adoptados para establecer las propuestas de reuso fueron:

1. Sustituir el consumo de agua fresca por agua residual a través del reuso directo de la misma, en operaciones en donde la calidad del efluente a reusar cumpliera con normas o estándares ambientales, o bien, que su calidad fuera mejor o igual que la del agua utilizada actualmente.
2. Utilizar efluentes residuales en más de una operación, buscando minimizar los consumos de agua fresca y las necesidades de tratamiento del agua residual.
3. Utilizar agua cuya calidad fuera por lo menos la misma que la utilizada actualmente, para una dada operación.

4. En el caso de reuso de efluentes tratados que fueran a reusarse o reciclarse en alguna operación cuya calidad tuviera que cumplir con normas ambientales (tal es el caso del reuso de agua del tratamiento biológico en sanitarios y riego), que la calidad de los mismos fuera al menos lo establecido en la norma.
5. Evitar la mezcla de corrientes, es decir, los efluentes de aguas sanitarias no deben mezclarse, una vez tratados, con los demás efluentes del proceso industrial.
6. Reusar los efluentes que actualmente descargan en la fosa multiusos, lo más posible, buscando utilizarlos en operaciones donde su reuso sea factible.
7. Eliminar lo más posible la necesidad de infiltrar agua tratada fisicoquímicamente, buscando reciclar dicho efluente en operaciones donde su reciclaje sea factible.
8. Evitar el ingreso de electrolito a las diferentes corrientes de agua ya que éste resultó ser la principal fuente de contaminantes. Se reduce la generación de sales, el caudal de aguas residuales y el consumo de químicos para tratamiento.
9. Eliminar el consumo de agua de potable pipa mediante la utilización de agua de pozo. La estrategia es sustituir el consumo de agua de pipa, por agua de pozo, posterior a su tratamiento o regeneración, con un costo de tratamiento que fuera menor al del agua potable de pipa y con una calidad que cumpliera con las concentraciones de la norma que regula la calidad del agua potable utilizada para consumo humano.

Es importante mencionar que se pretendió utilizar no sólo los conceptos, sino también la metodología que plantea la tecnología del “water pinch” para elaborar las propuestas de reuso, sin embargo, esto no fue posible debido a que el diferencial de concentraciones resultó negativo en varias operaciones; es decir, las concentraciones de contaminante en el influente de la operación, eran en varios casos, mayores que las concentraciones del mismo en el efluente; lo anterior debido a una posible acumulación del contaminante en la operación, o bien, a que la transferencia de masa del contaminante se difería en el tiempo.

Con base en el análisis anterior, se integraron dos propuestas de reuso de agua, las cuales plantean el reuso de agua con y sin ingreso de electrolito. Para cada una de las opciones se calcularon los indicadores establecidos para la evaluación del uso de agua y se presentaron las acciones y beneficios derivados de su implementación.

#### **4.8 Evaluación económica de las propuestas**

Para realizar la evaluación económica se solicitaron a la Empresa los planos de la planta correspondientes a la distribución de áreas de operaciones y de tuberías sanitaria, industrial, de agua tratada y de agua de pozo. Los planos se utilizaron para elaborar los planos isométricos de cada una de las líneas de reuso de agua. El detalle de la isometría se presenta en el Anexo 12.

A partir de los planos isométricos se calcularon las necesidades de tubería, accesorios, conexiones, válvulas, bombas, tanques de almacenamiento, tanques hidroneumáticos y arrancadores, para cada propuesta de reuso. Posteriormente se estimó la inversión requerida para la implementación de cada propuesta. Las tuberías, conexiones, accesorios y válvulas se cotizaron en tubería hidráulica de PVC ced. 80. Se seleccionó este material debido a que es

un material conveniente para el uso en las líneas de agua en la planta, pues no se corroe ni se oxida, es resistente a los químicos, soporta temperaturas de hasta 60°C, presiones de trabajo de hasta 57 atm (dependiendo del diámetro y temperatura de operación), es ligero, flexible y durable, de fácil corte y rápida instalación (EMMSA, 2006). El costo total en instalaciones para las líneas de reuso de agua, se incluye en la Tabla 13.5 del Anexo 13.

Los consumos y gastos en químicos y agua purificada se calcularon para el sistema actual y para las propuestas de reuso de agua (con y sin ingreso de electrolito). Solamente en el caso del sistema actual, se estimó el consumo y el gasto mensual de agua potable de pipa. En los cálculos realizados se incluyó el consumo del hipoclorito que se utiliza para la desinfección del efluente biológico. En el Anexo 13 se presenta el detalle de las estimaciones hechas. Los costos unitarios fueron proporcionados por personal de la planta.

Para calcular los ahorros anuales por escenario, primero se calculó el gasto anual en químicos para tratamiento, agua purificada y agua potable de pipa del sistema actual y posteriormente los de las diferentes alternativas de reuso (con y sin ingreso de electrolito), sin considerar el consumo y el gasto en agua potable de pipa. Los ahorros generados por alternativa son la diferencia entre los gastos anuales del sistema actual y los gastos anuales de la alternativa analizada. La paridad utilizada en los cálculos fue de \$11.00 pesos/dólar. Los gastos se expresaron en pesos/año y dólares/año.

Las opciones de reuso que se propusieron consideran el tratamiento terciario del efluente biológico, para lo cual se solicitó cotización con dos proveedores (Industrias Islas y CCR Mexicana). Las dos cotizaciones presentadas, incluyen el monto de la inversión, el gasto mensual en químicos/consumibles y el detalle del proceso de tratamiento.

También se propuso en todas las opciones de reuso, el tratamiento del agua de pozo para sustituir el consumo de agua potable de pipa por agua de pozo potabilizada, en aquellas operaciones que actualmente la utilizan. Se solicitó cotización al proveedor CCR para la planta potabilizadora del agua de pozo y el estimado incluye la inversión, los gastos de operación y mantenimiento y el detalle del tratamiento propuesto.

Las opciones de reuso sin ingreso de electrolito consideran adicionalmente el tratamiento y recuperación de electrolito o bien el confinamiento del mismo como residuo peligroso.

En el caso de la opción de reuso que considera el tratamiento y recuperación del electrolito, se solicitó al proveedor CCR Mexicana, el estimado de la inversión y del gasto en operación y mantenimiento anual y estos costos se incluyeron en los flujos de efectivo para la evaluación económica de esta alternativa.

Para incluir la opción de confinamiento del electrolito, se realizó un estimado del gasto a partir del volumen mensual de electrolito que ingresa al MA-51 y de los costos de transporte y tratamiento/disposición, proporcionados por el proveedor RIMSA. Este gasto se consideró como gastos de operación, dentro de la evaluación económica de la alternativa de confinamiento. Dentro de los gastos de operación y mantenimiento para las alternativas de reuso sin ingreso de electrolito (tratamiento y confinamiento) se incluyeron además los gastos

---

anuales en químicos/consumibles del tratamiento biológico terciario y en operación y mantenimiento del sistema de potabilización del agua de pozo.

Como parte de la evaluación económica de las diferentes alternativas, se calcularon los montos de las inversiones, gastos de operación y mantenimiento y los ahorros generados por su implementación a períodos de tiempo de 5 y 10 años. Estos flujos se expresaron en valor presente y a partir de estos valores se calculó el valor presente neto por alternativa a 5 y 10 años.

En las alternativas de reuso con ingreso de electrolito, los gastos de operación y mantenimiento estimados, consideran el consumo en químicos/consumibles del tratamiento biológico terciario y los gastos de operación y mantenimiento del tratamiento del agua de pozo.

Para simplificar los cálculos, al realizar la evaluación económica no se consideró el efecto del cambio en la paridad del dólar ni del aumento en precios por efecto de la inflación.

Además del valor presente neto, también se calcularon para cada alternativa, las relaciones B/C, B/I, el período de retorno de inversión y la TIR. Estos indicadores financieros sirvieron como referencia para realizar una comparación objetiva entre las diferentes alternativas. En los Anexos 13 y 14 se presenta el detalle de los cálculos y la información de los flujos anuales de efectivo.

La información generada en la evaluación económica permitió estimar la rentabilidad de cada una de las opciones propuestas y analizar sus ventajas y/o desventajas.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Identificación de corrientes de agua y de agua residual en la planta.

El diagrama de la figura 5.1 se integró a partir de la información de la planta y muestra las principales operaciones de uso de agua, los tratamientos, las fosas y lagunas de almacenamiento, además de los influentes y efluentes de agua al sistema. Las operaciones identificadas se numeraron del 1 al 14, mientras que las líneas de agua se marcaron con diferentes colores para indicar la calidad de agua que representan.

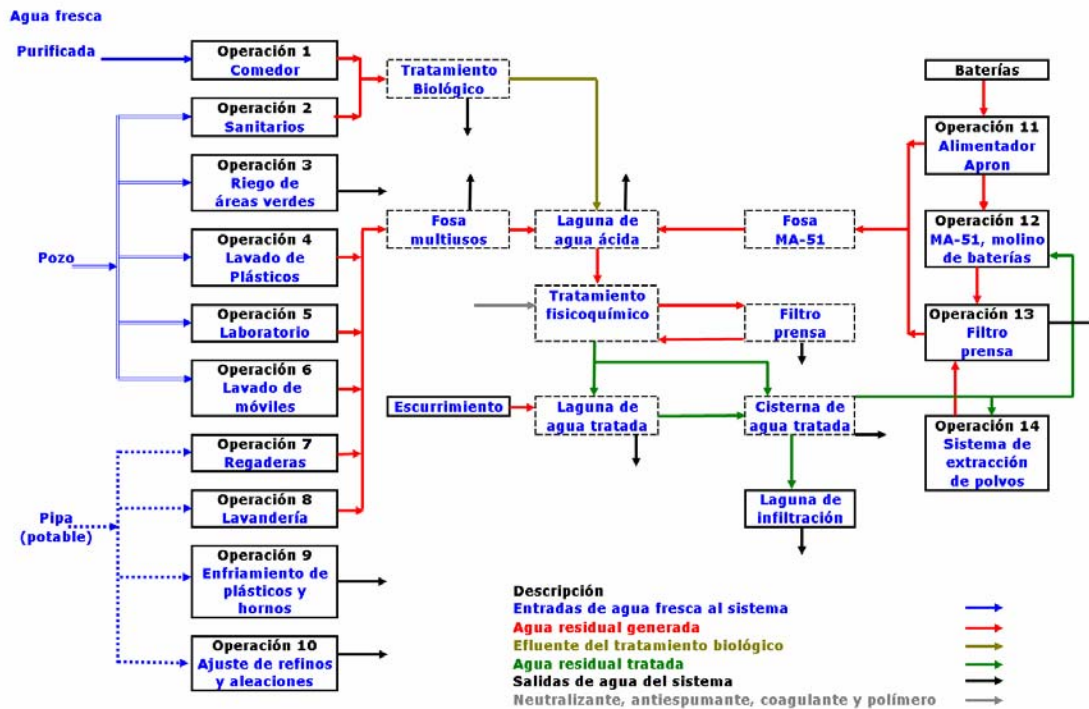


Figura 5.1 Diagrama de flujo con los principales influentes y efluentes de agua de la planta.

Las operaciones de uso de agua identificadas fueron: comedor, sanitarios, riego de áreas verdes, lavado de plásticos, laboratorio, lavado de móviles, regaderas, lavandería, enfriamiento de plásticos y horno, ajuste de refinados y aleaciones, alimentador apron o Apron Feeder, molino de baterías, filtro prensa y por último, el sistema de extracción de polvos.

La alimentación de baterías usadas al molino del MA-51 es la operación inicial del proceso de reciclaje de plomo y polipropileno. Esta operación en promedio representa un ingreso de electrolito de  $1455 \text{ m}^3$ , pues la planta procesa mensualmente 803,145 baterías y cada batería que se alimenta al molino contiene aproximadamente 1.81 lt de electrolito.

Los influentes de agua son el agua fresca, el electrolito contenido en las baterías usadas y el agua que ingresa por adición de químicos para tratamiento fisicoquímico. La operación de

mayor consumo de agua es el molino de baterías pues utiliza parte del electrolito y el agua tratada de cisterna que se recicla al MA-51.

El agua fresca que se consume en la planta es de 3 fuentes: agua purificada, agua de pozo y agua potable de pipa. El agua fresca se suministra a las operaciones de comedor, sanitarios, regaderas, lavandería, laboratorio, lavado de plásticos y lavado de móviles. Sólo el comedor utiliza agua purificada, las demás operaciones en las que se alimenta agua fresca consumen agua de pozo (sanitario, laboratorio, lavado de plásticos y lavado de móviles) y agua potable de pipa (lavandería y regaderas).

Los efluentes de agua son las descargas de la fosa multiusos y de la fosa MA-51 a la laguna de agua ácida, el efluente de tratamiento fisicoquímico a laguna de agua tratada, el efluente de la cisterna de agua tratada a laguna de infiltración y el efluente de cisterna de agua tratada que se recicla en el proceso en el MA-51.

En la planta existen dos instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales: la planta de tratamiento biológico y la planta de tratamiento fisicoquímico. La planta de tratamiento biológico recibe los efluentes del comedor y sanitarios, en donde posterior a su tratamiento, una parte del efluente es reusado para el riego de escorias (aproximadamente el 27.12%) y el resto es enviado a la laguna de agua ácida para tratamiento fisicoquímico. La planta de tratamiento fisicoquímico recibe el efluente de la laguna de agua ácida, en la cual se concentran los efluentes de otras operaciones.

La fosa MA-51 se localiza en la sección de la planta denominada MA-51 y en esta fosa se concentran las descargas de electrolito y de aguas residuales, provenientes de las diferentes operaciones que se realizan en el proceso del MA-51. La sección de la planta denominada MA-51 incluye las operaciones de molienda de baterías, además de las separaciones de plástico, pasta, finos y óxidos de plomo. La descarga de esta fosa hacia la laguna de agua ácida es la principal contribución de aguas residuales a la planta de tratamiento fisicoquímico.

La fosa multiusos es una fosa cercana a la planta de tratamiento fisicoquímico, en la cual se colectan las descargas de las operaciones de regaderas, lavandería, lavado de plásticos, lavado de móviles y laboratorio.

La laguna de agua ácida está ubicada físicamente en el área de la planta de tratamiento fisicoquímico y en ella descargan los efluentes de la fosa multiusos, de la fosa MA-51 y parte del efluente tratado biológicamente.

El agua tratada fisicoquímicamente es 17,209 m<sup>3</sup>/mes, este caudal se envía a una cisterna en donde 14,177 m<sup>3</sup>/mes se reciclan en el proceso del MA-51 y el resto del agua tratada se dispone a través de lagunas de infiltración. El volumen mensual que se infiltra es de aproximadamente 3,151 m<sup>3</sup>.

## **5.2 Selección de puntos de muestreo**

En total 18 puntos fueron seleccionados siguiendo el criterio establecido en la Metodología. La selección de cada uno de los puntos de muestreo fue esencial para poder realizar los

balances volumétricos de agua y de masa de los diferentes constituyentes. En la Figura 5.2 se presenta el diagrama con los puntos de muestreo y su numeración correspondiente.

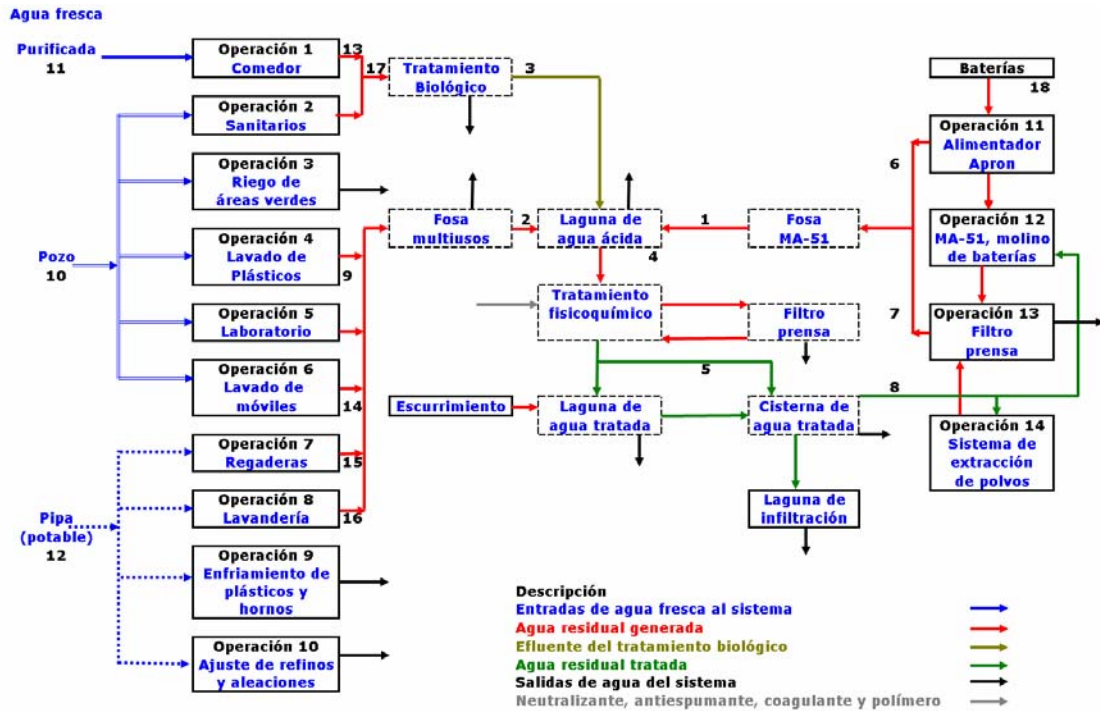


Figura 5.2 Diagrama indicando los puntos de muestreo y numeración.

### 5.3 Determinación de flujos en puntos de muestreo

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de las determinaciones de los flujos en cada uno de los puntos. Como se mencionó en la Metodología, solamente los puntos 1,2,4,5,6,7 y 8 se determinaron por medición directa con equipo ultrasónico. En los restantes, los consumos se estimaron con base en información histórica o bien, volumétricamente, con cronómetro y recipiente de volumen conocido. El detalle del cálculo del flujo en cada punto, se incluye en el Anexo 5.

La principal descarga del proceso hacia el tratamiento físico-químico es el efluente de la fosa del MA-51.

Las mayores aportaciones a la fosa multiusos son los efluentes de regaderas y lavado de plásticos. En promedio mensualmente ingresan de regaderas  $1,055 \text{ m}^3$  y de lavado de plásticos  $312.54 \text{ m}^3$ . Los demás ingresos a esta fosa lo constituyen los efluentes de lavandería ( $225 \text{ m}^3/\text{mes}$ ) y del lavado de móviles ( $60 \text{ m}^3/\text{mes}$ ). Anteriormente se realizaba el lavado de transportes en la planta, pero no se está considerando en el presente trabajo debido a que personal de la planta informó que se realizará fuera de las instalaciones. El lavado de móviles sólo considera barredoras y montacargas.

Tabla 5.1 Determinación de caudales en los puntos de muestreo.

No. de punto de muestreo	Efluente	Flujo promedio lt/s	Desviación estándar lt/s	Tiempo descarga al día (hr)	Flujo estimado m <sup>3</sup> /d	Flujo estimado m <sup>3</sup> /mes
1	Fosa del MA-51	16.60	0.38	7.75	463.17	13,895.19
2	Fosa multiusos	4.63	0.73	3.02	50.28	1,508.45
3	Tratamiento biológico	-	-	-	25.14	754.24
4	Laguna de agua ácida	14.06	1.33	13.33	674.94	20,248.07
5	Tratamiento fisicoquímico	12.18	1.23	13.33	584.44	17,533.14
6	Fosa del Apron Feeder	1.90	0.40	1.78	12.20	365.94
7	Efluente de filtro prensa	6.25	1.42	20.88	469.88	14,096.25
8	Agua tratada de cisterna	6.17	0.99	20.62	457.81	13,734.44
9	Lavado de plásticos	-	-	-	-	312.54
10	Agua de pozo	-	-	-	-	3,510.94
11	Agua purificada	-	-	-	-	105.82
12	Agua potable de pipa	-	-	-	-	1,938.23
13	Comedor	-	-	-	-	105.82
14	Lavado de móviles	-	-	-	-	60
15	Regaderas	-	-	-	-	1,055
16	Efluente de lavandería	-	-	-	-	224.64
17	Influyente al tratamiento biológico	-	-	-	-	1,035.78
18	Electrolito de baterías usadas	-	-	-	-	1,454.65

Fuentes: medición de flujos e información proporcionada por personal de la planta.

Los efluentes de las operaciones de comedor y sanitarios se tratan biológicamente. El principal ingreso al tratamiento biológico es la descarga de sanitarios, que representa aproximadamente el 89.77% del flujo a tratar. Parte del efluente tratado biológicamente, 755 m<sup>3</sup>/mes, en promedio, es enviado a la laguna de agua ácida, el resto, 281 m<sup>3</sup>/mes; es utilizado en el riego de escorias. El caudal tratado biológicamente que ingresa a la laguna de agua ácida representa el 4.39% del total de agua que se procesa mensualmente en el tratamiento fisicoquímico.

Del total del electrolito de las baterías, 366 m<sup>3</sup>/mes ingresan a la fosa ácida del MA-51, provenientes de la fosa del Apron Feeder. El resto del electrolito, 1089 m<sup>3</sup>/mes, ingresan directamente al molino de baterías junto con el flujo de agua tratada fisicoquímicamente que se recicla en el proceso MA-51.

El efluente de filtro prensa es la mayor descarga de agua residual hacia la laguna de agua ácida, pues constituye el 97.56% del influente que ingresa a ésta.



Del total de agua fresca, el agua de pozo es la de mayor consumo, representa el 63.88%, el agua potable de pipa el 34.19% y el restante 1.93%, corresponde a agua purificada que se usa en el comedor.

Del consumo mensual de agua de pozo las operaciones de lavado de móviles y lavado de plásticos representan el 1.71% y 8.90%, respectivamente.

#### 5.4 Caracterización fisicoquímica de corrientes

Las Tablas 5.2a y 5.2b resumen los resultados de los análisis fisicoquímicos de las muestras tomadas en cada uno de los puntos seleccionados. Los valores en las tablas son los promedios de 5 muestras. Mayores detalles sobre los resultados se presentan en el Anexo 3.

De las Tablas 5.2a y 5.2b se observa que:

**Efluente de la fosa del MA-51 (FMA):** Este efluente tiene en promedio un pH de 1.1 y una conductividad eléctrica de 324.1 mS/cm. El valor de conductividad eléctrica es muy alto, 6 veces la conductividad del agua de mar que es aproximadamente 53mS/cm (Members Tripod, 2006). En el MA-51 se realizan las operaciones de molienda de baterías y la separación del plomo y del polipropileno.

Tabla 5.2a Resultados de análisis fisicoquímicos por parámetro para las diferentes corrientes.

Efluente	Unidades	FMA	FMU	ETB	LAA	ETFQ	FAF	FPMA	ATC	LP
Temp.	°C	35.4	26.7	22.4	26.5	35.3	22.3	36.5	34.1	26
pH	adim	1.11	5.5	7.7	1.22	7.5	1.38	1.11	7.06	7.3
Densidad	g/ml	<1.10	1.002	1	1.11	1.1	1.11	1.13	1.13	1.03
CE	mS/cm	324.1	22.2	4.8	124.3	53.5	3,470	320.9	60.1	7
Cl	mg/lt	537.8	524.7	467.9	526.3	510.1	359	535.3	581	428.9
SST	mg/lt	2,007.4	1,323.6	28.7	892	712	1,359.2	1,018.6	863.9	517.5
SDT	mg/lt	168,202.7	41,478.6	3,739.5	165,860.2	184,734	227,679.8	182,338.2	189,129.9	7,902.70
DQO	mg/lt	354.5	195.6	128.2	399.4	344	1,100.6	435.1	340.5	450
Pb	mg/lt	38.8	28.3	<0.18	<6.28	<0.76	33	<12.21	<0.41	10
As	mg/lt	<0.16	<0.1	<0.1	<0.20	<0.1	<0.20	<0.21	<0.11	<0.1
Cd	mg/lt	<0.42	<0.1	<0.1	0.5	<0.1	<0.1	<0.70	<0.1	<0.1
Cr	mg/lt	<0.14	<0.1	<0.1	<0.17	<0.1	3.5	<0.12	<0.1	<0.1
Cu	mg/lt	0.3	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	3.6	0.3	<0.1	<0.1
Fe	mg/lt	11.6	1.7	<0.18	15.1	1	73.4	33.4	<0.52	1
Hg	mg/lt	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-
Ni	mg/lt	0.7	<0.136	<0.1	0.6	1	2	0.8	0.4	<0.1
Zn	mg/lt	2	0.4	<0.15	1.9	0	3.4	2.4	1.1	0.3
Ca	mg/lt	33.7	60.9	56.7	38.1	44	50	30.1	40.8	55.7
Mg	mg/lt	2,167.6	499.1	15.2	2,195.8	2,837	658	2,185	2,296.2	72.5
Na	mg/lt	516.9	202.3	56	557.2	548	239	675	502.9	124.6
CN	mg/lt	<0.06	<0.0156	<0.01	0	0.2	0.06	<0.07	0.3	<6.67
S total	mg/lt	<0.06	<0.0156	<0.01	0	0.2	0.06	<0.07	0.3	<6.67
P total	mg/lt	6,059.1	1254	89.2	6,435.5	5,555.9	8,528.15	6,627	6,045.75	167.3
NO <sub>3</sub>	mg/lt	<1.83	<0.32	<1.004	<0.91	<0.16	<2.58	<1.71	<0.17	<0.22
NTK	mg/lt	19.3	28.5	45.8	17.1	0.7	6.87	32	6.55	12.2
GyA	mg/lt	22.9	<27.3	37.8	31.5	12	58	30	32.61	<2.46

FMA: efluente fosa MA-51, FMU: efluente fosa multiusos, ETB: efluente tratamiento biológico, LAA: efluente laguna de agua ácida, ETFQ: efluente tratamiento fisicoquímico, FAF: efluente fosa Apron Feeder, FPMA: efluente filtro prensa MA-51, ATC: agua tratada de cisterna, LP: efluente lavado de plásticos.

El agua residual que se genera es ácida porque las baterías usadas que ingresan al proceso contienen electrolito. La Figura 5.3 muestra la carga másica promedio del muestreo el efluente de la fosa del MA-51:

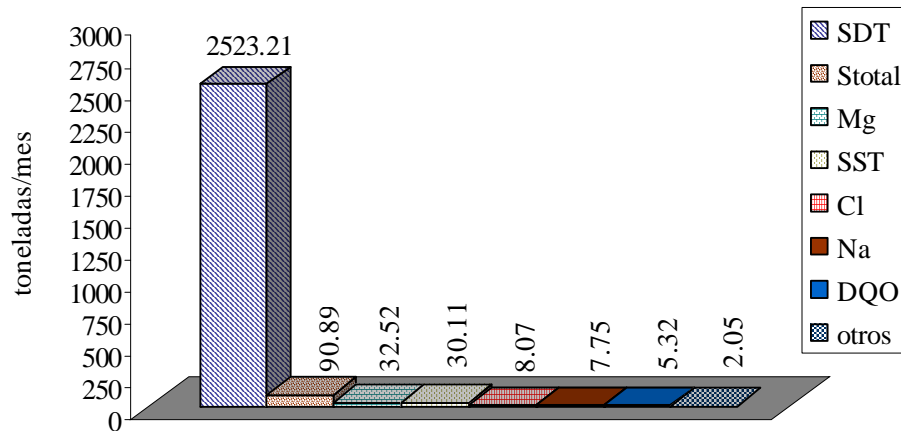


Figura 5.3 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la fosa del MA-51.

Como se puede observar, el principal constituyente de este efluente son los sólidos disueltos totales con una carga másica de 2,523.21 toneladas/mes y en menor proporción el azufre total 90.89 ton/mes, magnesio 32.52 ton/mes, sólidos suspendidos totales 30.11 ton/mes, cloruros 8.07 ton/mes, sodio 7.75 ton/mes, DQO 5.32 ton/mes y otros 2.05 ton/mes. La categoría “otros” incluye metales pesados (Pb, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni y Zn), calcio, nitrógeno Kjeldhal, nitratos, fósforo total, además de grasas y aceites presentes.

De los metales pesados el plomo es el más abundante, su concentración es de 38.79 mg/L, en menores concentraciones se encuentran el hierro 11.63 mg/L, zinc 1.98 mg/L, níquel 0.73 mg/L, cadmio < 0.43 mg/L, cobre 0.32 mg/L, arsénico < 0.17 mg/L y cromo < 0.15 mg/L. El plomo es el elemento más abundante debido a que las baterías usadas contienen plomo en su estructura (rejillas y placas) además está presente en el electrolito como sulfatos y óxidos en solución. En el caso del mercurio, el valor reportado < 0.1 mg/L, no es representativo pues corresponde al límite de detección del equipo de análisis. Este valor de < 0.1 mg/L fue reportado para el total de puntos muestreados.

El magnesio está presente en el efluente de la fosa MA-51 debido a que ingresa al proceso durante la etapa de neutralización y luego se incorpora al MA-51 en el agua reciclada.

**Efluente de la fosa multiusos (FMU):** Este efluente corresponde a la descarga de la fosa multiusos que se envía a la laguna de agua ácida. Sus valores promedios de pH y conductividad eléctrica son 5.5 y 22.2 mS/cm, respectivamente. La conductividad eléctrica de este efluente es relativamente, si se considera que la del agua de mar es 53mS/cm (Members Tripod, 2006) y su pH es ligeramente ácido. En la fosa multiusos se reciben las descargas de las operaciones de lavandería, lavado de plásticos, regaderas y lavado de móviles. En la Figura 5.4 se observa la carga másica promedio del muestreo de este efluente.

Tabla 5.2b Resultados de análisis fisicoquímicos por parámetro para las diferentes corrientes (continuación).

Efluente	Unidades	APO	APU	PIPA	COM	LM	REG	LAV	ITB	EBU	LTFQ*
Temp.	°C	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-
pH	adim	6.89	6.45	7.1	6.56	6.69	7.41	7.37	7.3	0.36	-
Densidad	g/ml	1.002	1.001	1	1.002	1.004	1.004	1.004	1.001	1.21	-
CE	mS/cm	4.6	0.1	2.5	1	2.8	2.2	2.9	3.4	12927.1	-
Cl	mg/lt	557.6	124.8	370.5	85.8	352.9	358.8	411.4	739.5	55.3	1,610.8
SST	mg/lt	44	26	-	79.3	30.8	52.8	207	645	2,072.20	6,621.8
SDT	mg/lt	3,924	197	1,780	1,453.9	2,478	1,999.6	2,404.9	3,467.5	405,111.4	48,138
DQO	mg/lt	144	12	100	1,520	152	272	710	1,740	228	-
Pb	mg/lt	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.10	0.4	0.2	4.6	1.1	2.6	26,515
As	mg/lt	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.12	< 0.16	< 0.16	< 0.16	< 0.1	< 0.1	< 1
Cd	mg/lt	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1,850
Cr	mg/lt	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.10	750
Cu	mg/lt	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.4	1,950
Fe	mg/lt	2.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.5	< 0.105	0.3	0.4	23.4	82,200
Hg	mg/lt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	mg/lt	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.22	1,150
Zn	mg/lt	0.1	0.15	0.4	< 0.12	0.1	0.1	< 0.14	0.15	4.02	6,200
Ca	mg/lt	67	1.4	37.1	1	45.5	38.1	43.3	58	28.7	1,350
Mg	mg/lt	26.8	0.1	7.5	0.2	8.1	7.1	11.5	20.2	12.5	149,150
Na	mg/lt	59.9	6.5	31.5	44.1	41.6	34.5	39.4	48.8	820.9	14,200
CN	mg/lt	-	-	-	< 0.01	0	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.1	< 0.5
S total	mg/lt	-	-	-	< 0.01	0	< 0.01	< 0.01	< 0.01	-	47,850
P total	mg/lt	155.2	50	93.2	< 56.4	81.5	60.1	74.5	31.7	1.09	1,548
NO <sub>3</sub>	mg/lt	< 0.03	< 0.03	0.1	< 1.34	1.98	0.19	0.24	18.1	0.53	1.95
NTK	mg/lt	-	-	-	-	-	-	-	< 0.06	47.9	818
GyA	mg/lt	0.6	< 0.5	< 0.5	19.5	6	11.3	17.25	86.2	5.1	830

APO: agua pozo, APU: agua purificada, PIPA: agua potable de pipa, COM: efluente de comedor, LM: efluente lavado de móviles, REG: efluente de regaderas, LAV: efluente lavandería, ITB: influente tratamiento biológico, EBU: electrolito contenido en baterías usadas, LTFQ: lodos tratamiento fisicoquímico.

\* Unidades expresadas en mg/Kg en lugar de mg/lt.

La mayor proporción de esta corriente, la constituyen los sólidos disueltos totales, 68.52 ton/mes; en menores cantidades están presentes los sólidos suspendidos totales 2.19 ton/mes, azufre total 2.07 ton/mes, cloruros 0.87 ton/mes, magnesio 0.82 ton/mes, sodio 0.334 ton/mes, otros 0.327 ton/mes y DQO 0.323 ton/mes. La categoría “otros” incluye calcio, grasas y aceites, metales pesados (Pb, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni y Zn), nitratos, nitrógeno Kjeldhal, cianuros y el fósforo total, contenidos en este efluente.

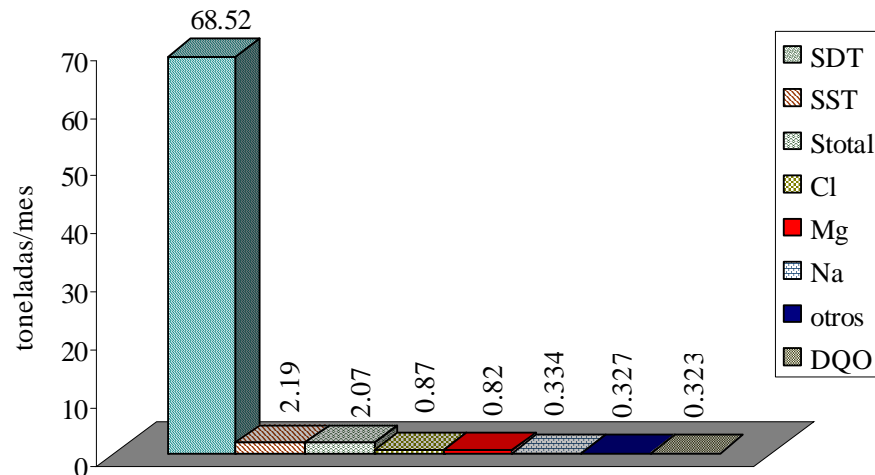


Figura 5.4 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la fosa multiusos.

Los metales pesados aportan 51 kg/mes al efluente de la fosa multiusos. El plomo es el más abundante, mensualmente ingresan 46.7 kilogramos y su concentración es de 28.27 mg/L, el resto de los metales pesados son el hierro 1.73 mg/L, zinc 0.36 mg/L, níquel 0.14 mg/L; el arsénico, cadmio, cromo y cobre están presentes, cada uno, en una concentración menor a 0.10 mg/L. Las mayores aportaciones de metales pesados a esta fosa, son las descargas de las operaciones de lavado de plásticos y de lavandería. En la operación de lavado de plásticos, el plástico triturado contiene adheridos en su superficie, metales pesados y el agua de pozo que se utiliza, también contiene metales pesados. En la lavandería el ingreso de metales pesados se debe principalmente al contenido de los mismos, como polvos, en los uniformes que usa el personal operativo (montacarguistas, personal de producción, supervisores de área, personal de mantenimiento, etc.), los cuales se adhieren, durante el contacto que tienen con el personal, en las diferentes actividades que realizan dentro de la planta.

Las principales entradas de sólidos (disueltos y suspendidos), grasas y aceites a la fosa multiusos, son por aportaciones del lavado de plásticos y las descargas de regaderas. Los plásticos triturados contienen grasas y sólidos disueltos adheridos a su superficie y como su tamaño no es uniforme, existen partículas pequeñas del mismo plástico que no se logran filtrar. En el caso de las regaderas, las aportaciones de sólidos y grasas, se derivan del uso de jabones y de shampoo.

**Efluente tratamiento biológico (ETB):** Este efluente tiene un pH promedio de 7.7, el cual es un pH ligeramente alcalino (mayor a 7.0). La conductividad eléctrica promedio es de 4.8 mS/cm. La Figura 5.5 muestra la carga másica promedio de los diferentes constituyentes.

El efluente del tratamiento biológico está compuesto principalmente por sólidos disueltos, de los cuales, mensualmente se descargan 2.82 toneladas. Los demás constituyentes que se descargan en menores cantidades son los cloruros 0.35 kg/mes, DQO 0.10 kg/mes, azufre total 0.07 kg/mes, calcio 0.043 kg/mes, sodio 0.042 kg/mes, nitratos 0.035 kg/mes, nitrógeno Kjeldhal 0.029 kg/mes, sólidos suspendidos 0.022 kg/mes y otros 0.014 kg/mes.

En la categoría “otros” están incluidos el magnesio, grasas y aceites, metales pesados (Pb, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni y Zn), fósforo total y los cianuros. Los metales pesados aportan al efluente

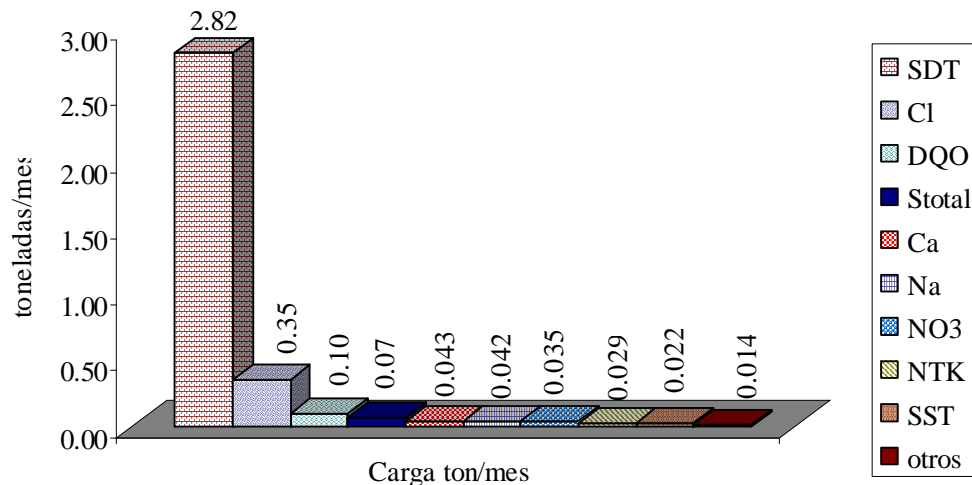


Figura 5.5 Carga másica promedio de constituyentes del efluente del tratamiento biológico.

tratado biológicamente, 0.77 kg/mes, en promedio.

El fierro es el metal que está en mayor concentración < 0.183 mg/L, le siguen el plomo <0.182 mg/L y el zinc < 0.15 mg/L. El arsénico, cadmio, cromo, cobre y níquel están en una concentración menor a 0.10 mg/L, cada uno.

El efluente tratado biológicamente contiene metales pesados pero su concentración cumple con la normatividad aplicable (norma NOM-ECOL-001-1996, límites máximos permisibles de contaminantes con descargas en embalses naturales y artificiales para uso en riego agrícola).

En comparación con el agua de pozo, el efluente tratado biológicamente tiene menor contenido de cloruros, azufre total, sólidos disueltos, calcio, sodio y magnesio, por lo que su calidad es mejor y lo vuelve una opción potencial de reuso de agua.

**Efluente de la laguna de agua ácida (LAA):** Su pH promedio es 1.22 (pH ácido) con una conductividad eléctrica de 124.3 mS/cm. El valor de la conductividad eléctrica de este efluente es alto, más del doble del valor de la conductividad eléctrica del agua de mar (53 mS/cm; Members Tripod, 2006) por su gran contenido de sales disueltas (en promedio 165,860.15 mg/L). La Figura 5.6 muestra la carga másica promedio de los diferentes constituyentes.

El efluente de la laguna de agua ácida está compuesto mayormente por sólidos disueltos; en promedio se descargan 2,854.88 ton/mes de sólidos disueltos. Las demás aportaciones son el azufre total 110.75 ton/mes, magnesio 37.79 ton/mes, sólidos suspendidos 15.35 ton/mes, sodio 9.59, cloruros 9.06 ton/mes, DQO 6.87, otros 0.78 y calcio 0.66 ton/mes.

El nitrógeno Kjeldhal, metales pesados, grasas y aceites, nitratos, fósforo total y los cianuros están incluidos en la categoría “otros”.

Los metales pesados aportan 432.1 kg/mes a este efluente. Los más abundantes son el fierro 15.09 mg/L y el plomo < 6.29 mg/L. Los demás metales pesados presentes son el níquel 0.65,

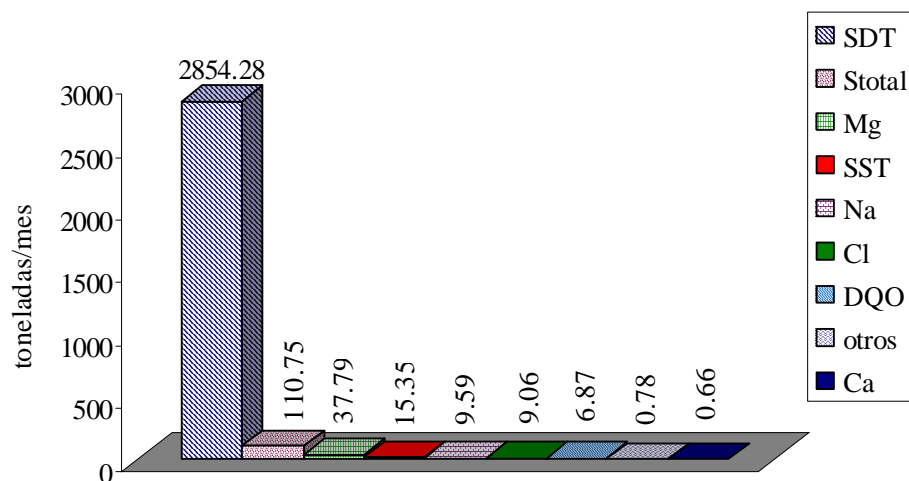


Figura 5.6 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la laguna de agua ácida.

cadmio 0.45 mg/L, cobre 0.36 mg/L, arsénico < 0.21 mg/L, cromo < 0.18 mg/L y el zinc 1.89 mg/L.

El efluente de la laguna de agua ácida tiene un alto contenido de sólidos en suspensión y de sales disueltas porque recibe las descargas de diferentes operaciones en donde se generan y transportan sales y sólidos (lavado de plásticos, lavado de móviles, lavandería, operaciones del proceso en el MA-51, etc.). El pH ácido de esta corriente lo originan las descargas de la fosa ácida del MA-51, ricas en electrolito.

**Efluente del tratamiento fisicoquímico (ETFQ):** Esta corriente en promedio tiene un pH de 7.5 y una conductividad eléctrica de 53.5 mS/cm, valor cercano a la conductividad eléctrica del agua de mar (53 mS/cm; Members Tripod, 2006). Las concentraciones de sólidos suspendidos y sólidos disueltos son altas en este efluente (712 y 184,733.78 mg/L) debido a que no se remueven los sólidos del influente y a la formación de más sales durante la neutralización con hidróxido de magnesio. En la Figura 5.7, se observa la carga másica promedio de los diferentes constituyentes.

El efluente del tratamiento fisicoquímico está constituido en mayor cantidad por los sólidos disueltos 3,213.80 ton/mes. Las demás aportaciones a esta corriente son el azufre total 96.66 ton/mes, magnesio 49.36 ton/mes, sólidos suspendidos totales 12.39 ton/mes, sodio 9.53 ton/mes, cloruro 8.87 ton/mes, DQO 5.99 ton/mes y otros 1.09 ton/mes.

En la categoría “otros” están considerados el calcio, metales pesados, nitrógeno Kjeldhal, nitratos, grasas y aceites, cianuros y el fósforo total.

De los metales pesados los más abundantes son el plomo < 0.77 mg/L y el hierro 0.61 mg/L. En menores concentraciones se encuentran el níquel 0.51 mg/L, zinc 0.29 mg/L. Los demás metales pesados, como el arsénico, cadmio, cromo y el cobre están presentes, en una proporción menor a 0.1 mg/L.

El contenido de sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno y plomo en el efluente del tratamiento fisicoquímico, son altos en comparación con los valores establecidos en las condiciones particulares de descarga.

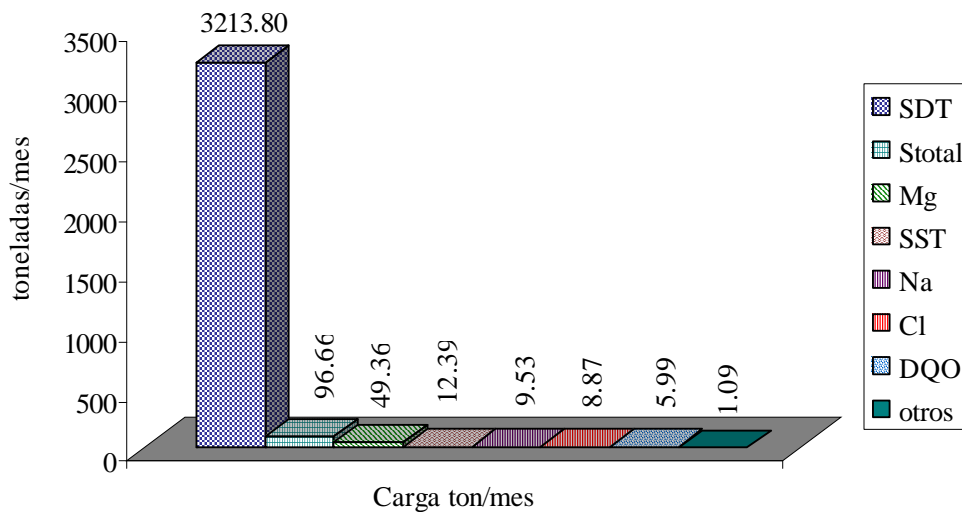


Figura 5.7 Carga másica promedio de constituyentes del efluente del tratamiento fisicoquímico.

Las concentraciones de sólidos disueltos, cloruros y azufre total no están reguladas; sin embargo, su magnitud es considerable.

A pesar de que el tratamiento fisicoquímico remueve de manera eficiente la mayoría de los metales pesados, se generan gran cantidad de sólidos disueltos y sólidos en suspensión que afectan la eficiencia de mismo. Al reciclar el agua tratada, los sólidos disueltos y suspendidos, reingresan a la corriente de agua, ocasionando una acumulación permanente de los mismos, la cual aumenta sustancialmente el consumo de químicos empleados (neutralizante, coagulante, antiespumante y polímero) y el daño a tuberías y equipo de bombeo.

**Efluente de la fosa del Apron Feeder (EAF):** El pH y la conductividad promedio son 1.38 y 3,470 mS/cm, respectivamente. El efluente de la fosa del Apron Feeder tiene además un contenido alto de sólidos suspendidos totales (1,359.2 mg/L) y de sólidos disueltos totales (227,679.8 mg/L). El pH ácido y el alto contenido de sólidos en este efluente, se deben a que la fosa recibe directamente el electrolito de las baterías que se conducen al molino. En la Figura 5.8 se observa la carga másica promedio de los constituyentes del efluente.

Los contenidos másicos mensuales por constituyente, para el efluente de la fosa son: sólidos disueltos totales 83.33 ton/mes, azufre total 3.12 ton/mes, sólidos suspendidos totales 0.50 ton/mes, DQO 0.40 ton/mes, magnesio 0.24 ton/mes, otros 0.18 ton/mes y cloruros 0.13 ton/mes.

En la categoría “otros” están incluidos el sodio, metales pesados, nitrógeno Kjeldhal, nitratos, calcio, grasas y aceites, fósforo total y los cianuros.

Los metales pesados aportan 43.6 kg/mes a esta corriente. El hierro es el más abundante, con una concentración de 73.40 mg/L; le siguen el plomo 32.99 mg/L, cobre 3.60 mg/L, cromo 3.52 mg/L, zinc 3.38 mg/L, níquel 2.03 mg/L, arsénico < 0.20 mg/L y el cadmio < 0.10 mg/L.

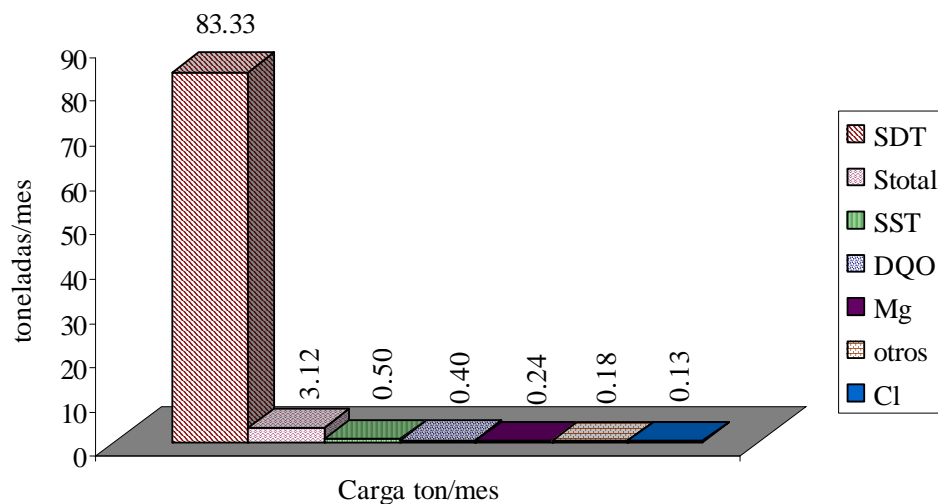


Figura 5.8 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de la fosa del Apron Feeder.

El efluente de la fosa del Apron Feeder tiene una concentración alta de azufre total (aproximadamente, 8528.15 mg/L), principalmente por el contenido de sulfatos en el electrolito y en la pasta que ingresan a la fosa durante la alimentación de baterías al molino.

La concentración de grasas y aceites en esta corriente es de 6.60 mg/L. Generalmente las baterías usadas contienen en su exterior grasas y aceites que se remueven al drenar el electrolito durante la alimentación de baterías al molino.

**Efluente del filtro prensa del MA-51 (FPMA):** La conductividad eléctrica y el pH promedio son de 320.87 mS/cm y 1.10, respectivamente. Su contenido de sólidos suspendidos y sólidos disueltos es alto. El bajo pH de este efluente se debe a que las baterías llegan al molino del MA-51 parcialmente vacías, por lo que el electrolito remanente y la pasta le infieren a este efluente un carácter ácido importante. Este efluente tiene menor contenido de sólidos suspendidos, sólidos disueltos, grasas y aceites, sulfatos, nitratos, cianuros, fósforo total, cloruros y metales pesados, que el efluente de la fosa ácida del MA-51, aunque su pH y densidad son parecidos. En la Figura 5.9 se observa la carga másica promedio de constituyentes.

Para este efluente, la carga másica mensual por constituyente es la siguiente: sólidos disueltos totales 2,668.52 ton/mes, azufre total 96.98 ton/mes, magnesio 31.98 ton/mes, sólidos suspendidos totales 14.91 ton/mes, sodio 9.88 ton/mes, cloruros 7.83 ton/mes, DQO 6.37 ton/mes y otros 2.13 ton/mes.

La categoría “otros” está compuesta por los metales pesados, nitratos, calcio, nitrógeno Kjeldhal, grasas y aceites, fósforo total y cianuros.

Los metales pesados aportan a esta corriente 0.7342 ton/mes. El más abundante es el hierro con una concentración de 33.36 mg/L. Los demás metales pesados que están presentes son el plomo <12.21 mg/L, zinc 2.40 mg/L, níquel 0.82mg/L, cadmio < 0.71 mg/L, cobre 0.34 mg/L, arsénico < 0.21 mg/L y el cromo < 0.12 mg/L.

La concentración de cianuros es de < 0.069 mg/L. Este efluente del filtro prensa tiene altas

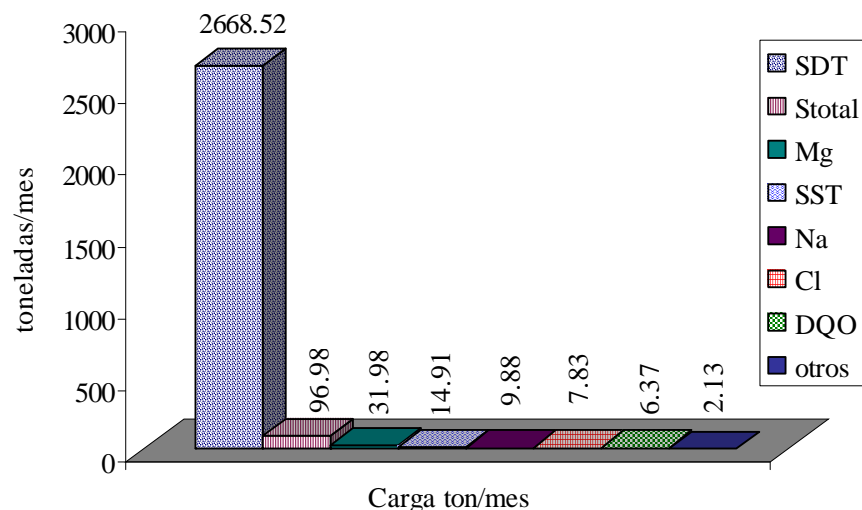


Figura 5.9 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de filtro prensa del MA-51.



concentraciones de nitratos y nitrógeno Kjeldhal (31.60 y 29.92 mg/L, respectivamente). La concentración de grasas y aceites es de 2.10 mg/L. El filtro prensa recibe las entradas de agua de las operaciones molino de baterías y del sistema de extracción de polvos.

**Efluente de agua tratada de cisterna (ATC):** Su pH y conductividad eléctrica promedio son 7.06 y 60.08 mS/cm, respectivamente. El valor de la conductividad eléctrica es ligeramente más alto que la conductividad eléctrica del agua de mar (53 mS/cm; Members Tripod, 2006). Las concentraciones de sólidos suspendidos totales (863.92 mg/L) y sólidos disueltos totales (189,129.94 mg/L) son altas debido a la presencia de sólidos que se arrastran al tratamiento (provenientes de la descarga de agua de la laguna de agua ácida) y a la adición del hidróxido de magnesio como agente neutralizante y precipitante.

El agua tratada de cisterna tiene una densidad promedio de 1.1315 gr/cm<sup>3</sup>, la cual es muy parecida a la del efluente tratado fisicoquímicamente; sin embargo su contenido de sólidos disueltos, fósforo total, sulfatos, cloruros, nitratos, cianuros, arsénico y zinc es mayor al de este efluente tratado. En la Figura 5.10 se observa la carga másica promedio de constituyentes.

Los sólidos disueltos totales en esta corriente son del orden de 2,681.30 ton/mes. Los demás constituyentes que están presentes en menor cantidad son el azufre total 85.71 ton/mes, magnesio 32.55 ton/mes, sólidos suspendidos totales 12.25 ton/mes, cloruros 8.24 ton/mes, sodio 7.13 ton/mes, DQO 4.83 ton/mes, calcio 0.58 ton/mes, nitrógeno Kjeldhal 0.46 ton/mes y otros 0.16 ton/mes.

En la categoría “otros” están considerados los nitratos, cianuros, fósforo total, metales pesados y las grasas y aceites.

De los metales pesados presentes en este efluente, el zinc es el más abundante con una concentración de 1.07 mg/L., le siguen en menor proporción el hierro < 0.53 mg/L, plomo y níquel < 0.42 mg/L y el arsénico < 0.11 mg/L. El cadmio, cromo y cobre están presentes en una concentración < 0.10 mg/L, cada uno.

Por la cisterna de agua tratada pasan en promedio 17,328 m<sup>3</sup>/mes, de los cuales, el 81.82% se recicla para ser utilizado en las diferentes operaciones del MA-51; la diferencia, el 18.18% del flujo, se envía directamente a las lagunas de infiltración para su disposición final. A la

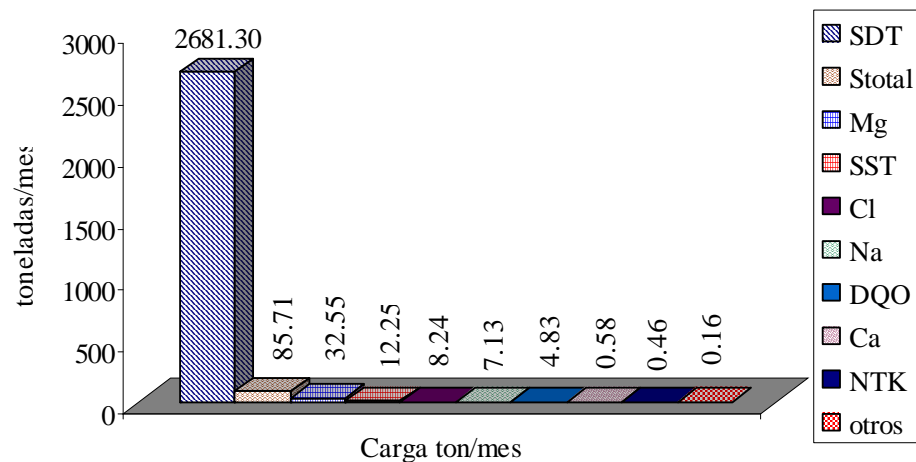


Figura 5.10 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de agua tratada de cisterna.

cisterna de agua tratada ingresa agua tanto del tratamiento fisicoquímico como de la laguna de agua tratada.

Las concentraciones de contaminantes para este efluente de agua tratada están reguladas por las condiciones particulares de descarga. La concentración de sólidos suspendidos totales (863.9 mg/L) excede el valor establecido como límite para el promedio mensual (150 mg/L). Las concentraciones de sólidos disueltos totales, sulfatos, cloruros, DQO, fierro, calcio, magnesio, sodio, azufre total y de nitratos, son altas, pero estos parámetros no están regulados. Los metales pesados, cianuros, fósforo total, nitrógeno total y de las grasas y aceites, cumplen con los límites de concentración establecidos, en el promedio mensual. El pH promedio también cumple con las condiciones de descarga, pues está dentro del rango  $5 < \text{pH} < 10$ .

**Efluente del lavado de plásticos (LP):** Este efluente representa la descarga directa de la operación del lavado de plásticos. El pH y conductividad promedio son 7.30 y 6.95 mS/cm, respectivamente. La Figura 5.11 representa la carga másica promedio de sus constituyentes:

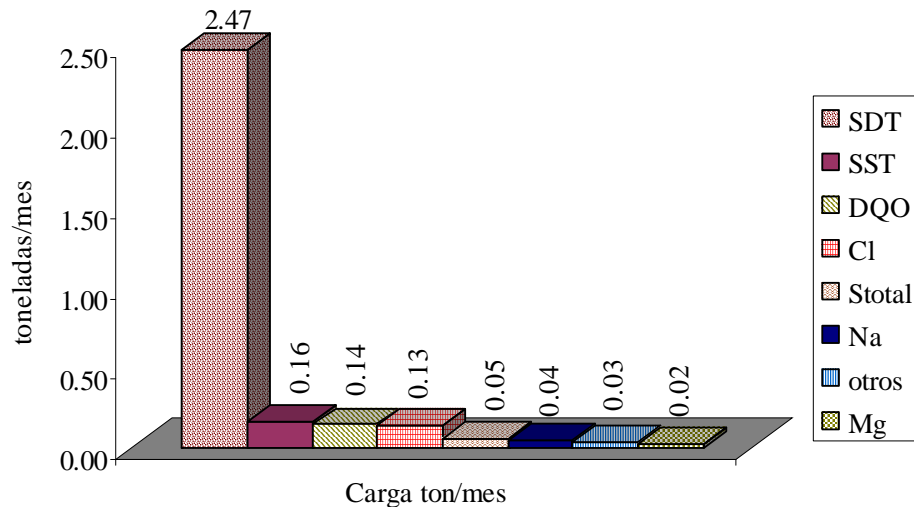


Figura 5.11 Carga másica promedio de constituyentes del efluente del lavado de plásticos.

El efluente del lavado de plásticos está compuesto principalmente por los sólidos disueltos totales, los cuales ascienden a 2.47 ton/mes. Las demás aportaciones corresponden a los sólidos suspendidos totales 0.16 ton/mes, DQO 0.14 ton/mes, cloruros 0.13 ton/mes, azufre total 50 kg/mes, sodio 40 kg/mes, otros 30 kg/mes y magnesio 20 kg/mes.

La categoría “otros” está compuesta por el calcio, grasas y aceites, nitratos, metales pesados, cianuros, nitrógeno Kjeldhal y el fósforo total.

Los metales pesados aportan a 3.5 kg/mes. El más abundante es el plomo, pues se encuentra presente en una concentración de 9.88 mg/L. Los demás metales pesados son el fierro 0.52 mg/L y el zinc 0.30 mg/L. El arsénico, cadmio, cromo, cobre y níquel, también se encuentran presentes, pero sus concentraciones son menores a 0.1 mg/L.

La concentración de plomo en este efluente es alta en comparación con el límite para el promedio mensual establecido en las condiciones particulares de descarga, que es de 0.50 mg/L (CPD, 2006). La concentración de sólidos suspendidos totales es alta (517.50 mg/L, en promedio), en relación al límite impuesto por las condiciones particulares de descarga cuyo

promedio mensual es de 150 mg/L. La concentración de sólidos disueltos totales también es alta, pero este parámetro no es regulado. Las altas concentraciones de sólidos suspendidos y disueltos se deben a las impurezas adheridas en la superficie del plástico triturado y al tamaño de partícula del mismo.

Las concentraciones de cloruros, calcio, magnesio, sodio, azufre total y nitratos también son altas pero no están reguladas, como se mencionó anteriormente.

Con respecto a los cianuros en el efluente del lavado de plásticos su concentración ( $< 6.67$  mg/L) excede la concentración límite del promedio mensual fijado en las condiciones particulares de descarga, que es de 2 mg/L (CPD, 2006).

**Agua de pozo (APO):** El agua de pozo alimenta directamente las operaciones de riego de áreas verdes, sanitarios, lavado de plásticos, lavado de móviles y laboratorio. Su pH y conductividad eléctrica promedio son 6.89 y 4.60 mS/cm, respectivamente. La concentración de sólidos suspendidos totales en este influente es de 44 mg/L. El agua de pozo tiene altas concentraciones de sólidos disueltos (3,924.30 mg/L), cloruros (557.63 mg/L) y azufre total (155.20 mg/L). La norma NOM-127-SSA-1994 establece como límites para el agua potable concentraciones de 1000 mg/L y 250 mg/L, para los sólidos disueltos y los cloruros, el azufre total no es regulado (SSA, 2006). La Figura 5.12 muestra la carga másica promedio de constituyentes.

La carga másica promedio para los sólidos disueltos totales es del orden de 13.78 ton/mes. Las cargas de los constituyentes restantes son: cloruros 1.96 ton/mes, azufre total 0.54 ton/mes, DQO 0.51 ton/mes, calcio 0.24 ton/mes, sodio 0.21 ton/mes, sólidos suspendidos totales 0.15 ton/mes y otros 0.11 ton/mes. La categoría "otros" está compuesta por el magnesio, metales pesados, nitrógeno Kjeldhal, grasas y aceites y el fósforo total.

Los metales contribuyen con 10.4 kg/mes. El más abundante es el hierro, su concentración es de 2.20 mg/L. Le siguen en menor concentración el plomo 0.13 mg/L, zinc 0.12 mg/L, arsénico  $< 0.1$  mg/L, cadmio  $< 0.1$  mg/L, cromo  $< 0.1$  mg/L, cobre  $< 0.1$  mg/L y el níquel  $< 0.1$  mg/L.

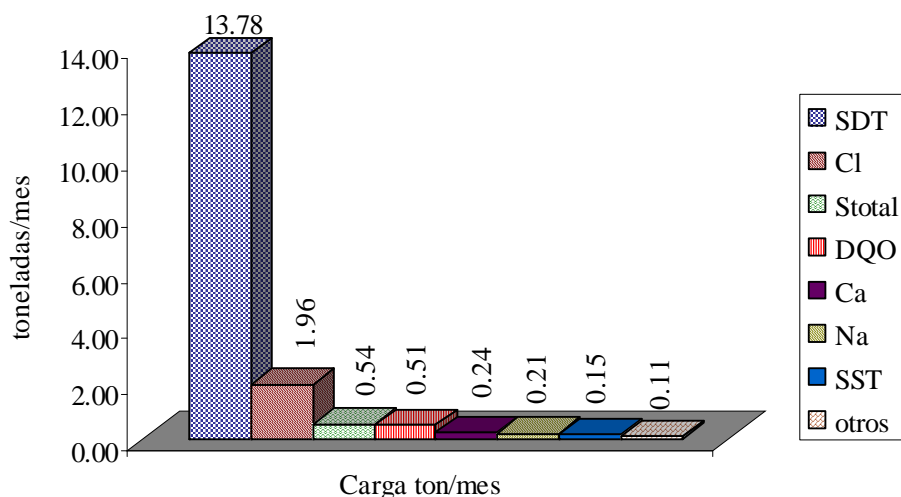


Figura 5.12 Carga másica promedio de constituyentes del agua de pozo.

**Agua purificada (APU):** El pH y la conductividad promedio son 6.45 y 0.10 mS/cm, respectivamente. La concentración de sólidos suspendidos es de 26 mg/L y la de sólidos disueltos de 196.50 mg/L. En la Figura 5.13 se representa la carga másica promedio de constituyentes del agua purificada:

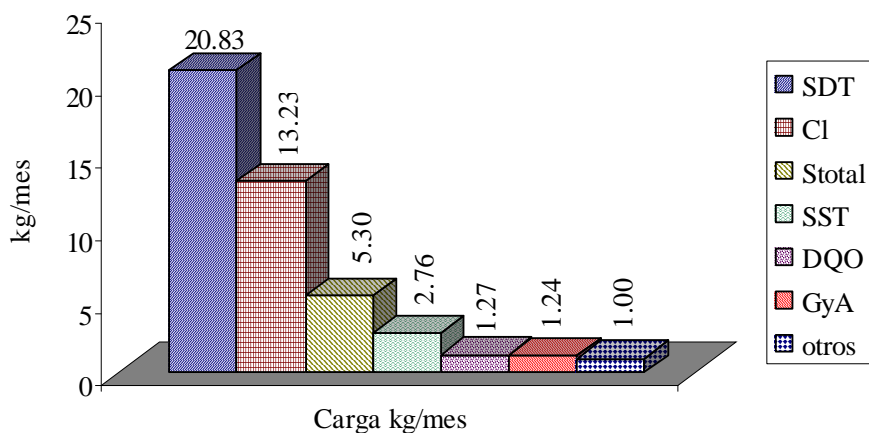


Figura 5.13 Carga másica promedio de constituyentes del agua purificada.

Como se puede observar en la Figura 5.12, la contribución del agua purificada a incrementar las concentraciones de los diferentes parámetros es insignificante.

**Agua potable de pipa (PIPA):** El pH y la conductividad eléctrica promedio para este influente son 7.10 y 2.50 mS/cm, respectivamente. El agua potable de pipa tiene altas concentraciones de cloruros (370.45 mg/L) y sólidos disueltos (1,780 mg/L). La norma oficial mexicana, NOM-127-SSA-1994, establece como concentraciones límite 400 mg/L y 1,000 mg/L para los cloruros y sólidos disueltos, respectivamente (SSA, 2006).

Esta agua se utiliza en las operaciones de regaderas, enfriamiento de plásticos y hornos, lavandería y en el ajuste de refinados y aleaciones. En la Figura 5.14 se observa la carga másica promedio de constituyentes:

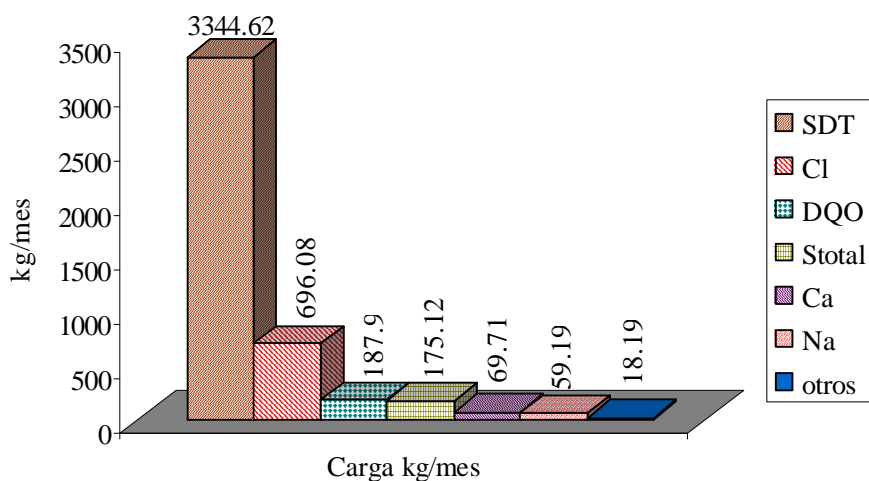


Figura 5.14 Carga másica promedio de constituyentes del agua potable de pipa.

El agua potable contribuye con una carga promedio de 3,344.62 kg/mes de sólidos disueltos, cloruros 696.08 kg/mes, DQO 187.9 kg/mes, azufre total 175.12 kg/mes, calcio 69.71 kg/mes, sodio 59.19 kg/mes y otros 18.19 kg/mes.

La categoría “otros” está compuesta por el magnesio, metales pesados, nitrógeno Kjeldhal, grasas y aceites y el fósforo total.

Los metales pesados representan, en promedio < 2.1 kg/mes. El zinc es el que se encuentra en mayor concentración (0.41 mg/L). Los demás metales están presentes en una concentración menor a 0.1 mg/L (plomo, arsénico, cadmio, cromo, cobre, hierro y níquel). La norma NOM-127-SSA-1994 establece como concentraciones límite 0.025 mg/L, 0.05 mg/L, 0.005 mg/L y 0.05 mg/L, para el plomo, arsénico, cadmio y cromo, respectivamente, (SSA, 2006). Puesto que las concentraciones reportadas de metales pesados corresponden al límite de detección del equipo, no se puede emitir un juicio en torno a si cumplen o no con los valores establecidos en la normatividad.

**Efluente de comedor (COM):** Su pH y conductividad eléctrica promedio son 6.56 y 0.99 mS/cm, respectivamente. Este efluente tiene altas concentraciones de cloruros (85.79 mg/L), sólidos suspendidos (79.25 mg/L), sólidos disueltos (1,453.88 mg/L) y DQO (1,520 mg/L). La alta concentración de DQO se debe principalmente a las aportaciones de las grasas y alimentos dispuestos en esta corriente. La Figura 5.15 muestra la carga másica promedio de los diferentes constituyentes.

En este efluente los parámetros con mayor carga másica son el DQO, 161.12 kg/mes y los sólidos disueltos totales, 154.11 kg/mes. En menor proporción las grasas y aceites 17.86 kg/mes, cloruros 9.09 kg/mes, sólidos suspendidos totales 8.40 kg/mes, azufre total 5.98 kg/mes, sodio 4.68 kg/mes y otros 2.48 kg/mes.

La categoría “otros” la integran el nitrógeno Kjeldhal, calcio, fósforo total, metales pesados, magnesio y los cianuros.

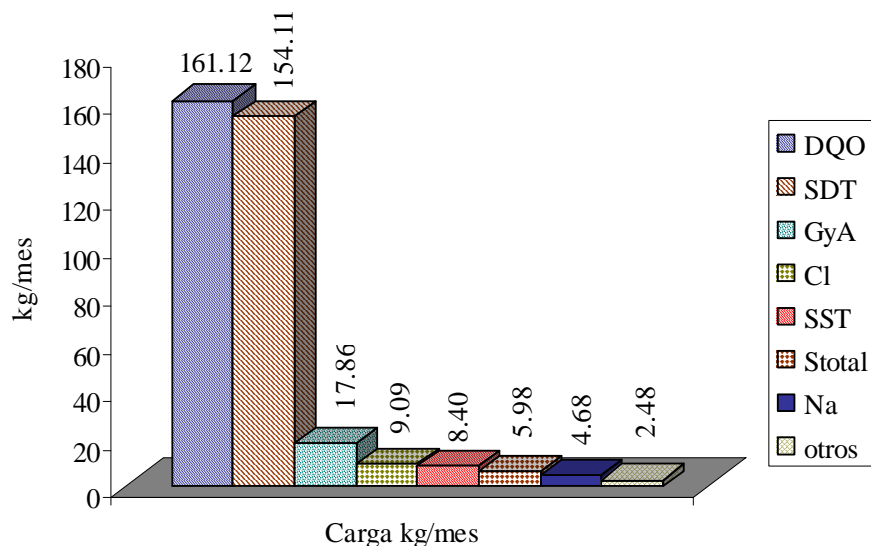


Figura 5.15 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de comedor.

La contribución por metales pesados es mínima, en promedio, 0.1 kg/mes. El zinc es el más abundante, su concentración es < 0.12 mg/L, le siguen el arsénico < 0.12 mg/L y el plomo < 0.105 mg/L. El cadmio, cromo, cobre, fierro y el níquel, están presentes, individualmente, a una concentración menor a 0.10 mg/L.

El efluente de comedor descarga directamente a la planta de tratamiento biológico y constituye el 10.23% del volumen total tratado en dicha planta.

**Efluente de lavado de móviles (LM):** El efluente del lavado de móviles recoge la descarga de la operación de lavado de barredoras y montacargas. Este efluente se envía directamente a la fosa multiusos y constituye el 3.63% en volumen del influente a la fosa. Su pH y conductividad eléctrica promedio son 6.69 y 2.76 mS/cm, respectivamente. Este efluente presenta altas concentraciones de cloruros (352.91 mg/L), sólidos disueltos (2,478 mg/L), azufre total (81.50 mg/L), además de grasas y aceites (10.85 mg/L). La Figura 5.16 muestra la carga másica promedio de los distintos constituyentes:

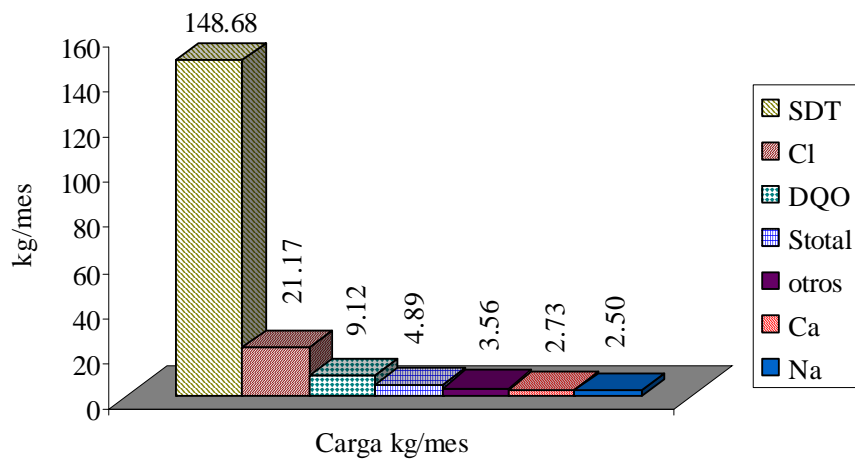


Figura 5.16 Carga másica promedio de constituyentes del efluente del lavado de móviles.

Los sólidos disueltos totales, contribuyen mensualmente con 148.68 kg/mes. Las demás aportaciones másicas son cloruros 21.17 kg/mes, DQO 9.12 kg/mes, azufre total 4.89 kg/mes, otros 3.56 kg/mes, calcio 2.73 kg/mes y sodio 2.50 kg/mes.

La categoría “otros” está integrada por los sólidos suspendidos, grasas y aceites, nitrógeno Kjeldhal, fósforo total, metales pesados y los cianuros.

La carga de los metales pesados es de sólo 0.1 kg/mes. El fierro es el más abundante, su concentración es 0.49 mg/L. En menor concentración se encuentran el zinc < 0.45 mg/L, plomo 0.42 mg/L y el arsénico menor a 0.16 mg/L. El cadmio, cromo, cobre y níquel también están presentes y su concentración individual es menor a 0.1 mg/L.

**Efluente de regaderas (REG):** Su pH y conductividad promedio son 7.4 y 2.2 mS/cm, respectivamente. La concentración de sólidos suspendidos es de 52.75 mg/L. En comparación con el agua potable, el contenido de sólidos disueltos es mayor en la descarga de regaderas y su concentración es de 1,999.63 mg/L. El efluente de regaderas tiene una alta concentración de DQO (en promedio 270 mg/L), debido a los químicos y detergentes que se utilizan en la

limpieza y durante el baño (shampoo, jabones de baño, etc.). En la Figura 5.17 se muestra la carga másica promedio de constituyentes:

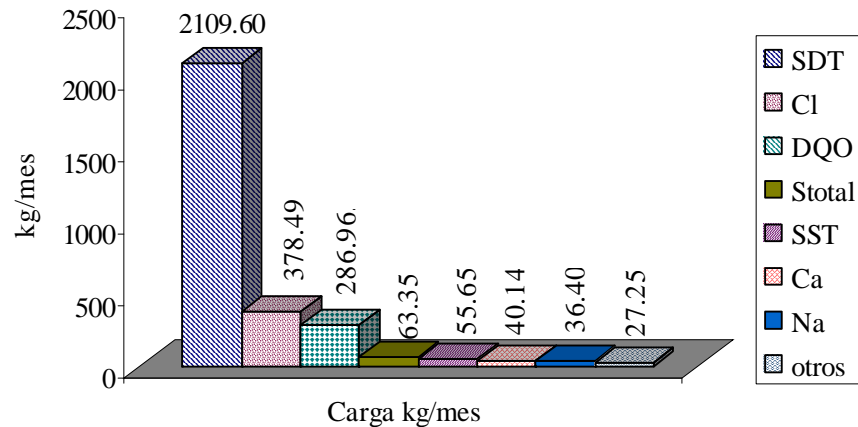


Figura 5.17 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de regaderas.

Los sólidos disueltos totales representan 2,109.60 kg/mes. Le siguen en menor cantidad los cloruros 378.49 kg/mes, DQO 286.96 kg/mes, azufre total 63.35 kg/mes, sólidos suspendidos totales 55.65 kg/mes, calcio 40.14 kg/mes, sodio 36.40 kg/mes y otros 27.25 kg/mes.

La categoría “otros” la integran el nitrógeno Kjeldhal, magnesio, grasas y aceites, metales pesados, fósforo total y los cianuros.

Los metales pesados contribuyen mensualmente con 1 kg. El plomo es el metal pesado más abundante, su concentración es de 0.19 mg/L. El resto de los metales que están presentes son el arsénico < 0.165 mg/L, zinc 0.12 mg/L, fierro < 0.105 mg/L. La concentración de cadmio, cromo y cobre en el efluente de regaderas es menor a 0.1 mg/L.

Esta corriente tiene altas concentraciones de azufre total (60.05 mg/L), calcio (38.05 mg/L), sodio (34.50 mg/L), magnesio (7.05 mg/L) y de grasas y aceites (6.3 mg/L).

El efluente de regaderas descarga directamente en la fosa multiusos y constituye el 63.83% del volumen que ingresa a dicha fosa.

**Efluente de lavandería (LAV):** El efluente de la lavandería descarga mensualmente 225 m<sup>3</sup> a la fosa multiusos. Este efluente tiene una conductividad eléctrica y un pH promedio de 2.87 mS/cm y 7.37, respectivamente. Sus concentraciones de cloruros (411.40 mg/L), sólidos suspendidos (207 mg/L), sólidos disueltos (2,404.88 mg/L) y DQO (710 mg/L) son relativamente altas. En la lavandería se adicionan químicos y detergentes para remover contaminantes de la ropa de trabajo que usa el personal de la planta. La carga másica promedio de constituyentes se observa en la Figura 5.18.

El efluente de la lavandería está constituido mayormente por los sólidos disueltos totales y la DQO, los cuales aportan 541.10 y 159.75 kg/mes, respectivamente. En menores cantidades se

encuentran presentes los cloruros 92.56 kg/mes, sólidos suspendidos totales 46.58 kg/mes, otros 27.66 kg/mes y el azufre total 16.76 kg/mes.

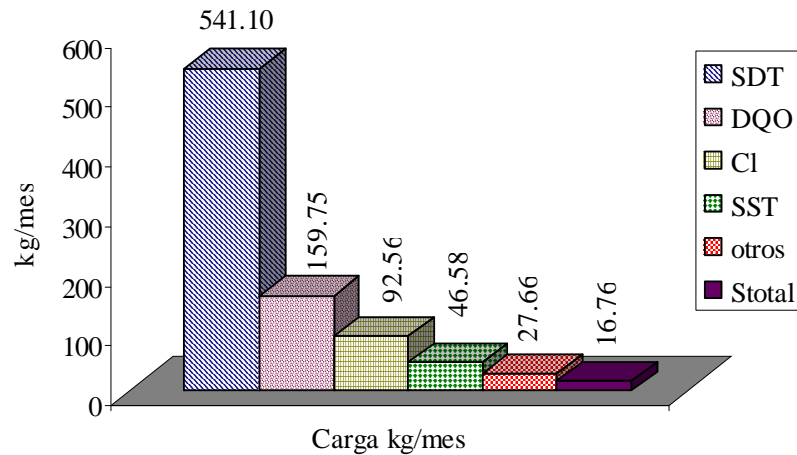


Figura 5.18 Carga másica promedio de constituyentes del efluente de lavandería.

La categoría “otros” está formada por el calcio, nitrógeno Kjeldhal, magnesio, grasas y aceites, metales pesados, fósforo total y los cianuros.

Los metales pesados aportan mensualmente 1.3 kg/mes a esta descarga. El más abundante es el plomo, se encuentra presente a una concentración de 4.62 mg/L. Los demás metales presentes son el hierro 0.305 mg/L, arsénico <0.165 mg/L, zinc < 0.14 mg/L. Las concentraciones individuales de cadmio, cromo, cobre y níquel son menores a 0.1 mg/L.

El contenido de plomo es alto en el efluente de lavandería debido a que en esta operación se efectúa el lavado de los uniformes del personal operativo, los cuales están impregnados de partículas de plomo y demás contaminantes. Los contaminantes se adhieren a la ropa en forma de polvos.

**Influente al tratamiento biológico (ITB):** Está compuesto por las descargas de sanitarios y del comedor. Su pH promedio es de 7.30. La conductividad eléctrica promedio es de 3.40 mS/cm. El influente biológico tiene altas concentraciones de sólidos disueltos totales (3,467.50 mg/L), cloruros (739.49 mg/L), sólidos suspendidos (645 mg/L), grasas y aceites (167.6 mg/L), azufre total (31.71 mg/L) y fósforo total (18.1 mg/L), debido a las aportaciones del excremento humano y a los residuos orgánicos del comedor. La Figura 5.19 muestra la carga másica promedio de los diferentes constituyentes.

Las cargas másicas de este influente son: sólidos disueltos totales 3.59 ton/mes, DQO 1.80 ton/mes, cloruros 0.77 ton/mes, sólidos suspendidos totales 0.67 ton/mes, grasas y aceites 0.17 ton/mes, nitrógeno Kjeldhal 90 kg/mes, calcio 60 kg/mes, sodio 50 kg/mes, otros 40 kg/mes y azufre total 30 kg/mes.



La categoría “otros” está integrada por el magnesio, fósforo total, metales pesados, nitratos y cianuros.

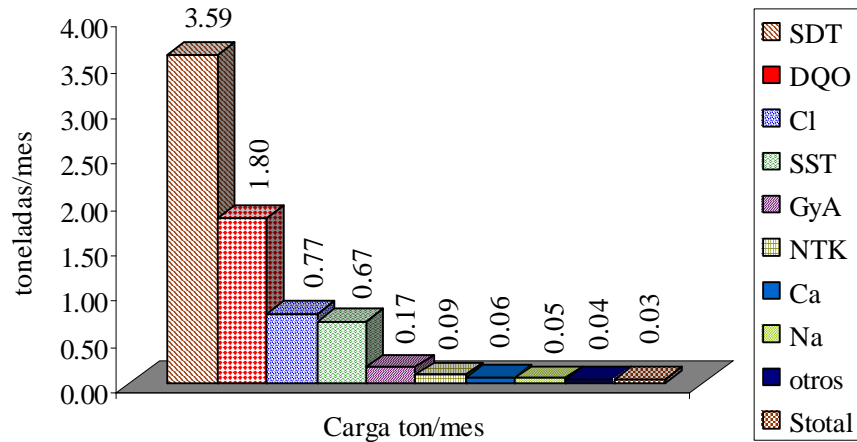


Figura 5.19 Carga másica promedio de constituyentes del influente del tratamiento biológico.

Los metales pesados contribuyen mensualmente con 2.2 kg; siendo el plomo el más abundante, con una concentración de 1.13 mg/L. Los demás metales pesados presentes son el hierro 0.35 mg/L, zinc 0.15 mg/L, cadmio < 0.1 mg/L, cromo < 0.1 mg/L, cobre < 0.1 mg/L y níquel < 0.1 mg/L.

El influente biológico tiene además, altas concentraciones de calcio (48.8 mg/L) y magnesio (20.2 mg/L).

**Electrolito contenido en baterías usadas (EBU):** El electrolito se distribuye en la fosa del Apron Feeder y en el molino del MA-51. Su pH y conductividad eléctrica promedio son 0.36 y 12,927.06 mS/cm. Este valor de conductividad es aproximadamente, 243 veces más grande que la conductividad eléctrica del agua de mar (53mS/cm; Members Tripod, 2006). Las concentraciones de sólidos disueltos (405,111.42 mg/L) y sólidos suspendidos (2,072.15 mg/L) son bastante altas. El electrolito tiene una densidad de 1.21 gr/cm<sup>3</sup> y contiene aproximadamente, un 30% en peso de ácido sulfúrico, el detalle del cálculo se incluye en el Anexo 6. La Figura 5.20 representa la carga másica promedio de constituyentes encontrados.

Los sólidos disueltos aportan, en promedio, 589.44 ton/mes al electrolito. En menores cantidades también están los sólidos suspendidos totales 3,014.98 kg/mes, sodio 1,194.47 kg/mes, DQO 331.74 kg/mes, cloruros 80.41 kg/mes, nitrógeno Kjeldhal 69.69 kg/mes, calcio 41.78 kg/mes y otros 18.16 kg/mes.

La categoría “otros” la integran los metales pesados, magnesio, fósforo total, nitratos y los cianuros.

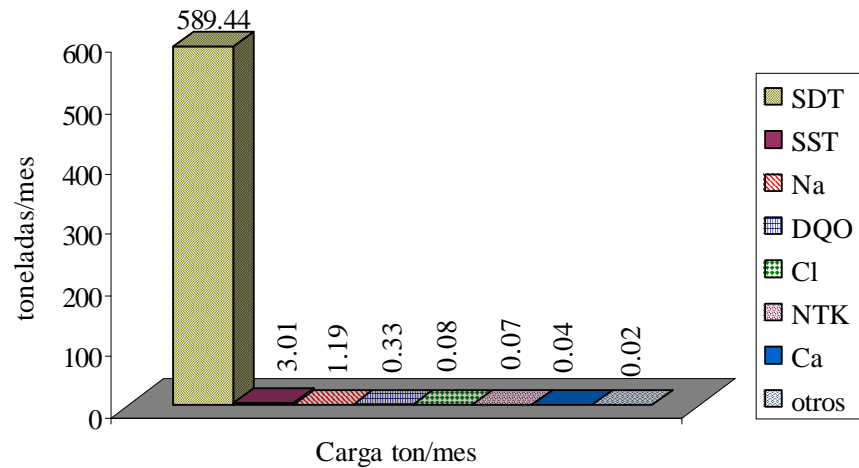


Figura 5.20 Carga másica promedio de constituyentes en el electrolito contenido en baterías usadas.

Los metales contribuyen mensualmente con 45 kg. El más abundante en el electrolito es el hierro, su concentración es de 23.36 mg/L. En menor concentración se encuentran presentes, además, el zinc 4.02 mg/L, plomo 2.62 mg/L, cobre 0.38 mg/L, níquel < 0.23 mg/L, cromo < 0.103 mg/L, arsénico < 0.10 mg/L y cadmio < 0.10 mg/L.

**Lodos del tratamiento fisicoquímico (LTFQ):** Se producen aproximadamente 3.8 ton/día de lodos en la planta de tratamiento fisicoquímico, lo cual equivale a 114 toneladas al mes. Los lodos del tratamiento fisicoquímico son manejados y confinados como residuos no peligrosos. En la Tabla 5.3 se muestran las concentraciones de los elementos o especies más representativos de su caracterización.

De la Tabla 5.3 se observa que las especies químicas más abundantes en este lodo son el magnesio, hierro, azufre total, plomo y el sodio.

El cálculo de las cargas másicas por constituyente, para cada uno de los puntos de muestreo descritos anteriormente, se presenta con mayor detalle en el Anexo 7.

A partir de los resultados de los análisis realizados, se observó que existen parámetros como la densidad, conductividad eléctrica, sulfatos, cloruros, sólidos disueltos totales, azufre total, calcio, sodio, hierro y el magnesio que no están regulados por las condiciones particulares de descarga, ni por la normatividad, pero que están presentes en los efluentes e influentes muestreados, afectando la calidad del agua y limitando sus opciones de reuso.

### 5.5 Balances volumétricos de agua

La Figura 5.21 presenta el diagrama de flujo que resume el balance volumétrico de agua (expresado en m<sup>3</sup>/mes), distinguiendo con colores las diferentes corrientes de agua y mostrando con flechas el origen y destino de cada una de ellas.

En el proceso industrial existen entradas y salidas de agua. Las entradas de agua son las aportaciones de agua fresca, el ingreso de agua en el electrolito y en los químicos del tratamiento (neutralizante, antiespumante, coagulante y polímero). Las salidas del sistema están integradas por las pérdidas por evaporación, disposición en lagunas de infiltración y por remoción de agua contenida en pasta y lodos.

Tabla 5.3 Composición de los lodos del tratamiento fisicoquímico.

Especie	Concentración mg/Kg
Cloruros	1,610.77
Sólidos suspendidos	6,621.80
Sólidos disueltos	48,138.05
Plomo	26,515
Arsénico	<1
Cadmio	1,850
Cromo	750
Cobre	1,950
Hierro	82,200
Níquel	1,150
Zinc	6,200
Calcio	1,350
Magnesio	149,150
Sodio	14,200
Cianuros	<0.5
Azufre total	47,850
Fósforo total	1,548
Nitratos	1.95
Nitrógeno Kjeldhal	818
Grasas y aceites	830

\* Composiciones expresadas en mg/Kg base húmeda.

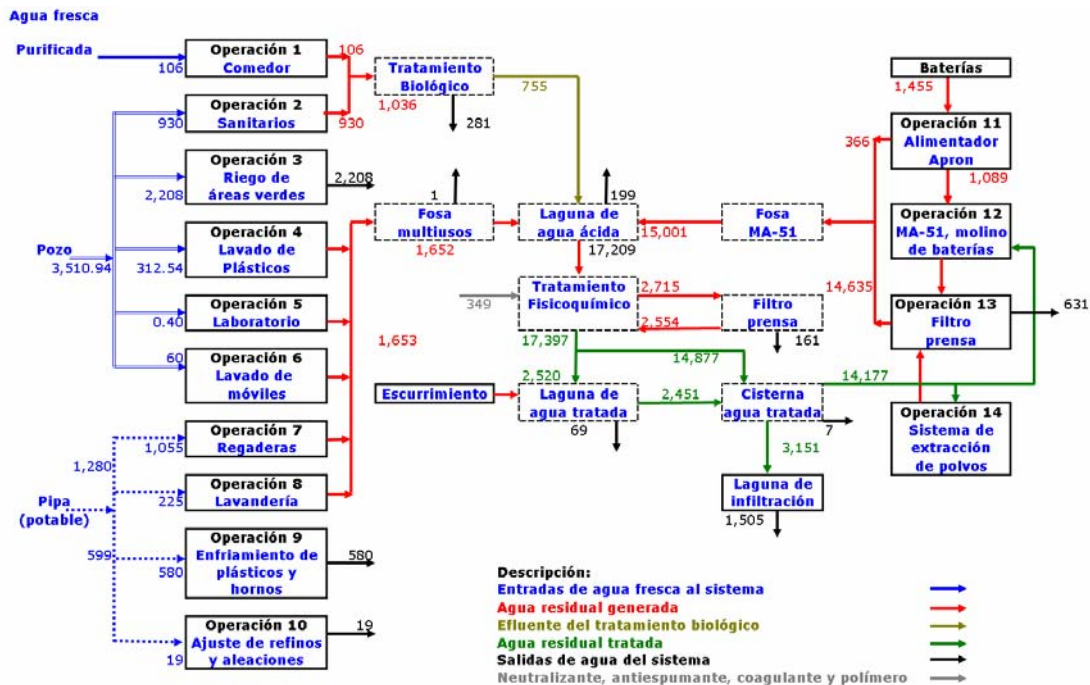


Figura 5.21 Balance volumétrico de agua actual (m<sup>3</sup>/mes).

Las principales fuentes de agua fresca son el agua de pozo, el agua de potable de pipa y el agua purificada, las cuales representan un ingreso mensual de 5,495.94 m<sup>3</sup>. El ingreso mensual de electrolito es de 1,455 m<sup>3</sup> y por químicos para tratamiento ingresan al sistema 349 m<sup>3</sup>/mes.

Las principales salidas de agua del sistema son: disposición final en lagunas de infiltración (3,151 m<sup>3</sup>/mes), evaporación en las operaciones de enfriamiento, ajuste de refinados y

aleaciones (599 m<sup>3</sup>/mes) y en la laguna de agua tratada (69 m<sup>3</sup>/mes); remoción de agua contenida en los lodos del filtro prensa del tratamiento fisicoquímico (161 m<sup>3</sup>/mes) y en los lodos y pasta del filtro prensa en el MA-51 (631 m<sup>3</sup>/mes). Los aspectos más importantes que se pueden observar del balance volumétrico de agua se resumen en las Tablas 5.4 y 5.5. En el Anexo 8 se presentan mayores detalles del balance volumétrico de agua.

Tabla 5.4 Información relevante del balance volumétrico de agua del sistema actual en m<sup>3</sup>/mes.

Consumo de agua fresca dentro de la planta (FW)	5,495.94
Entradas de agua fresca al proceso (FWI)	3,287.94
Entradas de agua por escurrimiento (RI)	variable
Entradas de agua por el electrolito (EI)	1,455
Entradas de agua por químicos (neutralizante, antiespumante, coagulante y polímero) (TCI)	349
Entradas totales de agua al proceso (TI)	5,091.94
Salidas totales de agua del proceso (WO)	5,099
Generación de agua residual (WWG)	17,689.94
Caudal de agua tratada (WWT)	18,244.94
Reuso directo de agua residual (DWWR)	0
Regeneración de agua residual y reuso (WWRR)	2,407.94
Tratamiento de agua residual y reciclaje (WWRC)	14,177

La información de la Tabla 5.4 es muy valiosa porque indica la situación actual que guarda la planta de Ciénega de Flores en cuanto a consumo de agua fresca, generación de aguas residuales, tratamiento y reuso de las mismas. Con el fin de poder utilizar sistemáticamente la información de la Tabla 5.4 y poder valorar y comparar la situación actual con la situación futura, después de implementar los sistemas alternos, se desarrollaron índices, los cuales se muestran en la Tabla 5.5:

Tabla 5.5 Indicadores para la evaluación del uso del agua (sistema actual).

Indicador	Valor
<b>Para minimización de aguas residuales</b>	
Consumo de agua fresca a proceso por batería (FWI/bat), L/bat	4.09
Consumo de agua por batería (FWI+WWRC)/bat, L/bat	21.75
Tasa de generación de agua residual por batería (WWG/bat), L/bat	22.03
<b>Para reuso de agua</b>	
Tasa de reuso directo (DWWR/WWG)	0
Tasa de regeneración y reuso (WWRU/WWRG)	0.0567
Tasa de tratamiento y reciclaje (WWRC/WWT)	0.777
<b>Costo del agua</b>	
Costo por consumo de agua fresca, \$/mes	202,479
Costo por consumo de agua fresca, \$/m <sup>3</sup>	102
Costo del tratamiento fisicoquímico, \$/mes	1,186,747
Costo del tratamiento fisicoquímico, \$/m <sup>3</sup>	68.96

Los indicadores calculados se clasificaron en 3 categorías: para minimización de aguas residuales, para reuso de agua y costo del agua. Cada uno de los indicadores cuantifica cierto consumo o caudal a través de una relación o una tasa, en comparación a otro caudal o bien, como una razón de consumo o de generación por unidad de batería usada procesada. Para el cálculo, el total de baterías usadas procesadas fue de 803,145 baterías/mes. En el caso de los indicadores que expresan consumo de agua por batería, tasa de generación de agua residual por batería, costo de agua fresca y costo del tratamiento fisicoquímico, el objetivo de cualquier iniciativa de mejora es reducir su magnitud lo más posible. A diferencia, los que se expresan en tasas, como el reuso directo, regeneración y reuso y tratamiento y reciclaje, el valor deberá tender a la unidad.

El consumo de agua fresca es de 21.75 L/batería mientras que la tasa de generación de agua residual es de 22.03 L/batería. La generación de agua residual es ligeramente mayor al consumo de agua fresca. La tasa de reuso directo es de 0, lo cual representa que actualmente no se están reusando de manera directa los efluentes de agua en el proceso, éste valor debe incrementarse para aprovechar mejor el agua. La tasa de tratamiento y reciclaje es de 0.77 e indica que sólo el 77.7% del agua tratada se recicla. Lo ideal son valores de 1 o cercanos a 1 para ambos indicadores. Con el reuso se busca reducir los consumos y generación de agua residual y aumentar las tasas de reuso directo y de tratamiento y reciclaje, para que sus valores tiendan a la unidad.

Estos indicadores fueron de mucha utilidad pues permitieron cuantificar y/o evaluar el uso del agua del sistema actual en comparación con las propuestas de reuso planteadas en el presente trabajo. El detalle del cálculo para cada uno de los conceptos anteriores se incluye en el Anexo 9.

### **5.6 Balances de masa de contaminantes**

Se realizaron balances de masa para los constituyentes o contaminantes presentes en las corrientes de agua del sistema. Los balances para los principales constituyentes (sólidos suspendidos, sólidos disueltos, cloruros, sulfatos y plomo) se muestran a continuación así como algunas observaciones relevantes sobre cada uno. Las tablas con el cálculo de los ingresos y egresos de los demás constituyentes (arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, zinc, hierro, azufre total, fósforo total, calcio, magnesio, sodio, grasas y aceites, DQO, nitrógeno Kjeldhal, nitratos y cianuros) se incluyen en el Anexo 10.

*Sólidos suspendidos totales (SST):* En la Figura 5.22 se presenta el balance de masa para los sólidos suspendidos totales, en donde los flujos máxicos están expresados en toneladas/mes.

De la Figura 5.22 se observa que los principales contribuyentes de sólidos suspendidos totales son el electrolito de las baterías y el efluente de filtro prensa a fosa MA-51. La fosa multiusos también aporta una cantidad considerable de sólidos suspendidos, aproximadamente 2.19 toneladas/mes; lo anterior debido a que en la fosa multiusos se concentran las descargas de las operaciones de plásticos, lavado de móviles, regaderas y lavandería, en donde se generan sólidos suspendidos.

La carga másica de sólidos suspendidos en el efluente de la cisterna que se recicla en el MA-51 es alta. Esta corriente transporta mensualmente 12.25 toneladas. El tratamiento

fisicoquímico debiera contribuir en reducir los sólidos suspendidos totales de manera más significativa, sin embargo esto no sucede. Por otro lado, la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente de la cisterna (863.9 mg/L) es mayor a la correspondiente al efluente del tratamiento fisicoquímico (712 mg/L); lo anterior puede ser debido a la contribución del agua pluvial al mezclarse con el agua tratada o bien, a la resuspensión de sólidos sedimentados durante la operación de las bombas (López Zavala M.A, 2006). En ambos casos las concentraciones de sólidos suspendidos son superiores al límite establecido como promedio mensual en las condiciones particulares de descarga, el cual es de 150 mg/L (CPD, 2006).

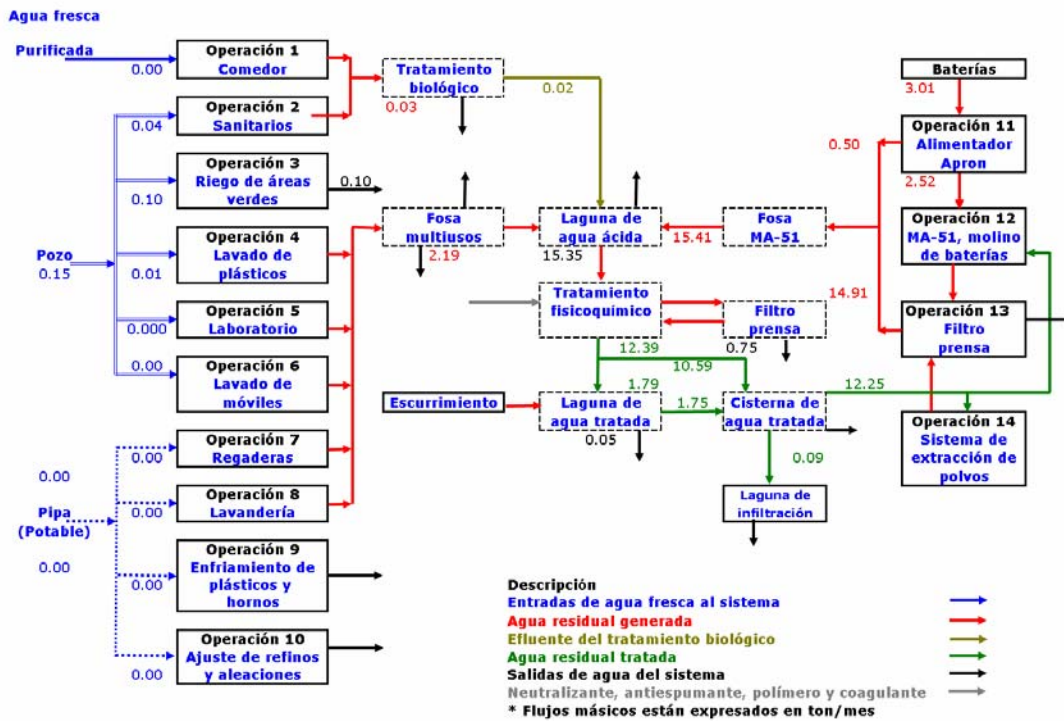


Figura 5.22 Balance de masa para los sólidos suspendidos totales (ton/mes).

**Sólidos disueltos totales (SDT):** El diagrama en la Figura 5.23 resume el balance de sólidos disueltos totales en el sistema. Los flujos máxicos están expresados en toneladas/mes.

De manera similar a los sólidos suspendidos, el electrolito es el principal contribuyente de sólidos disueltos y en menor grado se tiene la aportación de la fosa multiusos. Es importante mencionar, que de acuerdo a los resultados de los análisis realizados, el tratamiento fisicoquímico no contribuye a remover los sólidos disueltos totales, incluso su concentración incrementa, como consecuencia de la neutralización con hidróxido de magnesio (López Zavala M.A., 2006).

La concentración de sólidos disueltos totales en el efluente de la cisterna es mayor a la correspondiente al efluente del tratamiento fisicoquímico (como en el caso de los sólidos suspendidos totales), debido a la contribución del agua pluvial, que se mezcla con el agua en la laguna de agua tratada y/o a la resuspensión de sólidos sedimentados en la cisterna durante el bombeo (López Zavala M.A., 2006).

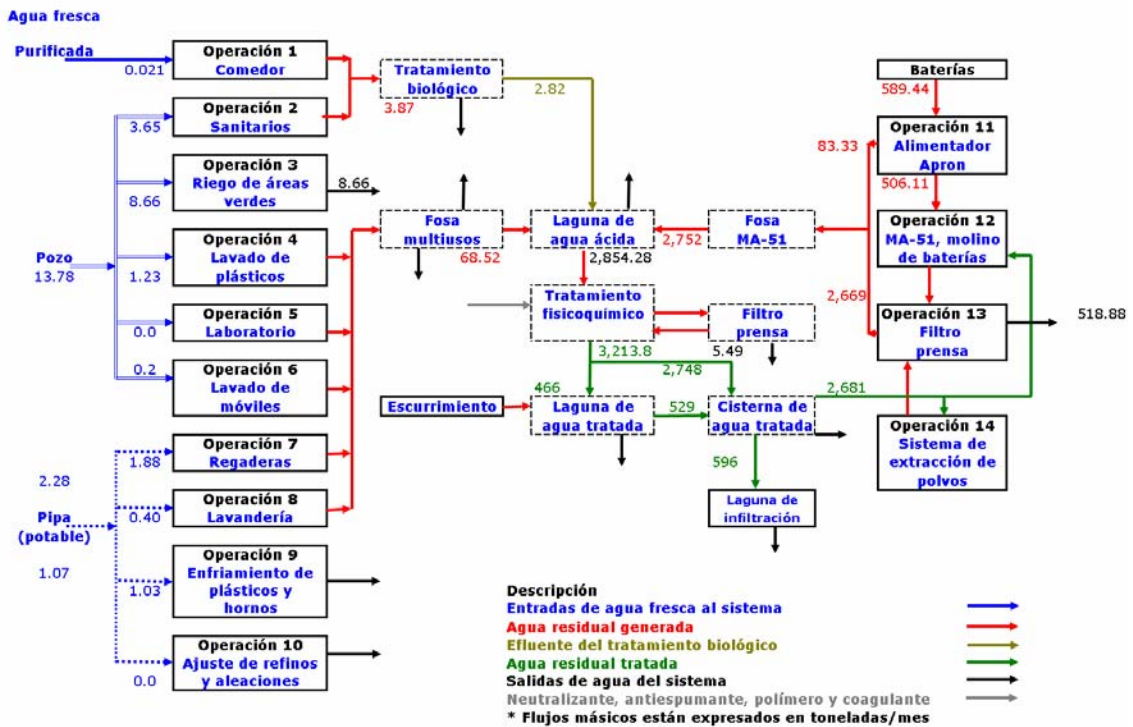


Figura 5.23 Balance de masa para los sólidos disueltos totales (ton/mes).

Los límites de concentración para los sólidos disueltos totales, no están regulados actualmente en las condiciones particulares de descarga; sin embargo, las concentraciones de sólidos disueltos totales en el efluente del tratamiento fisicoquímico y en el efluente de la cisterna de agua tratada son elevadas. Su valores promedio son de 184,733.78 mg/L y 189,129.94 mg/L, respectivamente.

**Cloruros (Cl):** Los mayores ingresos de cloruros son el agua de pozo, el agua potable de pipa y el electrolito, tal como se observa en la Figura 5.24.

Los cloruros son especies iónicas muy solubles en el agua y una de las principales fuentes de sales en las corrientes de agua del proceso de reciclaje. Cuando las baterías ingresan al molino del MA-51 contienen pasta y una cantidad importante de electrolito, por tal razón las concentraciones de cloruros son altas en los efluentes del filtro prensa y del Apron Feeder, en promedio 535.34 y 358.68 mg/L, respectivamente (López M.A., 2006).

La fosa multiusos contribuye de manera importante con cloruros (524.72 mg/L, en promedio), siendo el origen de los mismos las descargas correspondientes a las operaciones de lavado de plásticos, lavado de móviles, regaderas y lavandería, que a su vez reciben las aportaciones de cloruros del agua fresca utilizada en estas operaciones (López M.A., 2006).

En el tratamiento fisicoquímico se remueve una pequeña parte de los cloruros; sin embargo, las concentraciones en el efluente tratado aún son elevadas (510.08 mg/L, en promedio), por lo que las alternativas para la remoción de cloruros deben estar enfocadas a mejorar la calidad del agua de pozo (López M.A., 2006).



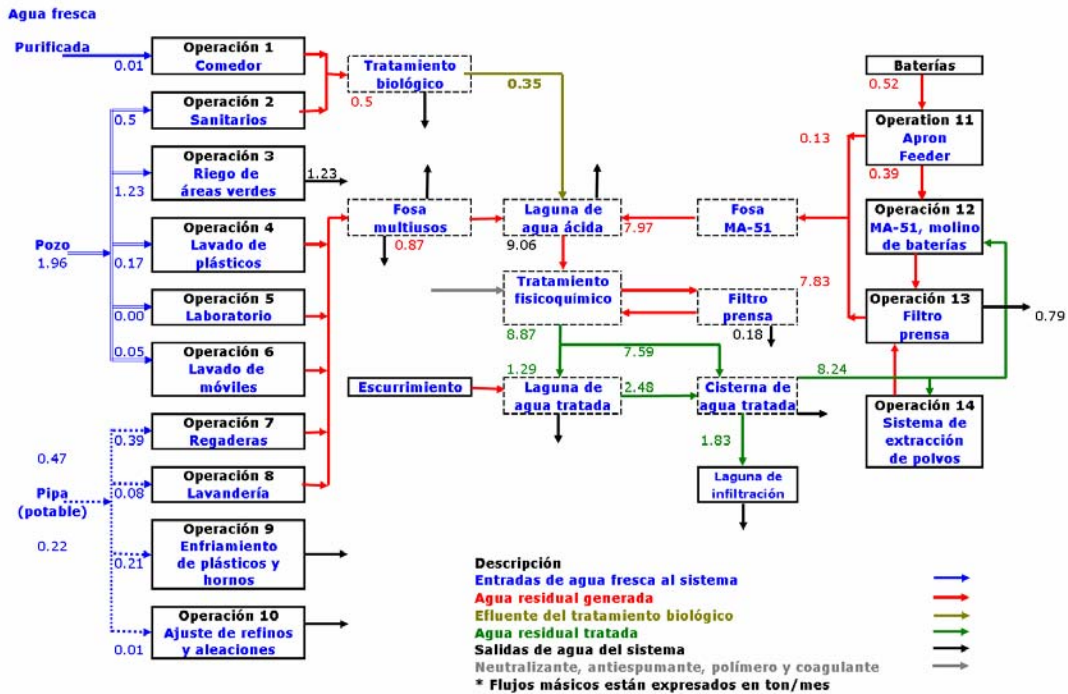


Figura 5.24 Balance de masa para los cloruros (ton/mes).

Aunque la concentración de cloruros no está regulada por las condiciones particulares de descarga, es importante considerar su efecto, ya que en promedio ingresan en el electrolito 55.27 mg/L de cloruros y el agua tratada que se recicla en el proceso MA-51, contiene aproximadamente 581.03 mg/L. Los cloruros afectan la operación y el tiempo de vida útil de los equipos y tuberías, al causar corrosión en los mismos.

**Sulfatos ( $SO_4$ ):** Las principales aportaciones de sulfatos son el electrolito y el efluente del filtro prensa del MA-51 (en promedio ingresan, 541.79 y 500.58 toneladas/mes, respectivamente); debido a que las baterías usadas que ingresan al molino contienen un volumen considerable de electrolito rico en ácido sulfúrico y a que en la filtración del agua residual del sistema de extracción de polvos prensa se concentran los sulfatos. (López M.A, 2006). En la Figura 5.25 se muestra esquemáticamente el balance máscico de sulfatos.

La fosa multiusos contribuye también con sulfatos, debido a las aportaciones de las operaciones que descargan en ella y al ingreso de sulfatos en el agua fresca utilizada en las mismas (López M.A, 2006).

Una parte de los sulfatos se remueve en el tratamiento fisicoquímico, sin embargo, su concentración promedio en el efluente tratado es alta, este efluente contiene aproximadamente 28,461.22 mg/L de sulfatos.

Los sulfatos, al igual que los cloruros, no están regulados en las condiciones particulares; sin embargo, es importante reducir la concentración de ambas sales, por la corrosión que ocasionan en equipos y tuberías, pues limita el funcionamiento y reduce la vida útil de los mismos. El agua reciclada que ingresa al MA-51, presenta una concentración promedio de sulfatos de 28,772.24 mg/L.



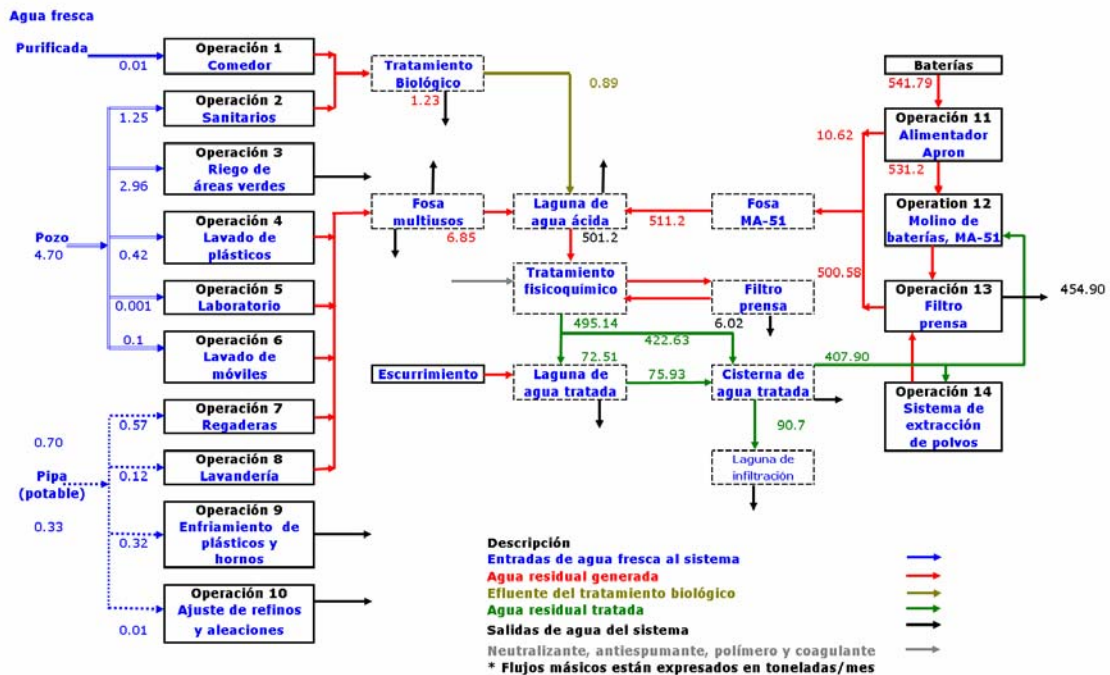


Figura 5.25 Balance de masa para los sulfatos (ton/mes).

**Plomo (Pb):** El electrolito contribuye mensualmente con 48 kilogramos de plomo, mayormente en forma de sulfatos y óxidos de plomo en solución. El efluente del filtro prensa representa la mayor contribución de plomo, este metal pesado se concentra en la operación, debido a que está presente en la pasta y en el electrolito. La concentración promedio de plomo en el electrolito es 2.62 mg/L. Otra fuente importante de plomo es la fosa multiusos, el plomo se concentra en la fosa y proviene principalmente de las descargas de las operaciones de lavado de plásticos, lavado de móviles, regaderas y lavandería. Las concentraciones más elevadas de plomo corresponden a los efluentes de las operaciones de lavado de plásticos, 9.88 mg/L y lavandería 4.62 mg/L. En la Figura 5.26 se presenta el balance másico de plomo, expresado en kilogramos/mes.

El efluente de la laguna de agua ácida tiene una concentración de plomo menor a 6.28 mg/L, esta concentración es alta en comparación con las condiciones particulares de descarga (cuyo valor límite establecido de concentración para el promedio mensual es de 0.5 mg/L); sin embargo, el tratamiento fisicoquímico lo remueve satisfactoriamente pues su concentración en el efluente tratado es < 0.77 mg/L. La concentración de plomo en la cisterna de agua tratada es menor que la del efluente del tratamiento fisicoquímico debido a que parte del plomo se sedimenta y acumula en la misma.

Es importante monitorear y controlar las concentraciones de plomo en el efluente tratado, en las descargas de la cisterna, principalmente en la disposición final en lagunas de infiltración, por el impacto nocivo que pudiera presentar al ambiente. El acuífero de la zona puede estar

expuesto a la contaminación por plomo si las descargas a las lagunas de infiltración contienen concentraciones por arriba de los límites permisibles, establecidos en la normatividad.

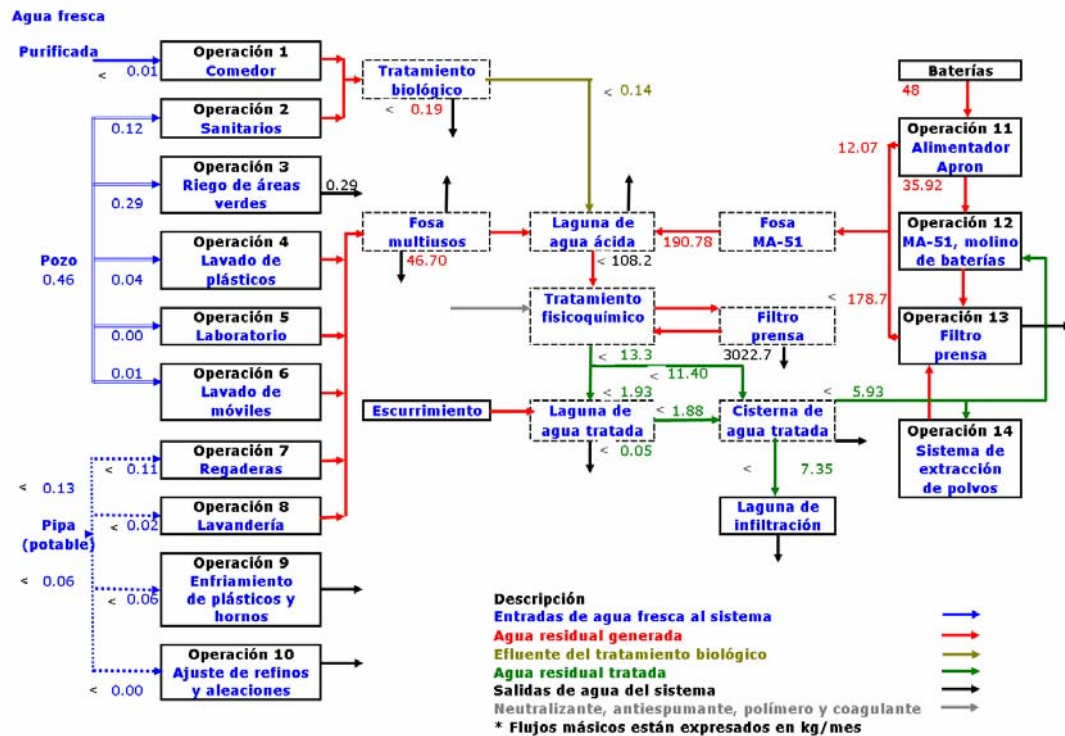


Figura 5.26 Balance de masa para el plomo (kg/mes).

### 5.7 Propuestas de reuso de agua y minimización de aguas residuales

Con base en el análisis de los resultados de la caracterización de corrientes y conceptos del “water pinch”, además de los balances de agua y de masa de constituyentes, se propusieron dos opciones de reuso, buscando reducir el consumo de agua fresca y minimizar la generación de aguas residuales. El análisis que se realizó para integrar los sistemas alternos se muestra a continuación:

#### Uso del efluente tratado biológicamente

a) **Reciclaje del efluente del tratamiento biológico en sanitarios:** se compararon las concentraciones de contaminantes del efluente del tratamiento biológico con las concentraciones en el agua de pozo (que es la que actualmente se utiliza para descargas de sanitarios) y las concentraciones límites correspondientes a la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto indirecto, promedio mensual). La condición para poder reusar este efluente en la operación de sanitarios fue que las concentraciones de los contaminantes fueran menores o iguales que las concentraciones límites establecidas como promedio mensual en la norma y/o menores o iguales que las concentraciones del agua alimentada actualmente a los sanitarios (agua de pozo).

Tabla 5.6 Comparación efluente tratamiento biológico y agua de pozo.

Concentración (mg/L)	Efluente		Agua de pozo
	tratamiento biológico	Normatividad aplicable (uso descargas sanitarios) <sup>(1)</sup>	
SDT	3,739.46	NR	3,924.30
SO <sub>4</sub>	1,185.01	NR	1,339.84
Cl	467.94	NR	557.63
SST	28.70	30	44
Pb	<0.182	0.5	0.13

NR: no regulado; (1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto indirecto, promedio mensual).

Como puede observarse en la Tabla 5.6, el efluente del tratamiento biológico es apto para reusarse en sanitarios si garantiza que microbiológicamente cumple con la normatividad.

**b) Reuso del efluente del tratamiento biológico en riego de áreas verdes:** se compararon las concentraciones de contaminantes en el efluente del tratamiento biológico con las concentraciones en el agua de pozo y las concentraciones límites correspondientes a la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual). La condición para poder reusar este efluente en el riego de áreas verdes fue que las concentraciones de los contaminantes fueran menores o iguales que las concentraciones límites establecidas como promedio mensual en la norma y/o menores o iguales que las concentraciones del agua utilizada actualmente para riego (agua de pozo).

Tabla 5.7 Comparación efluente tratamiento biológico y agua de pozo.

Concentración (mg/L)	Efluente		Agua de pozo
	tratamiento biológico	Normatividad aplicable (uso riego áreas verdes) <sup>(1)</sup>	
SDT	3,739.46	NR	3,924.30
SO <sub>4</sub>	1,185.01	NR	1,339.84
Cl	467.94	NR	557.63
SST	28.70	20	44
Pb	<0.182	5 <sup>(2)</sup>	0.13

NR: no regulado; (1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual). (2) Valor tomado de la norma NOM-001-ECOL-1996 (Límites de descargas de contaminantes en suelos con uso en riego agrícola)

El efluente del tratamiento biológico también es apto para reuso en el riego de áreas verdes si garantiza que microbiológicamente cumple con la normatividad. Las concentraciones de SDT, SO<sub>4</sub>, Cl, SST y Pb presentes en este efluente son menores que las del agua de pozo. El valor de la concentración del plomo es mucho menor que el límite establecido en la norma NOM-001-ECOL-1996 (Límites de descargas de contaminantes en suelos con uso en riego agrícola) para el promedio mensual de descarga.

**Sustitución del consumo de agua de pipa por agua de pozo**

**a) Tratamiento del agua de pozo para su uso en regaderas, lavandería, enfriamiento y ajuste de refinados y aleaciones:** en este caso, se propone sustituir el consumo de agua de pipa por agua de pozo potabilizada. Las condiciones para poder sustituir el consumo de agua de pipa por agua de pozo, son que las concentraciones de contaminantes en el agua tratada fueran menores o iguales que las concentraciones límites establecidas en la norma NOM-127-SSA1-1994 (Límites permisibles de calidad del agua potable para uso y consumo humano) y que el costo unitario del tratamiento ( $\$/m^3$ ) fuera menor que el costo del agua de pipa, el cual actualmente es de  $\$36.50/m^3$ . En la Tabla 5.8 se presenta la comparación del agua de pozo con los límites de la norma NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 5.8 Comparación agua de pozo y norma NOM-127-SSA1-1994.

Concentración (mg/L)	Agua de pozo	Normatividad aplicable (para agua potable, consumo humano)
SDT	3,924.30	1,000
SO <sub>4</sub>	1,339.84	400
Cl	557.63	250
SST	44	NR(1)
Pb	0.13	0.01

Los SST no están regulados como tal. El parámetro que está regulado es la turbiedad con un valor límite de 5 NTU.

El agua de pozo tiene concentraciones mayores de SDT, SO<sub>4</sub>, Cl y Pb a los límites establecidos por la norma pero si se trata puede ser utilizada en lugar del agua de potable de pipa para su uso en las operaciones si garantiza que cumple con la norma NOM-127-SSA1-1994 y asegura la calidad biológica requerida para uso humano.

**Uso del efluente o descarga de regaderas**

**a) Reciclaje de la descarga de regaderas para riego de áreas verdes:** se compararon las concentraciones de contaminantes del efluente de regaderas con las concentraciones en el agua de pozo (que es la que actualmente se utiliza para riego de áreas verdes) y las concentraciones límites correspondientes a la norma NOM-003-ECOL-1997. La condición para poder reciclar este efluente en la operación de riego de áreas verdes fue que las concentraciones de los contaminantes fueran menores o iguales que las concentraciones límites establecidas como promedio mensual en la norma y/o menores o iguales a las concentraciones del agua de pozo.

Tabla 5.9 Comparación efluente de regaderas y agua de pozo.

Concentración (mg/L)	Efluente de regaderas	Normatividad aplicable (para riego de áreas verdes)	Agua de pozo
SDT	1,999.63	NR	3,924.30
SO <sub>4</sub>	572.40	NR	1,339.84
Cl	358.76	NR	557.63
SST	52.75	20 <sup>(1)</sup>	44
Pb	0.19	5 <sup>(2)</sup>	0.13

NR: no regulado; (1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual).

(2)Valores tomados de la norma NOM-001-ECOL-1996 (Límites de descargas de contaminantes en suelo con uso en riego agrícola, promedio mensual).

El efluente de regaderas es apto para el reuso en riego de áreas verdes. Los valores de las concentraciones de SDT, SO<sub>4</sub>, Cl y Pb son menores que los correspondientes en el agua de pozo. La concentración de SST en el efluente de regaderas es mayor que la del agua de pozo y que la establecida en la norma NOM-003-ECOL-1997 pero no limita el reuso de este efluente en el riego de áreas verdes. Los SST no están regulados en la norma NOM-001-ECOL-1996 en lo referente a descargas de contaminantes en suelos con uso en riego agrícola.

### Uso del efluente o descarga de lavandería

**a) Reuso del efluente de lavandería en el lavado de móviles:** se compararon las concentraciones de contaminantes del efluente de lavandería con las concentraciones del agua de pozo y de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo). La condición para poder reusar este efluente en la operación de lavado de móviles fue que las concentraciones de los contaminantes fueran menores o iguales que las concentraciones límites establecidas como promedio mensual en la norma y/o menores o iguales a las concentraciones en el agua utilizada actualmente en el lavado de móviles (agua de pozo).

Tabla 5.10 Comparación del efluente de lavandería y agua de pozo.

Concentración (mg/L)	Efluente de lavandería	Normatividad aplicable	
		(reuso con contacto directo, lavado de vehículos) (1)	Agua de pozo
SDT	2,404.88	NR	3,924.30
SO <sub>4</sub>	757.57	NR	1,339.84
Cl	411.40	NR	557.63
SST	207	20	44
Pb	4.62	0.5	0.13

NR: no regulado; (1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual).

En este caso, la concentración de plomo es mayor en el efluente de lavandería, pero no es limitante para reusar este efluente en la operación de lavado de móviles, debido a que el efluente de esta operación no va a disposición final sino a reuso en otra operación. Respecto a los SST la concentración del efluente de lavandería es mayor que la del agua de pozo y que la de la norma NOM-003-ECOL-1997 sin embargo esto no afecta el reuso del efluente de lavandería en el lavado de móviles; por el tipo de movimientos en la planta (carga y descarga, entrada y salida de vehículos) los móviles operan en un ambiente polvoso, pero los operarios no están en contacto directo con el polvo pues portan equipo de seguridad.

### b) Reuso del efluente de lavandería en el lavado de plásticos

Se compararon las concentraciones de contaminantes del efluente de lavandería con las concentraciones del agua de pozo. La condición para poder reusar este efluente en la operación de lavado de plásticos fue que las concentraciones de los contaminantes fueran menores o iguales a las concentraciones en el agua utilizada actualmente para el lavado de plásticos (agua de pozo).

Tabla 5.11 Comparación efluente de lavandería y agua pozo.

Concentración (mg/L)	Efluente de lavandería	Agua de pozo
SDT	2,404.88	3,924.30
SO <sub>4</sub>	757.57	1,339.84
Cl	411.40	557.63
SST	207	44
Pb	4.62	0.13

De la Tabla 5.11 se observa que la concentración de plomo en el efluente de lavandería es mayor que la correspondiente al agua de pozo, pero no es una limitante para reusar el efluente de lavandería en esta operación, debido a que en las primeras etapas del lavado de plásticos no se requiere una calidad específica de agua.

#### Uso del efluente de lavado de móviles

**a) Reuso del efluente de lavado de móviles en el lavado de plásticos:** Se compararon las concentraciones de contaminantes en el efluente del lavado de móviles con las concentraciones del agua de pozo. La condición para poder reusar este efluente en la operación de lavado de plásticos fue que las concentraciones de contaminantes fueran menores o iguales a las concentraciones del agua de pozo.

Tabla 5.12 Comparación efluente lavado móviles y agua de pozo.

Concentración (mg/L)	Efluente lavado de móviles	Agua de pozo
SDT	2,477.99	3,924.30
SO <sub>4</sub>	902.01	1,339.84
Cl	352.91	557.63
SST	30.75	44
Pb	0.415	0.13

Similarmente, la concentración de plomo en el efluente de lavado de móviles es mayor que la del agua de pozo, pero no es una limitante para reusar este efluente en las primeras etapas de la operación de lavado de plásticos, pues no se requiere una calidad específica de agua.

#### Uso del efluente o descarga del lavado de plásticos

**a) Reuso del efluente de lavado de plásticos en el sistema de extracción de polvos:** Se compararon las concentraciones de contaminantes en el efluente del lavado de plásticos con las concentraciones en el efluente de la cisterna de agua tratada fisicoquímicamente. La condición para poder reusar este efluente en el sistema de extracción de polvos fue que las concentraciones de contaminantes en el efluente de lavado de plásticos fueran menores o iguales a las concentraciones en el efluente de la cisterna de agua tratada.

Tabla 5.13 Comparación del efluente tratado fisicoquímicamente (cisterna) y el efluente del lavado de plásticos.

Concentración (mg/L)	Efluente tratado	
	fisicoquímicamente (cisterna)	Efluente lavado de plásticos
SDT	189,129.94	7,902.71
SO <sub>4</sub>	28,772.24	3,612.56
Cl	581.03	428.95
SST	863.92	517.50
Pb	<0.4184	9.88

En el sistema de extracción de polvos no se requiere agua de una calidad específica por lo que es posible reusar el efluente del lavado de plásticos en esta operación. El propósito del sistema de extracción de polvos es capturar los polvos de plomo como lodos y recuperar el plomo contenido en ellos. El reusar agua que contenga plomo, contribuirá a incrementar su recuperación en el proceso industrial.

### Uso del efluente tratado fisicoquímicamente

**a) Reuso del efluente de cisterna a riego de escorias:** Se compararon las concentraciones de contaminantes en el efluente de la cisterna de agua tratada con las concentraciones en el efluente tratado biológicamente, que actualmente se utiliza en el riego de escorias. La condición para poder reusar el efluente de la cisterna fue que las concentraciones de contaminantes fueran menores o iguales a las concentraciones del efluente tratado biológicamente. Para el riego de escorias no se requiere agua de una calidad específica por lo que es posible usar el efluente de la cisterna de agua tratada.

Tabla 5.14 Comparación efluente cisterna-efluente tratamiento biológico.

Concentración (mg/L)	Efluente cisterna agua tratada	Efluente
		Tratamiento Biológico
SDT	189,129.94	3,739.46
SO <sub>4</sub>	28,772.24	1,185.01
Cl	581.03	467.94
SST	863.92	28.70
Pb	<0.4184	<0.182

En las tablas anteriores se compararon los parámetros SDT, SO<sub>4</sub>, Cl, SST y Pb por ser los más significativos (en cuanto a la magnitud de sus cargas máxicas); sin embargo el Anexo 11 se presentan comparaciones similares que se realizaron para el resto de los parámetros determinados en los análisis fisicoquímicos.

### Opción 1

Esta opción considera varios cambios en cuanto a líneas de tuberías con la finalidad de reducir los consumos de agua potable y de agua de pozo, eliminar el consumo de agua de pipa, además del reuso directo de efluentes. Esta alternativa no implica modificaciones a las operaciones del proceso industrial, pero sí del sistema de tratamiento biológico de aguas residuales del comedor y sanitarios, además del tratamiento de 1,879 m<sup>3</sup>/mes de agua de pozo para su reuso en las operaciones de regaderas, lavandería, enfriamiento (de plásticos y hornos) y ajuste de refinados y aleaciones. La Figura 5.27 muestra la configuración completa de esta opción, los flujos están expresados en m<sup>3</sup>/mes:

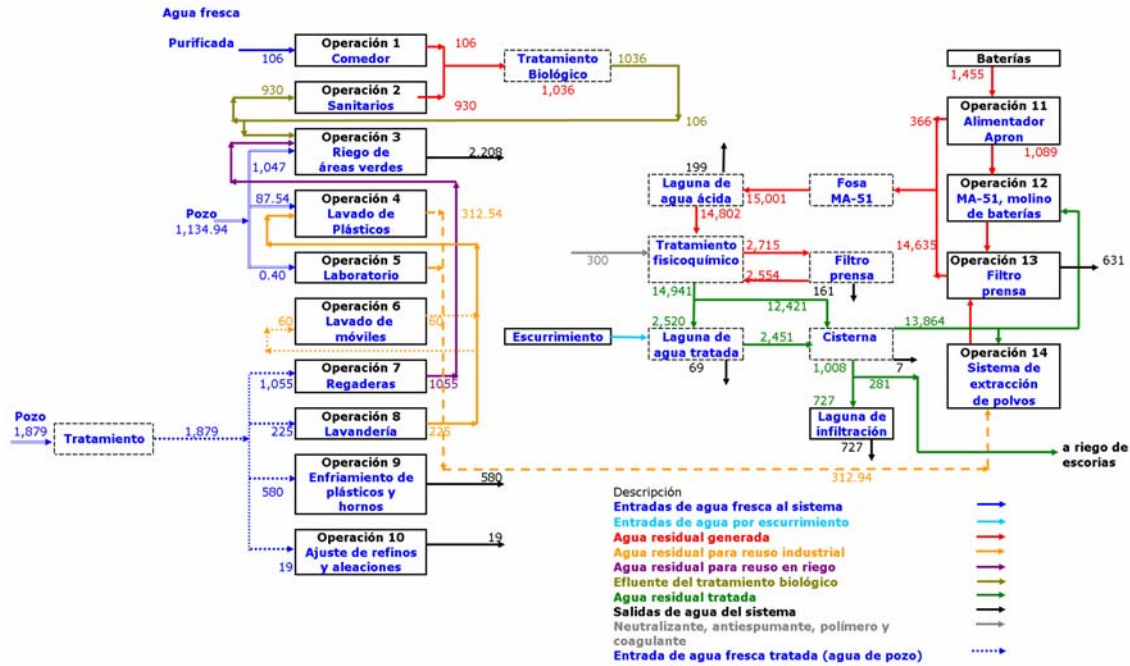


Figura 5.27 Configuración de influentes y efluentes para la Opción 1 de reuso de agua y minimización de aguas residuales (flujos expresados en m<sup>3</sup>/mes).

Las acciones propuestas son:

1. Reuso del efluente tratado biológicamente: del efluente tratado biológicamente, reusar 930 m<sup>3</sup>/mes en la operación de sanitarios y 106 m<sup>3</sup>/mes en el riego de áreas verdes. Dentro de esta acción se considera el tratamiento terciario del efluente, utilizando filtración, absorción con carbón activado y cloración con hipoclorito con el fin de eliminar malos olores, sólidos suspendidos, materia orgánica y patógenos que pudieran generar contaminación microbiana.
2. Reuso del efluente de regaderas: esta modificación considera utilizar el efluente de la operación de regaderas (1,055 m<sup>3</sup>/mes) para el riego de áreas verdes.
3. Reuso del efluente de lavandería: enviar el efluente de lavandería (225 m<sup>3</sup>/mes) a la operación de lavado de plásticos para reusarlo en ella.
4. Reuso del efluente de lavado de móviles: reusar la totalidad del efluente de lavado de móviles (60 m<sup>3</sup>/mes) en la operación de lavado de plásticos.
5. Reuso del efluente de lavado de plásticos: enviar el efluente del lavado de plásticos (312.54 m<sup>3</sup>/mes) al sistema de extracción de polvos para reusarlo en dicha operación y completar el faltante con agua tratada fisicoquímicamente. Actualmente este sistema consume en promedio 728 m<sup>3</sup>/mes de agua tratada fisicoquímicamente (su consumo aproximado es de 28 m<sup>3</sup>/d y ocasionalmente opera parcialmente el sábado y el domingo) y no requiere agua de excelente calidad, por lo cual esta opción de reusar el efluente del lavado de plásticos es una oportunidad viable para aprovechar la totalidad del efluente y suministrar parte del consumo de agua de esta operación.
6. Reusar 281 m<sup>3</sup>/mes del caudal que va a las lagunas de infiltración, en el riego de escorias. Actualmente la operación de riego de escorias utiliza agua tratada biológicamente. Esto permitirá reducir el volumen a infiltrar.



7. Tratamiento del agua de pozo: 1,879 m<sup>3</sup>/mes de agua de pozo son tratados para usarse en las operaciones de regaderas, lavandería, enfriamiento de plásticos y hornos y ajuste de refinados de aleaciones.

### Evaluación del uso del agua para la Opción 1:

Tabla 5.15 Información relevante del balance volumétrico de agua para la Opción 1 en comparación al sistema actual (m<sup>3</sup>/mes)

Categoría	Actual	Opción 1
Consumo de agua fresca dentro de la planta (FW)	5,495.94	3,119.94
Entradas de agua fresca al proceso (FWI)	3,287.94	911.94
Entradas de agua por escurrimiento (RI)	variable	variable
Entradas de agua por el electrolito (EI)	1,455	1,455
Entradas de agua por químicos (neutralizante, antiespumante, coagulante y polímero) (TCI)	349	300
Entradas totales de agua al proceso (TI)	5,091.94	2,667.13
Salidas totales de agua del proceso (WO)	5,099	2,674.13
Generación de agua residual (WWG)	17,689.94	17,404.94
Caudal de agua tratada (WWT)	18,244.94	15,838
Reuso directo de agua residual (DWWR)	0	1,652.94
Regeneración de agua residual y reuso (WWR)	2,407.94	387
Tratamiento de agua residual y reciclaje (WWRC)	14,177	14,794.06

Tabla 5.16 Indicadores para la evaluación del uso del agua para la Opción 1 en comparación al sistema actual.

Indicador	Actual	Opción 1
<b>Para minimización de aguas residuales</b>		
Consumo de agua fresca a proceso por batería (FWI/bat), L/bat	4.09	1.14
Consumo de agua por batería (FWI+WWRC)/bat, L/bat	21.75	19.56
Tasa de generación de agua residual por batería (WWG/bat), L/bat	22.03	21.67
<b>Para reuso de agua</b>		
Tasa de reuso directo (DWWR/WWG)	0	0.0950
Tasa de regeneración y reuso (WWRU/WWRG)	0.0567	0.1288
Tasa de tratamiento y reciclaje (WWRC/WWT)	0.777	0.9341
<b>Costo del agua</b>		
Costo por consumo de agua purificada y agua potable, \$/mes*	202,479 <sup>(1)</sup>	151,836 <sup>(2)</sup>
Costo por consumo de agua purificada y agua potable, \$/m <sup>3</sup> *	102 <sup>(1)</sup>	76.49 <sup>(2)</sup>
Costo del tratamiento fisicoquímico, \$/mes	1,186,747	1,020,762
Costo del tratamiento fisicoquímico, \$/m <sup>3</sup>	68.96	68.96

\*El agua de pozo no se está incluyendo porque actualmente no representa un costo para la planta. <sup>(1)</sup> El sistema actual utiliza agua potable de pipa a un costo de \$36.50/m<sup>3</sup>.

<sup>(2)</sup> El agua potable que se considera es el agua de pozo potabilizada que tiene un costo de \$9.55/m<sup>3</sup>.

**Beneficios:**

1. Con el reuso del efluente tratado biológicamente se elimina la necesidad de enviarlo a la laguna de agua ácida y tratarlo en la planta de tratamiento fisicoquímico.
2. Se elimina el uso de la fosa multiusos, pues los efluentes de las operaciones que anteriormente descargaban en la fosa, son reusados en otras operaciones. Cada mes se enviaban en promedio, 1652.94 m<sup>3</sup> a la fosa multiusos, mismos que con esta estrategia son reusados en diferentes operaciones.
3. El reuso del efluente de regaderas y de parte del efluente del tratamiento biológico en el riego de áreas verdes, reduce el consumo de agua de pozo.
4. Esta estrategia permite reducir el volumen de agua a infiltrar en un 76.92% y el volumen de agua a tratar fisicoquímicamente en un 14%.
5. La reducción de la infiltración reduce el impacto ecológico en el acuífero porque se reduce el caudal de contaminantes que se descargan en las lagunas e infiltran.
6. El consumo mensual de hidróxido de magnesio, antiespumante, coagulante y polímero se reducen en un 14%. El nuevo consumo de químicos sería de 409.03 m<sup>3</sup>/mes, lo cual representa un ingreso de agua de aproximadamente 300 m<sup>3</sup>/mes.
7. La reducción del consumo de agua de pozo es del 14.16%.
8. Al tratar 1,879 m<sup>3</sup>/mes de agua de pozo y usarlo en las operaciones de regaderas, lavandería, enfriamiento (de plásticos y hornos) y ajuste de refinados y aleaciones, se elimina la necesidad de comprar agua potable de pipa. El agua potable de pipa tiene un costo de \$36.50 pesos/m<sup>3</sup> y el agua de pozo potabilizada cuesta \$9.55 /m<sup>3</sup>, aproximadamente. El ahorro sería de \$26.95 pesos por cada m<sup>3</sup> de agua potable utilizada.
9. El consumo de agua y la tasa de generación de agua por batería residual disminuyen en un 10.07% y 1.63%, respectivamente.
10. La tasa de reuso directo aumenta de 0 a 0.0950. Con esta opción se están reusando de manera directa parte de los efluentes de agua.
11. El incremento en la tasa de regeneración y reuso es del 127.16%.
12. La tasa de tratamiento y reciclaje aumenta de 0.777 a 0.9341 (valor cercano a 1), lo cual significa que el 93.41% del agua tratada se recicla.

**Opción 2:**

Esta opción es una variante a la opción anterior, aquí además se planteó la separación y colección del electrolito, evitando que éste ingrese al proceso. Esta opción considera que el electrolito fue previamente separado por algún medio mecánico o manual. En el presente trabajo no se plantea ni se evalúa el método de separación pues se parte de que la separación del electrolito es factible. Las baterías entrarían sin electrolito al Apron Feeder y posteriormente al molino de baterías para ser trituradas. En esta configuración, el agua tratada ingresa junto con el efluente de lavado de plásticos al sistema de extracción de polvos y parte del efluente tratado biológicamente se utiliza en el riego de escorias. La Figura 5.28 muestra la configuración para esta propuesta:

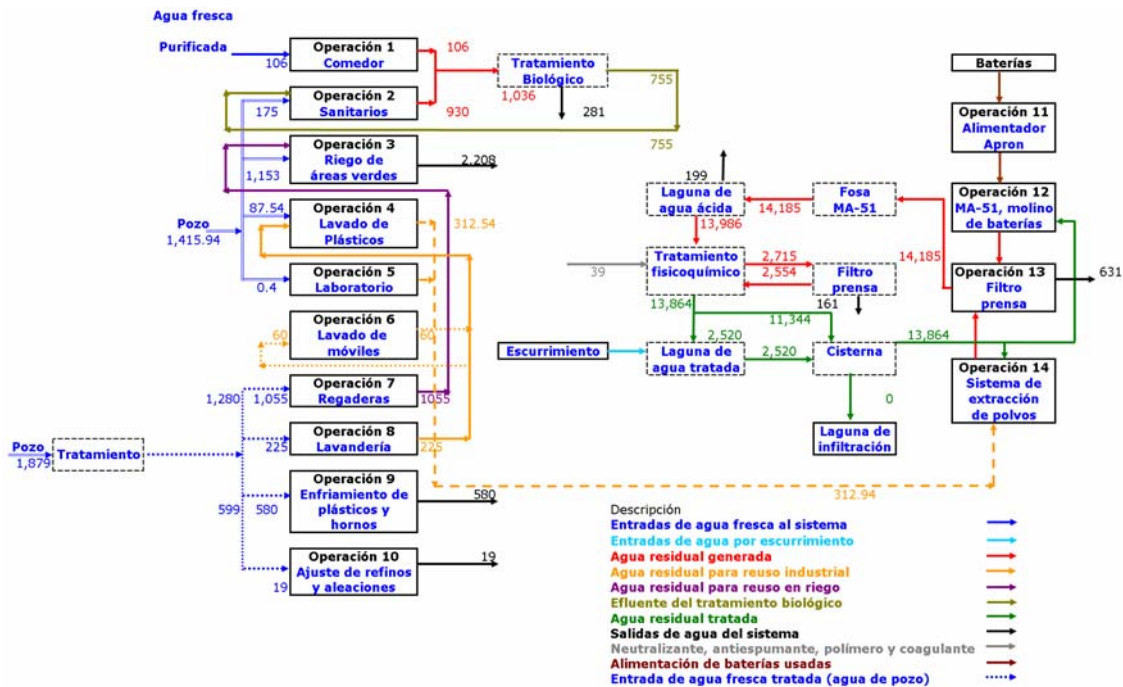


Figura 5.28 Configuración de influentes y efluentes para la Opción 2 de reuso de agua y minimización de aguas residuales, (flujos expresados en m<sup>3</sup>/mes).

**Evaluación del uso del agua para la Opción 2:**

Tabla 5.17 Información relevante del balance volumétrico de agua para la Opción 2 en comparación al sistema actual (m<sup>3</sup>/mes)

Categoría	Actual	Opción 2
Consumo de agua fresca dentro de la planta (FW)	5,495.94	3,400.94
Entradas de agua fresca al proceso (FWI)	3,287.94	1,192.94
Entradas de agua por escurrimiento (RI)	variable	variable
Entradas de agua por el electrolito (EI)	1,455	0
Entradas de agua por químicos (neutralizante, antiespumante, coagulante y polímero) (TCI)	349	39
Entradas totales de agua al proceso (TI)	5,091.94	1,231.61
Salidas totales de agua del proceso (WO)	5,099	1,871
Generación de agua residual (WWG)	17,689.94	16,589
Caudal de agua tratada (WWT)	18,244.94	15,022.06
Reuso directo de agua residual (DWWR)	0	1,652.94
Regeneración de agua residual y reuso (WWRR)	2,407.94	281
Tratamiento de agua residual y reciclaje (WWRC)	14,177	14,619.07

Tabla 5.18 Indicadores para la evaluación del uso del agua para la Opción 2 en comparación al sistema actual.

Indicador	Actual	Opción 2
<b>Para minimización de aguas residuales</b>		
Consumo de agua fresca a proceso por batería (FWI/bat), L/bat	4.09	1.49
Consumo de agua por batería (FWI+WWRC)/bat, L/bat	21.75	19.69
Tasa de generación de agua residual por batería (WWG/bat), L/bat	22.03	20.66
<b>Para reuso de agua</b>		
Tasa de reuso directo (DWWR/WWG)	0	0.0996
Tasa de regeneración y reuso (WWRU/WWRG)	0.0567	0.1287
Tasa de tratamiento y reciclaje (WWRC/WWT)	0.777	0.9732
<b>Costo del agua</b>		
Costo por consumo de agua purificada y agua potable, \$/mes*	202,479 <sup>(1)</sup>	151,836 <sup>(2)</sup>
Costo por consumo de agua purificada y agua potable, \$/m <sup>3</sup> *	102 <sup>(1)</sup>	76.49 <sup>(2)</sup>
Costo del tratamiento fisicoquímico, \$/mes	1,186,747	130,685
Costo del tratamiento fisicoquímico, \$/m <sup>3</sup>	68.96	9.34

\*El agua de pozo no se está incluyendo porque actualmente no representa un costo para la planta. <sup>(1)</sup> El sistema actual utiliza agua potable de pipa a un costo de \$36.50/m<sup>3</sup>.

<sup>(2)</sup> El agua potable que se considera es el agua de pozo potabilizada que tiene un costo de \$9.55/m<sup>3</sup>

### Beneficios:

1. Con el reuso del efluente tratado biológicamente se elimina la necesidad de enviarlo a la laguna de agua ácida y tratarlo en la planta de tratamiento fisicoquímico.
2. Se elimina el uso de la fosa multiusos, pues los efluentes de las operaciones que anteriormente descargaban en la fosa, son reusados en otras operaciones. Cada mes se enviaban en promedio, 1652.94 m<sup>3</sup> a la fosa multiusos, mismos que con esta estrategia son reusados en diferentes operaciones.
3. El reuso del efluente de regaderas en el riego de áreas verdes reduce el consumo de agua de pozo.
4. Esta estrategia permite eliminar la necesidad de infiltrar y el volumen de agua a tratar fisicoquímicamente en un 18.73%.
5. La reducción de la infiltración reduce el impacto ecológico en el acuífero porque se reduce el caudal de contaminantes que se descargan en las lagunas e infiltran.

6. Se reduce el consumo mensual de antiespumante, coagulante y polímero en un 18.73% y prácticamente se elimina la necesidad de utilizar el hidróxido de magnesio. El nuevo consumo de químicos sería de 39 m<sup>3</sup>/mes. El esquema de tratamiento actualmente utiliza 475.54 m<sup>3</sup>/mes (que representa un ingreso de agua de 349 m<sup>3</sup>/mes) los cuales incluyen al hidróxido de magnesio. Con esta opción prácticamente ya no sería necesario neutralizar para poder tratar fisicoquímicamente las descargas del MA-51.
7. La reducción del consumo de agua de pozo es del 6.15%.
8. Al tratar 1,879 m<sup>3</sup>/mes de agua de pozo y usarlo en las operaciones de regaderas, lavandería, enfriamiento (de plásticos y hornos) y ajuste de refinados y aleaciones, se elimina la necesidad de comprar agua potable de pipa. El agua potable de pipa tiene un costo de \$36.50 pesos/m<sup>3</sup> y el agua de pozo potabilizada cuesta \$9.55 /m<sup>3</sup>, aproximadamente. El ahorro sería de \$26.95 pesos por cada m<sup>3</sup> de agua potable utilizada.
9. Con respecto al sistema actual, la reducción en el consumo de agua por batería es del 9.47%, pero con respecto a la Opción 1, aumenta 0.66%.
10. La tasa de generación de agua residual es menor en la Opción 2 en comparación con el sistema actual y en comparación a la Opción 1. La diferencia es del 6.22 y 4.66%, respectivamente.
11. La tasa de reuso directo aumenta para la Opción 2 en comparación a la Opción 1 y al sistema actual. Para la Opción 1, la tasa de reuso directo es de 0.0950 y en el sistema actual el reuso directo es 0. El incremento en el reuso directo para la Opción 2 es del 4.84% con referencia a la Opción 1.
12. La tasa de tratamiento y reciclaje es de 0.9732, valor que representa un aumento del 25.25% con respecto al sistema actual y del 4.19% con respecto a la Opción 1. La tasa de tasa de tratamiento y reciclaje es mejor que la de la Opción 1 por ser un valor más cercano a la unidad.
13. Con esta opción se elimina la entrada de electrolito al proceso de reciclaje y por lo tanto se reduce el ingreso de contaminantes como los sólidos disueltos, sulfatos, metales pesados, grasas y aceites, cloruros, fosfatos y nitratos.

### **5.8 Evaluación económica de propuestas**

En esta sección se presenta la evaluación económica que se realizó para las dos propuestas, anteriores. En la Opción 2 se consideran a su vez dos variantes: tratamiento del electrolito y confinamiento del electrolito. Las Tablas 5.19 y 5.20 resumen la evaluación económica a períodos de 5 y 10 años. Para el valor presente neto, los montos están expresados en miles de pesos.

Tabla 5.19 Resumen de la evaluación económica para las propuestas de reuso (5 años).

Indicador/Alternativa	OP1A	OP1B	OP2A	OP2B	OP2C	OP2D
VPN (miles pesos)	8,076.25	8,637.65	20,879.95	21,441.35	Genera pérdidas	Genera pérdidas
n, retorno inversión ( en años)	<3 años A partir del 2° año	<3 años A partir del 2° año	<5 años A partir del 4° año	<5 años A partir del 4° año	No es rentable	No es rentable
TIR (%)	74.98%	92.93%	32.08%	33.04%	No es rentable	No es rentable
B/C	3.5373	4.2947	1.6308	1.6589	0.2058	0.2062
B/I	4.4547	5.9143	1.8579	1.9025	<<0	<<0

OP1A y OP1B: reuso de agua con ingreso de electrolito; OP2A y OP2B: reuso de agua y tratamiento de electrolito; OP2C y OP2D: reuso de agua y confinamiento de electrolito.

Las alternativas OP1A y OP1B corresponden a las opciones de reuso de agua con ingreso de electrolito, la diferencia es el tipo de tratamiento biológico terciario. La alternativa OP1A considera filtración de lecho profundo, filtración con carbón activado y desinfección. La OP1B, incluye operaciones de filtración granular con zeolita seleccionada, filtración en trama fina, oxidación avanzada, adsorción en carbón activado, microfiltración y desinfección.

En el caso de las propuestas de reuso sin ingreso de electrolito se tienen 4 alternativas (OP2A, OP2B, OP2C y OP2D). Las alternativas OP2A y OP2B corresponden a las variantes de tratamiento del electrolito y recuperación del ácido mientras que las OP2C y OP2D al confinamiento del mismo. Las 4 alternativas consideran tratamiento biológico terciario. En OP2A y OP2C el tratamiento es filtración de lecho profundo, filtración en carbón activado y desinfección. Por último para la OP2B y OP2D, el tratamiento biológico terciario es la segunda opción, la cual incluye varias etapas entre ellas la filtración granular con zeolita seleccionada, filtración en trama fina, oxidación avanzada, adsorción en carbón activado, microfiltración y desinfección.

Todas las alternativas presentadas consideran el tratamiento del agua de pozo, para lo cual se cotizó con el proveedor CCR Mexicana la planta potabilizadora. Según cotización, los montos estimados para la inversión y el gasto de operación y mantenimiento anual son de \$33,286 y \$18,000 dólares, respectivamente. El tipo de tratamiento para el agua de pozo es un sistema de ósmosis inversa con capacidad de 2,000 m<sup>3</sup>/mes. La propuesta contempla un sistema de postratamiento para la eliminación del CO<sub>2</sub> mediante descarbonador al vacío, ajuste Ca y Mg en lecho neutralizante, postfiltración en carbón activado y filtros cartucho, desinfección y aseguramiento de la calidad biológica utilizando ClO<sub>2</sub>, para no generar trihalometanos.

Para la opción de reuso que considera el tratamiento del electrolito y recuperación del ácido, se solicitó al proveedor CCR Mexicana el estimado de la inversión y el gasto en operación y

mantenimiento anual del sistema de tratamiento del electrolito y recuperación del ácido. Los valores estimados en la propuesta fueron de \$ 2,000, 000 de dólares para la inversión inicial con un gasto anual de operación y mantenimiento de \$180,000 dólares. El tratamiento planteado por este proveedor considera la recuperación del ácido sulfúrico mediante etapas que incluyen la remoción de sólidos contenidos en el electrolito, concentración del ácido y por último la purificación del mismo.

Tabla 5.20 Resumen de la evaluación económica para las propuestas de reuso (10 años).

Indicador/ Alternativa	OP1A	OP1B	OP2A	OP2B	OP2C	OP2D
VPN	21,093.73	21,631.77	77,402.06	77,940.10	(465,934.20)	(465,396.16)
n, retorno inversión (en años)	<3 años A partir del 2º año	<3 años A partir del 2º año	<5 años A partir del 4º año	<5 años A partir del 4º año	No es rentable	No es rentable
TIR (%)	82.91%	99.33%	45.51%	46.32%	No es rentable	No es rentable
B/C	5.9753	6.8438	2.7568	2.7908	0.2068	0.2070
B/I	10.0231	13.3073	4.1803	4.2806	<<0	<<0

OP1A y OP1B: reuso de agua con ingreso de electrolito; OP2A y OP2B: reuso de agua y tratamiento de electrolito; OP2C y OP2D: reuso de agua y confinamiento de electrolito.

Con el propósito de simplificar los cálculos, en esta evaluación económica no se está considerando el efecto del aumento en los precios por la inflación, la depreciación de instalaciones y equipo, ni el cambio en la paridad del dólar a través del tiempo. La tasa de interés considerada es del 10% (BNM, 2006).

El detalle de los cálculos realizados para completar la evaluación económica, se incluye en el Anexo 13.

A 5 y 10 años, las alternativas más rentables son la OP1A y OP1B porque tienen menores períodos de retorno de inversión, mayores valores de TIR y valores altos de B/C y B/I (mucho mayores a 1), en comparación con las demás alternativas. Estas alternativas corresponden al reuso de agua y tratamiento del electrolito.

Los valores presente neto calculados para evaluar las 6 alternativas consideran los ingresos y los desembolsos.

Las alternativas OP2C y OP2D no son rentables porque no generan ahorros, sin importar el período de tiempo. Los valores presente neto son siempre negativos, por lo cual el confinamiento no es una opción económicamente viable. Estas opciones tienen valores de B/C menores a 1 y B/I menores a 0.

Las alternativas OP2A y OP2B son rentables porque su valor presente neto es mucho mayor que el valor presente neto de las demás alternativas. Estas opciones son económicamente

viables pero poco atractivas pues los períodos de retorno de inversión son menores a 5 años y los valores de las tasas internas de retorno y de las relaciones B/C y B/I son menores a los de las alternativas 1A y 1B (a pesar de ser valores altos, mucho mayores a 1).

El período de retorno de inversión para las alternativas OP1A y OP1B es menor en comparación al de las alternativas OP2A y OP2B, en las cuales el retorno de inversión es menor a 5 años.

La TIR de las alternativas OP1A y OP1B es mucho mayor que la TIR de las alternativas OP2A y OP2B, debido a que las alternativas OP1A y OP1B requieren un monto de inversión relativamente pequeño ( $< \$ 2,700,000$  pesos) en comparación al monto de la inversión de las OP2A y OP2B ( $< \$24,500,000$  pesos). Los ahorros anuales generados por las alternativas OP1A y OP1B son montos mayores a sus respectivas inversiones, a diferencia de las alternativas OP2A y OP2B, en las cuales los ahorros anuales netos son menores al 50% de la inversión.

De las alternativas OP1A y OP1B, la OP1B es la más rentable. Los valores de los indicadores calculados para la evaluación económica (VPN, TIR, B/C y B/I) son mayores y por lo tanto mejores, para esta opción en comparación a la OP1A. En términos económicos, un proyecto es rentable entre más alto sean los valores de VPN, TIR, B/C y B/C.

En el Anexo 14 se incluyen las tablas en donde se presentan a detalle los flujos de efectivo anuales para cada una de las 6 propuestas anteriores. Los flujos están expresados en miles de pesos.



## 6. Conclusiones y Recomendaciones

Con base en la literatura revisada y los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones son:

### 6.1 Conclusiones

- a) La alimentación de baterías al molino MA-51 es la principal fuente de contaminantes del proceso de reciclaje debido a que el electrolito y demás componentes de las baterías usadas contienen cantidades importantes de metales pesados, ácido sulfúrico en solución, además de otros elementos.
- b) El efluente de la laguna de agua ácida tiene un alto contenido de sólidos en suspensión y de sales disueltas porque recibe las descargas de operaciones en donde se generan y transportan sales y sólidos (lavado de plásticos y de móviles, lavandería, operaciones del proceso en el MA-51, etc).
- c) El pH ácido en el efluente de la laguna de agua ácida lo originan las descargas de la fosa ácida del MA-51, ricas en electrolito.
- d) El efluente del tratamiento fisicoquímico tiene altas concentraciones de sólidos suspendidos y de sólidos disueltos debido a que no se remueven los sólidos del influente (descarga de la laguna de agua ácida) y a la formación de más sales durante la neutralización con hidróxido de magnesio.
- e) Al reciclar el agua tratada fisicoquímicamente, los sólidos disueltos y suspendidos reingresan a la corriente, ocasionando una acumulación permanente de los mismos, la cual aumenta sustancialmente el consumo de químicos empleados (neutralizante, coagulante, antiespumante y polímero) y el daño a tuberías y equipo de bombeo.
- f) El electrolito de las baterías contiene 30% en peso de ácido sulfúrico y aporta mensualmente 589.44 toneladas de sólidos disueltos al Apron Feeder, de esta carga el 85.86% ingresa al molino de baterías, el resto del electrolito descarga en la fosa ácida del MA-51.
- g) Los principales ingresos de cloruros al sistema son el agua de pozo, el agua potable y el electrolito de las baterías, mensualmente aportan 1.96, 0.70 y 0.52 toneladas, respectivamente.
- h) Es importante monitorear las concentraciones de plomo en el efluente tratado, en las descargas de la cisterna, principalmente en la disposición final en las lagunas de infiltración, debido a que el acuífero de la zona puede estar expuesto a la contaminación por plomo si las descargas a las lagunas de infiltración contienen concentraciones por arriba de los límites permisibles, establecidos en la normatividad.
- i) Con las propuestas de reuso reduce el impacto ambiental en el acuífero, porque es menor la descarga de contaminantes a las lagunas de infiltración. En la Opción 1 (reuso con ingreso de electrolito) el volumen a infiltrar disminuye en un 76.92% a diferencia de la Opción 2 en donde se elimina por completo la necesidad de infiltrar.
- j) La tasa de generación de agua residual es menor en la Opción 2 en comparación con el sistema actual y en comparación a la Opción 1. La diferencia es del 6.22 y 4.66%, respectivamente. Entre menor sea el valor de la tasa de generación mejor es la propuesta de reuso.

- k) La tasa de reuso directo aumenta para la Opción 2 en comparación a la Opción 1 y al sistema actual. Para la Opción 1, la tasa de reuso directo es de 0.0950 y en el sistema actual el reuso directo es 0. El incremento en el reuso directo para la Opción 2 es del 4.84% con referencia a la Opción 1. El mejor valor de la tasa de reuso corresponde a la Opción 2 pues es más cercano a 1, que es el óptimo.
- l) La tasa de tratamiento y reciclaje es de 0.9732, valor que representa un aumento del 25.25% con respecto al sistema actual y del 4.19% con respecto a la Opción 1. La tasa de tasa de tratamiento y reciclaje es mejor que la de la Opción 1 por ser un valor más cercano a la unidad, que es el valor óptimo para este indicador.
- m) El utilizar agua de pozo potabilizada en las operaciones donde actualmente se suministra agua de pipa potable, trae una reducción en el costo de \$26.95/m<sup>3</sup> de agua potable empleada.
- n) A 5 y 10 años, las alternativas más rentables son la OP1A y OP1B porque tienen menores períodos de retorno de inversión, mayores valores de TIR y valores altos de B/C y B/I (mucho mayores a 1), en comparación con las demás alternativas.
- o) Aparentemente en sus variantes, la Opción 1 es mejor que la Opción 2, sin embargo los beneficios de reducir el daño a equipos y tuberías, dejar de disponer agua tratada con alto contenido de sales en las lagunas de infiltración y trabajar en ambientes con pH menos ácidos y menos tóxicos, no fueron considerados en el presente trabajo por lo cual la Opción 2 (en sus variantes, A y B) podría resultar una alternativa con mayor viabilidad. La Opción 2 además de los beneficios ambientales mencionados posee beneficios económicos.
- p) Las alternativas OP2C y OP2D no son alternativas rentables económicamente pues generan pérdidas. La inversión estimada es <215,000 dólares pero los gastos anuales son altos debido al confinamiento del electrolito (> 5,890,000 dólares).
- q) Desde el punto de vista ambiental las alternativas OP2C y OP2D no son alternativas viables porque el confinamiento no es una solución sustentable. No se están minimizando los contaminantes, sólo se están transportando del lugar de origen al sitio de disposición.

## 6.2 Recomendaciones

- a) Eliminar el ingreso del electrolito al proceso industrial, con lo cual se elimina la principal fuente de contaminantes hacia las corrientes de agua.
- b) Realizar un estudio con el fin de mejorar el manejo y disposición final del agua pluvial, para disponerla de manera controlada y segura y minimizar los problemas operativos en la planta durante períodos de lluvias.
- c) Instalar instrumentos de medición de flujo para conocer los caudales de los principales influentes y efluentes de agua del proceso y poder realizar con mayor precisión los balances de agua.
- d) Eficientar el uso de la fosa multiusos después de implementar alguna de las opciones propuestas de reuso. Esta fosa se puede limpiar y utilizar para almacenar agua pluvial

(y utilizar el agua en el lavado de plásticos o de móviles) o agua de la fosa del MA-51, del lavado de plásticos o de lavandería, en caso de mantenimiento o reparación por daño en las bombas que descargan agua a la laguna de agua ácida.

- e) Evaluar la evolución de la calidad del agua de pozo para determinar si ésta ha sido afectada por las continuas infiltraciones de agua residual tratada.
- f) Realizar un estudio de impacto ambiental en el área de influencia de la planta y en el acuífero de la región para determinar riesgos y evaluar alternativas de prevención/remediación de la contaminación de las aguas subterráneas.
- g) Realizar estudio y pruebas en laboratorio necesarios para definir un método o una tecnología alterna que permita tratar el electrolito y recuperar el ácido sulfúrico, con lo cual el ácido se transforma en materia prima apta para usarse en el proceso de fabricación de nuevas baterías. Como parte del estudio sería conveniente incluir el diseño del sistema de extracción (manual, mecánico o automatizado) del electrolito de las baterías usadas.
- h) En futuras evaluaciones económicas es necesario incorporar los beneficios asociados a la reducción del daño a equipos y tuberías y del riesgo por laborar en ambientes menos ácidos, para poder determinar con mayor precisión la viabilidad de las alternativas 2A y 2B.
- i) Cuantificar e incluir en las estimaciones los efectos de la depreciación de instalaciones y equipos, incremento en precios por la inflación, cambio en la paridad del dólar a través del tiempo, además de los costos por conceptos de consumo de energía eléctrica (bombeo y operación) y mantenimiento para realizar evaluaciones económicas que reflejen con mayor veracidad la rentabilidad de las alternativas propuestas.

**Anexo 1 Resultados de las mediciones de flujo con equipo ultrasónico.**

Tabla A1.1 Medición de caudales con medidor ultrasónico.

Punto de muestreo	Efluente	Destino	Promedio lt/s	Desviación estándar lt/s	Mínimo lt/s	Máximo lt/s
1	Fosa del MA-51	Laguna de agua ácida	16.60	0.38	15.30	17.61
2	Fosa multiusos	Laguna de agua ácida	3.37	0.73	2	4.63
4	Laguna de agua ácida	Tratamiento fisicoquímico	10.68	1.33	8.90	13.07
6	Apron Feeder	Fosa del MA-51	0.79	0.40	0.10	1.90
7	Efluente de Filtro Prensa	Fosa del MA-51	4.87	1.42	1.90	10.20
8	Agua tratada de cisterna	Proceso en MA-51	6.17	0.99	4.02	7.65

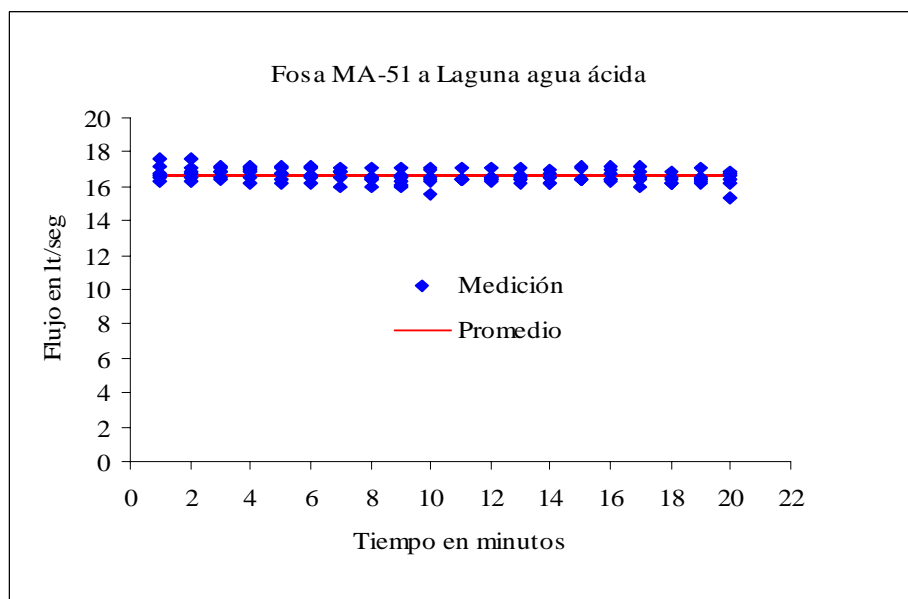


Figura A1.1 Mediciones de flujo en el punto de muestreo No.1

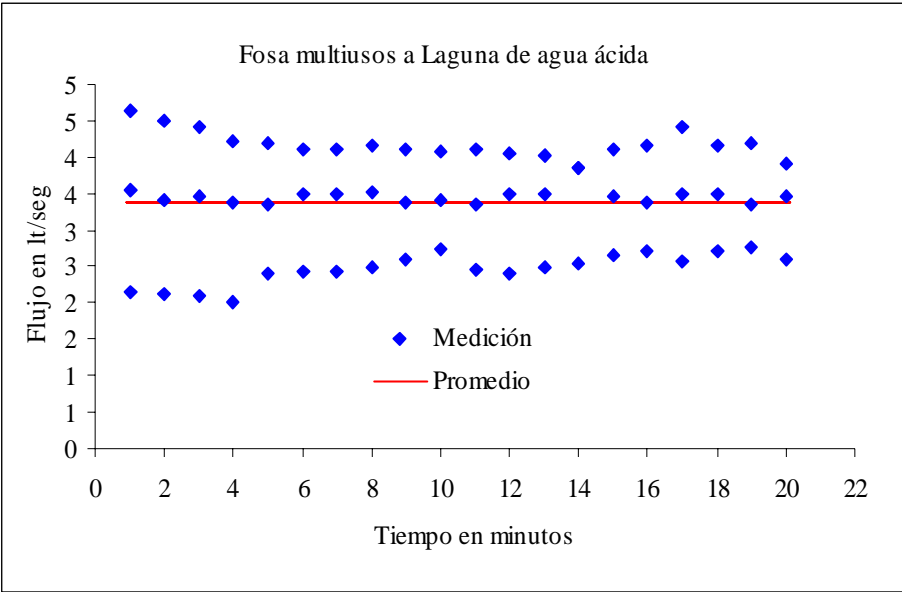


Figura A1.2 Mediciones de flujo en el punto de muestreo No.2

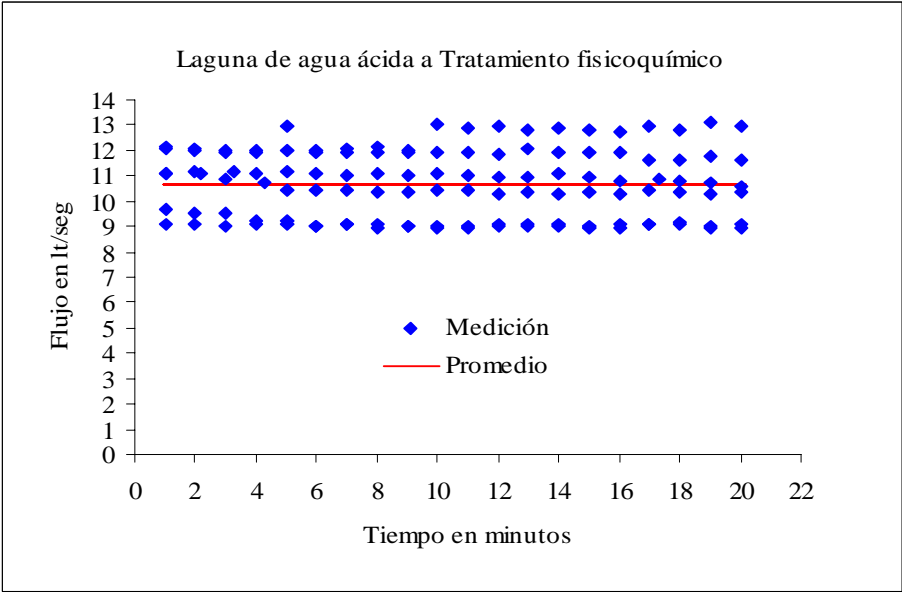


Figura A1.3 Mediciones de flujo en el punto de muestreo No. 4

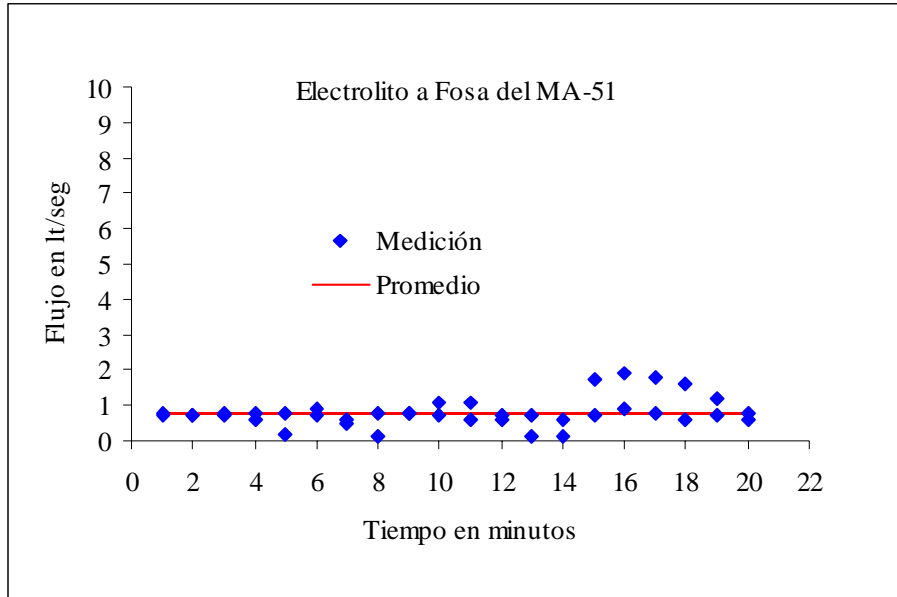


Figura A1.4 Mediciones de flujo en el punto de muestreo No.6

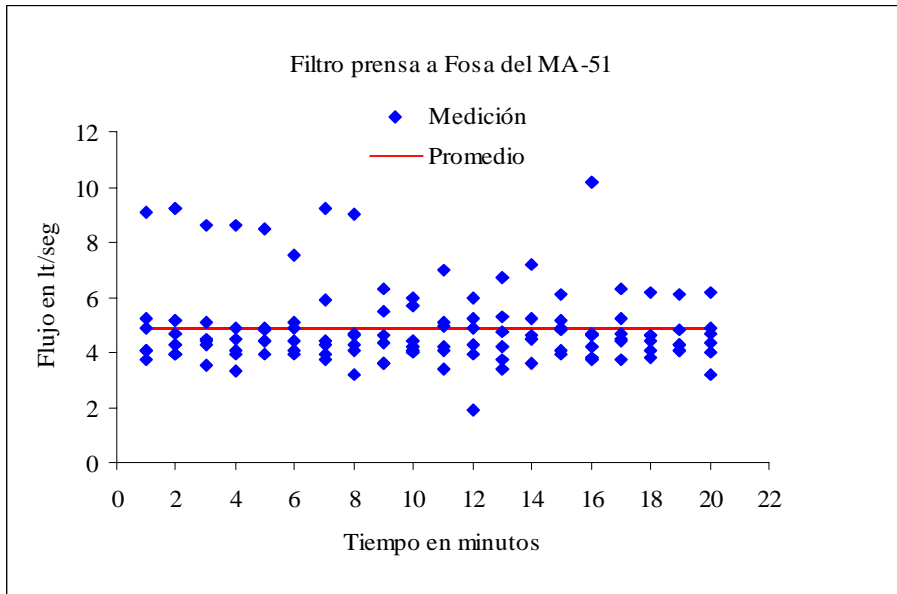


Figura A1.5 Mediciones de flujo en el punto de muestreo No.7

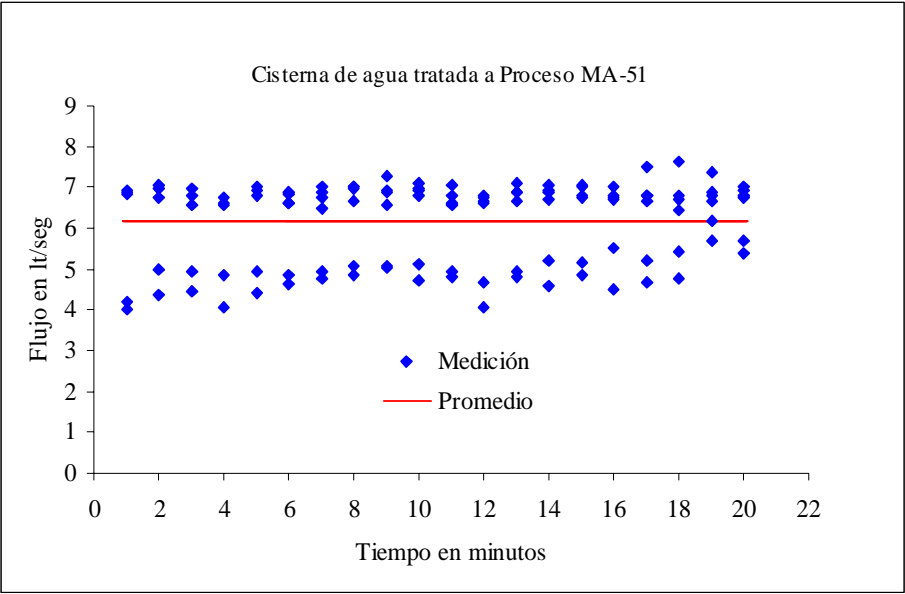


Figura A1.6 Mediciones de flujo en el punto de muestreo No. 8

## Anexo 2 Metodologías aplicadas en la determinación de parámetros.

Tabla A2.1 Normas aplicadas en la determinación de parámetros.

Parámetro determinado	Norma aplicable	Descripción de la norma
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Densidad	No Aplica	Inmersión de densímetro en fluido
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	Norma mexicana que establece el método de prueba para la determinación del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000	Determinación de la conductividad eléctrica en agua, aplicable para agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada.
Sólidos suspendidos totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Sólidos disueltos totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Demanda Química de Oxígeno	NMX-AA-030-SCFI-2001	Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Nitrógeno Total Kjeldahl	NMX-AA-026-SCFI-2001	Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Nitrógeno como nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001	Determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y tratadas.
Fósforo total	NMX-AA-029-SCFI-2001	Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Sulfatos	NMX-AA-074-1981	Determinación del ión sulfato en aguas naturales y residuales.
Cianuros	EPA 335.2 (1983)	Determinación de cianuros sensibles a la clorinación, en agua potable, naturales, salinas, domésticas y residuales industriales.
Cationes	EPA 200.7 (1991)	ICP Espectrometría de Emisión Atómica.
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	Determinación de grasas y aceites en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Metales Pesados	EPA 200.7 (1991)	Método para la determinación de metales en el ambiente por ICP Espectrometría de Emisión Atómica.



### Anexo 3 Resultados de análisis fisicoquímicos de muestras.

Tabla A3.1a Parámetros físicos.

Punto de muestreo	Muestras Efluente	Temperatura C°			Densidad g/cm <sup>3</sup>		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	35.43	25.0-46.0	6.32	1.11	<1.0-1.14	0.04
2	Fosa multiusos	23.80	19.0-28.0	4.02	1.0	<1.0-1.0	0.02
3	Tratamiento biológico	22.40	20.0-25.0	2.07	1.001	1.0	0.002
4	Laguna de agua ácida	26.65	24.0-31.0	2.33	1.11	1.1-1.12	0.006
5	Tratamiento fisicoquímico	36.0	34.0-38.0	2.00	1.13	1.12-1.14	0.006
6	Fosa del Apron Feeder	22.33	20.0-25.0	2.51	1.11	1.1-1.11	0.009
7	Efluente de filtro prensa	36.50	26.0-48.0	7.58	1.13	1.1-1.14	0.01
8	Agua tratada de cisterna	34.10	26.0-40.0	4.67	1.13	1.12-1.14	0.005
9	Lavado de plásticos	26.0	24.0-28.0	2.00	1.02	1.0-1.05	0.02
10	Agua de pozo				1.002	1.002	
11	Agua purificada				1.001	1.001	
12	Agua potable de pipa				1.0	1.0	
13	Comedor				1.00	1.00	0.003
14	Lavado de móviles				1.00	1.003-1.004	0.001
15	Regaderas				1.00	1.003-1.004	0.001
16	Lavandería				1.00	1.003-1.005	0.001
17	Influente al tratamiento biológico	30.00	30.0-30.0	0.00	1.00	1.001-1.002	0.001
18	Electrolito de las baterías				1.20	1.07-1.28	0.082
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico						

Tabla A3.1b Parámetros físicos (continuación).

Punto de muestreo	Muestras Efluente	pH			Conductividad eléctrica mS/cm		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	1.11	0.8-1.4	0.2	324.05	57.3- 2,590.0	714.68
2	Fosa multiusos	5.5	2.1-7.9	2.49	22.22	4.8-47.1	20.81
3	Tratamiento biológico	7.7	7.4-8.1	0.27	4.79	3.8-5.3	0.58
4	Laguna de agua ácida	1.22	0.8-1.4	0.2	124.2	111.8- 135.9	7.74
5	Tratamiento físicoquímico	7.5	7.2-8.0	0.35	53.53	24.3-62.6	14.50
6	Fosa del Apron Feeder	1.38	1.1-1.6	0.21	2,970.0	680.0- 5,020.0	2,019.35
7	Efluente de filtro prensa	1.11	0.6-1.5	0.25	320.88	79.8- 2,870.0	734.41
8	Agua tratada de cisterna	7.06	4.3-7.7	0.9	60.08	57.5-62.4	1.84
9	Lavado de plásticos	7.17	6.7-7.9	0.64	6.57	5.8-7.7	1.00
10	Agua de pozo	6.89	6.89		4.6	4.6	
11	Agua purificada	6.45	6.45		0.1	0.1	
12	Agua potable de pipa	7.1	7.1		2.5	2.5	
13	Comedor	6.56	5.8-7.2	0.99	0.99	0.2-1.7	1.00
14	Lavado de móviles	6.69	5.9-7.4	1.07	2.76	2.5-3.0	0.33
15	Regaderas	7.41	7.3-7.4	0.071	2.20	2.1-2.3	0.14
16	Lavandería	7.37	7.2-7.4	0.17	2.87	2.7-3.0	0.19
17	Influente al tratamiento biológico	7.2	7.1-7.3	0.14	2.50	1.6-3.4	1.27
18	Electrolito de las baterías	0.37	0.2-0.5	0.12	12,380.0	4,300- 16,130	4,810.16
19	Lodos del tratamiento físicoquímico						

Tabla A3.1c Parámetros físicos (continuación).

Muestras		Sólidos suspendidos totales mg/L			Sólidos disueltos totales mg/L		
Punto de muestreo	Efluente	Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	2,007.39	766.0-5,322.6	1,375.05	168,442.33	112,681.5-196,505.0	23,542.35
2	Fosa multiusos	1,323.60	50.0-4,710	1,928.35	48,838.93	4,062.5-101,096.6	49,886.34
3	Tratamiento biológico	28.70	12.0-56.0	18.06	3,739.46	3,567.3-3,978.2	171.57
4	Laguna de agua ácida	824.15	73.5-1,620.4	386.97	165,928.03	139,202.5-198,782.0	21,986.43
5	Tratamiento fisicoquímico	712.00	548.0-1,085.0	206.86	184,733.78	156,732.9-242,066.5	31,672.91
6	Fosa del Apron Feeder	1,359.20	1,234.0-1,597.0	147.49	227,679.85	174,074.0-289,178.0	50,996.96
7	Efluente de filtro prensa	1,018.64	574.0-2,358.0	426.00	182,338.22	140,237.2-209,737.0	20,514.47
8	Agua tratada de cisterna	863.92	594.0-1,560.0	317.96	189,129.95	164,258.7-216,165.7	19,065.33
9	Lavado de plásticos	414	207.0-723.0	272.70	6,932.81	4,993.0-8,245.7	1,714.58
10	Agua de pozo	44	44		3,924.30	3,924.30	
11	Agua purificada	26	26		196.50	196.50	
12	Agua potable de pipa				1,780	1,780	
13	Comedor	79.25	79.0-79.5	0.35	1,453.88	288.7-2,608.0	1,632.17
14	Lavado de móviles	30.75	29.0-32.5	2.47	2,478.00	2,428.5-2,527.5	70.0
15	Regaderas	52.75	51.5-54.0	1.76	1,999.63	1,712.2-2,287.0	406.41
16	Lavandería	207	164.0-250.0	60.81	2,404.88	2,327.2-2,482.5	109.77
17	Influente al tratamiento biológico	431.25	217.5-645.0	302.28	3,386.25	3,305.0-3,467.5	114.90
18	Electrolito de las baterías	2,040.59	1,086.1-2,915.0	691.64	391,493.13	138,270.8-564,855.1	161,600.67
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	6,621.80 mg/kg	6,621.80 mg/kg		48,138.04 mg/kg	48,138.04 mg/kg	

Tabla A3.2a Parámetros químicos.

Punto de muestreo	Muestras Efluente	DQO mg/L			NTK mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. Std
1	Fosa del MA-51	354.50	247.0-520.0	83.62	9.54	2.6-15.5	5.61
2	Fosa multiusos	195.60	28.0-368.0	155.87	2.75	<0.5-5.0	3.18
3	Tratamiento biológico	116.00	35.0-236.0	80.19	10.10	10.10	
4	Laguna de agua ácida	399.36	272.0-610.0	107.65	14.85	6.7-36.0	10.63
5	Tratamiento fisicoquímico	344.25	256.0-533.0	128.36	8.25	7.5-9.0	1.06
6	Fosa del Apron Feeder	1,100.60	513.0-1,520.0	439.16	43.40	42.3-44.5	1.55
7	Efluente de filtro prensa	435.08	208.0-580.0	113.78	14.38	4.9-24.1	6.75
8	Agua tratada de cisterna	340.50	252.0-530.0	82.38	8.98	5.5-15.1	4.23
9	Lavado de plásticos	325.67	77.0-540.0	233.40	2.47	<0.5-6.40	3.40
10	Agua de pozo	144.0	144.0		0.6	0.6	
11	Agua purificada	12.0	12.0		<0.5	<0.5	
12	Agua potable de pipa	100.0	100.0		<0.5	<0.5	
13	Comedor	1,520.00	360.0-2,680.0	1,640.48	19.50	6.0-33.0	19.09
14	Lavado de móviles	152.00	116.0-188.0	50.91	6.00	6.0-6.0	0
15	Regaderas	272.00	164.0-380.0	152.73	11.30	9.0-13.6	3.25
16	Lavandería	710.0	700.0-720.0	14.14	17.25	15.0-19.5	3.18
17	Influyente al tratamiento biológico	1,088.00	436.0-1,740.0	922.06	67.90	49.6-86.2	25.88
18	Electrolito de las baterías	228.0	228.0		47.90	47.90	
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico				818.0 mg/kg	818.0 mg/kg	

Tabla A3.2b Parámetros químicos (continuación).

Punto de Muestreo	Muestras Efluente	N como NO <sub>3</sub> mg/L			GyA mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std
1	Fosa del MA-51	19.26	2.0-56.0	21.31	3.60	1.4-5.3	1.99
2	Fosa multiusos	28.50	23.0-34.0	7.77	6.30	<0.5-12.1	8.20
3	Tratamiento biológico	45.75	14.5-77.0	44.19	1.10	0.5-1.70	0.84
4	Laguna de agua ácida	17.13	6.7-36.0	16.37	1.95	1.0-2.6	0.69
5	Tratamiento fisicoquímico	0.71	0.71				
6	Fosa del Apron Feeder	6.87	0.04-13.7	9.65	8.40	5.5-11.3	4.10
7	Efluente de filtro prensa	31.60	11.0-75.0	25.21	2.18	1.3-3.5	0.83
8	Agua tratada de cisterna	6.55	2.0-15.4	7.66			
9	Lavado de plásticos	20.10	12.2-28.0	11.17	12.63	<0.5-27.3	13.57
10	Agua de pozo	24.0	24.0		< 0.5	< 0.5	
11	Agua purificada				11.7	11.7	
12	Agua potable de pipa				<0.5	<0.5	
13	Comedor				168.45	26.5-310.4	200.74
14	Lavado de móviles				10.85	1.6-20.1	13.08
15	Regaderas				6.30	3.7-8.9	3.67
16	Lavandería				5.65	<0.5-10.8	7.28
17	Influente al tratamiento biológico	<0.06	<0.06	0	106.00	44.4-167.6	87.11
18	Electrolito de las baterías	0.53	0.53		5.10	5.10	
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	1.95 mg/kg	1.95 mg/kg		830.0 mg/kg	830.0 mg/kg	

Tabla A3.2c Parámetros químicos (continuación).

Punto de muestreo	Muestras Efluente	P total mg/L			Cloruros mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	3.90	0.4-8.4	3.10	537.81	116.9-955.3	321.70
2	Fosa multiusos	0.67	0.4-0.9	0.34	524.72	345.6-711.6	146.76
3	Tratamiento biológico	2.25	2.1-2.3	0.15	467.94	331.4-610.9	111.15
4	Laguna de agua ácida	2.65	2.1-3.3	0.58	524.39	272.9-955.3	191.05
5	Tratamiento fisicoquímico	0.37	0.37		508.46	370.4-591.4	81.39
6	Fosa del Apron Feeder	5.69	1.1-10.2	6.42	358.68	23.4-1,423.3	604.62
7	Efluente de filtro prensa	4.76	0.5-11.6	4.11	537.68	93.5-1,072.3	306.01
8	Agua tratada de cisterna	0.26	0.12-0.38	0.13	579.27	370.4-700.4	106.74
9	Lavado de plásticos	0.28	0.15-0.41	0.184	467.94	311.9-545.9	135.08
10	Agua de pozo	<0.03	<0.03		557.63	557.63	
11	Agua purificada	<0.03	<0.03		124.78	124.78	
12	Agua potable de pipa	0.07	0.07		370.45	370.45	
13	Comedor	2.01	0.91-3.1	1.54	85.79	70.1-101.3	22.06
14	Lavado de moviles	1.98	1.1-2.7	1.14	352.91	308.0-397.7	63.42
15	Regaderas	0.19	0.16-0.21	0.035	358.76	331.4-386.0	38.61
16	Lavandería	0.24	0.15-0.33	0.12	411.40	370.4-452.3	57.90
17	Influente al tratamiento biológico	12.39	6.6-18.1	8.11	727.08	714.6-739.4	17.54
18	Electrolito de las baterías	1.09	1.09		53.81	39.0-77.9	16.17
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	1,548 mg/kg	1,548 mg/kg		1,610.77 mg/kg	1,610.77 mg/kg	

Tabla A3.2d Parámetros químicos (continuación).

Punto de Muestreo	Muestras Efluente	SO <sub>4</sub> mg/L			Cianuros mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	6,489.90	4,882.5-8,505.7	918.03	0.07	<0.01-0.3	0.13
2	Fosa multiusos	4,149.18	1,256.7-6,395.2	1,841.49	0.02	<0.01-0.03	0.01
3	Tratamiento biológico	1,185.01	1,064.9-1,248.4	73.86	<0.01	<0.01	0
4	Laguna de agua ácida	5,518.66	3,138.9-7,844.8	1,269.43	0.02	0.016-0.02	0.004
5	Tratamiento fisicoquímico	3,897.91	2,230.3-7,971.5	2,050.24	0.20	0.06-0.3	0.18
6	Fosa del Apron Feeder	6,538.74	5,008.7-7,389.4	932.40	0.06	0.05-0.08	0.019
7	Efluente de filtro prensa	5,527.8	2,509.3-8,199.5	1,644.53	0.07	<0.01-0.18	0.066
8	Agua tratada de cisterna	4,579.68	2,641.8-7,225.9	1,451.03	0.30	0.26-0.37	0.044
9	Lavado de plásticos	3,038.51	1,890.4-4,261.4	1,187.30	6.68	0.01-20.0	11.54
10	Agua de pozo	13,339.84	1,339.84		<0.01	<0.01	
11	Agua purificada	93.82	93.82				
12	Agua potable de pipa	543.18	543.18				
13	Comedor	380.64	54.3-706.9	461.48	<0.01	<0.01	
14	Lavado de móviles	902.01	781.8-1,022.1	169.92	0.039	0.039	
15	Regaderas	572.40	561.2-583.5	15.71	<0.01	<0.01	
16	Lavandería	757.57	702.0-813.1	78.56	<0.01	<0.01	
17	Influyente al tratamiento biológico	857.57	781.0-934.1	108.24	<0.01	<0.01	0
18	Electrolito de las baterías	6,390.27	6,116.5-6,813.6	285.52	<0.01	<0.01	
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	52,822.58 mg/kg	5,189.5-54,355.6 mg/kg	2,168.02	<0.5 mg/kg	<0.5 mg/kg	

En el caso de los sulfatos las determinaciones que se realizaron son incorrectas debido a que no se hicieron las diluciones en las muestras. La norma NMX-AA-074-1981 indica que el método es aplicable en la determinación del ión sulfato para aguas naturales y residuales en el rango de 10 a 100 mg/L (método gravimétrico) y el valor esperado de concentración para las mismas excede el límite superior establecido por la norma.

Tabla A3.2e Parámetros químicos (continuación).

Muestras		Ca mg/L			Mg mg/L		
Punto de Muestreo	Efluente	Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std
1	Fosa del MA-51	33.68	23.5-44.0	7.35	2,167.63	993.0-2,609.0	565.03
2	Fosa multiusos	60.91	45.9-75.8	13.24	499.11	19.7-1,581.3	652.48
3	Tratamiento biológico	56.69	46.4-65.2	7.22	15.24	6.8-21.5	5.98
4	Laguna de agua ácida	38.15	30.6-48.5	6.21	2,195.80	913.5-2,887.3	601.93
5	Tratamiento fisicoquímico	44.32	34.5-49.9	5.98	2,837.18	1,010.6-3,540.3	930.55
6	Fosa del Apron Feeder	49.96	33.4-72.1	16.89	658.14	13.0-1,708.3	697.47
7	Efluente de filtro prensa	30.06	21.8-38.5	4.98	2,185.03	875.6-2,800.0	714.18
8	Agua tratada de cisterna	40.82	32.1-50.3	6.00	2,296.23	871.1-3,546.3	1,113.73
9	Lavado de plásticos	58.67	42.6-68.8	14.07	58.46	30.3-107.3	42.45
10	Agua de pozo	67.0	67.0		26.8	26.8	
11	Agua purificada	1.39	1.39		0.12	0.12	
12	Agua potable de pipa	37.1	37.1		7.5	7.5	
13	Comedor	1.48	1.2-1.7	0.33	0.23	0.14-0.3	0.12
14	Lavado de móviles	45.45	44.0-46.9	2.05	8.13	6.9-9.3	1.66
15	Regaderas	38.05	35.4-40.7	3.74	7.05	6.7-7.4	0.49
16	Lavandería	43.25	42.3-44.2	1.34	11.49	8.0-14.9	4.82
17	Influente al tratamiento biológico	55.15	52.3-58.0	4.03	18.80	17.4-20.2	1.98
18	Electrolito de las baterías	32.76	12.4-67.7	27.04	14.38	5.4-33.4	11.17
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	1,350.00 mg/kg	500.0-2,200.0 mg/kg	1,202.08	149,150.0 mg/kg	126,400.0-171,900.0 mg/kg	32,173.35



Tabla A3.2f Parámetros químicos (continuación).

Punto de Muestreo	Muestras Efluente	Na mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	516.90	418.3-626.7	66.37
2	Fosa multiusos	202.29	57.8-373.1	135.84
3	Tratamiento biológico	55.97	46.3-62.0	6.80
4	Laguna de agua ácida	557.24	472.7-676.1	58.21
5	Tratamiento fisicoquímico	547.90	485.0-630.4	65.35
6	Fosa del Apron Feeder	239.13	134.9-316.6	68.36
7	Efluente de filtro prensa	675.02	430.3-1,279.0	241.65
8	Agua tratada de cisterna	502.86	371.5-643.6	73.22
9	Lavado de plásticos	109.57	79.6-125.4	25.96
10	Agua de pozo	59.9	59.9	
11	Agua purificada	6.5	6.5	
12	Agua potable de pipa	31.5	31.5	
13	Comedor	44.13	7.6-80.6	51.58
14	Lavado de móviles	41.60	35.9-47.3	8.06
15	Regaderas	34.50	33.3-35.7	1.69
16	Lavandería	39.40	38.6-40.2	1.13
17	Influente al tratamiento biológico	45.20	41.6-48.8	5.09
18	Electrolito de las baterías	820.62	565.1-1,226.0	269.87
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	14,200.0 mg/kg	12,400.0-16,000.0 mg/kg	2,545.58

Tabla A3.2g Parámetros químicos (continuación).

Muestras		Pb mg/L			As mg/L		
Punto de muestreo	Efluente	Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std
1	Fosa del MA-51	38.79	4.7-105.3	29.01	0.17	<0.10-0.56	0.13
2	Fosa multiusos	28.27	0.3-117.2	50.55	<0.10	<0.10	0
3	Tratamiento biológico	0.18	<0.1-0.51	0.18	<0.10	<0.10	0
4	Laguna de agua ácida	6.29	<0.1-14.9	4.37	0.21	<0.1-0.36	0.12
5	Tratamiento fisicoquímico	0.77	<0.1-4.1	1.63	<0.1	<0.1	0
6	Fosa del Apron Feeder	32.99	4.9-96.0	37.28	0.20	<0.1-0.44	0.15
7	Efluente de filtro prensa	12.21	<0.1-64.5	17.65	0.21	<0.1-0.63	0.20
8	Agua tratada de cisterna	0.42	<0.1-4.0	1.07	0.11	<0.1-0.23	0.036
9	Lavado de plásticos	8.52	3.5-16.2	6.74	<0.10	<0.10	0
10	Agua de pozo	0.13	0.13		<0.10	<0.10	
11	Agua purificada	<0.10	<0.10		<0.10	<0.10	
12	Agua potable de pipa	<0.10	<0.10		<0.10	<0.10	
13	Comedor	0.11	<0.1-0.11	0.007	0.12	<0.10-0.14	0.028
14	Lavado de móviles	0.42	0.17-0.6	0.34	0.16	<0.10-0.2	0.085
15	Regaderas	0.19	0.19	0	0.17	<0.1-0.23	0.092
16	Lavandería	4.62	4.4-4.7	0.22	0.17	<0.1-0.2	0.092
17	Influente al tratamiento biológico	0.75	0.3-1.1	0.53	<0.10	<0.10	0
18	Electrolito de las baterías	2.72	2.2-4.0	0.73	<0.10	<0.10	0
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	26,515.00 mg/kg	20,900.0-32,130.0 mg/kg	7,940.8	1.00 mg/kg	1.00 mg/kg	0

Tabla A3.2h Parámetros químicos (continuación).

Punto de muestreo	Muestras Efluente	Cd mg/L			Cr mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	0.42	<0.10-1.17	0.28	0.15	<0.10-0.3	0.073
2	Fosa multiusos	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
3	Tratamiento biológico	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
4	Laguna de agua ácida	0.45	0.2-0.74	0.22	0.18	<0.1-0.7	0.17
5	Tratamiento fisicoquímico	<0.1	<0.1	0	<0.10	<0.10	0
6	Fosa del Apron Feeder	0.11	<0.1-0.16	0.02	3.52	1.1-6.2	1.84
7	Efluente de filtro prensa	0.67	<0.1-2.1	0.63	0.12	<0.1-0.26	0.042
8	Agua tratada de cisterna	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
9	Lavado de plásticos	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
10	Agua de pozo	<0.10	<0.10		<0.10	<0.10	
11	Agua purificada	<0.10	<0.10		<0.10	<0.10	
12	Agua potable de pipa	<0.10	<0.10		<0.10	<0.10	
13	Comedor	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
14	Lavado de móviles	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
15	Regaderas	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
16	Lavandería	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
17	Influente al tratamiento biológico	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
18	Electrolito de las baterías	<0.10	<0.10	0	0.10	<0.1-0.12	0.009
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	1,850.0 mg/kg	1,800.0-1,900.0 mg/kg	70.71	750.00 mg/kg	700.0-800.0 mg/kg	70.71

Tabla A3.2i Parámetros químicos (continuación).

Punto de muestreo	Muestras Efluente	Cu mg/L			Fe mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std
1	Fosa del MA-51	0.32	0.11-0.48	0.12	11.63	1.8-21.8	7.66
2	Fosa multiusos	<0.10	<0.10	0	1.73	0.3-4.2	2.14
3	Tratamiento biológico	<0.10	<0.10	0	0.18	<0.1-0.35	0.14
4	Laguna de agua ácida	0.36	0.16-0.5	0.12	15.09	12.3-17.8	2.10
5	Tratamiento fisicoquímico	<0.10	<0.10	0	0.61	0.4-0.9	0.23
6	Fosa del Apron Feeder	3.60	1.6-6.1	1.75	73.40	51.1-86.5	19.41
7	Efluente de filtro prensa	0.34	0.14-1.1	0.25	33.36	2.3-94.6	31.47
8	Agua tratada de cisterna	<0.10	<0.10	0	0.53	<0.10-0.9	0.31
9	Lavado de plásticos	<0.10	<0.10	0	0.39	0.14-0.5	0.22
10	Agua de pozo	<0.10	<0.10		2.2	2.2	
11	Agua purificada	<0.10	<0.10		<0.10	<0.10	
12	Agua potable de pipa	<0.10	<0.10		<0.10	<0.10	
13	Comedor	<0.10	<0.10	0	<0.10	<0.10	0
14	Lavado de móviles	<0.10	<0.10	0	0.49	0.4-0.5	0.042
15	Regaderas	<0.10	<0.10	0	0.11	<0.10-0.11	0.007
16	Lavandería	<0.10	<0.10	0	0.31	0.2-0.3	0.035
17	Influente al tratamiento biológico	<0.10	<0.10	0	0.23	<0.10-0.3	0.17
18	Electrolito de las baterías	0.42	0.11-0.6	0.23	25.52	8.4-51.0	18.31
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	1,950.00 mg/kg	1,900.0-2,000.0 mg/kg	70.71	82,200.00 mg/kg	81,700.0-82,700.0 mg/kg	707.10

Tabla A3.2j Parámetros químicos (continuación).

Punto de muestreo	Muestras Efluente	Ni mg/L			Zn mg/L		
		Promedio	Rango	Desv. std.	Promedio	Rango	Desv. std.
1	Fosa del MA-51	0.73	0.2-1.39	0.31	1.98	0.5-3.6	0.94
2	Fosa multiusos	0.14	0.1-0.2	0.05	0.36	0.2-0.4	0.091
3	Tratamiento biológico	<0.10	<0.10	0	0.15	<0.1-0.18	0.031
4	Laguna de agua ácida	0.65	0.3-0.9	0.20	1.89	1.0-3.3	0.70
5	Tratamiento fisicoquímico	0.51	0.2-0.6	0.17	0.29	0.2-0.3	0.061
6	Fosa del Apron Feeder	2.03	0.9-3.2	0.80	3.38	1.4-4.8	1.20
7	Efluente de filtro prensa	0.82	0.3-2.1	0.51	2.40	0.7-6.8	1.67
8	Agua tratada de cisterna	0.42	0.2-0.6	0.13	1.07	0.11-9.6	2.57
9	Lavado de plásticos	<0.10	<0.10	0	0.38	0.2-0.5	0.16
10	Agua de pozo	<0.10	<0.10		0.12	0.12	
11	Agua purificada	<0.10	<0.10		0.15	0.15	
12	Agua potable de pipa	<0.10	<0.10		0.41	0.41	
13	Comedor	<0.10	<0.10	0	0.11	<0.10-0.12	0.014
14	Lavado de móviles	<0.10	<0.10	0	0.15	0.14-0.15	0.007
15	Regaderas	<0.10	<0.10	0	0.12	0.12	0
16	Lavandería	<0.10	<0.10	0	0.14	<0.10-0.18	0.057
17	Influente al tratamiento biológico	<0.10	<0.10	0	0.13	0.11-0.15	0.028
18	Electrolito de las baterías	0.25	<0.10-0.6	0.24	4.34	0.8-8.6	3.78
19	Lodos del tratamiento fisicoquímico	1,150.00 mg/kg	900.0-1,400.0 mg/kg	353.55	6,200.00 mg/kg	5,400.0-7,000.0 mg/kg	1,131.37

**Anexo 4 Normatividad mexicana vigente para agua potable, descargas de aguas residuales y aguas residuales tratadas.**

Tabla A4.1 Norma NOM-001-ECOL-1996: Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales con descargas en embalses naturales, artificiales y suelos.

Parámetro	Unidades	Promedio diario <sup>(1)</sup>	Promedio mensual <sup>(1)</sup>	Promedio diario <sup>(2)</sup>	Promedio mensual <sup>(2)</sup>
Temperatura	°C	40	40	40 <sup>(3)</sup>	40 <sup>(3)</sup>
Grasas y aceites	mg/L	25	15	25	15
Materia flotante	No aplica	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos sedimentables	ml/L	2	1	2 <sup>(3)</sup>	1 <sup>(3)</sup>
Sólidos suspendidos totales	mg/L	125	75	125 <sup>(3)</sup>	75 <sup>(3)</sup>
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	mg/L	150	75	150 <sup>(3)</sup>	75 <sup>(3)</sup>
Nitrógeno total	mg/L	60	40	NA	NA
Fósforo total	mg/L	30	20	NA	NA
Arsénico	mg/L	0.4	0.2	0.4	0.2
Cadmio	mg/L	0.4	0.2	0.1	0.05
Cianuro	mg/L	3.0	2.0	3	2
Cobre	mg/L	6.0	4.0	6	4
Cromo	mg/L	1.5	1	1	0.5
Mercurio	mg/L	0.02	0.01	0.01	0.005
Níquel	mg/L	4	2	4	2
Plomo	mg/L	1	0.5	0.4 <sup>(3)</sup>	0.2 <sup>(3)</sup>
Zinc	mg/L	20	10	20	10

Fuente: Secretaría de Economía, 2006.

<sup>1</sup>Promedio diario y mensual para los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales con descargas en embalses naturales y artificiales para uso en riego agrícola.

<sup>2</sup>Promedio diario y mensual para los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales con descargas en suelos y uso en riego agrícola.

<sup>3</sup>Promedio diario y mensual para los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales con descargas en humedales naturales.

Tabla A4.2 Norma NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Servicios al público con contacto directo.

Parámetro	Unidades	Promedio mensual
Coliformes fecales	NMP/100 ml	240
Huevos de Helminto	h/L	≤ 1
Grasas y aceites	mg/L	15
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub> *	mg/L	20
Sólidos suspendidos totales	mg/L	20

Fuente: Secretaría de Economía, 2006.

Tabla A4.3 Norma NOM-127-SSA1-1994: Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización.

Parámetro	Límite permisible (mg/L)
pH	6.5-8.5
Aluminio	0.2
Arsénico	0.05
Bario	0.7
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250
Cobre	2
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500
Fierro	0.3
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.5
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5
Plomo	0.025
Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1,000
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400
Zinc	5

Fuente: SSA, 2006.

## Anexo 5 Cálculos realizados para las determinaciones de flujo

En este anexo se muestran los cálculos realizados para las determinaciones y pérdidas por evaporación que se estimaron.

### 1. Tratamiento biológico a laguna de agua ácida:

Tabla A5.1 Dimensiones del tanque de agua tratada.

Diámetro (m)	5.05
Radio (m)	2.525
Altura a la descarga de la laguna de agua ácida (m)	1.16

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

Tabla A5.2 Lecturas y niveles para el cálculo del efluente tratado biológico enviado a laguna de agua ácida.

Día	Lectura de entrada en el tanque (m <sup>3</sup> )	Lectura medidor riego de escorias (m <sup>3</sup> )	Nivel en el tanque (m)	Volumen en el tanque (m <sup>3</sup> )	Diferencial de lecturas de entrada del tanque (m <sup>3</sup> )	A	B	C	Diferencial de volumen en el tanque (m <sup>3</sup> )	A-B-C	Salida del tanque (m <sup>3</sup> )	Vo+A-Vol útil (m <sup>3</sup> )	Descarga (m <sup>3</sup> )
1	2,664.00	51.00	0.38	7.61									
2	2,681.00	57.00	0.64	12.82	17.00		6.00	5.21	5.79	1.38			
3	2,737.00	69.00	1.16	23.23	56.00		12.00	10.42	33.58	45.58			
4	2,737.00	79.00	0.79	15.82	0.00		10.00	-7.41	-2.59	0.00			
5	2,797.00	105.00	1.16	23.23	60.00		26.00	7.41	26.59	52.59			
6	2,824.00	109.00	1.15	23.03	27.00		4.00	-0.20	23.20	27.00			
7	2,884.00	120.00	1.16	23.23	60.00		11.00	0.20	48.80	59.80			
8	2,886.00	124.00	1.02	20.43	2.00		4.00	-2.80	0.80	2.00			
9	2,915.00	129.00	1.03	20.63	29.00		5.00	0.20	23.80	26.20			
10	2,932.00	129.00	1.10	22.03	17.00		0.00	1.40	15.60	14.40			
11	2,948.00	140.00	0.80	16.02	16.00		11.00	-6.01	11.01	14.80			
12	3,038.00	148.00	1.15	23.03	90.00		8.00	7.01	74.99	82.79			
13	3,051.00	155.00	1.08	21.63	13.00		7.00	-1.40	7.40	12.80			
14	3,067.00	162.00	0.95	19.03	16.00		7.00	-2.60	11.60	14.40			
15	3,086.00	169.00	0.98	19.63	19.00		7.00	0.60	11.40	14.79			
16	3,107.00	177.00	0.97	19.43	21.00		8.00	-0.20	13.20	17.39			
17	3,140.00	185.00	0.80	16.02	33.00		8.00	-3.41	28.41	29.19			
18	3,171.00	187.00	1.21	24.24	31.00		2.00	8.21	20.79	23.79			
19	3,172.00	198.00	1.10	22.03	1.00		11.00	-2.20	-7.80	2.00			
20	3,212.00	209.00	1.15	23.03	40.00		11.00	1.00	28.00	38.80			
21	3,212.00	226.00	1.15	23.03	0.00		17.00	0.00	-17.00	-0.20			
22	3,251.00	233.00	1.15	23.03	39.00		7.00	0.00	32.00	38.80			
23	3,251.00	251.00	0.82	16.42	0.00		18.00	-6.61	-11.39	-0.20			
24	3,291.00	261.00	1.18	23.63	40.00		10.00	7.21	22.79	33.19			
25	3,350.00	267.00	0.70	14.02	59.00		6.00	-9.61	62.61	59.40			
26	3,405.00	280.00	1.00	20.03	55.00		13.00	6.01	35.99	45.79			
27	3,431.00	295.00	0.80	16.02	26.00		15.00	-4.01	15.01	22.80			

Fuente: registros e información proporcionada por el personal de la planta.

$$\text{Volumen útil} = (1.16 \text{ m})(3.141592)(2.525 \text{ m})^2 = 23.23 \text{ m}^3.$$

$$\text{Descarga diaria promedio a riego de escorias} = 9.38 \text{ m}^3/\text{d}.$$

$$\text{Descarga mensual a riego de escorias} = (9.38 \text{ m}^3/\text{d})(30 \text{ d/mes}) = 281.54 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

$$\text{Descarga mensual promedio} = (25.14 \text{ m}^3/\text{d})(30 \text{ d/mes}) = 754.24 \text{ m}^3/\text{mes}.$$



## 2. Plásticos a fosa multiusos:

Tabla A5.3 Dimensiones de los tanques de neutralización y consumo de agua.

Tanque de neutralización	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Volumen útil (m <sup>3</sup> ) 80% capacidad	Descarga semanal (m <sup>3</sup> )
1	18	14.4	28.8
2	18	14.4	28.8

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

Consumo semanal de agua para tanques de neutralización = 57.6 m<sup>3</sup>/semana.

Tabla A5.4 Dimensiones de los tanques de lavado y consumo de agua.

Tanque de lavado	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Volumen útil (m <sup>3</sup> ) 80% capacidad	Descarga semanal (m <sup>3</sup> )
1	12.44	9.952	9.952
2	13.23	10.584	10.584

Fuente: información proporcionada por el personal de la planta.

Consumo semanal de agua para lavado = 9.952 m<sup>3</sup>/semana + 10.584 m<sup>3</sup>/semana = 20.536 m<sup>3</sup>/semana.

Consumo semanal de agua (lavado + neutralización) = 57.6 m<sup>3</sup>/semana + 20.536 m<sup>3</sup>/semana = 78.136 m<sup>3</sup>/semana.

Consumo mensual de agua en Plásticos = (78.136 m<sup>3</sup>/semana)(4 semanas/mes) = 312.544 m<sup>3</sup>/mes.

## 3. Agua de pozo:

Tabla A5.5 Consumos mensuales de agua de pozo para el año 2005.

Mes (2005)	Consumo (m <sup>3</sup> )
Enero	4,060
Febrero	3,018
Marzo	3,655
Abril	4,038
Mayo	6,051
Junio	5,551
Julio	5,032
Agosto	4,011
Septiembre	3,306
Octubre	3,778
Noviembre	3,303
Diciembre	3,060
Promedio	4,071.92

Fuente: información proporcionada por el personal de la planta.

El consumo mensual de agua de pozo fue calculado a partir del promedio de los datos de consumos mensuales del 2005 y de información proporcionada por el personal de la planta, ajustando el valor.

Consumo mensual de agua de pozo =  $3,510.94 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### 4. Agua purificada:

Tabla A5.6 Consumos mensuales de agua purificada para el año 2005.

Mes (2005)	Consumo ( $\text{m}^3$ )
Enero	76.26
Febrero	74.14
Marzo	88.15
Abril	112.31
Mayo	71.43
Junio	52.75
Julio	196.72
Agosto	142.19
Septiembre	159.71
Octubre	54.11
Noviembre	122.70
Diciembre	119.42
Promedio mensual	105.82

Fuente: información proporcionada por el personal de la planta.

El consumo mensual de agua purificada también se calculó a partir del promedio de los datos de consumos mensuales del 2005.

Consumo mensual de agua purificada =  $105.82 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### 5. Lavado de móviles/vehículos:

Se midió el volumen de la pistola de lavado en el cual se llena un volumen de 2.5 lts.

Volumen medido = 2.5 lts

Tiempo de llenado del recipiente = 13.5 segundos.

Flujo aproximado =  $2.5 \text{ lt}/13.5 \text{ segundos} = 0.185 \text{ lt/s}$ .

Se estimó el tiempo de lavado por unidad así como el número de unidades a lavar por día:

Tiempo estimado de lavado por vehículo = 30 minutos.

Total de unidades lavadas al día (estimado) = 6 unidades.

Tiempo total de lavado al día =  $(30 \text{ min/unidad})(6 \text{ unidades/d}) = (180 \text{ min/d}) = 3 \text{ hr/d}$ .

Consumo de agua por día =  $(0.185 \text{ lt/s})(3600\text{s/h})(3 \text{ h/d}) = 2000 \text{ lt/d}$ .

Consumo mensual =  $(2000 \text{ lt/d})(1\text{m}^3/1000 \text{ lt})(30 \text{ d/mes}) = 60 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

El valor anterior representa un consumo de  $60 \text{ m}^3/\text{mes}$  para el lavado de móviles y la misma cantidad para el lavado de vehículos.

## 6. Lavandería:

Descarga de agua por día = (32 cargas/d)(234 lt/carga)(1 m<sup>3</sup>/1000 lt)= 7.488 m<sup>3</sup>/d.

Consumo de agua por mes = (7.488 m<sup>3</sup>/d)(30 d/mes) = 224.64 m<sup>3</sup>/mes.

El número de cargas por día y los litros por carga fueron datos proporcionados por el personal de la planta.

## 7. Electrolito en las baterías

Se calculó a partir de los datos de producción y del volumen promedio de electrolito por batería usada.

Tabla A5.7 Número de baterías usadas procesadas por mes año 2005.

Mes (2005)	Baterías procesadas (bat/mes)
Enero	815,028
Febrero	703,337
Marzo	798,057
Abril	762,806
Mayo	772,261
Junio	798,497
Julio	804,903
Agosto	764,212
Septiembre	790,597
Octubre	849,530
Noviembre	895,481
Diciembre	883,028
Promedio mensual	815,028

Fuente: información proporcionada por el personal de la planta.

Tabla A5.8 Volumen de electrolito por batería usada.

Batería	Volumen de electrolito (lt)
1	2.356
2	1.59
3	1.83
4	2.135
5	1.145
Promedio de la muestra	1.811

Fuente: mediciones de la muestra de baterías usadas proporcionadas por la planta.

Promedio baterías procesadas = 815,028 baterías/mes.

Volumen promedio electrolito = 1.811 lt/batería.

Electrolito por batería = 0.001811 m<sup>3</sup>/batería.

Electrolito que ingresa en las baterías = (815,028 baterías/mes)(1.811 lt/batería)(1m<sup>3</sup>/1000 lt) =1,454.65 m<sup>3</sup>/mes.

## 8. Enfriamiento:

A partir de los datos de consumo de agua potable para enfriamiento del 2005 y de información proporcionada por el personal de la planta sobre la distribución aproximada del consumo.

Tabla A5.9 Consumo de agua potable en enfriamiento.

Orden	Consumo en m <sup>3</sup>
1	800.00
2	1,138.45
3	927.76
4	581.49
5	111.21
6	32.62
Promedio	598.59

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

Tabla A5.10 Distribución aproximada del consumo agua potable por operación de enfriamiento.

Operación de enfriamiento	Consumo aprox. m <sup>3</sup>	Proporción	Escalando
Plásticos	137.20	42.34%	253.43
Ajuste y refinó	10.11	3.12%	18.67
Hornos	176.76	54.54%	326.49
Total	324.08	100%	598.59

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

El consumo por operación de enfriamiento proporcionado sirvió para el cálculo de los porcentajes, a partir de los cuales se estimaron los consumos por área, al escalar las proporciones, con base al consumo total promedio de 598.59 m<sup>3</sup>/mes.

## 9. Agua potable (pipa):

Se calculó a partir de los datos de consumo de agua potable en regaderas y de las estimaciones que se hicieron para el consumo de agua en lavado de móviles, lavado de vehículos y en enfriamiento.

Tabla A5.11 Consumo de agua potable de pipa en regaderas órdenes del 2005.

Mes	Consumo m <sup>3</sup>
Enero	1,226.30
Febrero	1,019.14
Marzo	1,133.63
Abril	1,085.20
Mayo	983.91
Junio	1,442.54
Julio	1,725.14
Agosto	697.56
Septiembre	1,410.79
Octubre	526.80
Noviembre	1,623.52
Diciembre	1,756.40
Promedio	1,219.24

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

Consumo mensual de agua potable de pipa= consumo de regaderas + estimaciones de los consumos (enfriamiento, lavado de vehículos y móviles).

Consumo mensual de agua potable de pipa =  $1,219.24 \text{ m}^3/\text{mes} + 599 \text{ m}^3/\text{mes} + 120 \text{ m}^3/\text{mes}$

Consumo mensual de agua potable de pipa =  $1,938.24 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **10. Regaderas:**

Al consumo mensual calculado de agua potable de pipa se le restaron los consumos estimados de agua para lavado de vehículos, enfriamiento y lavandería.

Consumo mensual de regaderas =  $1,938.24 \text{ m}^3/\text{mes} - 60 \text{ m}^3/\text{mes} - 598.59 \text{ m}^3/\text{mes} - 224.64 \text{ m}^3/\text{mes} = 1,055 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **11. Influyente al tratamiento biológico:**

Es la suma de la descarga a riego de escorias y del estimado de la descarga a laguna de agua ácida.

Influente mensual al tratamiento biológico =  $281.54 \text{ m}^3/\text{mes} + 754.24 \text{ m}^3/\text{mes}$   
=  $1,035.78 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **12. Baños:**

Al influente del tratamiento biológico se le restó el consumo de agua purificada en comedor.

Influente mensual al tratamiento biológico =  $1,035.78 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

Consumo mensual de agua purificada en comedor =  $105.82 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

Consumo en baños =  $1,035.78 \text{ m}^3/\text{mes} - 105.82 \text{ m}^3/\text{mes} = 929.96 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **13. Laboratorio:**

A partir del dato proporcionado de consumo de 19 litros diarios, durante 5 días (el volumen de un garrafón de agua son 19 litros), lo cual da  $19 \text{ lt/d}$  o bien  $0.019 \text{ m}^3/\text{d}$ .

Consumo mensual de agua en laboratorio =  $(0.019 \text{ lt/d}) (5 \text{ d/semana})(4 \text{ semanas/mes}) = 0.38 \text{ m}^3/\text{mes}$ , redondeando  $0.4 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **14. Riego de áreas verdes:**

Por diferencia, al consumo total de agua de pozo se le restaron los consumos estimados de agua en baños, lavado de plásticos, laboratorio y lavado de móviles.

Consumo mensual de agua en riego =  $3,510.94 \text{ m}^3/\text{mes} - 929.96 \text{ m}^3/\text{mes} - 312.54 \text{ m}^3/\text{mes} - 0.4 \text{ m}^3/\text{mes} - 60 \text{ m}^3/\text{mes} = 2,208.04 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **15. Pérdidas por evaporación:**

Se calcularon a partir de las áreas superficiales y de las tasas de evaporación.

a) Fosa multiusos

Área superficial=  $A_s = 9.2416 \text{ m}^2$  (dato proporcionado por personal de la planta).

$v =$  tasa de evaporación = 0.1082 m/mes = 3.6069 mm/d.

$P_{Ev} =$  pérdida por evaporación =  $A_s * v = (9.2416 \text{ m}^2)(0.1082 \text{ m/mes}) = 1 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

b) Laguna de agua ácida

Área superficial=  $A_s = 757.0550 \text{ m}^2$  (dato proporcionado por personal de la planta).

$v =$  tasa de evaporación = 0.26286 m/mes = 8.76202 mm/d.

$P_{Ev} =$  pérdida por evaporación =  $A_s * v = (757.0550 \text{ m}^2)(0.26286 \text{ m/mes}) = 199 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

c) Laguna de agua tratada

Área superficial=  $A_s = 1,402.80 \text{ m}^2$  (dato proporcionado por personal de la planta).

$v =$  tasa de evaporación = 0.04918 m/mes = 1.6396 mm/d.

$P_{Ev} =$  pérdida por evaporación =  $A_s * v = (1,402.80 \text{ m}^2)(0.04918 \text{ m/mes}) = 69 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

d) Cisterna de agua tratada

Área superficial=  $A_s = 14.5250 \text{ m}^2$  (dato proporcionado por personal de la planta).

$v =$  tasa de evaporación = 0.48193 m/mes = 16.0643 mm/d.

$P_{Ev} =$  pérdida por evaporación =  $A_s * v = (14.5250 \text{ m}^2)(0.48193 \text{ m/mes}) = 7 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

e) Lagunas de infiltración

Área superficial=  $A_s = 9,937 \text{ m}^2$  (dato proporcionado por personal de la planta).

$v =$  tasa de evaporación = 0.15145 m/mes = 5.04847 mm/d.

$P_{Ev} =$  pérdida por evaporación =  $A_s * v = (9,937 \text{ m}^2)(0.15145 \text{ m/mes}) = 1,505 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

## Anexo 6 Cálculo del porcentaje en peso del ácido sulfúrico en el electrolito de las baterías usadas.

### 1. Gramos de ácido sulfúrico contenidos en el electrolito:

Se determinaron a partir de los resultados de la neutralización del electrolito con hidróxido de magnesio para cada una de las baterías.

Tabla A6.1 Neutralización del electrolito de la muestra de baterías usadas.

Batería	Volumen de electrolito (lt)	pH inicial	pH final	mLMg(OH) <sub>2</sub> 1M	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)	gr H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	2.356	0.4	7.1	35.5	3.55	811.90
2	1.590	0.22	7.0	65	6.5	1003.25
3	1.830	0.36	7.05	41	4.1	728.34
4	2.135	0.33	7.30	37	3.7	766.83
5	1.145	0.55	7.30	12	1.2	133.38

Peso molecular del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>= 97.0734 gr/mol.

Peso molecular del Mg(OH)<sub>2</sub>= 58.3196 gr/mol.

Volumen medido para neutralizar = 10 ml de electrolito para cada una de las baterías.

Por ejemplo para la batería 1

gr de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = (35.5 ml)(1 mol/lt)(2.356 lt)(97.0734 gr/mol)/(10 ml) = 811.90 gr.

El volumen de electrolito se determinó por medición directa.

### 2. Porcentaje en peso de ácido sulfúrico por batería:

Se estimó en base a la densidad, el volumen y los gramos de ácido sulfúrico presentes en el electrolito de la batería usada.

Tabla A6.2 Cálculo del porcentaje en peso de ácido sulfúrico para la muestra de baterías.

Batería	densidad g/ml	Volumen de electrolito lt	Volumen de electrolito ml	gr de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	% peso de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	1.2351	2.36	2356	811.90	27.90%
2	1.3396	1.59	1590	1003.25	47.10%
3	1.3115	1.83	1830	728.34	30.35%
4	1.2131	2.14	2135	766.83	29.61%
5	1.1179	1.15	1145	133.38	10.42%

Por ejemplo para la batería 2

% en peso de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = (1003.25 gr)/[(1.3396 g/ml)(1590 ml)] x 100 % = 47.10%

### 3. Porcentaje en peso de ácido sulfúrico promedio:

El porcentaje en peso de ácido sulfúrico promedio para la muestra, se calculó a partir del promedio ponderado, utilizando los porcentajes en peso de ácido sulfúrico y el volumen de electrolito para las 5 baterías.

$$\% \text{ peso} = \frac{(27.90\%)(2356) + (47.10\%)(1590) + \dots}{2356 + 1590 + \dots} = 29.96\%$$

## Anexo 7 Cálculo de las cargas másicas por constituyente.

### Cargas másicas por constituyente

Para calcular la carga másica por constituyente se multiplicó el flujo del efluente por la concentración correspondiente, para cada punto de muestreo. Por ejemplo, para calcular los cloruros en el efluente de la fosa del MA-51:

Flujo del efluente en la fosa MA-51 =  $15,001 \text{ m}^3/\text{mes} = 15,001,000 \text{ lt/mes}$ .

Concentración de cloruros =  $537.81 \text{ mg/L}$ .

Carga másica de cloruros en la fosa MA-51 =  $(15,001,000 \text{ lt/mes})(537.81 \text{ mg/L}) = 8,067,615,930 \text{ mg/mes} = 8.067 \text{ ton/mes}$  de cloruros.

La información utilizada y los cálculos realizados se presentan en las Tablas A7.1 y A7.2 en este mismo Anexo.

Tabla A7.1 Caudales en los puntos de muestreo.

Efluente	Flujo $\text{m}^3/\text{mes}$	Flujo $\text{lt/mes}$
Fosa del MA-51	15,001	15,001,000
Fosa multiusos	1,651.94	1,651,940
Tratamiento biológico	755	755,000
Laguna de agua ácida	17,208.94	17,208,940
Tratamiento fisicoquímico	17,396.94	17,396,940
Fosa del Apron Feeder	366	366,000
Efluente de filtro prensa	14,635	14,635,000
Agua tratada de cisterna	14,177	14,177,900
Plásticos	312.54	312,540
Pozo	3,510.94	3,510,940
Agua purificada	106	106,000
Agua de pipa (potable)	1,879	1,879,000
Comedor	106	106,000
Lavado de móviles	60	60,000
Regaderas	1,055	1,055,000
Efluente de lavandería	225	225,000
Influyente al tratamiento biológico	1,036	1,036,000
Electrolito en las baterías usadas	1,455	1,455,000



Tabla A7.2a Concentración por constituyente en mg/L en los puntos de muestreo.

Efluente	FMA	FMU	ETB	LAA	ETFQ	EAF	FPMA	ATC	LP
Cl	538	525	468	526	510	359	535	581	429
SST	2,007	1,324	29	892	712	1,359	1,019	864	518
SDT	168,203	41,479	3,739	165,860	184,734	227,680	182,338	189,130	7,903
DQO	355	196	128	399	344	1,101	435	341	450
Pb	38.8	28.3	0.18	6.29	0.77	32.99	12.21	0.42	9.88
As	0.17	0.10	0.10	0.21	0.10	0.20	0.21	0.11	0.10
Cd	0.43	0.10	0.10	0.45	0.10	0.10	0.71	0.10	0.10
Cr	0.15	0.10	0.10	0.18	0.10	3.52	0.12	0.10	0.10
Cu	0.32	0.10	0.10	0.36	0.10	3.60	0.34	0.10	0.10
Fe	11.63	1.73	0.18	15.09	0.61	73.40	33.36	0.53	0.52
Ni	0.73	0.14	0.10	0.65	0.51	2.03	0.82	0.42	0.10
Zn	1.98	0.36	0.15	1.89	0.29	3.38	2.40	1.07	0.30
Ca	33.68	60.91	56.69	38.15	44.32	49.96	30.06	40.82	55.70
Mg	2,168	499	15.24	2,196	2,837	658	2,185	2,296	73
Na	517	202	55.97	557	548	239	675	503	125
CN	0.07	0.02	0.01	0.02	0.20	0.06	0.07	0.30	6.68
Stotal	6059	1254	89.17	6,435	5,556	8,528	6,627	6,046	167
Ptotal	1.83	0.33	1.00	0.92	0.17	2.58	1.71	0.17	0.22
NO <sub>3</sub>	19.26	28.50	45.75	17.13	0.71	6.87	31.60	6.55	12.20
Nitrógeno Kjeldhal	22.87	27.30	37.78	31.48	12.00	58.00	29.92	32.61	2.47
GyA	4.73	49.77	1.43	2.23	2.67	6.60	2.10	1.62	12.63

FMA: efluente fosa MA-51, FMU: efluente fosa multiusos, ETB: efluente tratamiento biológico, LAA: efluente laguna de agua ácida, ETFQ: efluente tratamiento fisicoquímico, FAF: efluente fosa Apron Feeder, FPMA: efluente filtro prensa MA-51, ATC: agua tratada de cisterna, LP: efluente lavado de plásticos.

Tabla A7.2b Concentración por constituyente en mg/L en los puntos de muestreo (continuación).

Efluente	APO	APU	PIPA	COM	LM	REG	LAV	ITB	EBU	LTFQ*
Cl	558	125	370	85.79	353	359	411	739	55	1,611
SST	44	26	0	79.25	30.75	52.75	207	645	2,072	6,622
SDT	3,924	197	1,780	1,454	2,478	2,000	2,405	3,468	405,111	48,138
DQO	144	12	100	1,520	152	272	710	1,740	228	-
Pb	0.13	0.10	0.10	0.11	0.42	0.19	4.62	1.13	2.62	26,515
As	0.10	0.10	0.10	0.12	0.16	0.17	0.17	0.10	0.10	1
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	1,850
Cr	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	750
Cu	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.38	1,950
Fe	2.20	0.10	0.10	0.10	0.49	0.11	0.31	0.35	23.36	82,200
Ni	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.23	1,150
Zn	0.12	0.15	0.41	0.12	0.15	0.12	0.14	0.15	4.02	6,200
Ca	67	1.39	37.10	1.48	45.45	38.05	43.25	58	28.72	1,350
Mg	26.80	0.12	7.50	0.23	8.13	7.05	11.49	20.20	12.48	149,150
Na	59.90	6.50	31.50	44.13	41.60	34.50	39.40	48.80	821	14,200
CN	NA	NA	NA	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.10	0.50
Stotal	155	50	93	56	82	60	75	32	NA	47,850
Ptotal	0.03	0.03	0.07	1.35	1.98	0.19	0.24	18.12	1.09	1,548
NO <sub>3</sub>	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.06	0.53	1.95
Nitrógeno Kjeldhal	0.60	0.50	0.50	19.50	6.00	11.30	17.25	86.20	48	818
GyA	0.50	11.70	0.50	168	10.85	6.30	5.65	167.60	5.10	830

APO: agua pozo, APU: agua purificada, PIPA: agua potable de pipa, COM: efluente de comedor, LM: efluente lavado de móviles, REG: efluente de regaderas, LAV: efluente lavandería, ITB: influente tratamiento biológico, EBU: electrolito contenido en baterías usadas, LTFQ: lodos tratamiento fisicoquímico. \* Unidades expresadas en mg/Kg en lugar de mg/Lt.

## Anexo 8 Balances volumétricos de agua.

Tabla A8.1a Balances de agua en m<sup>3</sup>/mes.

Operación/ Tratamiento/ Almacenamiento	Influente	Flujo m <sup>3</sup> /mes	Efluente/Descarga	Flujo m <sup>3</sup> /mes	Salidas del sistema m <sup>3</sup> /mes
Comedor <sup>1</sup>	Agua purificada	106	Agua residual del lavado de utensilios. A tratamiento	106	0
Sanitarios <sup>1</sup>	Agua de pozo	930	Agua residual de la descarga de sanitarios. A tratamiento	930	0
Tratamiento biológico <sup>2</sup>	Agua residual de comedor y sanitarios	1,036	Agua tratada biológicamente. A laguna de agua ácida	755	0
Tratamiento biológico <sup>2</sup>	Agua residual de comedor y sanitarios	1,036	Agua tratada biológicamente. A riego de escorias	281	0
Riego <sup>1</sup>	Agua de pozo	2,208	Agua de pozo. Infiltración a suelos	0	2,208
Lavado de plásticos <sup>1</sup>	Agua de pozo	312.54	Agua residual del lavado de plásticos. A fosa multiusos	312.54	0
Laboratorio <sup>1</sup>	Agua de pozo	0.4	Agua residual de la descarga del laboratorio. A fosa multiusos	0.4	0
Lavado de móviles <sup>1</sup>	Agua de pozo	60	Agua residual del lavado de móviles. A fosa multiusos	60	0
Regaderas <sup>1</sup>	Agua potable de pipa	1,055	Descarga de regaderas. A fosa multiusos	1,055	0
Lavandería <sup>1</sup>	Agua potable de pipa	225	Agua residual de la descarga de lavandería. A fosa multiusos	225	0
Fosa multiusos <sup>3</sup>	Agua residual de varias operaciones	1,652.94	Agua residual de varias operaciones. A laguna de agua ácida	1651.94	1
Alimentación de baterías a proceso <sup>1</sup>	Electrolito de baterías usadas	1,455	Electrolito de baterías usadas. A Apron Feeder	1,455	0
Apron Feeder <sup>1</sup>	Agua residual conteniendo electrolito	1,455	Agua residual conteniendo electrolito. A molino de baterías	1,089	0
Apron Feeder <sup>1</sup>	Agua residual conteniendo electrolito	1,455	Agua residual conteniendo electrolito. A fosa del MA-51	366	0
Molino de baterías <sup>1</sup>	Agua tratada fisicoquímicamente /Efluente del Apron Feeder	15,266	Efluente de molino de baterías. A filtro prensa en MA-51	15,266	0
Filtro prensa en MA-51 <sup>1</sup>	Efluente del molino de baterías	15,266	Efluente de filtro prensa. A fosa del MA-51	14,635	631
Fosa MA-51 <sup>3</sup>	Agua residual de varias operaciones en el proceso MA-51	15,001	Agua residual de varias operaciones en MA-51	15,001	0

1 Operación, 2 Tratamiento, 3 Almacenamiento.

\* El lavado de móviles anteriormente incluía el lavado de vehículos. Por cambios en la planta ya no se va a realizar el lavado de vehículos en las instalaciones. Este flujo sólo considera el lavado de móviles (montacargas, barredoras, etc).

Tabla A8.1b Balances de agua en m<sup>3</sup>/mes (continuación).

Operación	Influente	Flujo m <sup>3</sup> /mes	Efluente/Descarga	Flujo m <sup>3</sup> /mes	Salidas del sistema m <sup>3</sup> /mes
Laguna de agua ácida <sup>3</sup>	Descarga de fosa multiusos y de la fosa del MA-51	17,407.94	Descarga de laguna de agua ácida a Planta de tratamiento fisicoquímico.	17,208.94	199
	Descarga de la laguna de agua ácida a tratamiento fisicoquímico	17,208.94	Agua tratada. A laguna de agua tratada	2,520	
TFQ <sup>2</sup>	Entrada de agua por la adición de químicos (coagulante, floculante, hidróxido)	349	Agua tratada. A cisterna de agua tratada	14,876.94	161
Cisterna de agua tratada <sup>3</sup>	Descarga de agua tratada de la planta de tratamiento fisicoquímico	14,876.94	Agua tratada para reuso en proceso MA-51.	14,177	7
	Descarga de la laguna de agua tratada	2,451	Agua tratada a laguna de infiltración.	3,144	
Laguna de agua tratada <sup>3</sup>	Descarga de agua tratada de la planta de tratamiento fisicoquímico	2,520	Descarga de agua de la laguna de agua tratada a la cisterna	2,451	69
Laguna de infiltración <sup>3</sup>	Descarga de cisterna de agua tratada a laguna de infiltración	3,151	Pérdida por evaporación en la laguna de infiltración	0	1,505
Enfriamiento de plásticos y hornos <sup>1</sup>	Agua potable de pipa	580	Pérdida por evaporación del agua en la operación	0	580
Ajuste de refinos y aleaciones <sup>1</sup>	Agua potable de pipa	19	Pérdida por evaporación del agua en la operación	0	19

1 Operación, 2 Tratamiento, 3 Almacenamiento.

## Anexo 9 Información relevante del balance volumétrico de agua.

### 1. Consumo de agua fresca dentro de la planta:

Es la suma de los consumos mensuales de agua purificada, agua de pozo y del agua potable de pipa.

$$FW = 106 \text{ m}^3/\text{mes} + 3,510.94 \text{ m}^3/\text{mes} + 1,280 \text{ m}^3/\text{mes} + 599 \text{ m}^3/\text{mes} = 5,495.94 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

### 2. Entradas de agua fresca al proceso (FWI):

A la suma de los consumos de agua purificada, agua de pozo y agua potable de pipa se le resta el consumo de agua de pozo utilizado para riego de áreas verdes.

$$FWI = 106 \text{ m}^3/\text{mes} + 3,510.94 \text{ m}^3/\text{mes} + 1,280 \text{ m}^3/\text{mes} + 599 \text{ m}^3/\text{mes} - 2,208 \text{ m}^3/\text{mes} = 3,287.94 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

### 3. Entradas de agua por el electrolito (EI):

Es el flujo de agua promedio que ingresa al proceso, mensualmente, contenida en el electrolito de las baterías usadas que se procesan.

$$EI = (803,145 \text{ baterías procesadas/mes})(0.0018112 \text{ m}^3 \text{ de electrolito/batería}) = 1,455 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

### 4. Entradas de agua por químicos (TCD):

Este dato fue calculado a partir de información proporcionada por el personal de la planta con respecto a la dosis de químicos, la densidad y la relación hidróxido de magnesio/volumen de agua tratada. En promedio ingresan 349 m<sup>3</sup>/mes de agua.

Tabla A9.1 Dosis de químicos para tratamiento. Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

Químico	Dosis ml/min
Antiespumante SWT-110	30
Coagulante MR-3000	150
Polímero SWT-1924	1,600

Tiempo de dosificación = 15 horas en promedio.

$$\text{Dosis de químicos (antiespumante, coagulante y polímero)} = 30 \text{ ml/min} + 150 \text{ ml/min} + 1600 \text{ ml/min} = 1780 \text{ ml/min}.$$

$$\text{Ingreso de agua por químicos (antiespumante, coagulante y polímero)} = (1,780 \text{ ml/min})(60 \text{ min/h})(15 \text{ h/d})(30 \text{ d/mes})(1 \text{ lt}/1,000 \text{ ml})(1 \text{ m}^3/1,000 \text{ lt}) = 48.06 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

Densidad del hidróxido de magnesio = 1,420 Kg/m<sup>3</sup>.

$$\text{Fracción de agua} = 1 - (1.42 - 1) / 1.42 = 0.7042$$

$$\text{Consumo de hidróxido de magnesio} = 0.02484 \text{ m}^3 \text{ de hidróxido}/\text{m}^3 \text{ de agua tratada}.$$

Volumen promedio de agua a tratar = 17,208.94 m<sup>3</sup>/mes. Este dato fue tomado del balance volumétrico de agua.

Ingreso de agua en el hidróxido de magnesio =  $(0.7042)(0.02484)(17,208.94 \text{ m}^3/\text{mes})$   
=  $301.04 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

Total de entradas de agua por químicos (TCI)=  $48.06 \text{ m}^3/\text{mes} + 301.04 \text{ m}^3/\text{mes} = 349.10 \text{ m}^3/\text{mes}$ , aproximadamente  $349 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **5. Entradas totales de agua al proceso (TI):**

Es la suma de las entradas de agua fresca al proceso, además de los ingresos de agua en el contenido en el electrolito y en los químicos para tratamiento (neutralizador, coagulante y polímero).

$TI = 3,287.94 \text{ m}^3/\text{mes} + 1,455 \text{ m}^3/\text{mes} + 349 \text{ m}^3/\text{mes} = 5,091.94 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **6. Salidas totales de agua del proceso (WO):**

Este dato se calculó sumando las salidas del sistema por evaporación, infiltración, pérdida de humedad (en pasta y lodos) además de la salida por el consumo de agua para riego de escorias:  
 $WO = 580 \text{ m}^3/\text{mes} + 19 \text{ m}^3/\text{mes} + 200 \text{ m}^3/\text{mes} + 69 \text{ m}^3/\text{mes} + 7 \text{ m}^3/\text{mes} + 3,151 \text{ m}^3/\text{mes} + 161 \text{ m}^3/\text{mes} + 631 \text{ m}^3/\text{mes} + 281 \text{ m}^3/\text{mes} = 5,099 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **7. Generación de agua residual (WWG):**

Consta de la suma de las descargas de agua a la planta de tratamiento biológico y fosa multiusos además de la descarga de agua a la laguna de agua ácida, proveniente del proceso MA-51.

$WWG = 1,036 \text{ m}^3/\text{mes} + 1,652.94 \text{ m}^3/\text{mes} + 15,001 \text{ m}^3/\text{mes} = 17,689.94 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **8. Caudal de agua tratada (WWT):**

Se obtuvo a partir de la suma de los flujos de agua tratada biológicamente y de agua tratada fisicoquímicamente.

$WWT = 1,036 \text{ m}^3/\text{mes} + 17,208.94 \text{ m}^3/\text{mes} = 18,244.94 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **9. Reuso directo de agua residual (WWDR):**

Este valor es 0 porque con la configuración actual, no reuso directo de agua residual.

$WWDR = 0 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **10. Regeneración de agua residual y reuso (WWRR):**

Es la suma del efluente tratado biológicamente y de efluente de la fosa multiusos que se envían a tratamiento fisicoquímico.

$WWRR = 755 \text{ m}^3/\text{mes} + 1,652.94 \text{ m}^3/\text{mes} = 2,407.94 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

#### **11. Tratamiento de agua residual y reciclaje (WWRC)**

Este es el flujo de agua que se trata fisicoquímicamente y que actualmente se recicla en el proceso MA-51.

$WWRC = 14,177 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

## Anexo 10 Carga másica por contaminante.

Tabla A10.1 Carga másica de sólidos suspendidos totales.

Operación/Origen	Influente (ton/mes)	Efluente (ton/mes)
Comedor	0.0028	0.0084
Baños	0.0409	0.6598
Tratamiento biológico	0.6682	0.0297
Riego de áreas verdes	0.0972	-
Lavado de plásticos	0.0138	0.1617
Laboratorio	0.0	-
Lavado de móviles	0.0026	0.0018
Lavandería	0.0	0.0466
Regaderas	0.0	0.0557
Fosa multiusos	0.2658	2.19
Alimentación de baterías a proceso	3.01	3.01
Fosa del Apron Feeder	0.4975	0.4975
Molino de baterías	14.77	14.77
Filtro prensa en MA-51	14.77	14.91
Fosa del MA-51	15.41	15.41
Laguna de agua ácida	17.61	15.35
Tratamiento fisicoquímico	15.35	12.39
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	0.7549
Cisterna de agua tratada	12.34	12.34
Laguna de agua tratada	1.79	1.75
Laguna de infiltración	0.0897	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0	-

Tabla A10.2 Carga másica de sólidos disueltos totales.

Operación/Origen	Influente (ton/mes)	Efluente (ton/mes)
Comedor	0.0208	0.1541
Baños	3.65	3.44
Tratamiento biológico	3.59	3.87
Riego de áreas verdes	8.66	-
Lavado de plásticos	1.23	2.47
Laboratorio	0.0016	-
Lavado de móviles	0.2355	0.1487
Lavandería	0.4005	0.5411
Regaderas	1.88	2.11
Fosa multiusos	5.27	68.52
Alimentación de baterías a proceso	589.44	589.44
Fosa del Apron Feeder	83.33	83.33
Molino de baterías	3,187.40	3,187.40
Filtro prensa en MA-51	3,187.40	2,668.52
Fosa del MA-51	2,751.85	2,751.85
Laguna de agua ácida	2,823.19	2,854.28
Tratamiento fisicoquímico	2,854.28	3,213.80
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	5.49
Cisterna de agua tratada	3,277.24	3,277.24
Laguna de agua tratada	465.53	528.97
Laguna de infiltración	595.95	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	1.03	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0338	-

Tabla A10.3 Carga másica de DQO.

Operación/Origen	Influyente (ton/mes)	Efluente (ton/mes)
Comedor	0.0013	0.1611
Baños	0.13	1.64
Tratamiento biológico	1.80	0.1328
Riego de áreas verdes	0.3180	-
Lavado de plásticos	0.0450	0.1406
Laboratorio	0.0001	-
Lavado de móviles	0.0086	0.0091
Lavandería	0.0225	0.1598
Regaderas	0.1055	0.2870
Fosa multiusos	0.5965	0.3231
Alimentación de baterías a proceso	1.60	1.60
Fosa del Apron Feeder	0.4028	0.4028
Molino de baterías	6.03	6.03
Filtro prensa en MA-51	6.03	6.37
Fosa del MA-51	6.77	6.77
Laguna de agua ácida	7.19	6.87
Tratamiento fisicoquímico	6.87	5.99
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	0.8837
Cisterna de agua tratada	5.90	5.90
Laguna de agua tratada	0.8675	0.7788
Laguna de infiltración	1.07	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0019	-

Tabla A10.4 Carga másica de nitrógeno Kjeldhal.

Operación/Origen	Influyente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0530	2.07
Baños	0.5580	87.24
Tratamiento biológico	89.30	39.13
Riego de áreas verdes	1.32	-
Lavado de plásticos	0.1875	0.7709
Laboratorio	0.0002	-
Lavado de móviles	0.0360	0.3600
Lavandería	0.1125	3.88
Regaderas	0.5275	11.92
Fosa multiusos	16.93	45.10
Alimentación de baterías a proceso	69.69	69.69
Fosa del Apron Feeder	21.23	21.23
Molino de baterías	510.75	510.75
Filtro prensa en MA-51	510.75	437.81
Fosa del MA-51	459.04	459.04
Laguna de agua ácida	532.66	541.82
Tratamiento fisicoquímico	541.82	208.76
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	93.25
Cisterna de agua tratada	565.04	565.04
Laguna de agua tratada	30.24	386.51
Laguna de infiltración	102.75	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.2900	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0095	-

Tabla A10.5 Carga másica de grasas y aceites.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	1.24	17.86
Baños	0.47	155.78
Tratamiento biológico	173.63	1.48
Riego de áreas verdes	1.10	-
Lavado de plásticos	0.1563	3.95
Laboratorio	0.0002	-
Lavado de móviles	0.0300	0.6510
Lavandería	0.1125	1.27
Regaderas	0.5275	6.65
Fosa multiusos	12.52	82.21
Alimentación de baterías a proceso	7.42	7.42
Fosa del Apron Feeder	2.42	2.42
Molino de baterías	27.97	27.97
Filtro prensa en MA-51	27.97	30.73
Fosa del MA-51	33.15	33.15
Laguna de agua ácida	116.44	38.35
Tratamiento fisicoquímico	38.35	46.39
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	94.62
Cisterna de agua tratada	46.21	46.21
Laguna de agua tratada	6.72	6.54
Laguna de infiltración	23.24	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.2900	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0095	-

Tabla A10.6 Carga másica de fósforo.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0032	0.1427
Baños	0.0279	18.63
Tratamiento biológico	18.77	1.04
Riego de áreas verdes	0.0662	-
Lavado de plásticos	0.0094	0.0688
Laboratorio	0.00001	-
Lavado de móviles	0.0018	0.1188
Lavandería	0.0158	0.0540
Regaderas	0.0739	0.1952
Fosa multiusos	0.4367	0.5385
Alimentación de baterías a proceso	1.59	1.59
Fosa del Apron Feeder	0.9450	0.9450
Molino de baterías	3.09	3.09
Filtro prensa en MA-51	3.09	25.03
Fosa del MA-51	25.97	25.97
Laguna de agua ácida	27.27	15.75
Tratamiento fisicoquímico	15.75	2.91
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	176.47
Cisterna de agua tratada	2.99	2.99
Laguna de agua tratada	0.4221	0.4972
Laguna de infiltración	0.5435	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0406	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0013	-



Tabla A10.7 Carga másica de cloruros.

Operación/Origen	Influyente (ton/mes)	Efluyente (ton/mes)
Comedor	0.0132	0.0091
Baños	0.5186	0.7570
Tratamiento biológico	0.7661	0.4848
Riego de áreas verdes	1.23	-
Lavado de plásticos	0.1743	0.1341
Laboratorio	0.0003	-
Lavado de móviles	0.0493	0.0212
Lavandería	0.0834	0.0926
Regaderas	0.3908	0.3785
Fosa multiusos	0.6263	0.8668
Alimentación de baterías a proceso	0.5219	0.5219
Fosa del Apron Feeder	0.1313	0.1313
Molino de baterías	8.63	8.63
Filtro prensa en MA-51	8.63	7.83
Fosa del MA-51	7.97	7.97
Laguna de agua ácida	9.19	9.06
Tratamiento fisicoquímico	9.06	8.87
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	0.18
Cisterna de agua tratada	10.07	10.07
Laguna de agua tratada	1.29	2.48
Laguna de infiltración	1.83	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.2149	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0070	-

Tabla A10.8 Carga másica de sulfatos.

Operación/Origen	Influyente (ton/mes)	Efluyente (ton/mes)
Comedor	0.0099	0.0403
Baños	1.25	0.9274
Tratamiento biológico	0.9677	1.23
Riego de áreas verdes	2.96	-
Lavado de plásticos	0.4188	1.13
Laboratorio	0.0005	-
Lavado de móviles	0.0804	0.0541
Lavandería	0.1222	0.1705
Regaderas	0.5731	0.6039
Fosa multiusos	1.96	6.85
Alimentación de baterías a proceso	541.79	541.79
Fosa del Apron Feeder	10.62	10.62
Molino de baterías	939.07	939.07
Filtro prensa en MA-51	939.07	500.58
Fosa del MA-51	511.20	511.20
Laguna de agua ácida	518.95	501.16
Tratamiento fisicoquímico	501.16	495.14
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	6.02
Cisterna de agua tratada	498.57	498.57
Laguna de agua tratada	72.51	75.93
Laguna de infiltración	90.66	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.3150	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0103	-

Tabla A10.9 Carga másica de calcio.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.1473	0.1569
Baños	62.31	59.93
Tratamiento biológico	60.09	58.73
Riego de áreas verdes	147.94	-
Lavado de plásticos	20.94	17.41
Laboratorio	0.0268	-
Lavado de móviles	4.02	2.73
Lavandería	8.35	9.73
Regaderas	39.14	40.14
Fosa multiusos	70.01	100.62
Alimentación de baterías a proceso	41.79	41.79
Fosa del Apron Feeder	18.29	18.29
Molino de baterías	602.19	602.19
Filtro prensa en MA-51	602.19	439.98
Fosa del MA-51	458.27	458.27
Laguna de agua ácida	601.69	656.48
Tratamiento fisicoquímico	656.48	770.97
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	153.90
Cisterna de agua tratada	707.30	707.30
Laguna de agua tratada	111.68	48.01
Laguna de infiltración	128.62	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	21.52	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.7049	-

Tabla A10.10 Carga másica de magnesio.

Operación/Origen	Influente (ton/mes)	Efluente (ton/mes)
Comedor	0.000013	0.000024
Baños	0.0249	0.0209
Tratamiento biológico	0.0209	0.0158
Riego de áreas verdes	0.0592	-
Lavado de plásticos	0.0084	0.0227
Laboratorio	0.000011	-
Lavado de móviles	0.0016	0.0005
Lavandería	0.0017	0.0026
Regaderas	0.0079	0.0074
Fosa multiusos	0.0332	0.8245
Alimentación de baterías a proceso	0.9576	0.9576
Fosa del Apron Feeder	0.2409	0.2409
Molino de baterías	33.27	33.27
Filtro prensa en MA-51	33.27	31.98
Fosa del MA-51	32.22	32.22
Laguna de agua ácida	33.05	37.79
Tratamiento fisicoquímico	37.79	49.36
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	17.00
Cisterna de agua tratada	44.63	39.79
Laguna de agua tratada	7.15	2.42
Laguna de infiltración	7.24	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0044	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.00014	-

Tabla A10.11 Carga másica de sodio.

Operación/Origen	Influente (ton/mes)	Efluente (ton/mes)
Comedor	0.0007	0.0047
Baños	0.0557	0.0459
Tratamiento biológico	0.0506	0.0580
Riego de áreas verdes	0.1323	-
Lavado de plásticos	0.0187	0.0389
Laboratorio	0.000024	-
Lavado de móviles	0.0036	0.0025
Lavandería	0.0071	0.0089
Regaderas	0.0332	0.0364
Fosa multiusos	0.0867	0.3342
Alimentación de baterías a proceso	1.19	1.19
Fosa del Apron Feeder	0.0875	0.0875
Molino de baterías	8.24	8.24
Filtro prensa en MA-51	8.24	9.88
Fosa del MA-51	9.97	9.97
Laguna de agua ácida	10.34	9.59
Tratamiento fisicoquímico	9.59	9.53
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	1.62
Cisterna de agua tratada	8.71	8.71
Laguna de agua tratada	1.38	0.56
Laguna de infiltración	1.58	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0183	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0006	-

Tabla A10.12 Carga másica de plomo.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0106	0.01113
Baños	0.1209	1.16
Tratamiento biológico	1.17	0.1886
Riego de áreas verdes	0.2870	-
Lavado de plásticos	0.0406	3.09
Laboratorio	0.0001	-
Lavado de móviles	0.0078	0.0249
Lavandería	0.0225	1.04
Regaderas	0.1055	0.2005
Fosa multiusos	4.35	46.70
Alimentación de baterías a proceso	48	48
Fosa del Apron Feeder	12.07	12.07
Molino de baterías	41.86	41.86
Filtro prensa en MA-51	41.86	178.70
Fosa del MA-51	190.78	190.78
Laguna de agua ácida	237.61	108.23
Tratamiento fisicoquímico	108.23	13.34
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	3022.71
Cisterna de agua tratada	13.28	13.28
Laguna de agua tratada	1.93	1.88
Laguna de infiltración	7.35	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0019	-

Tabla A10.13 Carga másica de arsénico.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0106	0.0127
Baños	0.0930	0.0909
Tratamiento biológico	0.1036	0.1036
Riego de áreas verdes	0.2208	-
Lavado de plásticos	0.0313	0.0313
Laboratorio	0.000040	-
Lavado de móviles	0.0060	0.0096
Lavandería	0.0225	0.0371
Regaderas	0.1055	0.1741
Fosa multiusos	0.2521	0.1652
Alimentación de baterías a proceso	0.1455	0.1455
Fosa del Apron Feeder	0.0747	0.0747
Molino de baterías	1.63	1.63
Filtro prensa en MA-51	1.63	3.11
Fosa del MA-51	3.19	3.19
Laguna de agua ácida	3.43	3.59
Tratamiento fisicoquímico	3.59	1.74
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	0.1140
Cisterna de agua tratada	1.91	1.91
Laguna de agua tratada	0.2520	0.4184
Laguna de infiltración	0.3466	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0019	-

Tabla A10.14 Carga másica de cadmio.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0106	0.0106
Baños	0.0930	0.0930
Tratamiento biológico	0.1036	0.1036
Riego de áreas verdes	0.2208	-
Lavado de plásticos	0.0313	0.0313
Laboratorio	0.00004	-
Lavado de móviles	0.0060	0.0060
Lavandería	0.0225	0.0225
Regaderas	0.1055	0.1055
Fosa multiusos	0.1653	0.1652
Alimentación de baterías a proceso	0.1455	0.1455
Fosa del Apron Feeder	0.0366	0.0366
Molino de baterías	1.53	1.53
Filtro prensa en MA-51	1.53	10.38
Fosa del MA-51	10.42	10.42
Laguna de agua ácida	10.66	7.78
Tratamiento fisicoquímico	7.78	1.74
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	210.90
Cisterna de agua tratada	1.73	1.73
Laguna de agua tratada	0.2520	0.2451
Laguna de infiltración	0.3151	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.00190	-

Tabla A10.15 Carga másica de cromo.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0106	0.0106
Baños	0.0930	0.0930
Tratamiento biológico	0.1036	0.1036
Riego de áreas verdes	0.2208	-
Lavado de plásticos	0.0313	0.0313
Laboratorio	0.00004	-
Lavado de móviles	0.0060	0.0060
Lavandería	0.0225	0.0225
Regaderas	0.1055	0.1055
Fosa multiusos	0.1653	0.1652
Alimentación de baterías a proceso	5.12	5.12
Fosa del Apron Feeder	1.29	1.29
Molino de baterías	5.25	5.25
Filtro prensa en MA-51	5.25	1.80
Fosa del MA-51	3.09	3.09
Laguna de agua ácida	3.33	3.06
Tratamiento fisicoquímico	3.06	1.74
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	85.50
Cisterna de agua tratada	1.73	1.73
Laguna de agua tratada	0.2520	0.2451
Laguna de infiltración	0.3151	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0019	-

Tabla A10.16 Carga másica de cobre.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0106	0.0106
Baños	0.0930	0.0930
Tratamiento biológico	0.1036	0.1036
Riego de áreas verdes	0.2208	-
Lavado de plásticos	0.0313	0.0313
Laboratorio	0.00004	-
Lavado de móviles	0.0060	0.0060
Lavandería	0.0225	0.0225
Regaderas	0.1055	0.1055
Fosa multiusos	0.1653	0.1652
Alimentación de baterías a proceso	5.23	5.23
Fosa del Apron Feeder	1.32	1.32
Molino de baterías	5.33	5.33
Filtro prensa en MA-51	5.33	5.00
Fosa del MA-51	6.31	6.31
Laguna de agua ácida	6.55	6.18
Tratamiento fisicoquímico	6.18	1.74
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	222.30
Cisterna de agua tratada	1.73	1.73
Laguna de agua tratada	0.2520	0.2451
Laguna de infiltración	0.3151	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0019	-

Tabla A10.17 Carga másica de hierro.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0106	0.0106
Baños	2.05	0.3520
Tratamiento biológico	0.3626	0.1899
Riego de áreas verdes	4.86	-
Lavado de plásticos	0.6876	0.1625
Laboratorio	0.00088	-
Lavado de móviles	0.1320	0.0294
Lavandería	0.0225	0.0686
Regaderas	0.1055	0.1108
Fosa multiusos	0.3713	2.86
Alimentación de baterías a proceso	34	34
Fosa del Apron Feeder	26.86	26.86
Molino de baterías	14.60	14.60
Filtro prensa en MA-51	14.60	488.26
Fosa del MA-51	515.12	515.12
Laguna de agua ácida	518.12	259.61
Tratamiento fisicoquímico	259.61	10.66
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	9370.80
Cisterna de agua tratada	9.12	9.12
Laguna de agua tratada	1.54	0.01
Laguna de infiltración	1.66	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0019	-

Tabla A10.18 Carga másica de níquel.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0106	0.0106
Baños	0.0930	0.0930
Tratamiento biológico	0.1036	0.1036
Riego de áreas verdes	0.2208	-
Lavado de plásticos	0.0313	0.0313
Laboratorio	0.00004	-
Lavado de móviles	0.0060	0.0060
Lavandería	0.0225	0.0225
Regaderas	0.1055	0.1055
Fosa multiusos	0.1653	0.2247
Alimentación de baterías a proceso	2.96	2.96
Fosa del Apron Feeder	0.7437	0.7437
Molino de baterías	8.13	8.13
Filtro prensa en MA-51	8.13	11.94
Fosa del MA-51	12.68	12.68
Laguna de agua ácida	12.98	11.15
Tratamiento fisicoquímico	11.15	8.81
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	131.10
Cisterna de agua tratada	8.78	8.78
Laguna de agua tratada	1.28	1.24
Laguna de infiltración	2.86	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.0580	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0019	-

Tabla A10.19 Carga másica de zinc.

Operación/Origen	Influente (kg/mes)	Efluente (kg/mes)
Comedor	0.0159	0.0131
Baños	0.1116	0.1423
Tratamiento biológico	0.1554	0.1595
Riego de áreas verdes	0.2650	-
Lavado de plásticos	0.0375	0.0922
Laboratorio	0.000048	-
Lavado de móviles	0.0072	0.0087
Lavandería	0.0923	0.0315
Regaderas	0.4326	0.1266
Fosa multiusos	0.2590	0.5980
Alimentación de baterías a proceso	5.85	5.85
Fosa del Apron Feeder	1.24	1.24
Molino de baterías	19.78	19.78
Filtro prensa en MA-51	19.78	35.05
Fosa del MA-51	36.29	36.29
Laguna de agua ácida	37.00	32.49
Tratamiento fisicoquímico	32.49	5.07
Lodos tratamiento fisicoquímico	-	706.80
Cisterna de agua tratada	18.54	18.54
Laguna de agua tratada	0.7350	14.20
Laguna de infiltración	3.37	-
Enfriamiento de plásticos y hornos	0.2378	-
Ajuste de refinados y aleaciones	0.0078	-

## Anexo 11 Tablas comparativas para propuestas de reuso.

Tabla A11.1 Comparación efluente tratamiento biológico y agua de pozo.

Parámetro	Efluente de tratamiento biológico	Normatividad aplicable (uso descargas sanitarios) <sup>(1)</sup>	Agua de pozo
Temperatura °C	22.40	40 <sup>(2)</sup>	-
pH	7.70	5-10 <sup>(2)</sup>	6.89
Densidad (g/ml)	1.00	NR	1.002
CE (mS/cm)	4.79	NR	4.60
SO <sub>4</sub>	1,185.01	NR	1,339.84
Cl	467.94	NR	557.63
SST	28.70	30	44
SDT	3,739.46	NR	3,924
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	3-150	1,000	ND
Huevos de helminto (h/L)	ND	<5	ND
DQO(mg/L)	128.20	30 <sup>(4)</sup>	144
Pb (mg/L)	<0.182	0.50	0.13
As (mg/L)	<0.1	0.20	< 0.1
Cd (mg/L)	<0.1	0.20	<0.1
Cr (mg/L)	<0.1	1	<0.1
Cu (mg/L)	<0.1	4	<0.1
Fe (mg/L)	<0.183	NR	2.20
Hg (mg/L)	<0.1*	0.010	ND
Ni (mg/L)	<0.1	2	<0.1
Zn (mg/L)	<0.154	10	0.12
Ca (mg/L)	56.69	NR	67
Mg (mg/L)	15.24	NR	26.80
Na (mg/L)	55.97	NR	59.90
Cianuros (mg/L)	<0.01	2	ND
S total (mg/L)	89.17	NR	155.20
P total (mg/L) (mg/L)	<1.004	20 <sup>(2)</sup>	<0.03
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	45.75	NR	ND
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	37.78	40 <sup>(2),(3)</sup>	0.60
Grasas y aceites (mg/L)	<1.43	15	< 0.5

ND: no disponible; NR: no regulado.

(1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1996 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto indirecto, promedio mensual).

(2) Valores tomados de la norma NOM-001-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola, promedio mensual).

(3) Valor límite para el promedio mensual de descarga del Nitrógeno total, en mg/L.

(4) Valor límite para el promedio mensual de descarga del DBO<sub>5</sub>, en mg/L.

\* Valor corresponde al límite de detección del equipo.

\*\* Para los metales pesados y cianuros también se tomaron los límites de la norma NOM-001-ECOL-1997.



Como puede observarse en la Tabla A11.1, el efluente del tratamiento biológico es apto para reusarse en sanitarios si garantiza que microbiológicamente cumple con la normatividad. Las concentraciones de las grasas y aceites, SST, cianuros y metales pesados en el efluente del tratamiento biológico están por debajo de los valores límites que marca la normatividad para el promedio mensual.

Tabla A11.2 Comparación efluente tratamiento biológico y agua de pozo.

Parámetro	Efluente de tratamiento biológico	Normatividad (para riego de áreas verdes) (1)	Agua de pozo
Temperatura °C	22.40	NR	-
pH	7.70	NR	6.89
Densidad (g/ml)	1.00	NR	1.002
CE (mS/cm)	4.79	NR	4.60
SO <sub>4</sub>	1,185.01	NR	1,339.84
Cl	467.94	NR	557.63
SST	28.70	20	44
SDT	3,739.46	NR	3,924
DQO(mg/L)	3-150	20 <sup>(2)</sup>	144
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	ND	240	ND
Huevos de helminto (h/l)	128.20	<1	ND
Pb (mg/L)	<0.182	5	0.13
As (mg/L)	<0.1	0.20	< 0.1
Cd (mg/L)	<0.1	0.05	<0.1
Cr (mg/L)	<0.1	0.5	<0.1
Cu (mg/L)	<0.1	4	<0.1
Fe (mg/L)	<0.183	NR	2.20
Hg (mg/L)	<0.1*	0.05	ND
Ni (mg/L)	<0.1	2	<0.1
Zn (mg/L)	<0.154	10	0.12
Ca (mg/L)	56.69	NR	67
Mg (mg/L)	15.24	NR	26.80
Na (mg/L)	55.97	NR	59.90
Cianuros (mg/L)	<0.01	2	ND
S total (mg/L)	89.17	NR	155.20
P total (mg/L) (mg/L)	<1.004	NR	<0.03
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	45.75	NR	ND
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	37.78	NR	0.60
Grasas y aceites (mg/L)	<1.43	15	< 0.5

ND: no disponible; NR: No regulado.

(1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual).

(2) Valor límite para el promedio mensual de descarga del DBO<sub>5</sub>, en mg/L.

\*\* Para los metales pesados y cianuros también se tomaron los límites de la norma NOM-001-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en suelo con uso en riego agrícola, promedio mensual).

El efluente del tratamiento biológico también es apto para reuso en el riego de áreas verdes si garantiza que microbiológicamente cumple con la normatividad. Las concentraciones de SDT,

SO<sub>4</sub>, Cl, SST y Pb presentes en este efluente son menores que las del agua de pozo. Los valores de las concentraciones de grasas y aceites, cianuros y metales pesados (con excepción del cadmio), son menores que el límite establecido en la norma para el promedio mensual de descarga. En el caso del cadmio éste valor no es significativo porque el valor reportado en los análisis corresponde al límite de detección del equipo. El límite que marca la norma para la concentración de cadmio en el promedio diario es 0.1 ppm y el valor reportado como resultado del análisis es < 0.1 ppm.

Tabla A11.3 Comparación agua de pozo y norma NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Normatividad aplicable	
	(agua potable uso y consumo humano)	Agua de pozo
Temperatura °C	NR	-
pH	6.5-8.5	6.89
Densidad (g/ml)	NR	1.002
CE (mS/cm)	NR	4.60
SO <sub>4</sub>	400	1,339.84
Cl	250	557.63
SST	NR	44
SDT	1,000	3,924
DQO(mg/L)	NR	144
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Ausencia o no detectables	2.67
Pb (mg/L)	0.01	0.13
As (mg/L)	0.05	< 0.1
Cd (mg/L)	0.005	<0.1
Cr (mg/L)	0.05	<0.1
Cu (mg/L)	2.00	<0.1
Fe (mg/L)	0.30	2.20
Hg (mg/L)	0.001	ND
Ni (mg/L)	NR	<0.1
Zn (mg/L)	5.00	0.12
Ca (mg/L)	NR	67
Mg (mg/L)	NR	26.80
Na (mg/L)	200	59.90
Cianuros (mg/L)	0.07	ND
S total (mg/L)	NR	155.20
P total (mg/L) (mg/L)	NR	<0.03
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	10	ND
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	0.50 <sup>(1)</sup>	0.60
Grasas y aceites (mg/L)	NR	< 0.5

ND: No disponible; NR: No regulado. (1) Valor límite para la concentración de Nitrógeno amoniacal.

El agua de pozo tiene concentraciones de SDT, SO<sub>4</sub>, Cl y Pb mayores a los límites establecidos por la norma, pero si se trata puede ser utilizada en lugar del agua de potable de pipa para su uso en las operaciones si garantiza que cumple con la norma NOM-127-SSA1-1994 y asegura la calidad biológica requerida para uso humano.

Tabla A11.4 Comparación efluente de regaderas y agua de pozo.

Parámetro	Efluente de regaderas	Normatividad (para riego de áreas verdes) <sup>(1)</sup>	Agua de pozo
Temperatura °C	-	NR	-
pH	7.41	NR	6.89
Densidad (g/ml)	1.0035	NR	1.002
CE (mS/cm)	2.2	NR	4.60
SO <sub>4</sub>	572.40	NR	1,339.84
Cl	358.76	NR	557.63
SST	52.75	20	44
SDT	1,999.63	NR	3,924
DQO(mg/L)	272	20 <sup>(2)</sup>	144
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	ND	240	ND
Huevos de helminto (h/l)	ND	<1	ND
Pb (mg/L)	0.19	5	0.13
As (mg/L)	<0.165	0.20	< 0.1
Cd (mg/L)	<0.1	0.05	<0.1
Cr (mg/L)	<0.1	0.5	<0.1
Cu (mg/L)	<0.1	4	<0.1
Fe (mg/L)	<0.105	NR	2.20
Hg (mg/L)	ND	0.05	ND
Ni (mg/L)	<0.1	2	<0.1
Zn (mg/L)	0.12	10	0.12
Ca (mg/L)	38.05	NR	67
Mg (mg/L)	7.05	NR	26.80
Na (mg/L)	34.5	NR	59.90
Cianuros (mg/L)	<0.01	2	ND
S total (mg/L)	60.05	NR	155.20
P total (mg/L) (mg/L)	0.19	NR	<0.03
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	ND	NR	ND
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	11.3	NR	0.60
Grasas y aceites (mg/L)	6.3	15	< 0.5

ND: no disponible; NR: No regulado. (1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual).

(2) Valor límite para el promedio mensual de descarga del DBO<sub>5</sub>, en mg/L.

\*\* Para los metales pesados y cianuros también se tomaron los límites de la norma NOM-001-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en suelo con uso en riego agrícola, promedio mensual).

El efluente de regaderas es apto para el reuso en riego de áreas verdes. Los valores de las concentraciones de SDT, SO<sub>4</sub>, Cl y Pb son menores que los correspondientes en el agua de pozo. La concentración de SST en el efluente de regaderas es mayor que la del agua de pozo y que la establecida en la norma NOM-003-ECOL-1997 pero no limita el reuso de éste efluente en el riego de áreas verdes. Los SST no están regulados en la norma NOM-001-ECOL-1996 en lo referente a descargas de contaminantes en suelos con uso en riego agrícola. Los valores de las concentraciones de grasas y aceites, cianuros y metales pesados, en el efluente de regaderas, están por debajo de los límites de concentración que marca la norma para el promedio mensual, con

excepción del cadmio, pero éste valor no es significativo porque el valor reportado en los análisis corresponde al límite de detección del equipo.

Tabla A11.5 Comparación efluente de lavandería y agua de pozo.

Parámetro	Efluente de lavandería	Normatividad aplicable (reuso lavado de vehículos) (1)	Agua de pozo
Temperatura °C	-	40 <sup>(3)</sup>	-
pH	7.37	5-10 <sup>(3)</sup>	6.89
Densidad (g/ml)	1.004	NR	1.002
CE (mS/cm)	2.87	NR	4.60
SO <sub>4</sub>	757.57	NR	1,339.84
Cl	411.40	NR	557.63
SST	207	20	44
SDT	2,404.88	NR	3,924
DQO(mg/L)	710	20 <sup>(2)</sup>	144
Pb (mg/L)	4.62	0.5	0.13
As (mg/L)	<0.165	0.20	< 0.1
Cd (mg/L)	<0.1	0.2	<0.1
Cr (mg/L)	<0.1	1	<0.1
Cu (mg/L)	<0.1	4	<0.1
Fe (mg/L)	0.31	NR	2.20
Hg (mg/L)	ND	0.01	ND
Ni (mg/L)	<0.1	2	<0.1
Zn (mg/L)	<0.14	10	0.12
Ca (mg/L)	43.25	NR	67
Mg (mg/L)	11.49	NR	26.80
Na (mg/L)	39.40	NR	59.90
Cianuros (mg/L)	<0.01	2 <sup>(3)</sup>	ND
S total (mg/L)	74.50	NR	155.20
P total (mg/L) (mg/L)	0.24	20 <sup>(3)</sup>	<0.03
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	ND	NR	ND
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	17.25	40 <sup>(3)</sup>	0.60
Grasas y aceites (mg/L)	<5.65	15	< 0.5

NR: no regulado; ND: no disponible.

(1) Valores tomados de la norma NOM-003-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público con contacto directo, promedio mensual). (2) Valor límite para el promedio mensual de descarga del DBO<sub>5</sub>, en mg/L. \*\* Para los metales pesados se tomaron los límites de la norma NOM-001-ECOL-1997 (Límites de descargas de contaminantes en embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola, promedio mensual). (3) Valores tomados de la norma NOM-001-ECOL-1997.

En este caso, la concentración de plomo es mayor en el efluente de lavandería, pero no es limitante para reusar este efluente en la operación de lavado de móviles, debido a que el efluente de esta operación no va a disposición final sino a reuso en otra operación. Respecto a los SST la concentración del efluente de lavandería es mayor que la del agua de pozo y que la de la norma NOM-003-ECOL-1997 sin embargo esto no afecta el reuso del efluente de lavandería en el lavado de móviles; por el tipo de movimientos en la planta (carga y descarga, entrada y salida de

vehículos) los móviles operan en un ambiente polvoso, pero los operarios no están en contacto directo con el polvo pues portan equipo de seguridad.

Tabla A11.6 Comparación efluente lavado móviles y agua de pozo.

Parámetro	Efluente lavado de móviles	Agua de pozo
Temperatura °C	-	-
pH	6.69	6.89
Densidad (g/ml)	1.0035	1.002
CE (mS/cm)	2.76	4.60
SO <sub>4</sub>	902.01	1,339.84
Cl	352.91	557.63
SST	30.75	44
SDT	2478	3924
DQO(mg/L)	152	144
Pb (mg/L)	0.42	0.13
As (mg/L)	<0.16	< 0.1
Cd (mg/L)	<0.1	<0.1
Cr (mg/L)	<0.1	<0.1
Cu (mg/L)	<0.1	<0.1
Fe (mg/L)	0.49	2.20
Hg (mg/L)	ND	ND
Ni (mg/L)	<0.1	<0.1
Zn (mg/L)	0.145	0.12
Ca (mg/L)	45.45	67
Mg (mg/L)	8.13	26.80
Na (mg/L)	41.60	59.90
Cianuros (mg/L)	0.039	ND
S total (mg/L)	81.50	155.20
P total (mg/L) (mg/L)	1.98	<0.03
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	ND	ND
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	6	0.60
Grasas y aceites (mg/L)	10.85	< 0.5

ND: no disponible.

La concentración de plomo en el efluente de lavado de móviles es mayor que la del agua de pozo, pero no es una limitante para reusar este efluente en las primeras etapas de la operación de lavado de plásticos, pues no se requiere una calidad específica de agua. Con respecto a las concentraciones de SO<sub>4</sub>, Cl, SST y SDT están por debajo de los valores de concentraciones del agua de pozo.

Tabla A11.7 Comparación efluente tratado fisicoquímicamente (cisterna) y efluente del lavado de plásticos.

Parámetro	Agua tratada de cisterna	Efluente del lavado de plásticos
Temperatura °C	34.1	26
pH	7.06	7.30
Densidad (g/ml)	1.1	1.027
CE (mS/cm)	60.1	6.95
SO <sub>4</sub>	4,579.7	3,612.56
Cl	581.0	428.95
SST	863.9	517.50
SDT	189,129.95	7,902.71
DQO(mg/L)	340.5	450
Pb (mg/L)	<0.41	9.88
As (mg/L)	<0.11	<0.1
Cd (mg/L)	<0.1	<0.1
Cr (mg/L)	<0.1	<0.1
Cu (mg/L)	<0.1	<0.1
Fe (mg/L)	<0.526	0.52
Hg (mg/L)	<0.1*	ND
Ni (mg/L)	0.42	<0.1
Zn (mg/L)	1.07	0.30
Ca (mg/L)	40.82	55.70
Mg (mg/L)	2,296.2	72.50
Na (mg/L)	502.9	124.55
Cianuros (mg/L)	0.301	<6.67
S total (mg/L)	6,045.7	167.25
P total (mg/L) (mg/L)	<0.172	<0.22
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	6.55	12.20
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	32.6	<2.46
Grasas y aceites (mg/L)	1.62	<12.63

ND: no disponible; \* Valor corresponde al límite de detección del equipo.

En el sistema de extracción de polvos no se requiere agua de una calidad específica por lo que es posible reusar el efluente del lavado de plásticos en esta operación. El propósito del sistema de extracción de polvos es capturar los polvos de plomo como lodos y recuperar el plomo contenido en ellos. El reusar agua que contenga plomo, contribuirá a incrementar su recuperación en el proceso industrial. Los valores de las concentraciones de cianuros y grasas y aceites están por debajo en el efluente de lavado de plásticos.

Tabla A11.8 Comparación del efluente tratado fisicoquímicamente y efluente del tratamiento biológico

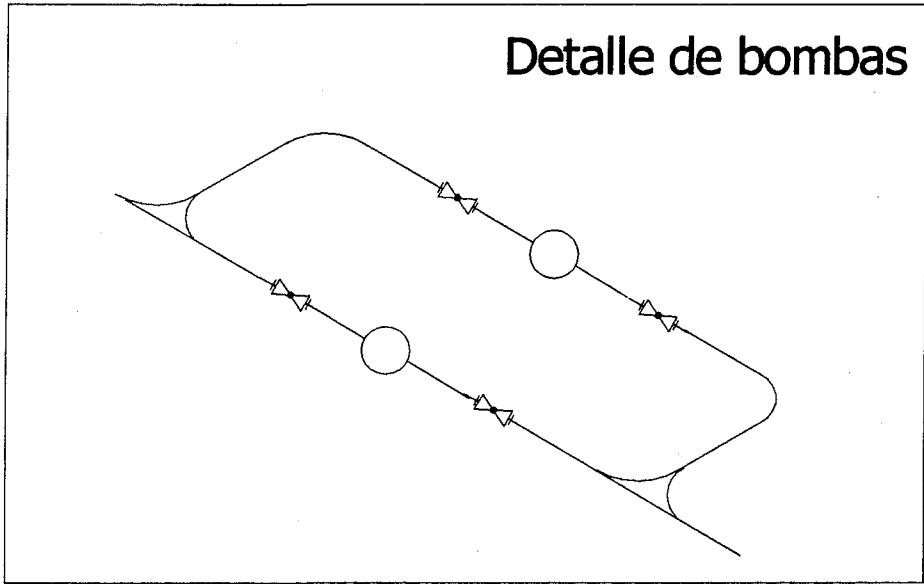
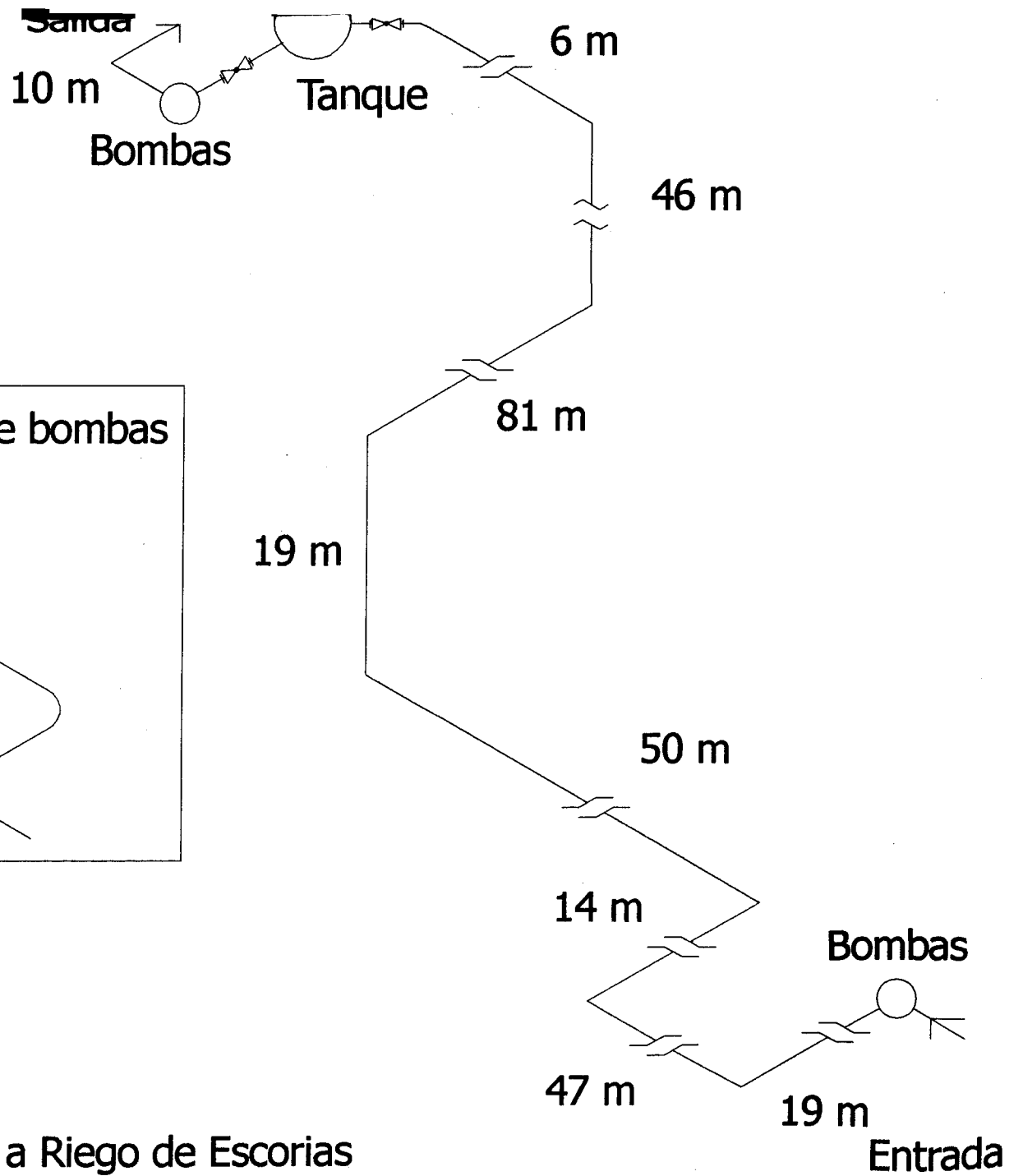
Parámetro	Agua tratada de cisterna	Efluente del tratamiento biológico
Temperatura °C	34.1	22.40
pH	7.06	7.70
Densidad (g/ml)	1.1	1.00
CE (mS/cm)	60.1	4.79
SO <sub>4</sub>	4,579.7	1,185.01
Cl	581.0	467.94
SST	863.9	28.70
SDT	189,129.95	3,739.46
DQO(mg/L)	340.5	128.20
Pb (mg/L)	<0.418	<0.182
As (mg/L)	<0.11	<0.1
Cd (mg/L)	<0.1	<0.1
Cr (mg/L)	<0.1	<0.1
Cu (mg/L)	<0.1	<0.1
Fe (mg/L)	<0.526	<0.18
Hg (mg/L)*	<0.1	<0.1
Ni (mg/L)	0.42	<0.1
Zn (mg/L)	1.07	<0.154
Ca (mg/L)	40.82	56.69
Mg (mg/L)	2,296.2	15.24
Na (mg/L)	502.9	55.97
Cianuros (mg/L)	0.301	<0.01
S total (mg/L)	6,045.7	89.17
P total (mg/L)	<0.172	<1.004
N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	6.55	45.75
Nitrógeno Kjeldhal (mg/L)	32.6	37.78
Grasas y aceites (mg/L)	1.62	<1.43

\* Valores corresponden al límite de detección del equipo.

Para el riego de escorias no se requiere agua de una calidad específica por lo que es posible usar el efluente de la cisterna de agua tratada.

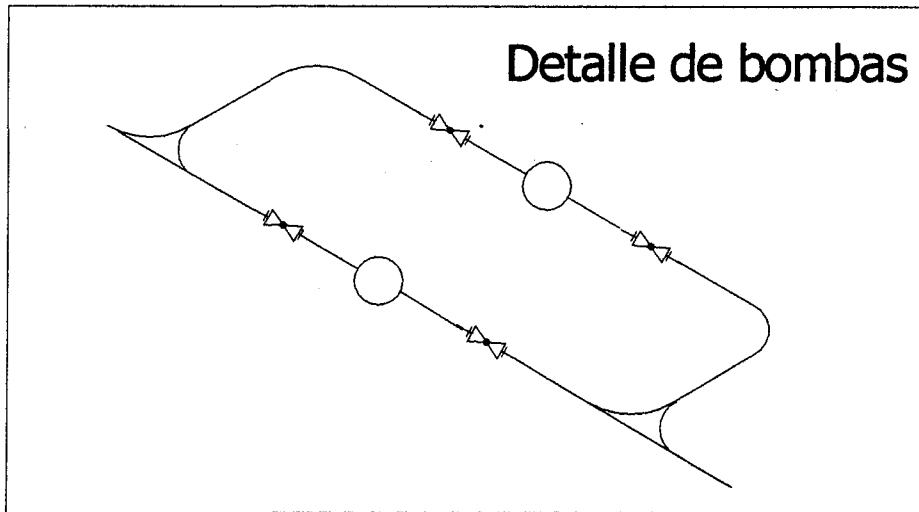
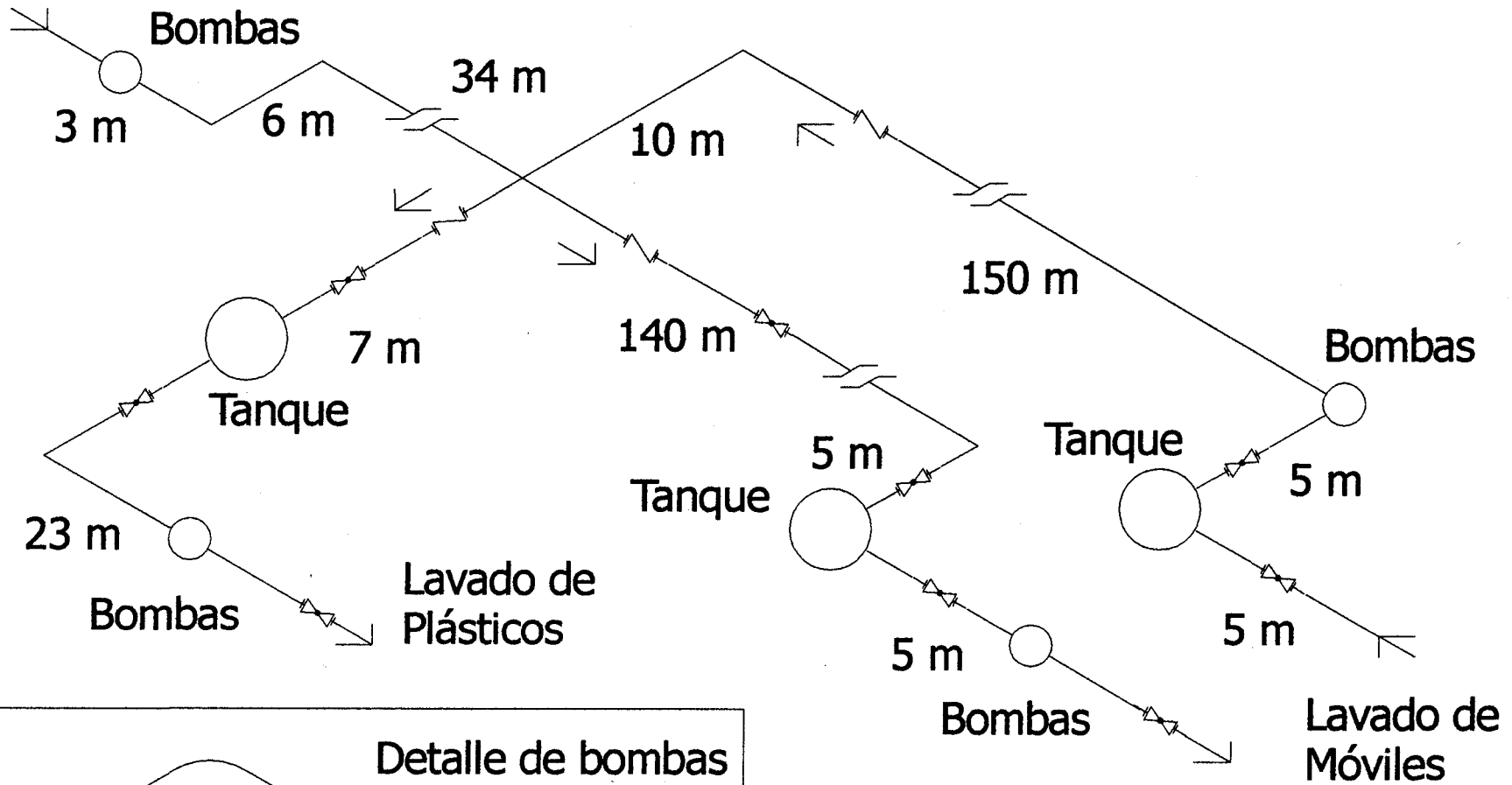
**Anexo 12 Isométricos de líneas de reuso de agua.**



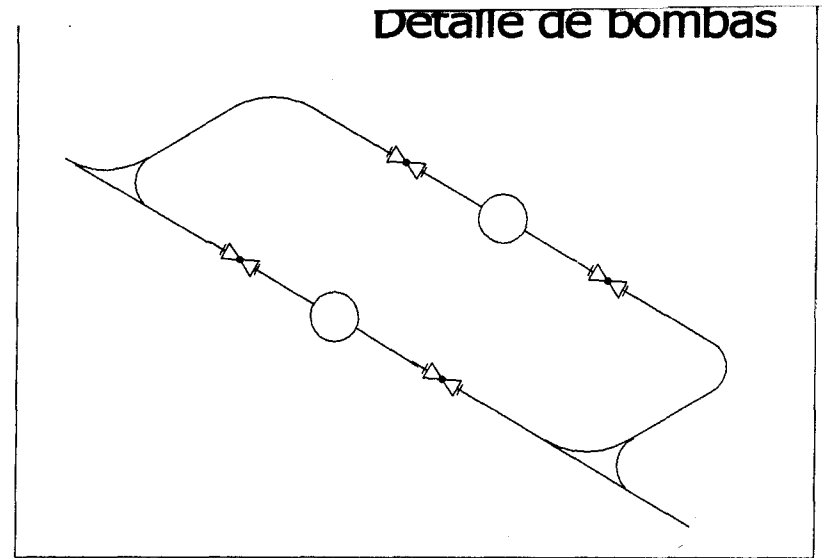
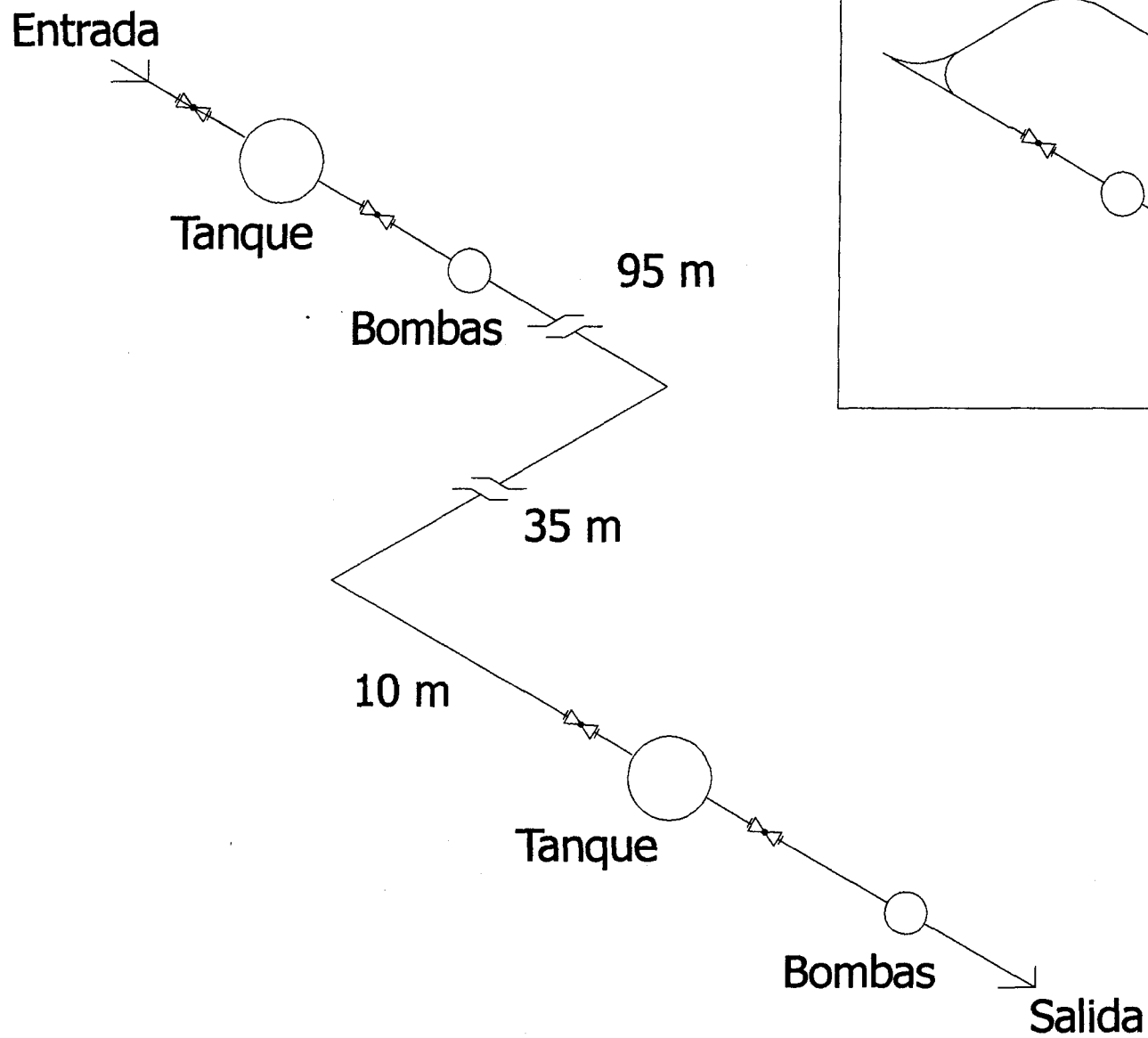


Reuso de Agua de Infiltración a Riego de Escorias

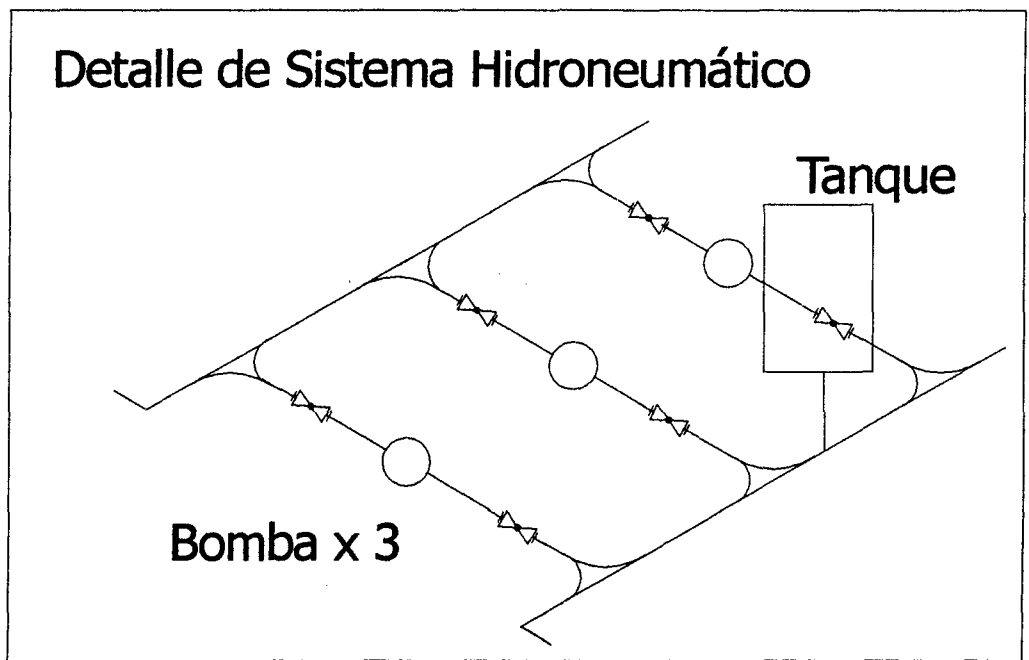
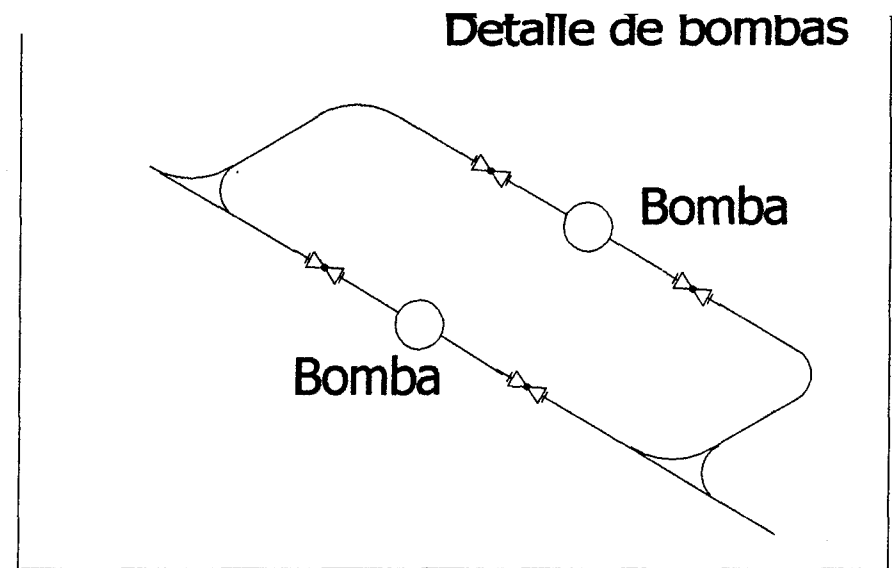
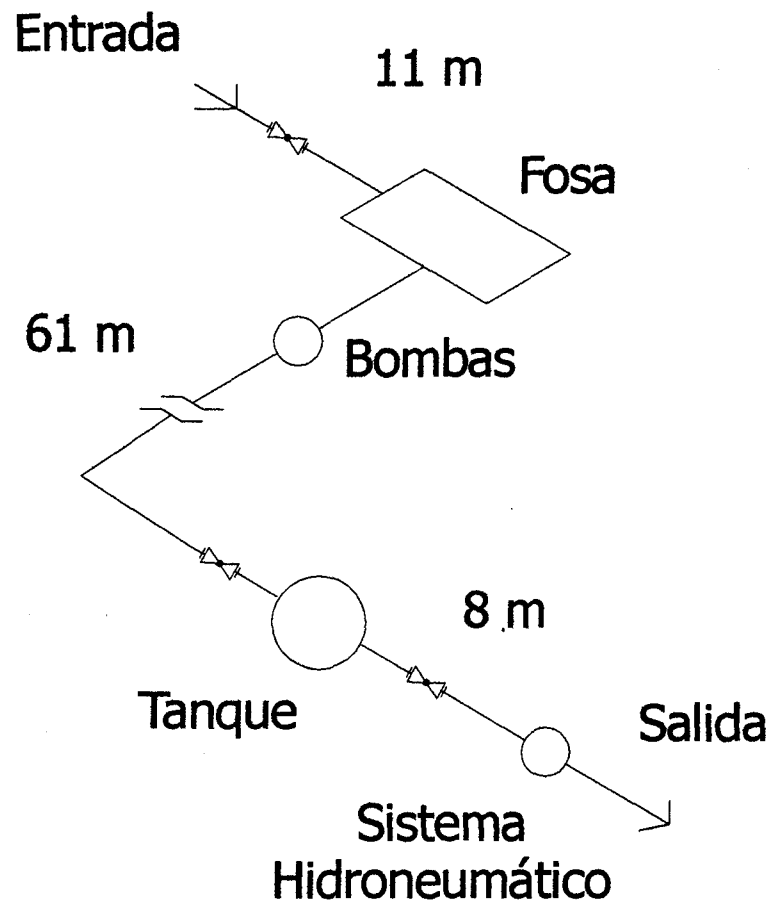
Entrada



Reuso de Agua de Lavandería en Lavado de Móviles y Lavado de Plásticos

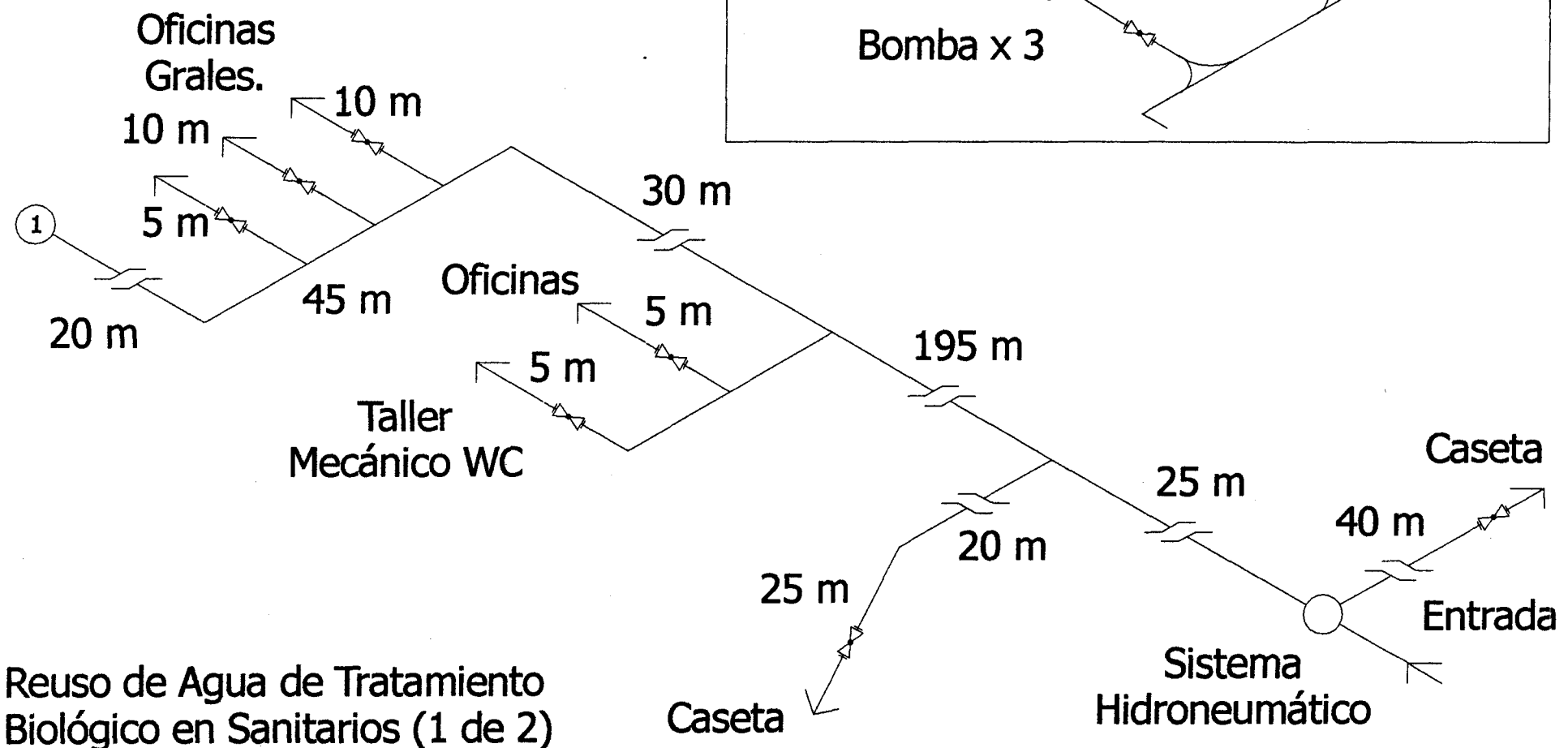
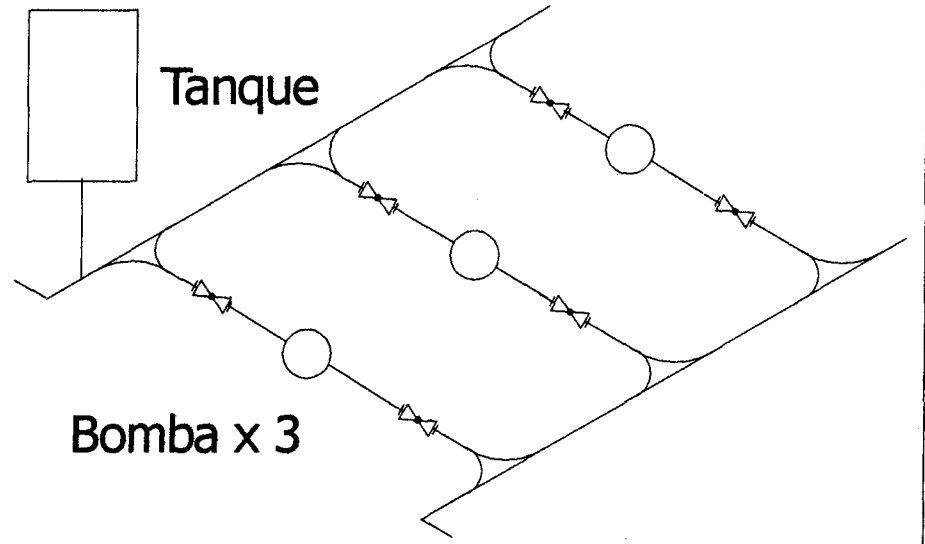


Reuso de Agua de Lavado de Plásticos en Sistema de Extracción de Polvos

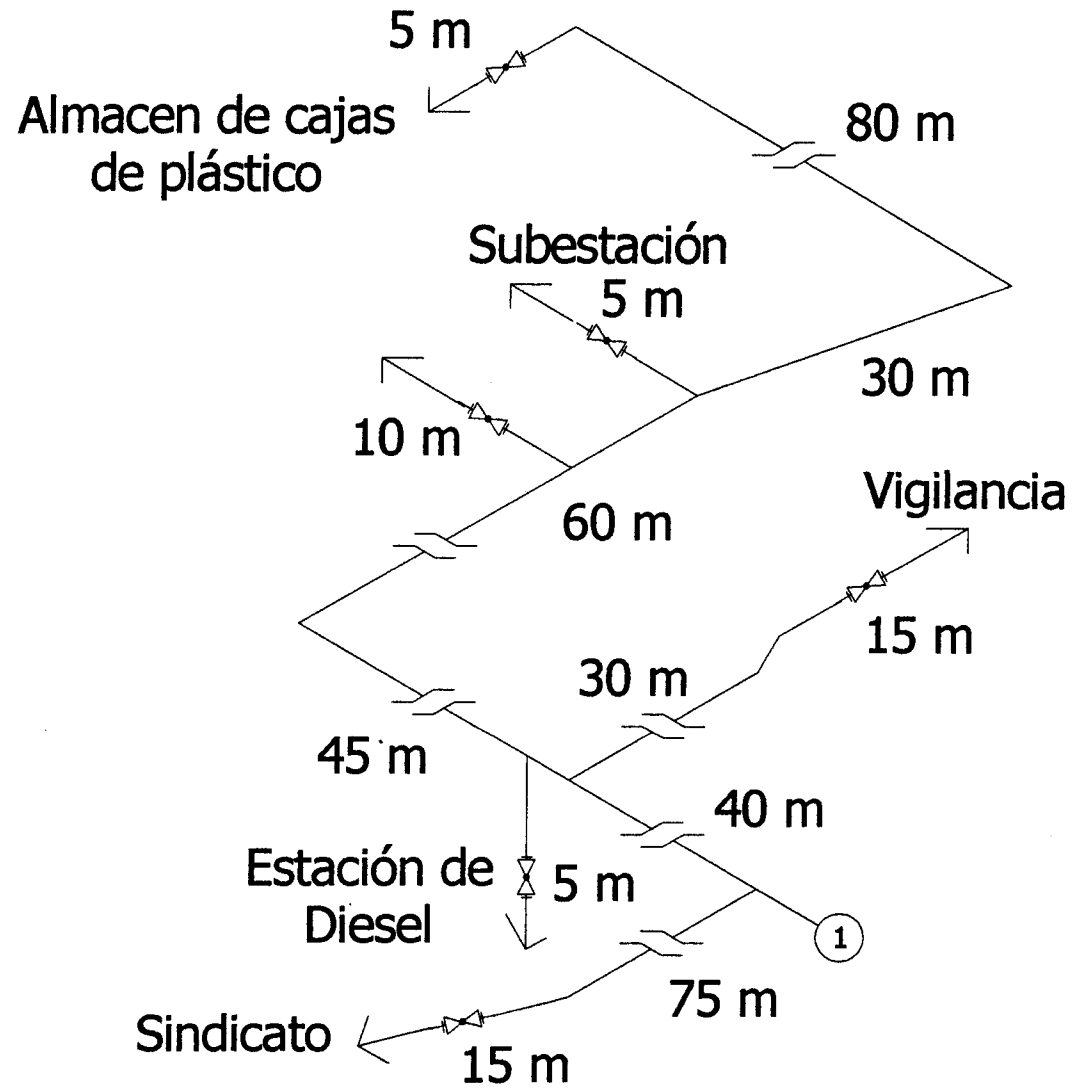


Reuso de Agua de Regaderas en Riego de Áreas Verdes

# Detalle de Sistema Hidroneumático



Reuso de Agua de Tratamiento Biológico en Sanitarios (1 de 2)



Reuso de Agua de Tratamiento  
 Biológico en Sanitarios (2 de 2)

## Anexo 13 Detalle de cálculos realizados para la evaluación económica.

Tabla A13.1 Costo de insumos.

Concepto	\$ pesos/lt	\$ dólares/lt
Hipoclorito de sodio <sup>(1)</sup>	\$5.00	\$0.45
Hidróxido de magnesio	\$ 2.40	\$0.22
Coagulante	\$ 29.70	\$2.70
Antiespumante	\$ 49.50	\$4.50
Polímero	\$ 0.1067	\$0.0097
Agua purificada <sup>(2)</sup>	\$1.26	\$0.1148
Agua potable de pipa	\$ 36,500	\$3,318.18

(1) Se utiliza en el tratamiento biológico para desinfección. (2) Se consideró el costo del agua purificada para beber (garrafón de 19 lt).

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

### 1. Cálculo del costo del hidróxido de magnesio por tonelada.

Se dividió el precio del hidróxido convertido a pesos/m<sup>3</sup> por la densidad y el resultado se multiplicó por el factor de conversión de kilogramos a toneladas.

Densidad del hidróxido de magnesio = 1,420 kg/m<sup>3</sup>. Dato proporcionado por personal de la planta.

Costo por tonelada = (\$2,400 pesos/m<sup>3</sup>)(1 m<sup>3</sup>/1420 kg)(1000 kg/ton) = \$1,690.14 pesos/ton.

Tabla A13.2 Consumo de hidróxido de magnesio y dosis de químicos para tratamiento.

Químico	Dosis/Consumo	Unidades
Hidróxido de magnesio	0.02484	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> de agua tratada
Coagulante	150	ml/min
Antiespumante	30	ml/min
Polímero	1,600	ml/min

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

### 2. Cálculo de los gastos actuales en químicos para tratamiento, agua purificada y agua potable de pipa.

Se obtuvieron multiplicando los consumos actuales por los correspondientes costos unitarios.

Tabla A13.3 Consumos actuales de químicos, agua purificada y agua de pipa

Concepto	Valor	Unidades
Agua purificada <sup>(1)</sup>	106	m <sup>3</sup> /mes
Agua potable de pipa <sup>(1)</sup>	1,879	m <sup>3</sup> /mes
Hipoclorito de sodio	0.20	m <sup>3</sup> /mes
Hidróxido de magnesio	427.4783	m <sup>3</sup> /mes
Antiespumante	0.81	m <sup>3</sup> /mes
Coagulante	4.05	m <sup>3</sup> /mes
Polímero	43.20	m <sup>3</sup> /mes

Fuente: información proporcionada por personal de la planta.

<sup>(1)</sup>Estimado a partir de información proporcionada por personal de la planta.

Por ejemplo para el gasto en agua potable de pipa:

Gasto mensual agua de pipa = (1,879 m<sup>3</sup>/mes)(\$36.50/m<sup>3</sup> de agua)= \$68,583.50 pesos/mes

En la Tabla A13.4 se resumen los valores calculados:

Tabla A13.4 Resumen de gastos actuales en químicos para tratamiento, agua potable y agua purificada.

Concepto	\$ pesos/mes	\$ dólares/mes
Agua purificada	\$133,894.74	\$12,172.25
Agua potable de pipa	\$ 68,583.50	\$6,234.86
Hidróxido de magnesio	\$ 1,025,947.88	\$93,267.99
Hipoclorito de sodio	\$1,000	\$90.90
Antiespumante	\$ 40,095	\$3,645
Coagulante	\$ 120,285	\$10,935
Polímero	\$ 419.04	\$38.09
Gasto total	\$1,390,225.15	\$126,384.10

La paridad utilizada en los cálculos fue \$11.00 pesos/dólar. El gasto total anual estimado corresponde a \$ 16,682,701.85 pesos/año.

### 3. Cálculo de gasto actual en instalaciones y equipos para la propuesta de reuso.

El detalle de los materiales y equipos requeridos se muestra en el Anexo 12. Las tuberías, conexiones, accesorios y válvulas se cotizaron en material de PVC, ced. 80. Los listados de materiales se obtuvieron a partir de los dibujos isométricos realizados para las diferentes líneas de reuso de agua. En la Tabla A13.5 se resumen los costos estimados por líneas para las propuestas de reuso:

Tabla A13.5 Costos estimados por líneas para las propuestas de reuso de agua.

Línea	Total pesos	Total dólares
Reuso del efluente del tratamiento biológico en las descargas de sanitarios y en el riego de áreas verdes.	\$118,008.55	\$10,728.05
Reuso de agua a infiltración en el riego de escorias.	\$244,524.50	\$22,229.50
Reuso del efluente del lavado de plásticos en el sistema de extracción de polvos.	\$240,619.05	\$21,874.46
Reuso del efluente de lavandería en el lavado de móviles y de plásticos.	\$335,495.88	\$30,499.63
Reuso del efluente de regaderas en el riego de áreas verdes.	\$261,848.48	\$23,804.41

### 4. Cálculo del consumo en químicos para tratamiento y agua purificada para la propuesta de reuso con ingreso de electrolito.

Estos consumos de químicos se calcularon a partir de los consumos actuales y del % de reducción en el flujo de agua tratada fisicoquímicamente, multiplicando el consumo actual por la diferencia entre el 100% y dicho porcentaje.

Flujo estimado de agua tratada fisicoquímicamente para el sistema actual = 17,209 m<sup>3</sup>/mes (Ver sección 5.5 del Análisis de Resultados).

Flujo estimado de agua tratada fisicoquímicamente para la propuesta de reuso = 14,802 m<sup>3</sup>/mes (Ver sección 5.7 del Análisis de Resultados).

$$\% \text{ reducción} = (17,209 - 14,802) / (17,209) \times 100\% = 13.98\%$$

$$100\% - \% \text{ reducción} = 86.02\%$$



Por ejemplo para el hidróxido de magnesio

$$\text{Consumo de hidróxido} = (427.4783 \text{ m}^3/\text{mes})(0.8602) = 367.6887 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

La Tabla A13.6 presenta los consumos estimados de químicos para tratamiento y agua purificada para la propuesta de reuso de agua que considera ingreso de electrolito:

Tabla A13.6 Resumen de consumo de químicos, agua purificada y agua potable para propuesta de reuso con ingreso de electrolito ( $\text{m}^3/\text{mes}$ ).

Concepto	Consumo ( $\text{m}^3/\text{mes}$ )
Agua purificada <sup>(1)</sup>	106
Hidróxido de magnesio	367.6887
Hipoclorito de sodio <sup>(2)</sup>	0.20 <sup>(2)</sup>
Antiespumante	0.6967
Coagulante	3.4835
Polímero	37.1578

(1) no hubo cambio en los consumos de agua purificada para la propuesta de reuso de agua con ingreso de electrolito, el consumo es el mismo que el expresado en la Tabla A13.3.

(2) no hay cambio en el consumo del hipoclorito pues el efluente biológico es el mismo.

### 5. Cálculo del gasto en químicos para tratamiento y agua purificada para la propuesta de reuso con ingreso de electrolito.

Se obtuvieron multiplicando los consumos estimados (Tabla A13.6) por los correspondientes costos unitarios (Tabla A13.1). El resumen de los gastos se muestra en la Tabla A13.7:

Tabla A13.7 Resumen de gastos en químicos para tratamiento y agua purificada para la propuesta de reuso con ingreso de electrolito.

Concepto	\$ pesos/mes	\$ dólares/mes
Agua purificada	\$133,894.74	\$12,172.25
Hidróxido de magnesio	\$ 882,452.99	\$80,223
Hipoclorito de sodio	\$ 1,000	\$90.90
Antiespumante	\$ 34,487.09	\$3,135.19
Coagulante	\$ 103,461.26	\$9,405.57
Polímero	\$360.43	\$32.77
Gasto total	\$1,155,656.50	\$105,059.68

### 6. Cálculo del consumo en químicos para tratamiento y agua purificada para la propuesta de reuso sin ingreso de electrolito.

Estos consumos de químicos se calcularon a partir de los consumos actuales y del % de reducción en el flujo de agua tratada fisicoquímicamente, multiplicando el consumo actual por la diferencia entre el 100% y dicho porcentaje.

Flujo estimado de agua tratada fisicoquímicamente para el sistema actual = 17,209  $\text{m}^3/\text{mes}$  (Ver sección 5.5 del Análisis de Resultados).

Flujo estimado de agua tratada fisicoquímicamente para la propuesta de reuso sin ingreso de electrolito = 13,986  $\text{m}^3/\text{mes}$  (Ver sección 5.7 del Análisis de Resultados).

$$\% \text{ reducción} = (17,209 - 13,986) / (17,209) \times 100\% = 18.73\%.$$

$$100\% - \% \text{ reducción} = 81.27\%$$

Por ejemplo para el antiespumante:

$$\text{Consumo de antiespumante} = (0.81 \text{ m}^3/\text{mes})(0.8127) = 0.6583 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

En el caso del hidróxido de magnesio se hizo la suposición de que ya no se requiere neutralizar debido a que no hay ingreso de electrolito, el cual es la principal fuente de acidez.

Los resultados de los cálculos se observan en la Tabla A13.8:

Tabla A13.8 Resumen de consumo en químicos y agua purificada de la propuesta de reuso de agua sin ingreso de electrolito, (m<sup>3</sup>/mes).

Concepto	Consumo
Agua purificada <sup>(1)</sup>	106
Hidróxido de magnesio	0.00
Hipoclorito de sodio <sup>(2)</sup>	0.20 <sup>(2)</sup>
Antiespumante	0.6583
Coagulante	3.2915
Polímero	35.1095

(1) no hubo cambio en el consumo de agua purificada para la propuesta de reuso de agua con ingreso de electrolito, es el mismo que el expresado en la Tabla A13.3

(2) no hay cambio en el consumo del hipoclorito pues el efluente biológico es el mismo.

## 7. Cálculo de los gastos en químicos para tratamiento y agua purificada para la propuesta de reuso sin ingreso de electrolito.

Los gastos se determinaron multiplicando los consumos estimados (Tabla A13.8) por los correspondientes costos unitarios (Tabla A13.1). El total de los gastos se presenta en la Tabla A13.9:

Tabla A13.9 Resumen de gastos en químicos para tratamiento y agua purificada para la propuesta de reuso sin ingreso de electrolito.

Concepto	\$ pesos/mes	\$ dólares/mes
Agua purificada	\$133,894.74	\$12,172.25
Hipoclorito de sodio	\$ 1,000	\$ 90.90
Antiespumante	\$32,301.65	\$2,936.51
Coagulante	\$96,904.94	\$8,809.54
Polímero	\$337.59	\$30.69
Gasto total	\$265,579.43	\$24,143.58

## 8. Costos del tratamiento biológico terciario.

La Tabla A13.10 se generó a partir de 2 cotizaciones para el tratamiento terciario biológico. La información presentada corresponde a dos proveedores distintos. Se menciona el detalle del equipo considerado en cada cotización.

Tabla A13.10 Propuestas de tratamiento biológico terciario.

Propuesta	A	B
Inversión en pesos	\$ 771,100 <sup>(1)</sup>	\$ 191,000
Gasto mensual en químicos y consumibles (pesos/mes)	\$ 1,110.54	\$ 1,500
Detalle del sistema de tratamiento	Sistema de dosificación de químicos. Filtro de lecho profundo. Tanque de almacenamiento de agua purificada con sistema de bombeo. Filtro de carbón activado. Instalación electromecánica.	Filtración granular con zeolita. Filtración en trama fina. Oxidación avanzada. Adsorción carbón activado. Microfiltración (dead end). Desinfección. Gabinete de control Nema tipo 3R metálico.

<sup>(1)</sup> Se modificó costo para considerar sólo la dosificación del polímero. La cotización original incluye sistema para dosificar el hipoclorito de sodio. Proveedor A: Industrias Islas, Proveedor B: CCR Mexicana.

### 9. Costo del tratamiento del agua de pozo.

Para obtener el estimado del costo del tratamiento del agua de pozo se solicitó cotización al proveedor CCR Mexicana. En la Tabla A13.11 se resume la cotización así como el detalle del tratamiento.

A13.11 Propuesta de tratamiento para el agua de pozo.

Inversión (pesos)	\$ 366,146 <sup>(1)</sup>
Gasto mensual en químicos y consumibles (pesos/mes)	\$16,500 <sup>(2)</sup>
Costo tratamiento (pesos/m <sup>3</sup> )	\$6.50/m <sup>3</sup> <sup>(3)</sup> \$9.55/m <sup>3</sup> <sup>(4)</sup>
Detalle del sistema de tratamiento	Sistema de ósmosis inversa con capacidad de tratamiento de 2000 m <sup>3</sup> /mes. Eficiencia de recuperación 50-68%. Eficiencia de rechazo 99-99.6%. Elementos de membrana: compuesto polimérico de empacado espiral de bajo ensuciamiento. Sistema de postratamiento para eliminación del CO <sub>2</sub> , mediante descarbonatador al vacío, ajuste Ca y Mg en lecho neutralizante, postfiltración en carbón activado y filtros cartucho, desinfección y aseguramiento de la calidad biológica por dosificación de ClO <sub>2</sub> .

(1) corresponde a una inversión de 33,286 dólares a una paridad de \$11.00;(2) corresponde a un gasto de \$1,500 usd a una paridad de \$11; (3) considera el costo de la energía, mto, reemplazo de membranas, consumo de químicos y aditivos, repuestos, mano de obra; (4) considera además el costo de capital.

### 10. Gasto en confinamiento del electrolito.

El gasto en confinamiento del electrolito se calculó a partir de una cotización proporcionada por el proveedor RIMSA y del volumen mensual de electrolito que ingresa al proceso.

Costo de tratamiento y disposición = \$2, 900 pesos/tonelada (incluye la neutralización y el encapsulado).

Costo de transporte en pipa de 15 m<sup>3</sup> = \$3,300 pesos/pipa.

Costo de transporte en pipa de 30 m<sup>3</sup> = \$6,000 pesos/pipa.

Volumen mensual de electrolito = 1,455 m<sup>3</sup> (Dato obtenido del balance volumétrico).

Densidad promedio del electrolito = 1,210 kg/m<sup>3</sup> (Dato obtenido por medición directa en muestras).

Gasto tratamiento y disposición = (\$2,900 pesos/ton)(1,455 m<sup>3</sup>/mes)(1.21 ton/m<sup>3</sup>)  
= \$ 5,105,595 pesos/mes.

Gasto en transporte = (1455 m<sup>3</sup>/mes)(\$ 6,000 pesos/pipa)/(30 m<sup>3</sup>/pipa) = \$294,000 pesos/mes.  
Si se utilizan pipas de 30 m<sup>3</sup> en lugar de pipas de 15 m<sup>3</sup>, se requieren menos viajes y el gasto en transporte es menor.

Gasto mensual en confinamiento = \$ 5,105, 595 pesos/mes + \$294,000 pesos/mes  
= \$ 5,399, 595 pesos/mes.

### 11. Cálculo del valor futuro (VF).

Con el propósito de reflejar el valor del dinero a través del tiempo y mostrar su variación en la tabla de los flujos de efectivo, los gastos en operación y mantenimiento y los ahorros, se calcularon también a valor futuro, mediante la fórmula:

$$F = P(1+i)^n$$

P es el valor presente en miles de pesos. En el caso de los ahorros y de los gastos de operación y mantenimiento los valores estimados son valores presente, al ser estimados actuales, i es la tasa de interés a la cual se está evaluando la alternativa, t el período de tiempo y F el valor futuro del dinero al período n (Blank Leland T. & Anthony J. Tarquin, 1992). La tasa de interés considerada en los cálculos fue del 10% anual (BNM, 2006).

Así por ejemplo para calcular el valor futuro de los gastos anuales en operación y mantenimiento correspondientes a la alternativa 1A (reuso con ingreso de electrolito) para los años 2, 3, 4, y 5:

P= valor presente de los gastos de operación y mantenimiento = \$211,326.49 pesos.

Año 2 VF<sub>2</sub> = \$ 211,326.49\*(1+0.10)<sup>2</sup> = \$ 255,705.05 pesos.

Año 3 VF<sub>3</sub> = \$ 211,326.49\*(1+0.10)<sup>3</sup> = \$ 281,275.56 pesos.

Año 4 VF<sub>4</sub> = \$ 211,326.49\*(1+0.10)<sup>4</sup> = \$ 309,403.12 pesos.

Año 5 VF<sub>5</sub> = \$ 211,326.49\*(1+0.10)<sup>5</sup> = \$ 340,343.43 pesos.

### 12. Cálculo del valor presente (VP).

Los flujos de efectivo correspondientes a la inversión, los gastos de operación y mantenimiento y los beneficios o ahorros, son valores a presente por ser estimados actuales. El valor presente por año, se calculó sumando algebraicamente estos flujos. La inversión y los gastos de mantenimiento, son desembolsos o flujos negativos. Los beneficios o ahorros son ingresos y por lo tanto flujos positivos. La fórmula utilizada fue:

$$VP = \text{Ahorros o beneficios} - \text{Inversión} - \text{Gastos en operación y mantenimiento}$$

Por ejemplo, los valores presente de la alternativa 1B, para los años 1, 2, 3, 4 y 5 son:

Inversión= \$1,757,642.45 pesos

Gastos operación y mantenimiento = \$ 216,000 pesos.

Beneficios o ahorros = \$2,814,823.89 pesos.

VP<sub>1</sub> = (\$1,757,642.45) pesos.

$$\begin{aligned}
VP_2 &= \$ 2,814,823.89 - \$216,000 = \$ 2,598,823.90 \text{ pesos.} \\
VP_3 &= \$ 2,814,823.89 - \$216,000 = \$ 2,598,823.90 \text{ pesos.} \\
VP_4 &= \$ 2,814,823.89 - \$216,000 = \$ 2,598,823.90 \text{ pesos.} \\
VP_5 &= \$ 2,814,823.89 - \$216,000 = \$ 2,598,823.90 \text{ pesos.}
\end{aligned}$$

Para todas las alternativas se consideró que al año 1, el único desembolso es la inversión inicial y que los ahorros y los gastos de operación y mantenimiento se generan a partir del año 2.

### 13. Valor presente neto (VPN).

El valor presente neto a un período de tiempo t, es la suma de los flujos netos de efectivo expresados a valor presente desde t=1 hasta t=n. Por ejemplo, el valor presente neto, en pesos, para la alternativa anterior a 5 años es:

$$\begin{aligned}
\text{Valor presente Neto (5 años)} &= VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4 + VP_5 \\
VPN_{5 \text{ años}} &= -\$1,757,642.45 + \$ 2,598,823.90 + \$ 2,598,823.90 + \$ 2,598,823.90 + \$ 2,598,823.90 \\
VPN_{5 \text{ años}} &= \$ 8,637,653.13 \text{ pesos.}
\end{aligned}$$

### 14. Relación Beneficio/Costo (B/C).

Se calculó a partir de los beneficios y de los costos totales, expresados a valor presente para un período de tiempo. Por ejemplo, para la alternativa B propuesta en la opción 1 y un período de 5 años:

$$\begin{aligned}
\text{Ahorros o Beneficios} &= \$11,259,295.59 \text{ pesos.} \\
\text{Costos totales} &= \text{Gastos de operación y mantenimiento} + \text{Inversión inicial} \\
\text{Gastos de operación y mantenimiento} &= \$864,000 \text{ pesos} \\
\text{Inversión inicial} &= \$ 1,757,642.45 \text{ pesos.} \\
\text{Costos totales} &= \$ 2,621,642.45 \text{ pesos.} \\
B/C &= \$11,259,295.59 / \$ 2,621,642.45 = 4.2947
\end{aligned}$$

### 15. Relación Beneficio/Inversión (B/I) neto.

De manera similar, este indicador se estimó a partir de los beneficios, de los gastos totales de operación y mantenimiento y de la inversión inicial, expresados a valor presente, para un período de tiempo, mediante la fórmula:

$$\left( \frac{B}{I} \right)_{\text{neto}} = \frac{\text{Beneficios} - \text{Gastos O \& M}}{\text{Inversión}}$$

Por ejemplo, para la alternativa B propuesta en la opción 1 y un período de 5 años:

$$\begin{aligned}
\text{Beneficios a 5 años} &= \$11,259,295.59 \text{ pesos.} \\
\text{Inversión inicial} &= \$ 1,757,642.45 \text{ pesos.} \\
\text{Gastos en operación y mantenimiento a 5 años} &= \$864,000 \text{ pesos.} \\
(B/I) \text{ neto} &= (\$11,259,295.59 - \$864,000) / \$ 1,757,642.45 = 5.9143
\end{aligned}$$

### 16. Tasa Interna de Retorno (TIR).

La tasa interna de retorno se estimó a partir del valor presente, igualando el valor presente de los desembolsos con el valor presente de los ingresos a un tiempo t.

Las fórmulas utilizadas fueron:

$$0 = -VP_D + VP_I$$

VP<sub>D</sub> representa el valor presente de los desembolsos y VP<sub>I</sub> el valor presente de los ingresos (Blank Leland T. & Anthony J. Tarquin, 1992). Las inversiones y los gastos de operación y

mantenimiento representan los desembolsos y los ahorros o beneficios, se consideran los ingresos.

Calculando para la alternativa A considerada en la opción 2 y un período de 5 años:

$$VP_D = \text{Inversión inicial} + VP_{\text{Gastos de O\&M}}$$

Inversión inicial= \$ 24,337,742.45 pesos o bien \$24,337.74 miles de pesos.

$$VP_{\text{Gastos de O\&M}} = \sum \text{Gastos O\&M} / (1+i)^t$$

$VP_I =$  Valor presente de los ingresos =  $\sum \text{Ahorros o Beneficios} / (1+i)^t$ , desde  $t=1$  hasta 5.

$i$  es la TIR o tasa interna de retorno que satisface la ecuación:

$$0 = -24,337.74 - 0/(1+i)^1 - 2,651.51/(1+i)^2 - 2,916.66/(1+i)^3 - 3,208.32/(1+i)^4 - 3,529.15/(1+i)^5 + 0/(1+i)^1 + 16,329.86/(1+i)^2 + 17,962.84/(1+i)^3 + 19,759.13/(1+i)^4 + 21,735.04/(1+i)^5$$

Esta ecuación se puede resolver a prueba y error para hallar el valor de  $i$  o bien utilizando la opción de buscar objetivo en la barra de herramientas del excel. El valor de  $i$  encontrado, el cual satisface la ecuación anterior es 32.08%.

### 17. Período de retorno de la inversión (n).

El período de retorno se estimó a partir del valor presente, igualando el valor presente de los desembolsos con el valor presente de los ingresos a una tasa de interés  $i$ , del 10%.

Las fórmulas utilizadas fueron:

$$0 = -VP_D + VP_I$$

$VP_D$  representa el valor presente de los desembolsos y  $VP_I$  el valor presente de los ingresos.

Calculando para la alternativa A considerada en la opción 2:

$$VP_D = \text{Inversión inicial} + VP_{\text{Gastos de O\&M}}$$

Inversión inicial= \$ 24,337,742.45 pesos.

$$VP_{\text{Gastos de O\&M}} = \sum \text{Gastos O\&M} / (1+i)^t$$

$VP_I =$  Valor presente de los ingresos =  $\sum \text{Ahorros o Beneficios} / (1+i)^t$ , desde  $t=1$  hasta  $t=n$  donde  $n$  es el período de retorno de la inversión.

Tabla A13.11 Flujos neto de efectivo en valor presente alternativa 2A

Año	Flujo (miles de pesos)
1	-\$24,337.74
2	\$11,304.42
3	\$11,304.42
4	\$11,304.42

$VP_3 = -\$24,337.74 + \$11,304.42 + \$11,304.42 = -\$1,728.90$  (Flujo neto negativo)

$VP_4 = \$9,575.52$  (Flujo neto positivo)

La inversión se recupera a partir del cuarto año. Por lo que  $n$  es menor a 5 años.

## Anexo 14 Detalle de los flujos de efectivo anuales por alternativa.

Tabla A14.1 Flujos de efectivo anuales (Alternativa 1A).

Año	Inversión	Gastos de O&M <sup>2</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>2</sup>	Flujo neto <sup>2</sup>	Factor de actualización	Inversión <sup>1</sup>	Gastos de O&M <sup>1</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>1</sup>	Valor actual del flujo neto <sup>1</sup>
1	2,338	0	0	-2,338	1.00	2,338	0	0	-2,338
2	0	256	3,406	3,150	0.83	0	211	2,815	2,603
3	0	281	3,747	3,465	0.75	0	211	2,815	2,603
4	0	309	4,121	3,812	0.68	0	211	2,815	2,603
5	0	340	4,533	4,193	0.62	0	211	2,815	2,603
6	0	374	4,987	4,612	0.56	0	211	2,815	2,603
7	0	412	5,485	5,073	0.51	0	211	2,815	2,603
8	0	453	6,034	5,581	0.47	0	211	2,815	2,603
9	0	498	6,637	6,139	0.42	0	211	2,815	2,603
10	0	548	7,301	6,753	0.39	0	211	2,815	2,603

Tabla A14.2 Flujos de efectivo anuales (Alternativa 1B).

Año	Inversión	Gastos de O&M <sup>2</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>2</sup>	Flujo neto <sup>2</sup>	Factor de actualización	Inversión <sup>1</sup>	Gastos de O&M <sup>1</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>1</sup>	Valor actual del flujo neto <sup>1</sup>
1	1,758	0	0	-1,758	1.00	1,758	0	0	-1,758
2	0	261	3,406	3,145	0.83	0	216	2,815	2,599
3	0	287	3,747	3,459	0.75	0	216	2,815	2,599
4	0	316	4,121	3,805	0.68	0	216	2,815	2,599
5	0	348	4,533	4,185	0.62	0	216	2,815	2,599
6	0	383	4,987	4,604	0.56	0	216	2,815	2,599
7	0	421	5,485	5,064	0.51	0	216	2,815	2,599
8	0	463	6,034	5,571	0.47	0	216	2,815	2,599
9	0	509	6,637	6,128	0.42	0	216	2,815	2,599
10	0	560	7,301	6,741	0.39	0	216	2,815	2,599

\* Los montos en las tablas están expresados en miles de pesos; <sup>(1)</sup> Flujos corresponden a valor presente.

<sup>(2)</sup> Flujos expresados en valor futuro; Flujo neto = Beneficios – Gastos de O&M – Inversión.

Tabla A14.3 Flujos de efectivo anuales (Alternativa 2A).

Año	Inversión	Gastos de O&M <sup>2</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>2</sup>	Flujo neto <sup>2</sup>	Factor de actualización	Inversión <sup>1</sup>	Gastos de O&M <sup>1</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>1</sup>	Valor actual del flujo neto <sup>1</sup>
1	24,338	0	0	-24,338	1.00	24,338	0	0	-24,338
2	0	2,652	16,330	13,678	0.83	0	2,191	13,496	11,304
3	0	2,917	17,963	15,046	0.75	0	2,191	13,496	11,304
4	0	3,208	19,759	16,551	0.68	0	2,191	13,496	11,304
5	0	3,529	21,735	18,206	0.62	0	2,191	13,496	11,304
6	0	3,882	23,909	20,026	0.56	0	2,191	13,496	11,304
7	0	4,270	26,299	22,029	0.51	0	2,191	13,496	11,304
8	0	4,697	28,929	24,232	0.47	0	2,191	13,496	11,304
9	0	5,167	31,822	26,655	0.42	0	2,191	13,496	11,304
10	0	5,684	35,004	29,321	0.39	0	2,191	13,496	11,304

Tabla A14.4 Flujos de efectivo anuales (Alternativa 2B).

Año	Inversión	Gastos de O&M <sup>2</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>2</sup>	Flujo neto <sup>2</sup>	Factor de actualización	Inversión <sup>1</sup>	Gastos de O&M <sup>1</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>1</sup>	Valor actual del flujo neto <sup>1</sup>
1	23,758	0	0	-23,758	1.00	23,758	0	0	-23,758
2	0	2,657	16,330	13,673	0.83	0	2,196	13,496	11,300
3	0	2,923	17,963	15,040	0.75	0	2,196	13,496	11,300
4	0	3,215	19,759	16,544	0.68	0	2,196	13,496	11,300
5	0	3,537	21,735	18,198	0.62	0	2,196	13,496	11,300
6	0	3,890	23,909	20,018	0.56	0	2,196	13,496	11,300
7	0	4,279	26,299	22,020	0.51	0	2,196	13,496	11,300
8	0	4,707	28,929	24,222	0.47	0	2,196	13,496	11,300
9	0	5,178	31,822	26,644	0.42	0	2,196	13,496	11,300
10	0	5,696	35,004	29,309	0.39	0	2,196	13,496	11,300

\* Los montos en las tablas están expresados en miles de pesos; <sup>(1)</sup> Flujos corresponden a valor presente.

<sup>(2)</sup> Flujos expresados en valor futuro; Flujo neto = Beneficios – Gastos de O&M – Inversión.



Tabla A14.5 Flujos de efectivo anuales (Alternativa 2C).

Año	Inversión	Gastos de O&M <sup>2</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>2</sup>	Flujo neto <sup>2</sup>	Factor de actualización	Inversión <sup>1</sup>	Gastos de O&M <sup>1</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>1</sup>	Valor actual del flujo neto <sup>1</sup>
1	2,338	0	0	-2338	1.00	2,338	0	0	-2,338
2	0	78,658	16,330	-62328	0.83	0	65,006	13,496	-51,511
3	0	86,524	17,963	-68561	0.75	0	65,006	13,496	-51,511
4	0	95,176	19,759	-75417	0.68	0	65,006	13,496	-51,511
5	0	104,694	21,735	-82959	0.62	0	65,006	13,496	-51,511
6	0	115,163	23,909	-91254	0.56	0	65,006	13,496	-51,511
7	0	126,679	26,299	-100380	0.51	0	65,006	13,496	-51,511
8	0	139,347	28,929	-110418	0.47	0	65,006	13,496	-51,511
9	0	153,282	31,822	-121460	0.42	0	65,006	13,496	-51,511
10	0	168,610	35,004	-133606	0.39	0	65,006	13,496	-51,511

Tabla A14.6 Flujos de efectivo anuales (Alternativa 2D).

Año	Inversión	Gastos de O&M <sup>2</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>2</sup>	Flujo neto <sup>2</sup>	Factor de actualización	Inversión <sup>1</sup>	Gastos de O&M <sup>1</sup>	Ahorros o Beneficios <sup>1</sup>	Valor actual del flujo neto <sup>1</sup>
1	1,758	0	0	-1,758	1.00	1,758	0	0	-1,758
2	0	78,663	16,330	-62,334	0.83	0	65,011	13,496	-51,515
3	0	86,530	17,963	-68,567	0.75	0	65,011	13,496	-51,515
4	0	95,183	19,759	-75,424	0.68	0	65,011	13,496	-51,515
5	0	104,701	21,735	-82,966	0.62	0	65,011	13,496	-51,515
6	0	115,171	23,909	-91,263	0.56	0	65,011	13,496	-51,515
7	0	126,688	26,299	-100,389	0.51	0	65,011	13,496	-51,515
8	0	139,357	28,929	-110,428	0.47	0	65,011	13,496	-51,515
9	0	153,293	31,822	-121,471	0.42	0	65,011	13,496	-51,515
10	0	168,622	35,004	-133,618	0.39	0	65,011	13,496	-51,515

\* Los montos en las tablas están expresados en miles de pesos; <sup>(1)</sup> Flujos corresponden a valor presente.  
<sup>(2)</sup> Flujos expresados en valor futuro; Flujo neto = Beneficios – Gastos de O&M – Inversión.

**BIBLIOGRAFÍA**

AWWA (2005). "Water Treatment Plant Design". Fourth edition. McGraw-Hill. Pp. 13.25, 13.27, 13-28.

Blank Leland T. & Anthony J. Tarquin (1992). "Ingeniería Económica", 3era edición, McGraw-Hill Inc., Pp. 26-28,160.

CLEANLEAD Project (2006). "CLEANLEAD Project: "Developing a New Concept 'CLEANLEAD Factory' for Europe". Página en Internet consultada el 23 de Noviembre del 2006. <http://www.claisse.info/brochure.htm>

CNA (2006). "Normas Oficiales Mexicanas". Página en Internet consultada el 27 de Agosto del 2006. [http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/MarcoNormativo/NOM-ECO-001\\_CNA.htm](http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/MarcoNormativo/NOM-ECO-001_CNA.htm)

CPD (2006). Condiciones particulares de descarga impuestos por la CNA al efluente tratado fisicoquímicamente de la Planta Ciénega de Flores.

Dross, Engineering (2001). "Small Scale Lead Battery Refining Plants: Turning a waste hazard into a commodity". Página en Internet consultada el 22 de Noviembre del 2006. <http://www.drossengineering.com/archive/small%20scale%20lead%20battery%20refining%20plants.pdf>

Eckenfelder, Wesley W. Jr. (2000). "Industrial Water Pollution Control". Third edition. McGraw-Hill. Pp. 124-156, 451, 452, 462-482, 555-557.

EMMSA (2006). "Sistemas de Tubería Plástica: Tubería hidráulica de PVC cédula 40 y cédula 80". Página en Internet consultada el 24 de Enero del 2007. <http://www.emmsa.com.mx/hidr-c40.htm>

FAO (2005). "Wastewater quality guidelines for agricultural use". Página en Internet consultada el 13 de Enero del 2006. <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e04.htm>

Gray, N.F (1999). "Water Technology". Chapter 20: "Physicochemical treatment processes". John Wiley & Sons Inc. Pp. 459-491.

Grosse, Douglas W. (1991). "Innovative Practices for Treating Waste Streams Containing Heavy Metals: A Waste Minimization Approach". EPA Research and Development. Pp. 14.

JC (2006). "Manual de operación de la planta de tratamiento biológico". Pp. 1-4.

LaGrega, Michael D., Phillip L. Buckingham y Jeffrey C. Evans (2001). "Hazardous Waste Management". Second edition. McGraw-Hill. Pp. 527-533.

López, Zavala M.A (2006). Comentarios de los analisis químicos de las diferentes de corrientes muestreadas en la planta de Ciénega.

Mann, James G. y Y.A. Liu (1999). "Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization". McGraw-Hill. Pp. 1-26, 29-44, 297-365.

Metcalf & Eddy (2003). "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse". Fourth edition. McGraw-Hill. Pp. 344-361, 419-422, 493-500, 526-532, 1124-1125, 1131, 1134, 1138-1150, 1180-1196.

Members Tripod (2006). "Valores de conductividad eléctrica de algunas muestras típicas de agua". Página en Internet consultada el 21 de Marzo del 2006. <http://members.tripod.com/Arturobola/conducti.htm>.

Miller, Chaz (2004). "Lead-Acid Batteries". Waste Age. Pp. 91, Julio 2004.

MWH (2005). "Water Treatment: Principles and Design". Second Edition. John Wiley & Sons Inc. Pp. 250, 342-343, 508-509, 657, 1246.

Natural Resources Canada (2006). "Automotive Battery Recycling". Página en Internet consultada el 26 de Junio del 2006. <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/mms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/rnet/autoarte.htm>

Noyes, Robert (1991). "Handbook of Pollution Control Processes". Chapter 9: "Metal and Cyanide Bearing Waste Streams". Noyes Publications. Pp. 241-242, 273-315.

Secretaría de Economía (2006). "Consulta del Catalogo de Normas Mexicanas (NMX): NMX-AA-034-SCFI-2001". Página en Internet consultada el 25 de Noviembre del 2006. <http://www.economia-nmx.gob.mx/>

Stephenson, Ralph L. & James B. Blackburn (1998). "Industrial Wastewater Systems Handbook". Lewis Publishers. Pp 90-91.

SSA (2006). "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Página en Internet consultada el 27 de Agosto del 2006. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>

Weber, Walter J. Jr. (1972). "Physicochemical Processes for Water Quality Control". John Wiley & Sons Inc. Pp. 74, 330-331 y 363.