

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DEL MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN DEL  
SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO G/D  
JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI (CPJAA)**

**Realizado por:**

***Zulivis María Vívenes Andrade***

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como  
requisito parcial para optar al título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Puerto La Cruz, octubre de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DEL MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN DEL  
SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO G/D  
JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI (CPJAA)**

**ASESORES:**

---

**Ing. Quím. Maria C. Andarcia**  
**Asesor industrial**

---

**Ing. Quím. Héctor Silva, MSc.**  
**Asesor académico**

**Puerto La Cruz, octubre de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DEL MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN DEL  
SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO G/D  
JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI (CPJAA)**

**JURADO:**

---

**Ing. Quím. Héctor Silva, Msc.  
Asesor Académico**

---

**Ing. Quím. Milena Amundarain, Msc.  
Jurado Principal**

---

**Ing. Quím. Luis Moreno  
Jurado Principal**

**Puerto La Cruz, octubre de 2010**

## RESOLUCIÓN

El reglamento de trabajos de grado de la Universidad de Oriente en su artículo 41 establece:

***“Los trabajos de grado son propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”.***



## **DEDICATORIA**

A Dios todo poderoso con sus ángeles y santos,  
A mi madre Marina Andrade, mi mayor orgullo y principal motivación.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por el milagro de la vida y por bendecir mis sueños.

A ti mamá, por ser tan especial y apoyarme incondicionalmente en todos mis proyectos, gracias madre por la gran oportunidad que me brindaste al permitirme estudiar ingeniería química.

A mi padre, Antonio Vívenes, porque en momentos críticos estuvo conmigo y gracias a su apoyo se hizo mucho más ligero el camino.

A mi hermana, Ing. Scarlinis Vívenes, Te agradezco hermana porque has sido la mejor influencia que he tenido en mi vida, gozas de toda mi admiración y de todo mi cariño.

A mis tíos, en especial a Yasmery, Zulma y Alejandro, porque de ellos obtuve las palabras indicadas en el momento adecuado, gracias por todo su cariño.

A Eileen, gracias amiga por compartir conmigo un sueño, ser ingenieros químicos, y por todas las veces que me tendiste tu mano para ayudarme a caminar.

A Laura, por ser una noble y buena amiga, por compartir los últimos semestres de nuestra carrera.

A mis hermanos: Quelin, José Ángel y Guillermo, porque los momentos compartidos siempre estuvieron llenos de humor y de alegría.

A mis amigos Mercedes, Zoraida, Freddy (un ángel de la guarda), Lourdarelys (mi gran consejera), Yolimar, Rosmary, Angelis, Yein, Mariana, Tania, Karla, Maylen, Dariana, Armí, Migdalia, Pancho, María, Krizia, Virginia, Julio, Maricela, Ana María, Nazareth y Asdrubal. Los recuerdo con cariño.

A mis hermanos: Audrey, Francelys y Daniel, gracias por su constante apoyo.

A Lisette, Julio Rafael, Oly e Iván, muchas gracias por su apoyo siempre.

Al Profesor Héctor Silva, por sus orientaciones para el buen desarrollo de este trabajo y por acompañarme en la etapa final de mi pregrado.

A la profesora Milena Amundarain, por todo su apoyo.

Al Profesor Arturo Rodulfo, por formar en todas sus cátedras la consciencia ingenieril.

A todos los profesores y preparadores que participaron en mi formación académica.

A la Universidad de Oriente y a Sabinqui, porque en sus espacios obtuve formación académica y ciudadana.

A Pequiven agradezco la oportunidad brindada.

*Zulivis María Vívenes Andrade*

## RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo con la finalidad de evaluar la capacidad de las lagunas de secado de lodos para la ampliación del sistema de agua industrial y proponer opciones de tecnología de deshidratación de lodos. Se estudió la producción de lodos de las tecnologías de tratamiento de aguas presentes en el CPJAA (Actiflo® y Densadeg®). Por medio de balances de sólidos suspendidos totales (SST) se determinó el caudal de lodos generados por las plantas Densadeg® obteniendo un caudal promedio de 112,08 m<sup>3</sup>/día mientras que para la planta Actiflo® se determinó el caudal a partir de lecturas diarias del contador de lodos obteniendo un valor de 182,33 m<sup>3</sup>/día, para la temporada de invierno. Debido a la ampliación del sistema de agua industrial la producción de lodos se incrementará en un 72,39%. Se realizó una tabla de distribución de sólidos totalmente secos (STS) acumulados en las lagunas a lo largo de un año y se pudo conocer que el sistema de lagunas puede manejar el 42,12 % de la producción de lodos proveniente de la futura ampliación. Se evaluaron las opciones tecnológicas de deshidratación de lodos en el mercado y se empleó una matriz de evaluación a partir de la cual se obtuvo que la mejor opción para deshidratar el excedente de lodos de la ampliación es un filtro prensa de bandas.

## CONTENIDO

<b>RESOLUCIÓN</b> .....	iv
<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vi
<b>RESUMEN</b> .....	viii
<b>CONTENIDO</b> .....	ix
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	iv
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 PEQUIVEN .....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.3.1 Objetivo general .....	5
1.3.2 Objetivos específicos .....	5
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO</b> .....	6
2.1 ANTECEDENTES .....	6
2.2 GENERALIDADES DEL TRATAMIENTO DEL AGUA .....	8
2.2.1 Calidad del agua .....	8
2.2.2 Tratamiento fisicoquímico del agua .....	11
2.3.- PRODUCCIÓN DE AGUA INDUSTRIAL CPJAA .....	20
2.3.1 Tecnología Densadeg® .....	21
2.3.2 Tecnología Actiflo® .....	22
2.4- GENERALIDADES DE LODOS .....	23
2.4.1 Manejo de lodos .....	25
2.4.1.1 Deshidratación de lodos .....	26

2.4.1.2 Destino final del lodo .....	32
2.5 CONCEPTOS BÁSICOS DE SECADO DE SÓLIDOS .....	36
2.6 PROYECTOS DE INGENIERÍA.....	38
2.7 CAPITAL DE INVERSIÓN .....	40
2.7.1 Capital fijo de inversión y capital de trabajo .....	40
2.7.2 Estimación de costos.....	41
2.8 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS.....	42
<b>CAPÍTULO III DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>44</b>
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE MANEJO DE LODOS .....	44
3.1.1 Ubicación.....	44
3.1.2 Descripción del proceso .....	44
3.1.2.1 Sistema de adensamiento Actiflo® .....	45
3.1.2.2 Sistema de adensamiento Densadeg®.....	48
3.1.2.3 Sistema de lagunas de secado de lodos.....	61
3.2 CÁLCULO DEL INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE LODOS DEBIDO A LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL ....	85
3.3 COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN .....	87
3.4 ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE MANEJO DE LODOS.....	89
3.4.1 Tecnologías de deshidratación de lodos hidróxidos .....	90
3.4.2 Aspectos de interés de las tecnologías de deshidratación de lodos hidróxidos.....	90
3.4.3 Equipos básicos asociados a las tecnologías propuestas .....	90
3.4.4 Capital de inversión .....	93
3.4.4.1 Capacidad del equipo.....	93
3.4.4.2 Estimación de costos .....	94
3.4.5 Matriz de valoración .....	97

3.4.5.1 Criterios de evaluación.....	97
3.4.5.2 Metodología para la evaluación de opciones .....	98
3.5 EQUIPOS, MATERIALES, SUSTANCIAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	99
<b>CAPÍTULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS, .....</b>	<b>102</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>102</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE MANEJO DE LODOS .....	102
4.1.1 Producción de lodos .....	102
4.1.2 Capacidad de manejo.....	104
4.2 INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE LODOS DEBIDO A LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL.....	107
4.3 COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN .....	108
4.4 ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE MANEJO DE LODOS.....	111
4.4.1 Selección de tecnología .....	111
4.4.2 Disposición final de lodos .....	113
4.5 CONCLUSIONES .....	114
4.6 RECOMENDACIONES.....	115
BIBLIOGRAFÍA.....	117
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	121

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de sedimentadores según el sentido del flujo (Arboleda, 2000).....	18
Tabla 2.2 Consistencia del lodo en función del porcentaje de humedad (Martinez y col, 2005).....	31
Tabla 2.3 Límites permisibles establecidos en el artículo 50, decreto 2635, para la mezcla suelo/desecho.....	36
Tabla 2.4 Tipos de estimado de costos (Peters y Timmerhaus, 1993).....	41
Tabla 3.1 Datos para calcular valores promedio de caudal entrada y salida de lodo de la planta M-600 para los meses julio y agosto.....	50
Tabla 3.2 Datos para calcular valores promedio de caudal entrada y salida de lodo de la planta M-600 para los meses septiembre y diciembre.....	50
Tabla 3.3 Valores calculados de caudal de entrada, caudal de salida y flujo másico de salida de lodo de la planta M-600 para los meses de julio y agosto.....	51
Tabla 3.4 Valores calculados de caudal de entrada, caudal de salida y flujo másico de salida de lodo de la planta M-600 para los meses de septiembre y diciembre.....	51
Tabla 3.5 Resultados de los flujos másicos y caudales obtenidos a partir del balance de sólidos suspendidos en las plantas Densadeg® a capacidad nominal.....	61
Tabla 3.6 Resultados del envío diario de lodos a las lagunas de secado por parte de las plantas Densadeg® a capacidad nominal.....	61
Tabla 3.7 Datos para el cálculo del $V_1$ a través de progresivas y medias distancias.....	67

Tabla 3.8 Datos para el cálculo del $V_2$ a través de progresivas y medias distancias.....	68
Tabla 3.9 Valores de caudales, flujos másicos y fracciones de STS de los lodos enviados hacia las lagunas de secado a capacidad nominal.....	73
Tabla 3.10 Valores de tiempo de secado obtenidos para distintas humedades y un espesor constante igual a 180 cm.....	80
Tabla 3.11 Datos anuales de los volúmenes de agua de lavado de líneas de extracción y de agua de lluvia recibido por el sistema de lagunas de secado .....	84
Tabla 3.12 Resultados de la producción de lodos de las nuevas plantas .....	86
Tabla 3.13 Valores de $Q_a$ , $Q_n$ y porcentaje de incremento en la producción de lodos para la ampliación.....	87
Tabla 3.14 Valores mensuales de caudales, flujos másicos y fracciones de STS de los lodos enviados hacia las lagunas de secado para la ampliación .....	88
Tabla 3.15 Distribución mensual de STS enviados al sistema de lagunas de secado para la ampliación.....	88
Tabla 3.16 Valores de caudales, flujos másicos y fracciones de STS de los lodos enviados hacia las lagunas de secado de lodos por meses adicionando dos (02) plantas 400.....	89
Tabla 3.17 Aspectos de interés del filtro prensa de placas y marcos.....	92
Tabla 3.18 Aspectos de interés de una centrifugadora de tazón sólido.....	92
Tabla 3.19 Aspectos de interés del filtro prensa de bandas.....	93
Tabla 3.20 Costos de filtro prensa de placas y marcos.....	95
Tabla 3.21 Costos de una centrifugadora de tazón sólido.....	95
Tabla 3.22 Costos de un filtro prensa de bandas.....	95

Tabla 3.23 Porcentajes en base al costo del equipo entregado para estimar el capital de inversión de plantas procesadoras de sólidos y líquidos (Peters & Timmerhaus, 1993).....	96
Tabla 4.1 Valores de los volúmenes efectivos ( $V_1$ y $V_2$ ) y volumen total del sistema de las lagunas de secado de lodos.....	105
Tabla 4.2 Distribución mensual de STS enviados al sistema de lagunas de secado de lodos cuando el sistema de agua industrial opera a capacidad nominal.....	106
Tabla 4.3 Distribución mensual de STS enviados al sistema de lagunas de secado adicionando dos (02) plantas 400.....	110

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Proceso de Coagulación.....	13
Figura 2.2 Aplicaciones de los polielectrolitos en tratamiento de aguas (Arboleda, 2000).....	15
Figura 2.3. Sedimentador de flujo ascendente con espesador de lodos (Nalco, 1989).....	19
Figura 2.4 Tratamiento de agua tecnología Densadeg®.....	22
Figura 2.5 Tratamiento de agua tecnología Actiflo®.....	23
Figura 2.6 Proceso de deshidratación de lodos CPJAA.....	28
Figura 2.7 Centrifugadora de tazón sólido (Nalco, 1989).....	29
Figura 2.8 Filtro prensa de placas y marcos (Garcés y col, 1996).....	29
Figura 2.9 Filtro prensa de bandas (Garcés y col, 1996).....	30
Figura 3.1 Diagrama para el balance de sólidos suspendidos en la planta D-300.....	53
Figura 3.2 Diagrama del filtro Densadeg® 400lps (D-200).....	59
Figura 3.3 Laguna de secado de lodos.....	62
Figura 3.4 División en secciones progresivas de una laguna de secado de lodos (generado en AutoCAD 2009).....	65
Figura 3.5 Área empleada en el cálculo del volumen de una laguna de secado de lodos.....	66
Figura 3.6 Cilindros de secado.....	80
Figura 3.7 Secado de lodo.....	76
Figura 3.8 Vista superior de TQ-1801.....	81
Figura 3.9 Vista superior de la Tubería.....	81
Figura 3.10 Vista de las bombas 1800 A/B.....	81
Figura 3.11 Descarga de lodos en una laguna de secado.....	84

Figura 3.12 Proceso de deshidratación mecánica.....	91
Figura 4.1 Variación mensual de SST en EBP-1 para el año 2008.....	102
Figura 4.2 Caudales de lodos generados por Densadeg® y Actiflo®.....	103
Figura 4.3 Distribución porcentual del aporte mensual (enero-julio) de STS para el llenado de una laguna de lodos.....	106
Figura 4.4 Diferencia entre la producción nominal de lodos en la actualidad y la producción para ampliación.....	108
Figura 4.5 Representación porcentual de la disponibilidad del sistema de lagunas de secado.....	108
Figura 4.6 Propuesta para el tratamiento del excedente de lodos de la ampliación.....	110
Figura 4.7 Resultados de la matriz de evaluación de tecnologías.....	114

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 PEQUIVEN**

Pequiven, Petroquímica de Venezuela, S.A, es la corporación del estado venezolano encargada de producir y comercializar productos petroquímicos fundamentales con prioridad hacia el mercado nacional y con capacidad de exportación. Fue creada en 1977 asumiendo las operaciones del Instituto Venezolano de Petroquímica (IVP) fundado en 1955 y por decreto presidencial en el año 2005 Pequiven pasó a ser corporación petroquímica de Venezuela independiente de PDVSA adscrita al Ministerio de Energía y Petróleo.

La empresa propicia la creación de empresas mixtas y de producción social (EPS), estimula el desarrollo agrícola e industrial de las cadenas productivas y promueve el equilibrio social con alta sensibilidad comunitaria y ecológica. Cuenta con tres unidades de negocios: olefinas y plásticos, fertilizantes y productos industriales. Genera y comercializa más de 40 productos petroquímicos para el mercado nacional e internacional cubriendo la gama de productos básicos, productos intermedios y algunos destinados al consumidor final. Su visión internacional del negocio y la vinculación con importantes socios en la conformación de las empresas mixtas en las que participa le ha permitido consolidar una importante presencia tanto en los mercados de la región como en otras partes del mundo.

Con un aprovechamiento óptimo de las reservas de gas del país, Pequiven persigue convertir a Venezuela en una potencia petroquímica mundial y de esta manera impulsar su desarrollo. La empresa tiene previsto desarrollar alrededor de 87 proyectos entre los años 2010, 2013, 2014 hasta el 2021, dichos proyectos contemplan la expansión de las

plantas petroquímicas existentes así como la instalación de nuevas plantas.

Dentro de la estructura organizativa de Pequiven se hallan la gerencia de producción, gerencia de comercialización y gerencia de proyectos, que involucran los tres complejos petroquímicos del país: Ana María Campos, Morón y G/D José Antonio Anzoátegui (CPJAA), ubicados en los estados Zulia, Carabobo y Anzoátegui, respectivamente. La gerencia de proyectos de Pequiven Jose-Güiria se localiza en el CPJAA, en la autopista Rómulo Betancourt, lugar que con una superficie de 740 hectáreas aloja a las empresas mixtas en las cuales Pequiven tiene participación accionaria.

La gerencia de proyectos tiene como objetivo contribuir en la transformación del modelo productivo nacional mediante la ejecución de proyectos destinados a satisfacer las grandes necesidades de la población. Actualmente se encuentran impulsando los proyectos de las nuevas plantas que se instalarán en el CPJAA así como el proyecto de infraestructura y servicios que contempla la ampliación del sistema de agua industrial.

El CPJAA sirve de condominio a las empresas mixtas que hacen vida en él, suministrándole los servicios básicos para su operación. El desarrollo petrolero y petroquímico que viene experimentando el país en las últimas décadas ha generado un incremento en la demanda de servicios industriales, razón por la cual en 1999 Pequiven en alianza estratégica con la compañía Tyco Group pone en marcha Aguas Industriales de Jose, una empresa destinada a la construcción, operación, mantenimiento y suministro del sistema de tratamiento de agua industrial, agua potable, aguas servidas y sistema de agua contra incendios.

Inicialmente Pequiven manejó una producción de 300 lps de agua industrial, Aguas industriales de Jose incrementó la capacidad del sistema de agua industrial a 1300 lps con la incorporación de una planta de tratamiento de agua tecnología Densadeg® y una planta de tecnología

Actiflo®, cada una con una capacidad nominal de producción de 400 y 600 lps respectivamente. La creciente demanda de agua industrial del CPJAA hizo necesaria una tercera ampliación del sistema que lo llevó a manejar 1600 lps de capacidad nominal. En el año 2006 Aguas industriales de Jose deja de ser empresa mixta y pasa a ser Pequiven, a partir de entonces la corporación petroquímica asumió todas las labores que venía desempeñando la empresa en el complejo.

El sistema de agua industrial del CPJAA opera para suplir la demanda establecida en contrato por Pequiven y sus clientes. Para el 2009 dicho sistema suministró agua industrial y potable a las siguientes empresas: Fertinitro, Metor I y II, Supermetanol, Petropiar, Petrocedeño, Petromonagas, Petroanzoátegui, Sinovensa, PDVSA fraccionamiento gas, TAEJ (Terminal de almacenamiento y embarque Jose), Bitor, así como a las dependencias de la corporación (muelle petroquímico, edificio administrativo, condominio parcela sur, servicios generales).

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La ampliación del sistema de agua industrial persigue abastecer la demanda futura del líquido que se verá incrementada por las nuevas plantas que operarán en el CPJAA. Actualmente se tiene una capacidad de agua industrial instalada de 1600 lps (aunque la producción es de 1330 lps) y para cubrir la demanda futura se requiere ampliar el sistema de tratamiento de agua industrial de manera que tenga una capacidad instalada de 3500 lps.

El sistema de agua industrial dispone de cuatro plantas, tres de ellas de tecnología Densadeg® y una de tecnología Actiflo®. Las plantas de tecnología Densadeg® son: D-100, D-200 y D-300. La D-200 tiene una capacidad instalada de agua tratada de 400 lps mientras que las plantas

D-100 y D-300 tienen una capacidad de 300 lps cada una. La planta de tecnología Actiflo®, es la M-600, que tiene una capacidad de 600 lps.

El agua tratada es enviada a un tanque de contacto para luego pasar al sistema de agua potable y a los tanques de almacenamiento del líquido que abastecen a las diferentes empresas mixtas del complejo. Las plantas de tratamiento de agua generan lodos, una fracción de ellos es recirculada al proceso (tecnología Densadeg®) y el resto enviado a las lagunas de secado de lodos.

Actualmente se disponen de cuatro lagunas de secado (estas se encuentran a condiciones ambientales), cada una con una capacidad nominal de 3000 m<sup>3</sup>. Los lodos que salen de las cuatro plantas son enviados a una laguna común y cuando esta completa su llenado, se pone en secado y empieza el llenado de otra laguna que se halle en espera.

La cantidad de lodos que produce cada módulo depende de las estaciones del año (invierno, verano) por lo que la tasa de producción es variable y también la composición de los mismos. Las plantas de tecnología Densadeg® envían lodos por turnos a las lagunas de secado, mientras que la M-600 envía lodos continuamente. Se desconocen con exactitud la cantidad de lodo y el tiempo de llenado de las lagunas, lo que dificulta el manejo óptimo del sistema. Según datos de la empresa el lodo tarda alrededor de 4 meses en secarse para luego ser recogido de forma manual por cuadrillas de obreros y dispuesto como abono en los alrededores del complejo. El tiempo de secado del lodo no ha sido determinado, la extracción de lodos de la laguna depende del juicio de los operadores.

La ampliación del sistema de tratamiento de agua industrial comprende la incorporación de cinco (05) plantas de tratamiento tecnología Densadeg®, lo cual aumentará la producción de lodos por lo que es necesario buscar opciones para su manejo. Lo anterior justifica la realización de este trabajo que evaluará el sistema de manejo de lodos

actual, con miras a satisfacer los nuevos requerimientos. Para ello se caracterizará el sistema, se hará uso de los documentos de diseño, la producción de lodo actual y futura será estimada por medio de balances de sólidos y para estimar el tiempo de secado se realizarán ensayos a condiciones ambientales. Finalmente se consultarán en el mercado tecnologías para el manejo de lodos y se valorarán con el objeto de proponer la mejor opción económica para Pequiven en armonía con el ambiente.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar el manejo de lodos para la ampliación del sistema de agua industrial del Complejo Petroquímico G/D José Antonio Anzoátegui.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Caracterizar el sistema actual de manejo de lodos.
2. Calcular el incremento en la producción de lodos debido a la futura ampliación del sistema de agua industrial.
3. Comprobar si la capacidad actual del sistema de manejo de lodos se adapta a los requerimientos producto de la ampliación.
4. Estudiar opciones de tecnologías para el manejo de lodos que se ajusten a los nuevos requerimientos del sistema.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

Sánchez (2009) determinó el volumen diario de extracción de lodos de los sedimentadores de una planta potabilizadora, para tal fin, realizó ensayos a partir de los cuales pudo conocer el caudal de extracción de las tuberías de los sedimentadores. Haciendo uso del tiempo de extracción y del caudal calculó el volumen diario de extracción de lodos. El objetivo de Sánchez fue determinar la cantidad de agua de las descargas de lodos que podría ser reutilizada en el proceso.

Inojosa (2004) trabajó en la determinación de la calidad fisicoquímica de los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales, en dicho estudio calculó la producción de lodos de la planta y determinó su composición mediante análisis fisicoquímicos con la finalidad de darle la mejor disposición en concordancia con las leyes ambientales venezolanas.

Pino (2003) estudió la influencia de la aplicación de coagulantes primarios en las operaciones unitarias de las plantas de potabilización El Rincón y José Antonio Anzoátegui, cuya fuente de alimentación es el agua del río Neverí. Pino pudo notar que la remoción de color y turbiedad en las operaciones unitarias de sedimentación y filtración fue mayor en la época de lluvia que en la época de sequía. Llevó a cabo pruebas de jarras y determinó la eficiencia del proceso de clarificación utilizando dos tipos de coagulantes, observó que la coagulación se veía afectada principalmente por el pH y la temperatura del agua. Determinó la cantidad de lodo generado para los distintos coagulantes estudiados y pudo demostrar los beneficios de sustituir

el sulfato de aluminio por policloruros de aluminio en la coagulación del agua.

Reyes (2003) en su evaluación técnico-económica de los clarificadores Actiflo® ubicados en el CPJAA, realizó una caracterización del agua procesada, tomando lecturas diarias de pH, color, turbidez y sólidos suspendidos, con el fin de determinar la eficiencia de la tecnología en el tratamiento de agua cruda y seleccionar la mejor opción tecnológica para la tercera ampliación del sistema de agua industrial del CPJAA.

Sandoval y col (1998) debido a la problemática de la generación de los lodos de las plantas potabilizadoras en México, estudiaron el acondicionamiento de los lodos por acidificación como alternativa para disminuir su volumen y facilitar su disposición final. Los investigadores encontraron que el volumen de dichos lodos generalmente representa del 0,3 al 1 % del agua tratada, poseen una gran cantidad de agua y su capacidad de deshidratación es baja, en especial aquellos lodos que son generados a partir de la coagulación con sulfato de aluminio. En el estudio demostraron que por medio de la acidificación es posible disminuir el volumen de lodos en un 91 %, teniendo como ventaja adicional la recuperación de cerca del 90 % del coagulante empleado en el tratamiento del agua cruda.

Corpoven S.A (1986) llevó a cabo un estudio de opciones para el manejo de los lodos del sistema de agua industrial del CPJAA. La descarga al mar, recuperación de cal, lagunas y lechos de secado, fueron las opciones evaluadas. De acuerdo con este trabajo, para aquel momento la disponibilidad de terreno y las condiciones ambientales de la zona favorecían el uso de un sistema combinado de lagunas y lechos de secado para deshidratar el lodo, por lo cual dicha opción fue seleccionada como la más conveniente y económica para Pequiven.

## 2.2 GENERALIDADES DEL TRATAMIENTO DEL AGUA

### 2.2.1 Calidad del agua

La calidad del agua está determinada por las características físicas, químicas y biológicas del agua que permiten darle un uso adecuado. El agua tal y como se encuentra en las fuentes naturales, difícilmente cumple con las especificaciones de calidad requeridas para uso doméstico o industrial, por ello es necesario someterla a un proceso de tratamiento que permita su adecuación. Algunos parámetros importantes de la calidad del agua, serán referidos a continuación:

- **Alcalinidad total:** es una medida de los constituyentes básicos (alcalinos) del agua. En las aguas naturales la alcalinidad usualmente se presenta en forma de carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio. Dentro de los límites razonables no tiene importancia sanitaria pero interfiere en los procesos coagulación del agua y las sustancias que constituyen este parámetro son las responsables de problemas de desgaste, incrustación y obstrucción en equipos y tuberías de procesos. se expresa en mg/l ( $\text{CaCO}_3$ ) (Rodier, 1987).
- **Color:** es generado por sustancias húmicas la mayoría de las veces provenientes de la degradación de materia orgánica. Los sólidos responsables de este parámetro son coloidales de dimensiones muy cercanas a sólidos disueltos. En la práctica se determinan el color aparente y color real. El primero es determinado a partir de una muestra de agua turbia, el segundo a una muestra libre de turbidez (Arboleda, 2000).

- **Conductividad:** es indicativo de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Depende de la existencia en el agua de sales solubles, presentes en forma de iones, de su concentración, movilidad, estado de valencia y de la temperatura a la cual se hace la medición (Arboleda, 2000).

- **Dureza:** corresponde a la suma de las concentraciones de cationes metálicos con la excepción de los metales alcalinos y del ión hidrógeno. El calcio y el magnesio son los principales constituyentes de la dureza de las aguas y la suma de ambas es lo que se conoce como dureza total, se expresa como carbonato de calcio mg/l ( $\text{CaCO}_3$ ) (Rodier, 1987).

- **pH:** matemáticamente se representa como el logaritmo de la concentración de hidrógeno. Valores de pH por debajo de siete corresponden a aguas de carácter ácido y por encima de ese valor las aguas tienen carácter básico. Las variaciones de pH afecta el tratamiento fisicoquímico del agua y la calidad del efluente a obtener. Un agua ácida o agresiva genera múltiples problemas de corrosión en los equipos de procesos (Arboleda, 2000).

- **Sólidos disueltos:** residuo filtrable total obtenido a partir del secado de un volumen de filtrado en una estufa a una temperatura de 180 °C, se expresa en mg/l (APHA & col, 2005).

- **Sólidos suspendidos:** es una medida de los sólidos sedimentables (no disueltos) que pueden ser retenidos en un filtro, se pueden determinar pesando el residuo que queda en el filtro después de secado (APHA & col, 2005).

- **Sólidos totales:** concentración de sólidos en una muestra. Se determina sometiendo un volumen de agua a secado en una estufa a temperaturas comprendidas entre 103 a 105 °C hasta peso constante. se expresa en mg/l (APHA y col, 2005).
- **Turbidez:** es la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, puede deberse a partículas de arcilla provenientes de la erosión de suelo, a algas o a crecimientos bacterianos. Aunque principalmente se debe a arcillas en dispersión, la unidad de este parámetro es NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez) (Arboleda, 2000).

Para la industria, así como para la vida, es indispensable el agua. Son muchos los usos que puede dársele, como por ejemplo: agua para procesos de enfriamiento, producción de vapor, agua de lavado, por mencionar algunos. Los problemas asociados al uso de agua en procesos industriales radican en las sustancias que se encuentran en ella, y que pueden generar problemas de incrustaciones y corrosión en las tuberías y equipos de procesos. El tratamiento aplicado al agua cruda para acondicionarla como agua industrial busca la producción de un tipo de agua que cumpla con especificaciones de calidad que permitan disminuir los problemas asociados a su uso en las plantas.

No existe una normativa general que especifique los valores aceptables de las variables de calidad del agua industrial, sin embargo en el caso particular del CPJAA los valores aceptables, fueron establecidos en contrato por Pequiven y sus clientes. Los valores se encuentran alrededor de los mostrados en la tabla A.1 (anexo A).

### **2.2.2 Tratamiento fisicoquímico del agua**

Varía según las características de la fuente. Sin embargo, a continuación se describirán las etapas que constituyen el tratamiento convencional que se le da a las aguas destinadas al uso industrial y de consumo humano:

**a. Cloración:** el poder oxidante del cloro para eliminar y controlar compuestos o sustancias indeseables en el agua y su efectividad en el control microbiológico de bacterias, virus, hongos y esporas hace que la adición de cloro sea una etapa importante en el tratamiento del agua cruda. La cloración permite la adecuación del agua para las siguientes etapas del tratamiento. Los efectos de la cloración en el agua son los siguientes (Lipesa, 1998):

- Control microbiológico.
- Desinfección.
- Oxidación del hierro y manganeso.
- Oxidación del sulfuro de hidrógeno.
- Remoción de amoníaco y compuestos orgánicos nitrogenados.
- Remoción de color.
- Destrucción de materia orgánica.
- Control del sabor y color

**b. Coagulación-floculación:** en línea general comprenden dos procesos distintos sin embargo en este apartado se describirán ambos procesos por ser determinantes para la separación de sólidos del agua. La coagulación es la desestabilización de las partículas suspendidas producida por la compresión de las dobles capas eléctricas que las rodean. Comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones

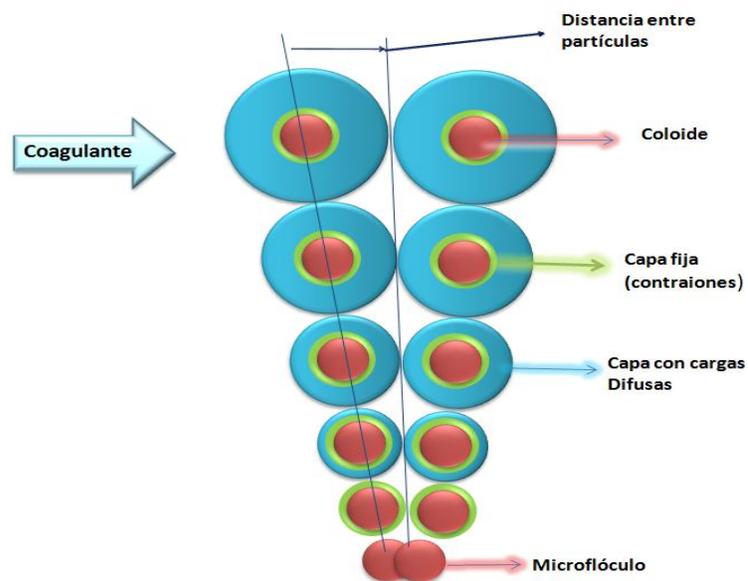
físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. Mientras que la floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras incrementando su peso. La ocurrencia de estos procesos permite la formación de masas con peso específico superior al del agua llamadas flóculos.

La coagulación y floculación permiten: remover la turbidez orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente, remoción de color verdadero y aparente, eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación, destrucción de algas y plancton en general así como la eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos, precipitados químicos y suspendidos orgánicos entre otros (Arboleda, 2000). A continuación se ampliarán algunos aspectos que son importantes para la comprensión del proceso de coagulación:

- **Teoría de la coagulación del agua:** los coloides presentes en el agua tienen carga superficial negativa. En el medio de dispersión la estabilidad de los coloides se debe a la doble capa eléctrica que los rodea y al potencial Z, potencial en el plano de cizalla que separa al coloide del resto de la dispersión. Introduciendo contraiones se logra neutralizar cargas, reducir el potencial Z y desestabilizar el coloide de forma que pueda agruparse con el resto de las partículas, mientras más fuerte sea la carga del contraión más rápidamente se neutraliza la partícula. La adsorción de moléculas poliméricas en la superficie de los coloides es otro mecanismo para llevar a cabo la coagulación. Es común que en la práctica se empleen sales minerales y coagulantes poliméricos para llevar a cabo el proceso, usando polímeros se logra reducir las cantidades de sales minerales que

regularmente se necesitarían para lograr una coagulación eficiente. La figura 2.1 representa el proceso de coagulación por adsorción y neutralización de cargas (Arboleda, 2000).

- **Factores que afectan la coagulación:** los principales factores que afectan el proceso de coagulación son (Arboleda, 2000):
  - Dosis de coagulantes.
  - Concentración coloides responsables de turbidez.
  - Color o concentración de sustancias orgánicas en el agua.
  - pH.
  - Intensidad de la mezcla rápida y gradiente de velocidad de la mezcla lenta.
  - Temperatura.
  - Movilidad electroforética de las partículas.
  - Aniones y cationes presentes en el agua.

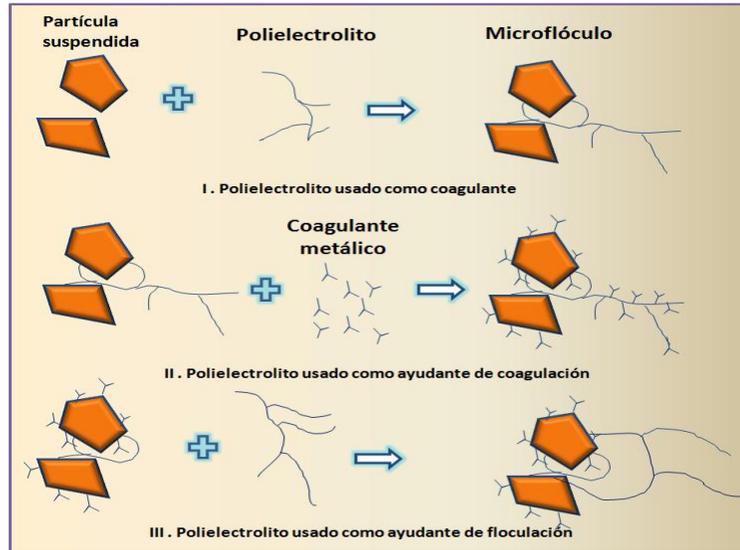


**Figura 2.1 Proceso de Coagulación.**

- **Coagulantes:** pueden ser clasificados en dos grupos: polielectrolitos (ayudantes de coagulación) y coagulantes metálicos (sales de hierro, aluminio y compuestos varios). Los polielectrolitos pueden ser naturales o sintéticos, iónicos o no iónicos. Se emplean de tres formas: como coagulantes, como ayudantes de coagulación y como ayudantes de floculación.

Su uso como coagulantes es limitado, ya que requiere grandes cantidades de sustancia para poder lograr una coagulación eficiente. Como ayudantes de coagulación son aplicados antes que los coagulantes minerales y compiten con los productos de la hidrólisis de sales de hierro y aluminio por los sitios de adsorción del coloide restándole eficiencia al proceso, de tal forma que no todos los polielectrolitos son adecuados para ser empleados como ayudantes de coagulación, los más propensos a generar este tipo de dificultades son los aniónicos y los no iónicos, sin embargo una buena selección del polielectrolitos permitirá una reducción en las cantidades de coagulantes minerales a utilizar. Por último, como ayudantes de floculación, una vez formados los microfloculos, intervienen reforzando las uniones y aumentan el número de partículas que conforman los flóculos, ver figura 2.2 (Arboleda, 2000).

- **Coagulación con sales de aluminio:** las más conocidas son el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal y cloruro de polialuminio. El sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) suele formar flóculos pesados, lo que favorece el proceso de separación sólido-líquido. Gracias a su bajo costo y manejo relativamente sencillo, es frecuente su uso en plantas potabilizadoras, se comercializa en estado sólido o líquido. Cuando se encuentra en solución se halla hidrolizado de la siguiente manera:

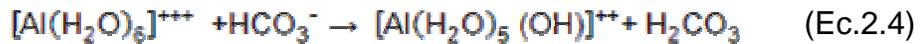


**Figura 2.2 Aplicaciones de los polielectrolitos en tratamiento de aguas (Arboleda, 2000).**

El producto de la hidrólisis  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++}$  se comporta como ácido en sentido de Brönsted (donador de protones) reaccionando con las bases que se encuentran en el agua de la siguiente manera (Arboleda, 2000):

**- Reacciones con la alcalinidad**

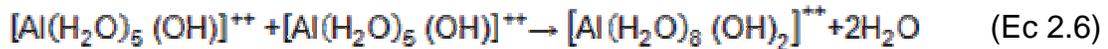




El producto de estas reacciones ( $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{++}$ ) es un compuesto inestable que se hidroliza rápidamente reemplazando un  $\text{H}_2\text{O}$  por un  $\text{OH}$  de la siguiente manera:



El producto final es un hidróxido de aluminio que precipita a ciertos pH y que puede tener carga negativa o no tenerla  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ . Las especies monoméricas, en este caso las que contienen un solo ión aluminio, se polimerizan reaccionando entre sí:



#### - Reacciones con el agua

Las reacciones con el agua se llevarán a cabo cuando la alcalinidad se consume (si llega a consumirse) de la siguiente manera:



Tanto para la reacción con la alcalinidad como para la reacción que tienen los iones aluminio hidratados con el agua, se llevan a cabo las mismas reacciones de polimerización que originarán  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ,  $(\text{H}_2\text{O}_3)$  como producto final según el pH. Para la operación del proceso de coagulación es muy importante comprender la relación entre dosis de coagulantes, pH y concentración de coloides, junto con las varias formas de desestabilización

de coloides. La tabla B.1 (anexo B) muestra una clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación.

**c. Sedimentación:** es la separación de los flóculos del agua por efecto de la gravedad, el objetivo de esta etapa es clarificar el agua que posteriormente será enviada a los filtros. Para que el proceso de sedimentación sea eficiente los flóculos deben de tener peso y tamaño suficiente para que decanten con facilidad. De acuerdo a las características de los sólidos en suspensión se pueden definir cuatro tipos de sedimentación:

- **Sedimentación tipo I:** este tipo de sedimentación aplica para soluciones de bajas concentraciones de suspendidos, en ellas se idealizan las partículas como discretas y aisladas; es decir, de tamaño, densidad y forma invariable durante su descenso. En este caso no hay interacción entre las partículas y entre las partículas y el resto del fluido, lo que ocurre en desarenadores y presedimentadores, por ejemplo (Arboleda, 2000).

- **Sedimentación tipo II:** se da en aguas con partículas aglomerables que al descender se aglutinan entre sí cambiando de tamaño, forma y peso específico durante la caída, como es el caso de los decantadores horizontales o de placas en los cuales las partículas forman agregados de mayor tamaño (Arboleda, 2000).

- **Sedimentación tipo III:** se lleva a cabo en soluciones de concentración intermedia, las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables. Esto ocurre, por ejemplo,

en la deposición de lodos en los decantadores de flujo ascendente (Arboleda, 2000).

- **Sedimentación tipo IV:** la compactación de lodos en el fondo de los sedimentadores es un ejemplo de este tipo de sedimentación, el proceso ocurre por la alta concentración de sólidos y el tiempo retención en las unidades de sedimentación, las partículas se agrupan y forman estructuras modificables a lo largo del tiempo (Arboleda, 2000).

El proceso se lleva a cabo en unidades denominadas sedimentadores o decantadores. Según el sentido del flujo los sedimentadores se clasifican de acuerdo al siguiente cuadro:

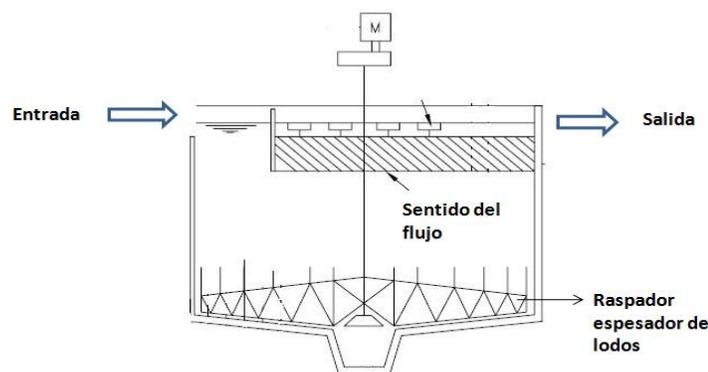
**Tabla 2.1 Tipos de sedimentadores según el sentido del flujo (Arboleda, 2000)**

Sentido del flujo	Tipo de sedimentación	Ejemplo	Rata de flujo m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . d
Horizontal	I y II	Desarenadores	200-420
			15-30
Vertical	II y III	Manto de lodos	45-60
Inclinado (ascendente o descendente)	I y II	Decantadores con módulos o placas	120-180

Las plantas de tratamiento del sistema de agua industrial del CPJAA, las cuales se describen en otro apartado de este trabajo (2.3.1 y 2.3.2), cuentan con un clarificador (sedimentador) de flujo inclinado ascendente. Estas unidades poseen un paquete o módulo de láminas en su interior (arreglo lamelar), con grados de inclinación de lamelas (láminas que

conforman el paquete) de 45° o 60°. Este arreglo aumenta la eficiencia del equipo y facilita la autolimpieza de las lamelas, pues los sólidos que decantan sobre ellas se deslizan y descienden a la zona de retención de sólidos al mismo tiempo que el agua liberada como consecuencia de la sedimentación tiende a subir rápidamente hacia la parte superior del módulo. La decantación que se lleva a cabo en estas unidades es conocida como decantación acelerada. (figura 2.3).

**d.- Filtración:** el agua que sale del sedimentador es sometida a un proceso de filtración para remover los sólidos que no sedimentaron. Se hace pasar a través de un medio poroso que puede estar conformado por arena, antracita, grava y otros materiales granulares. El efluente de clarificación es el influente de filtración, por lo tanto un proceso adecuado de sedimentación promueve la eficiencia del proceso siguiente. Esta etapa del tratamiento permite obtener valores de turbidez de hasta menos de 1 NTU .Normalmente es necesario someter el agua clarificada al proceso de filtración para que pueda cumplir con los parámetros de calidad (Lipesa, 1998).



**Figura 2.3. Sedimentador de flujo ascendente con espesador de lodos (Nalco, 1989).**

### **2.3.- PRODUCCIÓN DE AGUA INDUSTRIAL CPJAA**

El agua de alimentación del proceso se obtiene del río Neverí, clasifica como un aguatipto I subtipo B, de acuerdo con las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos, contempladas en el decreto 883 de la legislación venezolana. El proceso se inicia en la estación de bombeo “Las Parchitas”, ubicada en el barrio Mallorquín I de la ciudad de Barcelona. Dicha estación succiona agua del río para enviarla por medio de una tubería a las lagunas de agua cruda ubicadas en el CPJAA. La estación de bombeo de producción uno (EBP-1) succiona el agua de las lagunas y las envía a la entrada de las plantas de tratamiento con una adición de cloro previa.

Actualmente el sistema de agua industrial cuenta con cuatro plantas, tres de ellas tecnología Densadeg® y una de tecnología Actiflo®. Las plantas de tratamiento que pertenecen a la tecnología Densadeg® son la D-100, D-200 y D-300, con capacidades de 300 lps, 400 lps y 300 lps, respectivamente. Por otro lado la planta Actiflo® tiene una capacidad nominal de 600 lps, está constituida por dos módulos de tratamiento de 300 lps cada uno.

El agua que sale de las plantas de tratamiento va a dos tanques de contacto donde se lleva a cabo la post-cloración y la adición de un inhibidor de corrosión para luego pasar a las fosas de concreto donde es succionada por la estación de bombeo de producción dos (EBP-2) que envía el agua industrial a los tanques de almacenamiento y una fracción al sistema de agua potable (la calidad de agua potable se logra con una dosificación de cloro adicional que no requiere el agua industrial). La estación de bombeo de producción tres (EBP-3) se alimenta del agua de los tanques para descargarla en la red de distribución que abastece de agua industrial a Pequiven y sus clientes.

El CPJAA se encuentra en expansión, razón por la cual se incrementará la producción del sistema de agua industrial. La ampliación busca llevar la capacidad instalada de 1600 lps (actual) a 3500 lps para suplir la demanda futura. (En la figura A.1, anexo A, se halla el diagrama de bloques del proceso de producción de agua industrial).

### **2.3.1 Tecnología Densadeg®**

El agua preclorada antes de entrar a la planta recibe la adición en línea de los coagulantes y pasa al tanque de floculación donde es acondicionada con floculantes. La floculación genera partículas en suspensión de gran tamaño (flóculos) con altas tasas de sedimentación. La tecnología Densadeg® se caracteriza por aumentar el tamaño de los flóculos recirculando lodos al compartimiento de floculación. El agua floculada pasa al clarificador, donde los flóculos decantan y se concentran en el fondo del compartimiento (lodos) hasta que alcance una concentración de sólidos suspendidos de aproximadamente 800 veces la concentración del agua cruda, a caudal nominal. Transcurrido ese tiempo el lodo está listo para ser extraído y enviado a las lagunas de secado de lodos.

El agua clarificada pasa a los filtros donde son removidos los sólidos pequeños que no pudieron ser retirados en la sedimentación. Cada planta de Densadeg® dispone de dos filtros de arena de lavado continuo, el agua ingresa a ellos por gravedad y luego es enviada al tanque de contacto donde se lleva a cabo la última etapa del proceso, la postcloración. El agua de lavado de los filtros va a los tanques de agua de lavado para luego ser recirculada a la entrada de la planta. En la figura 2.4 se observa el proceso de tratamiento de agua Densadeg®.

### 2.3.2 Tecnología Actiflo®

El proceso de tratamiento Actiflo® se inicia cuando el agua preclorada ingresa al compartimiento de coagulación donde se dosifican los coagulantes. Luego en el tanque de inyección el agua entra en contacto con el floculante y la microarena, el polímero floculante activa la superficie de la microarena de manera que esta sirva como soporte para los sólidos suspendidos y se formen flóculos de gran tamaño.

En el tanque de maduración los flóculos aumentan su masa de tal forma que en el clarificador puedan ser separados del agua por sedimentación. Los flóculos que se concentran en el fondo constituyen el lodo. El lodo es recogido por un brazo mecánico y empujado hacia el centro del compartimiento donde las bombas lo extraen y envían al hidrociclón que separa el lodo de la microarena. La microarena es recirculada al proceso y el lodo es enviado al adensador, que genera un lodo mucho más concentrado.

El lodo adensado es enviado a las lagunas de secado. El agua clarificada va a los filtros. En los filtros se remueven los sólidos pequeños que no sedimentaron. El agua filtrada entra a un tanque de contacto en el cual se lleva a cabo la postcloración y luego es almacenada y distribuida a los clientes. En la figura 2.5 se observa el proceso de tratamiento de la planta Actiflo®.

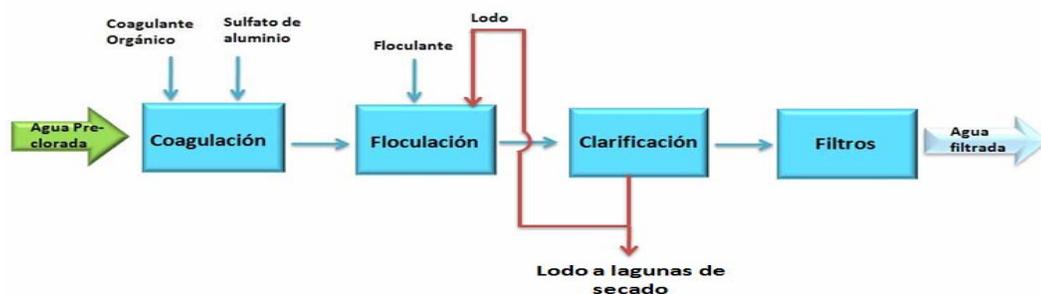


Figura 2.4 Tratamiento de agua tecnología Densadeg®.

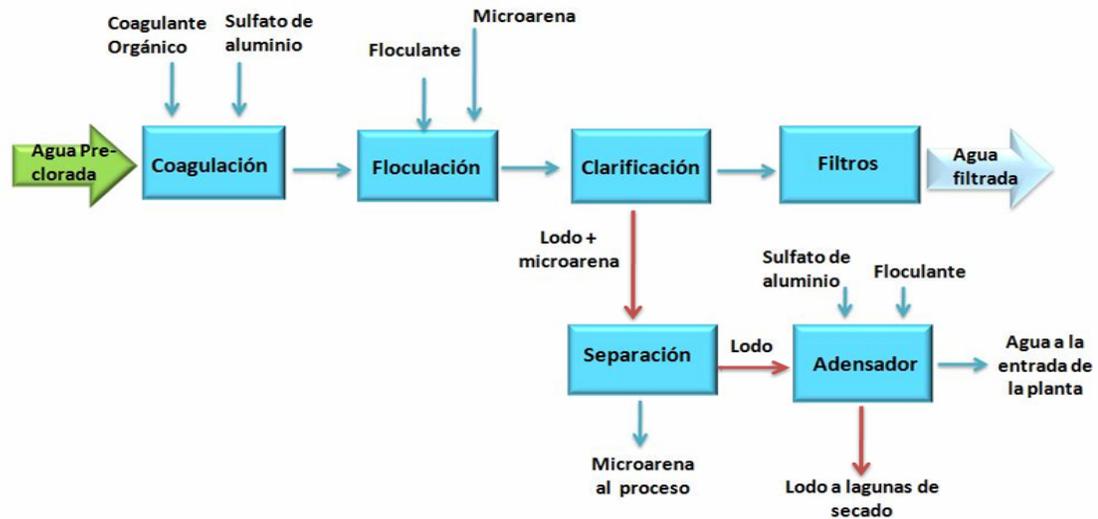


Figura 2.5 Tratamiento de agua tecnología Actiflo®.

## 2.4- GENERALIDADES DE LODOS

Los sólidos y los productos de sus reacciones que son retirados de la fase líquida en cualquier tratamiento de agua, cualquiera que sea su naturaleza, se reúnen finalmente en suspensiones más o menos concentradas denominadas “lodos”. Una clasificación de los lodos en función de su materia constitutiva proporciona una clara idea de la importancia de la caracterización del lodo para la correcta selección del tratamiento (Degremont, 1979):

- **Clase orgánica hidrófila:** son lodos que presentan alta dificultad de deshidratación debido a la presencia de una fracción importante de coloides hidrófilos. Entran dentro de esta categoría todos los tipos cuyo contenido en materias volátiles puede alcanzar hasta 90% de la

totalidad de las materias secas (aguas residuales de industrias alimentarias, por ejemplo). En estos lodos pueden encontrarse presentes hidróxidos de carácter hidrófilo, tales como hidróxidos de hierro o de aluminio, procedentes de floculantes minerales utilizados en el proceso de depuración del agua. Estos lodos orgánicos requieren un acondicionamiento antes de su deshidratación mecánica.

- **Clase mineral hidrófila:** estos lodos contienen hidróxidos metálicos formados en los procesos físico-químicos por precipitación de iones metálicos presentes en el agua a tratar (Al, Fe, Zn, Cr.) o debidos al empleo de floculantes minerales (sales ferrosas o férricas, sales de aluminio).

- **Clase aceitosa:** se caracteriza por la presencia de cantidades de aceite o grasas minerales (o animales), incluso pequeñas. Estos aceites se encuentran por emulsión o adsorbidos por las partículas hidrófilas o hidrófobas. Puede contener una fracción de lodo biológico, en caso de tratamiento final por lodos activados.

- **Clase mineral hidrófoba:** se caracterizan por una gran proporción de materias con un contenido de agua pequeño o nulo (arena, limo, escoria, cascarilla, sales cristalizadas). La deshidratación de este tipo de lodos que en principio no presenta dificultad, puede verse perturbada por la presencia de materia mineral hidrófila, procedente de floculantes utilizados en el proceso de tratamiento de agua.

- **Clase fibrosa:** estos lodos son, generalmente fáciles de deshidratar, excepto en el caso de que , debido a una recuperación extrema de fibras, evolucionen hasta el tipo hidrófilo, por la presencia de hidróxidos o lodos biológicos , o de unos y otros. Los lodos de plantas potabilizadoras y de agua industrial están constituidos principalmente por sustancias presentes en el agua cruda, arcillas, arenas, sustancias orgánicas, microorganismos y productos de la coagulación.

En el caso del tratamiento con sales de aluminio, los lodos son conocidos como lodos hidróxidos, porque presentan un gran contenido hidróxidos de aluminio. Los lodos hidróxidos poseen características gelatinosas en reposo pero líquidas en movimiento. Además, son compresibles y resistentes al espesamiento y deshidratación, especialmente aquellos generados con aguas de baja turbidez (Garcés y col, 1996).

#### **2.4.1 Manejo de lodos**

El manejo de lodos comprende fundamentalmente dos etapas: tratamiento y disposición. El tratamiento de lodos persigue adecuarlo para que sea dispuesto de la mejor manera, puede comprender procesos de estabilización, acondicionamiento con químicos, espesamiento, deshidratación, secado, incineración o una combinación de estos (Garcés y col, 1996).

La problemática que se genera tanto en plantas potabilizadoras como en plantas de aguas industriales (ya que básicamente el proceso es el mismo), radica en los grandes volúmenes que se obtienen, generalmente entre 0,3 y 1 % del agua tratada. La deshidratación es el tratamiento más común empleado para la reducción del volumen de lodo, con ella se logra disminuir el volumen, reducir costos de transporte y almacenaje, y obtener

una masa de sólidos que puede ser empleada como relleno para terrenos y otras aplicaciones que se verán más adelante (Sandoval y col, 1998).

#### **2.4.1.1 Deshidratación de lodos**

Los métodos de deshidratación de lodos pueden ser naturales o mecánicos.

- **Sistemas de secado natural**

- **Lechos de secado:** se emplean para reducir el contenido de humedad en lodos cuando se dispone de terreno y son propicias las condiciones climáticas. En condiciones apropiadas el lecho de secado ofrece ventajas sobre los sistemas de deshidratación mecánica: bajos costos de operación debido a la poca demanda de energía, poco mantenimiento y reducido control de operación.

Pueden operar con cualquier tipo de lodos y se obtienen tortas mucho más secas que las producidas por la mayor parte de los dispositivos mecánicos. Para un desecamiento efectivo el lodo debe tener propiedades físicas que permitan el drenado del agua contenida sin obturar el medio filtrante. Un lecho de arena típico tiene un desagüe inferior de tejas abierto con grava, de 30 cm de espesor y terminado con una capa de arena de 0,03 a 0,12 cm, la profundidad de la capa de lodo es de 15,2 a 25 cm con un coeficiente de uniformidad inferior a 5, según las condiciones locales y la cantidad de lodo para secarse (Nalco, 1989).

- **Lagunas de secado:** las lagunas y los lechos de secado son semejantes desde el punto de vista operativo, pues en ambos el lodo es vertido para ser retirado después de un período de

secado, repitiéndose el ciclo. La diferencia radica en que las lagunas no tienen sistema de drenaje, puesto que la mayor parte del secado ocurre mediante decantación del sobrenadante y evaporación. Generalmente las tasas de sólidos para estas lagunas son de 35,6 a 38,8 kg/año/m<sup>3</sup> de capacidad de la laguna.

Con frecuencia se usa un dique de 0,6 m de altura y una profundidad de 0,38 m (después de la decantación). Para grandes aplicaciones se usan mayores profundidades de lodo, se han llegado a utilizar profundidades de hasta 4,6 m con tiempos de detención de 6 a 12 meses. Se proporcionan puntos de extracción para retiro de sobrenadante y agua de lluvia.

Se pueden usar programas químicos para clarificar el sobrenadante y reducir el volumen de lodos aguas arriba del proceso. En el CPJAA la deshidratación de lodos se lleva a cabo mediante un sistema combinado de lagunas-lechos de secado, las lagunas tienen un fondo permeable que contribuye a la deshidratación, tal como se muestra en la figura 2.6 (Nalco, 1989).

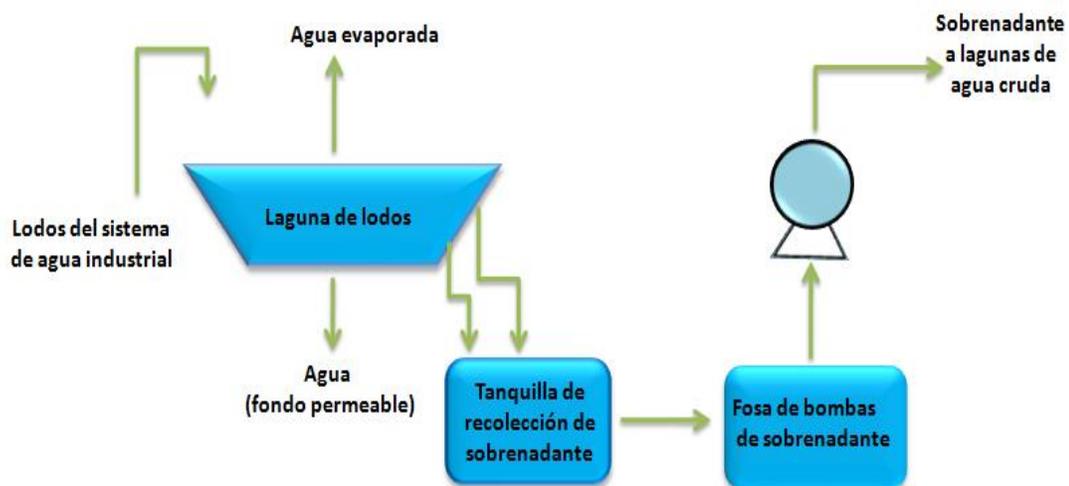
- **Sistemas de deshidratación mecánicos**

Los procesos mecánicos de deshidratación de lodos comprenden centrifugadoras y filtros. La selección de uno u otro dependerá de las características del lodo a tratar, y de la especificación deseable para su disposición. Los equipos de deshidratación mecánicos más empleados en el tratamiento del lodo son los siguientes:

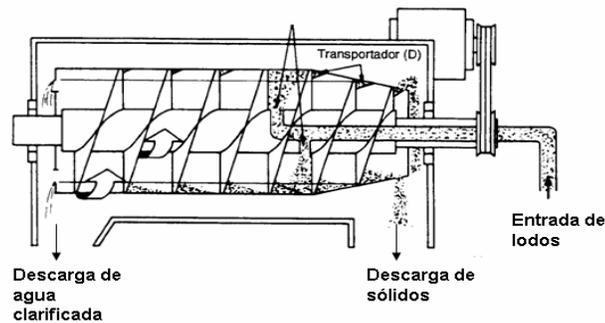
- **Centrifugadora de tazón sólido:** existen tres tipos de diseño de tazón sólido: cónico, cilíndrico y cónico-cilíndrico. El tazón cónico logra una máxima sequedad de la torta a expensas de la claridad del agua extraída, el tazón cilíndrico proporciona una buena claridad de

líquido extraído pero una torta relativamente húmeda mientras que, el diseño cónico-cilíndrico es flexible en la capacidad que tiene para desplazar el balance entre la sequedad de la torta y la calidad del líquido que es retirado en un intervalo amplio, mediante un cambio de profundidad en la alberca en función del criterio de desempeño que se desee, esto hace que este diseño sea el más común para una centrifugadora de tazón sólido.

El diseño cónico-cilíndrico consta de un tazón y un transportador unidos por un sistema de engranajes que hacen que el tazón y el transportador giren en la misma dirección, pero con velocidades ligeramente distintas. La sección cónica en el extremo del tazón forma una playa desecadora sobre la cual el transportador empuja el lodo hacia la salida. El líquido que sobrenada puede escapar por los vertederos o ser eliminado por un espumador. La figura 2.7 representa una centrifugadora de tazón sólido (Nalco, 1989).



**Figura 2.6 Proceso de deshidratación de lodos CPJAA.**



**Figura 2.7 Centrifugadora de tazón sólido (Nalco, 1989).**

- **Filtro prensa de placas y marcos:** su diseño consta de placas verticales sostenidas en un marco y presionadas entre un extremo fijo y el otro móvil. A cada placa se le adapta un medio filtrante, de ordinario propileno monofilamentoso tejido. El agua pasa a través del paño y sale de la prensa. Los sólidos se colectan en la superficie del paño. El flujo de lodo es alimentado a la prensa hasta que la velocidad del flujo disminuye radicalmente.

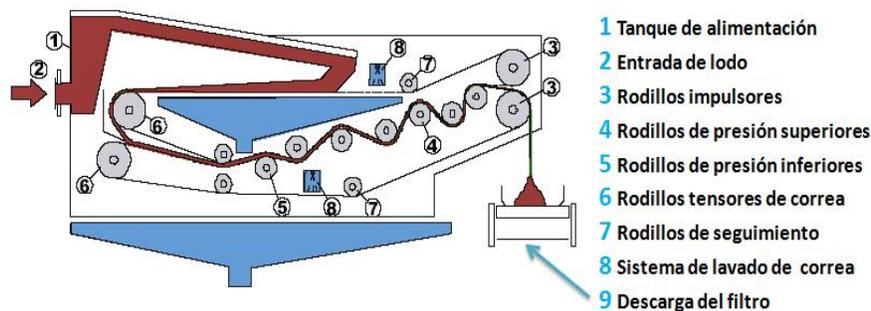
Los filtros prensa de placas y marcos en su mayoría operan a presiones comprendidas entre 100 y 250 psig. Cuando se detiene el flujo de filtrado, se libera la presión y se abre la unidad. De ordinario las prensas están equipadas con un mecanismo automático de apertura que separa las placas, de manera que puede descargarse la torta de lodo seca. Este filtro es de operación discontinua. La figura 2.8 muestra un filtro de este tipo (Kemmer y col, 1989).



**Figura 2.8 Filtro prensa de placas y marcos (Garcés y col, 1996).**

▪ **Filtro prensa de bandas:** es otro tipo de filtro que opera a presiones diferentes de la de vacío. Consta de tres zonas de deshidratación: zona de drenado, prensado y zona de cortado. Ya que un drenado libre es esencial para una prensa de banda, es necesario acondicionar previamente el lodo.

La mayor parte de la prensa de banda está equipada con un tanque de acondicionamiento donde los polímeros se mezclan con la alimentación del lodo. El lodo acondicionado fluye a la zona de drenado donde se efectúa un espesamiento inicial. Entonces el lodo pasa a través de dos cedazos donde se aplica una presión y se efectúa una deshidratación parcial. Finalmente al aumentar la presión sobre las bandas se corta el lodo parcialmente desecado. Por lo común la banda es una malla de acero inoxidable con malla relativamente gruesa. Estas unidades son apropiadas en particular cuando se tienen lodos difíciles de desecar. La figura 2.9 representa un filtro de este tipo.



**Figura 2.9 Filtro prensa de bandas (Garcés y col, 1996).**

Actualmente es común el uso de las centrifugadoras en el espesamiento de lodos, mucho más que en la deshidratación, debido a que generan tortas de sólidos muy húmedas. En cuanto a los filtros, los que

trabajan a presión producen tortas mucho más secas que los filtros que operan a presiones de vacío, frecuentemente se seleccionan los filtros de prensa de marcos y placas y los de prensa de bandas para la deshidratación de lodos hidróxidos.

La elección de tecnologías de deshidratación mecánica requiere sistemas de acondicionamiento y espesamiento que adecúen el lodo para ser tratado en los equipos de deshidratación. Con frecuencia estos procesos cuentan con tanques de mezcla, o tanques homogenizadores, que, como su nombre lo indica, homogenizan la concentración del lodo (variable en el tiempo) y además sirve para garantizar la alimentación a procesos continuos, como es el caso de los filtros prensa de bandas, por ejemplo. En la tabla 2.2 se muestran las características de la consistencia del lodo en función de la humedad.

**Tabla 2.2 Consistencia del lodo en función del porcentaje de humedad (Martinez y col, 2005)**

% Humedad del lodo	Característica
> 85	Líquido bombeable
75-65	Pastoso viscoso
65-60	Desmenuzable, no viscoso
40-35	Bastante sólido
<15-10	Polvoriento

**• Novedades en la deshidratación de lodos**

Para la fecha se han llevado a cabo varios estudios de reducción del volumen de lodos hidróxidos por recuperación de  $Al_2(SO_4)_3$  y  $FeCl_3$ , obteniendo buenos resultados a escala piloto, logrando recuperar entre 50 y 90 % del coagulante mineral utilizado en el tratamiento del agua. La recuperación se logra por acidificación del lodo con  $HNO_3$ ,  $HCl$  y  $H_2SO_4$ . Con este método se ha logrado reducir el volumen de lodos cerca

del 90%. El coagulante recuperado ha sido probado mediante ensayos de jarras y se ha obtenido una buena eficiencia del mismo (Sandoval y col, 1998).

Las dosis de ácido a emplear en este tipo de procesos dependen de las características fisicoquímicas del lodo y del volumen. La demanda de grandes cantidades de ácido afectaría la viabilidad económica de este método. En todo caso, ensayos en planta real se hacen necesarios para determinar con mayor certeza la sostenibilidad de este tipo de proyectos (Villegas y col, 2005).

#### **2.4.1.2 Destino final del lodo**

Debe ser dispuesto de tal forma que se cumpla con las leyes ambientales del país, sin obtener a cambio altos costos (mano de obra, reactivos, energía, transporte, descarga) aunque por tratamiento, en ocasiones los costos se ven incrementados. Los destinos comunes de los lodos son los siguientes:

- **Abono de los suelos:** esta aplicación es común, son apropiados por las materias húmicas que aportan y por la mejora del poder de retención del agua en el suelo que por su aporte de materias nutritivas. Se utilizan especialmente en cultivos florales, de césped, arboricultura. La incorporación al suelo de lodos orgánicos estabilizados o digeridos puede facilitar la proliferación de la flora microbiana autótrofa del suelo actuando directamente sobre la nutrición mineral de los vegetales. La operación de abonado puede hacerse en forma líquida (con espesamiento previo), en forma manejable con pala (deshidratación hasta un contenido en materia seca inferior al 10% para lodos biológicos coloidales y superior al 50% en caso de lodos minerales muy densos), en forma de polvo ( se requiere secado parcial del lodo con sequedades entre 65 y 90%). Sin embargo,

esta práctica ha generado resultados contradictorios, porque dependiendo de las concentraciones de hierro y aluminio que contenga el lodo, puede perjudicar algunas veces, en lugar de beneficiar los cultivos (Degremont, 1979).

• **Recuperación de productos:** se considera la recuperación de algunos elementos presentes en el lodo (Degremont, 1979):

- Fibras en la industria de papel y madera.
- Coagulantes usados en el tratamiento de agua en plantas de agua industrial o potable (cuando el coagulante es sulfato de aluminio puede ser recuperado por acidificación y se logra recuperar una parte importante de la alúmina usada en el tratamiento, después de su recarbonatación y .deshidratación este fango se evacúa en forma manejable).
- Cal o carbonato cálcico en los lodos procedentes de un tratamiento masivo con cal. (licores de papeleras, aguas usadas, aguas descarbonatadas) Los lodos de la descarbonatación pueden ser usados para la neutralización de efluentes ácidos.
- Cinc, cobre, cromo, en lodos provenientes de una depuración de aguas de tratamiento de superficies metálicas y de industrias diversas.

• **Recuperación de energía:** el uso de lodos para producción de energía es generalmente una etapa intermedia en un proceso. Su empleo como combustible es muy raro y se limita a lodos deshidratados procedentes de la decantación de aguas muy cargadas con polvo de carbón o suspensiones aceitosas y grasas recuperadas por flotación. En realidad si hay una recuperación de energía es a partir de los lodos con un alto

contenido de materia orgánica y como subproducto del tratamiento mas no como su objeto principal. La recuperación se lleva a cabo usualmente de dos formas (Degremont, 1979):

- Producción de gas metano por fermentación (digestión anaerobia). Este gas se utiliza para calefacción, para producción de electricidad o para acondicionamiento de lodos.
- Empleo del poder calorífico de las materias secas en los hornos de incineración. La energía sirve principalmente para el secado propio de los lodos. Cuando son autocombustibles puede recuperarse energía térmica usualmente en forma de energía eléctrica, de los gases de combustión. La energía recuperada va acompañada de la reducción de materia orgánica, eliminación de gérmenes patógenos y del poder de fermentación del producto.

• **Venta de subproductos:** en esta aplicación podrían incluirse cenizas utilizadas en la preparación de revestimientos de carreteras, de productos estabilizadores del suelo o de cementos. Sin embargo la industria apenas ha utilizado estos subproductos ya que prefiere utilizar materias primas más fáciles de manipular y de mejor calidad. Los lodos muy fibrosos y con bajo poder de fermentación pueden servir, una vez deshidratados, para estabilizar terrenos destinados a la siembra de césped (Degremont, 1979).

• **Descarga a vertedero:** es el destino más frecuente de los lodos producidos en tratamiento de agua. Esta descarga puede ir del simple estanque de lodo líquido, donde por drenaje y evaporación necesitará meses o años para su deshidratación, hasta relleno de excavaciones o depresiones, para lo cual se requerirá que el lodos secos cuyo compactado será más fácil. Una solución que se prevé es agregar al lodo

líquido antes de la descarga productos solidificantes (silicatos, cementos) con lo que al cabo de cierto tiempo en reposo se logra que la mezcla solidifique. La limitante de este método es que condena definitivamente la superficie donde se esparce el lodo (Degremont, 1979).

- **Inyección en el suelo:** consiste en inyectar los lodos en estado líquido, en bolsas porosas del subsuelo, aisladas entre dos capas profundas de arcilla. Para esta aplicación es indispensable un estudio minucioso de las condiciones geológicas (Degremont, 1979).

- **Materia prima en fabricación de cerámicos:** actualmente se han desarrollado estudios, obteniendo buenos resultados, para el uso de los lodos hidróxidos en la producción de materiales cerámicos de construcción, como ladrillos, por ejemplo. Para esta aplicación se emplean lodos con altos contenidos de arcillas y bajo contenido de materia orgánica (Degremont, 1979).

Los lodos que actualmente se generan en las plantas del CPJAA son mezclados con los lodos de aguas residuales y dispuestos en las áreas verdes. Sus características se hallan dentro de los límites permisibles según el artículo 50 del decreto 2635, de la legislación ambiental venezolana, para ser dispuestos empleando técnicas de esparcimiento en suelos (tabla 2.3), esta técnica es la más empleada en para la disposición final de los lodos debido a los bajos costos que genera, y puede ser aplicada siempre que el lodo cumpla con los parámetros exigidos por las leyes ambientales de cada país. La técnica permite darle al lodo un uso que puede resultar beneficioso si se considera que algunos minerales y materia orgánica son aprovechados por los suelos para favorecer el crecimiento de las plantas. Sin embargo el análisis fisicoquímico y microbiológico de los lodos es importante para decidir

si está apto para este uso debido a que el agua tratada tiene algunos patógenos (microorganismos dañinos) que por coagulación, floculación y sedimentación están contenidos en el lodo del proceso.

**Tabla 2.3 Límites permisibles establecidos en el artículo 50, decreto 2635, para la mezcla suelo/desecho**

Parámetros	Límites permisibles
pH	5-8
Conductividad (mmhos/cm)	< 3,5
Cloruros totales (ppm)	< 2500
Relación de adsorción de sodio (RAS)	<8
Aluminio intercambiable (meq/100g)	< 1,5
Saturación con bases (%)	> 80
Aceites y grasas (% peso)	≤ 1
Arsénico (mg/Kg)	25
Bario (mg/Kg)	20.000
Cadmio (mg/Kg)	8
Mercurio (mg/Kg)	1
Selenio (mg/Kg)	2
Plata(mg/Kg)	5
Cromo(mg/Kg)	300
Cinc(mg/Kg)	300
plomo(mg/Kg)	150

## 2.5 CONCEPTOS BÁSICOS DE SECADO DE SÓLIDOS

El secado es una operación unitaria que consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido hasta un valor aceptablemente bajo, en el caso particular de este estudio el líquido es agua. El término secado generalmente se usa para procesos que involucran una fuente de calor. Los procesos físicos de separación de líquido-sólido suelen ser menos costosos que los térmicos, razón por la cual debe eliminarse la mayor humedad posible del sólido antes de ser sometido a secado. (Geankoplis, 1998).

Algunos conceptos:

- **Sólido húmedo (SH):** presenta contenido de líquido.
- **Sólido totalmente seco (STS):** es el sólido libre de líquido.
- **Humedad no límite o agua no ligada:** es la humedad que posee el sólido que ejerce una presión de vapor igual a la presión de vapor que presentaría el líquido a la misma temperatura.
- **Humedad límite o agua ligada:** es la humedad que posee el sólido y que ejerce una presión de vapor menor a la que ejercería el líquido a la misma temperatura.
- **Humedad en base seca (X):** el contenido de humedad de los sólidos se expresa en estas unidades, representa la masa de agua que hay por unidad de masa de sólido totalmente seco (STS).
- **Humedad base húmeda (W):** representa la masa de agua que hay por unidad de masa de sólido húmedo y se expresa en porcentaje (%).

La ecuación 2.8 representa la expresión básica para determinar el sólido húmedo:

$$SH = STS + H_2O \quad (\text{Ec. 2.8})$$

A partir de la ecuación 2.8 se obtienen algunas relaciones que permiten calcular las humedades de los sólidos en base seca y base húmeda. Son las siguientes:

$$X = \left( \frac{SH}{STS} \right) - 1 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$STS = \frac{SH}{X+1} \quad (\text{Ec 2.10})$$

$$W = \frac{X}{X+1} \quad (\text{Ec 2.11})$$

$$X = \frac{W}{1-W} \quad (\text{Ec 2.12})$$

donde:

X: humedad en base seca (kg H<sub>2</sub>O / kg STS).

STS: masa de sólidos totalmente secos (kg).

SH: masa de sólido Húmedo (kg).

W: humedad en base húmeda (kg H<sub>2</sub>O/ kg SH).

## 2.6 PROYECTOS DE INGENIERÍA

El desarrollo de los proyectos de ingeniería comprende un conjunto de etapas que van desde la concepción de la idea hasta su implantación y puesta en marcha. A continuación se mencionan las etapas y actividades asociadas a cada una:

- **Visualización:** es la etapa de identificación del proyecto, en ella se realizan estudios preliminares de estimado de costo, localización, estudio de mercado, estudio de la capacidad de la planta y se llevan a cabo balances preliminares.

- **Conceptualización:** en esta etapa los estimados que se realizan son de mayor precisión. Se lleva a cabo la selección de tecnología, balances de masa y de energía y se elaboran los diagramas de bloque y de procesos. Se comienzan estudios para disposición de efluentes, optimizaciones energéticas, selección de alternativas de calentamiento y enfriamiento y se somete a consideración la compra de electricidad o generación propia.

- **Definición:** en esta fase ya se cuenta con información suficiente sobre el proyecto. Las actividades asociadas a esta etapa son: definición del área de la planta y distribución de los equipos; balances en detalle, dimensionamiento de los equipos, definición de la filosofía de operación y control; diseño de los diagramas de flujo de procesos, diagramas de tuberías e instrumentación, planos isométricos; estudio de impacto ambiental, procura de equipos, definición de software y hardware de control, costos en detalle y cronograma de ejecución detallado.

- **Contratación y ejecución:** comprende actividades de contratación, materialización y completación mecánica. Por ejemplo: movimiento de tierra, construcción de fundaciones y edificios, carreteras, cercas y drenajes; instalación de equipos, tuberías, accesorios e instrumentos de control entre otras.

- **Operación y evaluación:** en esta etapa se ejecuta el arranque de la planta y se realizará la evaluación continua a fin de determinar si cumple con las expectativas.

Las tres primeras etapas constituyen la definición y desarrollo de los proyectos de ingeniería, y las últimas la implantación y operación (Amendola, 2004).

## **2.7 CAPITAL DE INVERSIÓN**

Es la cantidad de dinero requerida para la construcción de una planta o la modificación de una existente. Es el producto de la suma del capital fijo de inversión y capital de trabajo.

### **2.7.1 Capital fijo de inversión y capital de trabajo**

- **Capital fijo de inversión:** está constituido por todos los costos asociados con la construcción de la planta. Estos costos pueden ser directos o indirectos. Los costos directos están relacionados con toda la instalación de la planta: equipo, envío del equipo hasta la planta, instalación del equipo, instrumentación y controles, tuberías, sistemas eléctricos, edificios, mejoras del sitio, servicios auxiliares y terreno. Mientras que los costos indirectos se refieren a los costos de los factores que no están directamente relacionados con la instalación de la planta: ingeniería y supervisión, asuntos legales, gastos de construcción, honorarios de contratistas, y contingencias (EPA, 2000).

- **Capital de trabajo:** es el capital que se requiere para financiar el primer mes de operación de la planta una vez que esta se encuentra instalada y lista para operar a régimen normal. Está constituido por: salarios, pérdidas en líneas y equipos, defectos de diseño que deben solucionarse, falla de instrumentos, necesidad de equipos

adicionales, compra de materias primas, cuentas por pagar, impuestos entre otros (EPA, 2000).

### **2.7.2 Estimación de costos**

Un estimado de costos es un pronóstico de los costos, que generará el desarrollo y ejecución de un proyecto definido y que respalda las decisiones de la gerencia de proyectos en cada una de las fases que se cumplen para llevarlo a cabo. El tipo de estimado de costo (tabla 2.4) que se realice depende de lo que se desee obtener con él y por ello de la fase en la que se encuentre el proyecto. A través de este estudio es posible:

- Evaluar la factibilidad de ejecución de un proyecto en su etapa conceptual.
- Analizar la rentabilidad económica de los proyectos en su etapa básica.
- Aprobar presupuestos.
- Sirven de base de comparación de las ofertas en licitaciones.
- Facilita la selección de opciones entre diversas alternativas de inversión.
- Sirven de base para establecer estrategias de financiamiento.

La estimación de costos es importante en todos los aspectos de un proyecto, pero especialmente en las etapas de concepción del proyecto, el diseño preliminar, el diseño detallado y el análisis económico (Peters y Timmerhaus, 1993).

**Tabla 2.4 Tipos de estimado de costos (Peters y Timmerhaus, 1993)**

Clasificación	Tipo de costos	Descripción
Clase V	Estimación de orden de magnitud (estimación relativa)	Basada en datos previos sobre costos similares; esta estimación tiene una exactitud aproximada de +30%.
Clase IV	Estimación de estudio	Basada en el conocimiento de los equipos más importantes; tiene una exactitud de hasta un 30%.
Clase III	Estimación preliminar (de los márgenes)	Se basa en suficiente información como para que se pueda preparar un presupuesto; tiene una exactitud del 20%.
Clase II	Estimación definitiva (para el control del proyecto)	Su información es casi completa pero es anterior a los diseños y especificaciones definitivas; tiene una exactitud de 10%.
Clase I	Estimación detallada (del contratista)	Basada en los planos definitivos, especificaciones y estado del terreno; tiene una exactitud dentro del 5%.

## 2.8 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS

Cuando se depende del análisis de un conjunto de datos para llegar a un resultado es conveniente emplear cálculos estadísticos para estimar el valor más representativo, a partir del cual sea posible dar respuestas oportunas al problema que se desea resolver. Es común utilizar herramientas estadísticas como medidas de tendencia central y de dispersión (Harvey, 2002).

Las medidas de tendencia central proporcionan la mejor estimación de la cantidad que se desea conocer mediante el cálculo de un valor central. La media, o promedio, es la medida de tendencia central más empleada.

Se representa  $\bar{X}$  y se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (\text{Ec 2.13})$$

donde:

$X_i$  = cada valor individual

n = número de datos.

Las medidas de dispersión indican la variabilidad de los valores de un conjunto de datos. Para determinar la dispersión promedio de un conjunto de valores respecto al valor central, se calcula la desviación estándar típica o absoluta ( $s$ ):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (\text{Ec 2.14})$$

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL PROYECTO**

En este capítulo se muestra cómo fueron desarrollados los objetivos. La recolección de datos del sistema, a través de encuestas no estructuradas dirigidas a los operadores de planta, así como la consulta de documentos de diseño, diagramas de procesos y de instrumentación de las plantas de tratamiento de agua de Pequiven, fueron punto de partida para la realización de la evaluación del manejo de lodos del sistema de agua industrial del CPJAA.

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE MANEJO DE LODOS**

##### **3.1.1 Ubicación**

El sistema de manejo de lodos es un subsistema del sistema de tratamiento de agua industrial del CPJAA. Se localiza en la parcela norte del complejo. El clima de la zona presenta dos (02) estaciones: lluviosa y seca (invierno y verano), con valores promedios anuales de temperatura y humedad relativa de 27 °C y 76,7 % respectivamente. En la tabla A.3 (anexo A) se muestran las condiciones ambientales predominantes en el área de acuerdo con los datos suministrados por Pequiven.

##### **3.1.2 Descripción del proceso**

El sistema se inicia en los clarificadores de las plantas Densadeg® y Actiflo®, donde los sólidos son removidos del agua por gravedad. Luego

pasan a un proceso de espesamiento y son enviados hacia las lagunas de secado de lodos bajo condiciones ambientales. El secado no solo se ve afectado por la radiación, la influencia del viento, la pluviosidad y demás factores ambientales, sino además por la permeabilidad de las lagunas y la recolección de sobrenadante.

Los componentes del sistema son:

- Sistema de adensamiento Actiflo®.
- Sistema de adensamiento Densadeg®.
- Sistema de secado de lodos, constituido a su vez por dos subsistemas:
  - Lagunas de secado
  - Sub-sistema de recolección de sobrenadante.

En adelante serán descritos los componentes mencionados así como los procesos que se llevan a cabo en cada uno:

### **3.1.2.1 Sistema de adensamiento Actiflo®**

**a. Descripción del proceso:** el sistema de adensamiento Actiflo® de lodos se inicia en los clarificadores. El agua floculada llega a los decantadores donde el flujo pasa de forma ascendente a través de las lamelas favoreciendo el deslizamiento y sedimentación de los flóculos (en esta tecnología constituidos por sólidos del agua, sólidos producto de los químicos empleados en el tratamiento y microarena). El sistema está diseñado para una tasa de  $53 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ , que permite una turbidez a la salida de 2 a 3 NTU.

El lodo en el fondo de los clarificadores es raspado por removedores mecánicos y dirigidos al pozo central de succión de dos (02) bombas (tipo centrífuga con capacidad máxima de  $34 \text{ m}^3/\text{h}$ ), quienes envían la mezcla a un hidrociclón que separará el lodo de la microarena que será recirculada al proceso. El lodo sale por el tope del hidrociclón y es enviado continuamente

a un tanque a través de una tubería de 6". El tanque tiene una capacidad de 5 m<sup>3</sup> y sirve de succión a la bomba de alimentación del adensador que se halle operativa. Se dispone de dos (02) bombas de alimentación al adensador (tipo tornillo con capacidad máxima de 60 m<sup>3</sup>/h que operan según la filosofía N+1, es decir, una en operación y una en espera). El lodo descargado recibe la dosificación en línea de sulfato de aluminio líquido, por medio de dos (02) bombas (tipo diafragma con capacidad máxima de 20 l/h).

El lodo entra a un adensador conformado por tres compartimientos: coagulación, floculación y decantación lamelar. En el compartimiento de coagulación un agitador rápido homogeniza la distribución del coagulante en el lodo contribuyendo a minimizar su consumo. Luego pasa al tanque de floculación donde es dosificado el polímero floculante por medio de dos (02) bombas tipo tornillo de capacidad máxima 60 l/h y un agitador de mezcla lenta promueve la aglutinación de los flóculos y la evacuación de los gases incorporados en el interior del hidrociclón. La inyección del polímero se realiza en dos puntos, primero antes de la entrada del tanque de floculación y luego directo al impulsor del agitador. El tiempo de floculación es menor que el aplicado en el tratamiento del agua porque ya el lodo ha pasado por un tratamiento fisicoquímico.

Seguidamente el lodo pasa al decantador lamelar atravesando una reja removible que tiene como finalidad hacer uniforme el flujo en toda el área de entrada. El lodo decanta rápidamente al entrar en el sedimentador, en la zona de alimentación y debajo de las lamelas, mientras que el agua es clarificada a medida que asciende a través de las lamelas para luego ser colectada por las canaletas y enviada a la entrada de la planta de tratamiento de agua Actiflo®. El lodo es homogenizado en el fondo por un raspador y direccionado al pozo de succión para ser descartado por dos (02) bombas de extracción (tipo tornillo con capacidad máxima de 6 m<sup>3</sup>/h), hacia las lagunas

de secado de lodos. El adensador tiene un contador de lodos a la entrada (FIT 05) y a la salida del mismo (FIT 06).

#### **b. Caudal de lodos enviado a las lagunas de secado por Actiflo®**

La cantidad de lodos que se generan depende principalmente del contenido de sólidos suspendidos totales del agua (SST) y de la cantidad de agua tratada. El contenido de SST varía considerablemente de una temporada a otra (invierno y verano) y por esa razón fue necesario determinar una producción por temporada. Se realizaron promedios de los caudales de lodos enviados por la Actiflo® hacia las lagunas de lodos a fin de tener valores representativos de la época de invierno y verano. Se tomaron las lecturas de los contadores de lodos del adensador, tanto para la entrada (FIT 05) como para la salida (FIT 06), en los últimos cuatro meses del año 2009 (julio, agosto, septiembre, diciembre) las cuales son mostradas en las tablas 3.1 y 3.2 y con la ecuación 3.1 se determinaron los caudales diarios de entrada y salida del adensador.

$$Q_i = L2 - L1 \quad (\text{Ec 3.1})$$

donde:

Qi: caudal de lodos (m<sup>3</sup>/día).

L2: lectura de FIT 05 el día dos (m<sup>3</sup>).

L1: lectura del FIT 05 el día uno (m<sup>3</sup>).

Para el mes de julio, por ejemplo, el caudal que entró al adensador ( $Q_E$ ) el día 03 de julio de 2009 (tomado de la tabla 3.1) fue:

$$Q_E = 1097639 - 1096696 = 943 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ lodo de entrada}$$

De esa forma se calcularon todos los caudales de lodos de la planta M-600, tanto los de entrada como los de salida de lodo ( $Q_s$ ). Se determinaron los flujos másicos de los caudales de salida promedio (Fs) haciendo uso de su densidad promedio (tabla D.2). Por ejemplo, para del mes de julio, se obtuvo el siguiente flujo másico:

$$164,27 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 991,59 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 162888,49 \frac{\text{kg de lodo a lagunas}}{\text{día}}$$

En las tablas 3.3 y 3.4 se muestran los valores obtenidos. Se seleccionó el mayor caudal de producción de lodos entre los meses de invierno como el valor más representativo de esa temporada (mes de septiembre). Para la temporada de verano sólo se disponía del valor del mes de diciembre, por lo que fue seleccionado como representativo de la producción Actiflo® en verano.

### 3.1.2.2 Sistema de adensamiento Densadeg®

**a. Descripción del proceso:** el sistema de adensamiento Densadeg® se lleva a cabo en los clarificadores de las plantas. En este apartado será descrito el proceso de una (01) planta Densadeg® (D-300), entendiendo que las demás operan de la misma manera. El agua floculada ingresa por gravedad al compartimiento de clarificación donde se llevan a cabo los procesos de sedimentación y espesamiento de lodos, tiene un arreglo lamelar con inclinación de 60°. Toda la materia decantada se acumula a partir de la mitad del volumen útil del clarificador hasta el fondo.

El lodo es manejado por un equipo raspador- espesador. los lodos más livianos son deshidratados al entrar en contacto con el espesador que tiene forma de peine de tal manera que pueda retirar agua reticulada de las

partículas; mientras que los más pesados son raspados y dirigidos por el espesador hacia el centro de la tolva.

El diseño original del sistema contempla la extracción automática de los lodos por medio de tres (03) bombas (tipo cavidad progresiva de capacidad máxima de 50 m<sup>3</sup>/h), una de estas bombas opera continuamente recirculando lodos al compartimiento de floculación (la recirculación está entre 0,7 a 3,3% del caudal alimentado a la planta). Sin embargo, el sistema automatizado de extracción de lodos ha presentado fallas, razón por la cual la extracción se hace de forma manual, según el criterio y la experiencia de los operadores de la planta. Las plantas disponen de tres tuberías colocadas a diferentes niveles del clarificador, estas tuberías son denominadas “testigos”, su función es indicar a qué nivel del clarificador se ha acumulado el lodo y en función de este nivel y/o de la concentración del lodo (por diseño resulta 800 veces la concentración de sólidos suspendidos del agua de alimentación al proceso) se ejecutan las extracciones hacia las lagunas de secado.

**b.Caudal de lodos enviados a las lagunas de secado por las plantas Densadeg®:** a diferencia de la tecnología Actifló® las plantas Densadeg® no disponen de un contador de lodos para llevar un control los caudales de extracción. Se realizaron balances de SST usando promedios por temporada y tomando todas las consideraciones establecidas en el diseño de la planta D-300 (300 lps). Para conocer el caudal de lodos generado por la planta D-200 (400 lps) se utilizó un factor de escala, este cálculo se muestra más adelante.

**Tabla 3.1 Datos para calcular valores promedio de caudal entrada y salida de lodo de la planta M-600 para los meses julio y agosto.**

DD/MM/AA	LECTURA FIT 05 (m <sup>3</sup> )	LECTURA FIT 06 (m <sup>3</sup> )	DD/MM/AA	LECTURA FIT 05 (m <sup>3</sup> )	LECTURA FIT 06 (m <sup>3</sup> )
03/07/09	1096696	83.855	01/08/09	1127543	2451
04/07/09	1097639	84012	02/08/09	1128548	2626
09/07/09	1103423	84078	09/08/09	1134770	3645
10/07/09	1104342	84190	10/08/09	1135603	3824
11/07/09	1105652	84396	11/08/09	1136542	4019
12/07/09	1106718	84555	14/08/09	1139932	4545
16/07/09	1111012	193	15/08/09	1141171	4757
17/07/09	1112056	366	17/08/09	1143750	5137
18/07/09	1113023	535	18/08/09	1144929	5284
19/07/09	1114210	726	19/08/09	1146177	5444
20/07/09	1115061	863	20/08/09	1147201	5602
21/07/09	1116143	1027	21/08/09	1148350	5788
22/07/09	1117194	1191	NI	NI	NI
23/07/09	1118301	1366	NI	NI	NI

Nota: NI (ninguno).

**Tabla 3.2 Datos para calcular valores promedio de caudal entrada y salida de lodo de la planta M-600 para los meses septiembre y diciembre**

DD/MM/AA	LECTURA FIT 05 (m <sup>3</sup> )	LECTURA FIT 06 (m <sup>3</sup> )	DD/MM/AA	LECTURA FIT 05 (m <sup>3</sup> )	LECTURA FIT 06 (m <sup>3</sup> )
02/09/09	1164238	7065	03/12/09	1280580	17450
03/09/09	1165782	7229	04/12/09	1282181	17711
04/09/09	1167245	7395	05/12/09	1283580	17889
05/09/09	1168816	7573	06/12/09	1285017	18072
13/09/09	1180072	8298	07/12/09	1286270	18253
14/09/09	1181013	8459	08/12/09	1287501	18419
15/09/09	1182298	8634	10/12/09	1290150	18752
16/09/09	1183707	8851	11/12/09	1291733	18944
17/09/09	1185177	9059	20/12/09	1302715	19516
18/09/09	1186647	9260	21/12/09	1303999	19637
24/09/09	1194795	10223	23/12/09	1306412	19697
25/09/09	1196061	10394	24/12/09	1307873	19853

**Tabla 3.3 Valores calculados de caudal de entrada, caudal de salida y flujo másico de salida de lodo de la planta M-600 para los meses de julio y agosto**

DD/MM/AA	Fs			DD/MM/AA	Fs		
	(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /día)	(promedio) (kg/día)		(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /día)	(promedio) (kg/día)
03/07/09	943	157	162888,49	01/08/09	1005	175	175015,64
09/07/09	919	112		09/08/09	833	179	
10/07/09	1310	206		10/08/09	939	195	
11/07/09	1066	159		14/08/09	1239	212	
16/07/09	1044	173		17/08/09	1179	147	
17/07/09	967	169		18/08/09	1248	160	
18/07/09	1187	191		19/08/09	1024	158	
19/07/09	851	137		20/08/09	1149	186	
20/07/09	1082	164		NI	NI	NI	
21/07/09	1051	164		NI	NI	NI	
22/07/09	1107	175		NI	NI	NI	
$\bar{X}$	1047,91	164,27		$\bar{X}$	1077,00	176,50	
<b>s</b>	128,84	24,952		<b>s</b>	150,07	19,96	

Nota: NI (ninguno).

**Tabla 3.4 Valores calculados de caudal de entrada, caudal de salida y flujo másico de salida de lodo de la planta M-600 para los meses de septiembre y diciembre**

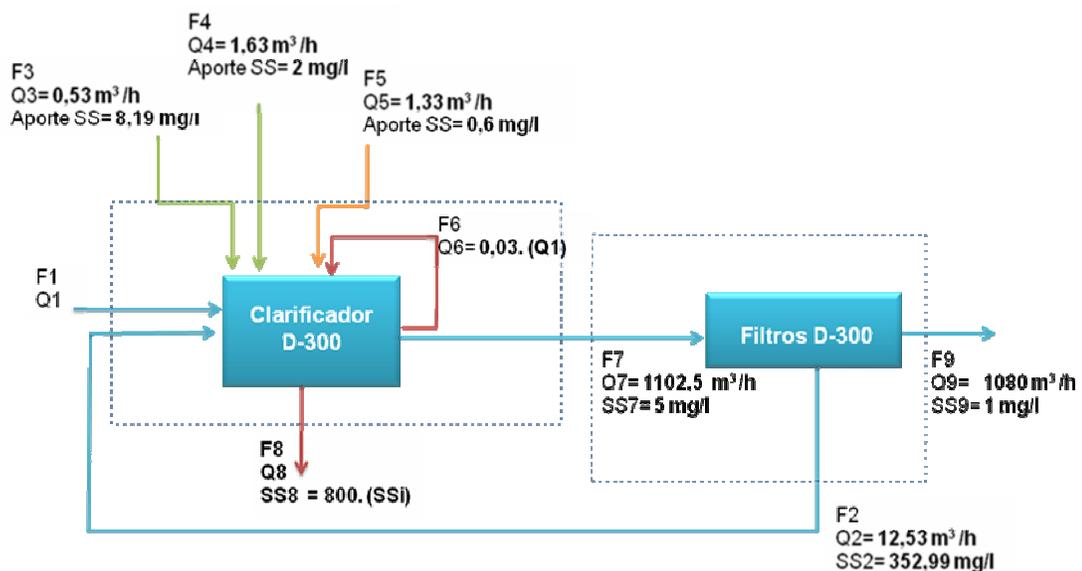
DD/MM/AA	Q <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> /día)	Q <sub>S</sub> (m <sup>3</sup> /día)	Fs (promedio) (kg/día)	DD/MM/AA	Q <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> /día)	Q <sub>S</sub> (m <sup>3</sup> /día)	Fs (promedio) (kg/día)
03/09/09	1463	166	04/12/09	1399	178		
04/09/09	1571	178	05/12/09	1437	183		
13/09/09	941	161	06/12/09	1253	181		
14/09/09	1285	175	07/12/09	1231	166		
15/09/09	1409	217	10/12/09	1583	192		
16/09/09	1470	208	20/12/09	1284	121		
17/09/09	1470	201	23/12/09	1461	156		
24/09/09	1266	171	NI	NI	NI		
NI	NI	NI	NI	NI	NI		
$\bar{X}$	1379,89	182,33	$\bar{X}$	1406,13	179,75		
<b>s</b>	194,31	20,82	<b>s</b>	133,37	37,03		

Nota: NI (ninguno) .

A continuación se indican todas las consideraciones tomadas del diseño de la planta D-300 para la realización del balance de sólidos suspendidos:

- El lodo está constituido principalmente por los sólidos suspendidos que trae el agua cruda y sólidos aportados por los químicos empleados en el tratamiento fisicoquímico.
- La temperatura de operación es constante y es de 30 °C.
- La densidad del agua se asume constante y tiene un valor de 996 kg/m<sup>3</sup>.
- El caudal nominal a la salida de los filtros es de 300 l/s (1080 m<sup>3</sup>/h).
- El caudal de efluente de lavado de los filtros es 12,53 m<sup>3</sup>/h.
- El tiempo de lavado de los filtros está estimado en 35 min y se realizan a caudal máximo 6 lavados por día.
- La concentración de SST del agua de lavado de los filtros se asume constante e igual a 352,99 mg/l. Es constante porque el diseño de la tecnología está dado para mantener un caudal y una concentración de sólidos suspendidos determinada en el agua que entra a los filtros (agua clarificada con 1102,5 m<sup>3</sup>/h de caudal y 5 mg/l de SST).
- La concentración de SST en el agua filtrada es de 1 mg/l.
- Se determinará la producción de lodos correspondiente a cada temporada (invierno, verano).
- La concentración de SST en EBP-1 será un promedio de las concentraciones de sólidos para cada temporada (77 mg/l invierno y 12,67 mg/l verano).
- La concentración de sólidos aportada por el sulfato de aluminio será 8,19 mg/l.
- La concentración de sólidos aportada por el coagulante orgánico será 2 mg/l.
- La concentración de sólidos aportada por el floculante será 0,6 mg/l.

- La concentración de sólidos suspendidos del lodo de extracción será 800 veces la concentración de sólidos suspendidos de entrada.
- El caudal de recirculación de lodo estará entre 0,7 % y 3,3 %, estableciéndose como valor normal 3 %.
- Los caudales de químicos son los que de acuerdo al diseño de la planta corresponden a las dosis promedio que han sido empleadas, 0,53 m<sup>3</sup>/h para el sulfato de aluminio, 1,63 m<sup>3</sup>/h para el coagulante orgánico y 1,33 m<sup>3</sup>/h para el floculante). en la realidad aún en las condiciones más críticas (temporada de invierno) la dosificación rara vez supera estos promedios, de acuerdo al histórico del mes de agosto 2008 (tabla B.2).



**Figura 3.1 Diagrama para el balance de sólidos suspendidos en la planta D-300.**

En la figura 3.1 se puede observar un diagrama de bloques para el balance de sólidos suspendidos en la planta D-300, en esta figura se tiene:

Q1: caudal agua de EBP-1 (m<sup>3</sup> /h).

Q2: caudal de efluente de lavado de los filtros ( $m^3/h$ ).

Q3: caudal de sulfato de aluminio dosificado ( $m^3/h$ ).

Q4: caudal de coagulante orgánico dosificado ( $m^3/h$ ).

Q5: caudal de floculante dosificado ( $m^3/h$ ).

Q6: caudal de recirculación de lodos ( $m^3/h$ ).

Q7: caudal de agua clarificada ( $m^3/h$ ).

Q8: caudal de lodos de extracción ( $m^3/h$ ).

Q9: caudal de agua filtrada ( $m^3/h$ ).

F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9: flujos máxicos de sólidos suspendidos ( $kg/h$ ).

SS1, SS2, SS3, SS4, SS5, SS6, SS7, SS8, SS9: concentración de sólidos suspendidos en cada flujo.

La ecuación general de balance de masa se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Entrada} + \text{generación} - \text{salida} - \text{consumo} = \text{acumulación} \quad (\text{Ec 3.2.a})$$

Los términos de generación y consumo para este caso se hacen igual a cero, pues no se consideran reacciones químicas que generen o consuman sólidos suspendidos. La expresión se transformó en lo siguiente:

$$\text{Entrada} - \text{salida} = \text{acumulación} \quad (\text{Ec 3.2.b})$$

El balance se realizó considerando flujos máxicos, con base en una hora de proceso, asumiendo que todo el lodo generado para ese tiempo se extrae del sistema a la concentración de diseño, por lo tanto, el término acumulación se hizo cero:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \quad (\text{Ec 3.2.c})$$

Partiendo de lo anterior y en base a la figura 3.1, se obtuvo una ecuación de balance global de flujos másicos (kg/h) en el clarificador D-300 como sigue:

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = F_7 + F_8$$

Despejando la incógnita de interés, flujo másico de lodo, se obtiene:

$$F_8 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 - F_7 \quad (\text{Ec 3.3})$$

Para determinar el valor de los flujos másicos se empleó la siguiente ecuación:

$$F_i = Q_i \times \frac{SS_i}{1000} \quad (\text{Ec 3.4})$$

donde:

$F_i$ : flujo másico de sólidos suspendidos  $i$  (kg SST/h).

$Q_i$ : caudal  $i$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

$SS_i$ : concentración de sólidos suspendidos  $i$  (mg/l).

Y el factor  $1/1000$  permite convertir mg/l a  $\text{Kg}/\text{m}^3$ .

Por ejemplo, para determinar  $F_2$  se tomaron los valores de caudal y concentración de diseño considerados para el balance y fueron sustituidos en la ecuación 3.4, obteniendo:

$$F_2 = \frac{12,53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 352,99 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{1000} = 4,42 \text{ Kg SST}$$

De igual forma se determinaron los demás valores, los resultados se hallan en la tabla 3.5 Sin embargo, hay que hacer notar que los valores de F3, F4, F5 corresponden a los flujos máscicos de sólidos suspendidos aportados por el sulfato de aluminio, el coagulante orgánico y el floculante, respectivamente, y que fueron calculados en función del caudal de agua de entrada a la planta (Q1), para ello se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$F3 = Q1 \times \frac{8,19 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{1000} = 0,00819 \times Q1 \quad (\text{Ec 3.5})$$

$$F4 = Q1 \times \frac{2 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{1000} = 0,002 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times Q1 \quad (\text{Ec 3.6})$$

$$F5 = Q1 \times \frac{0,6 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{1000} = 0,0006 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times Q1 \quad (\text{Ec 3.7})$$

Una vez conocido el valor de Q1 fue posible determinar el valor de Q8 y los flujos máscicos desconocidos en el balance, con un sistema de ecuaciones. Para tal fin se desarrollo una ecuación en función de los caudales de la planta, considerando que la densidad de los caudales que entran y salen del proceso tienen igual densidad (en la realidad sus densidades son muy cercanas), la cual no varía ya que se asume una temperatura de operación constante, se consideró lo siguiente:

$$Q1 + Q2 + Q3 + Q4 + Q5 = Q7 + Q8$$

Ordenando la expresión anterior se obtuvo:

$$Q8 = Q1 + Q2 + Q3 + Q4 + Q5 - Q7 \quad (\text{Ec 3.8})$$

En la ecuación anterior fueron sustituidos los valores de los caudales de diseño correspondiente y se obtuvo:

$$Q8 = Q1 - 1086,48$$

Por otro lado, La ecuación 3.3 fue llevada a términos de Q8 de la siguiente manera:

$$Q8 = \frac{(F1 + F2 + F3 + F4 + F5 - F7)}{\frac{SS8}{1000}} \quad (\text{Ec 3.9})$$

Las expresiones de F1, F3, F4, F5 fueron sustituidas por las expresiones obtenidas en función de Q1. La concentración de SST en el lodo, fue determinada de acuerdo a las especificaciones de diseño:

$$SS8 = 800 \times (\text{SST de entrada}) \quad (\text{Ec 3.10})$$

donde:

SST de entrada = SS1 + SS aportados por los químicos.

El aporte de los químicos a la concentración de sólidos suspendidos de la corriente de agua de alimentación al tratamiento es la suma de la contribución de suspendidos de los coagulantes y la contribución del floculante. Se conoció por diseño que el aporte del sulfato de aluminio, coagulante orgánico y floculante es: 8,19, 2 y 0,6 mg por litro de agua

procesado respectivamente. En este caso es posible sumar estos valores a SS1, ya que son sólidos asociados a Q1, por lo tanto:

$$SS8 = 800. \left( 77 \frac{\text{mg}}{\text{l}} + 8,19 \frac{\text{mg}}{\text{l}} + 2 \frac{\text{mg}}{\text{l}} + 0,6 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = 70232,0 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

Al sustituir las expresiones y el valor de SS8 en la ecuación 3.10 se obtuvo lo siguiente:

$$Q8 = (0,0013 \times Q1) - 0,016 \quad (\text{Ec 3.11})$$

Igualando la ecuación 3.11 a la ecuación 3.8 fue posible conocer el valor de Q1:

$$(0,0013 \times Q1) - 0,016 = Q1 - 1086,48$$

$$Q1 = 1087,88 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Conocido Q1 y con la ecuación 3.4 se obtuvo F1:

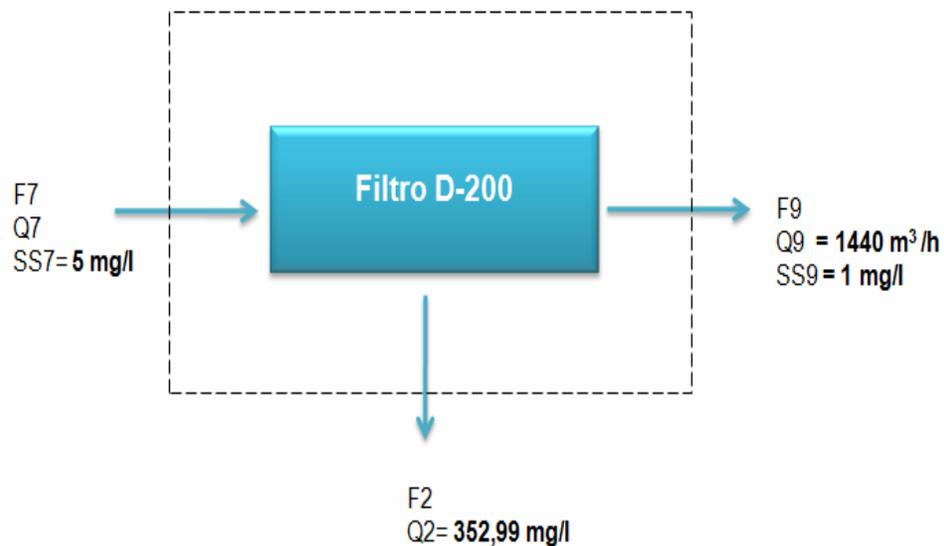
$$F1 = 1087,88 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{77 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{1000} = 83,77 \frac{\text{Kg SST}}{\text{h}}$$

Conocido Q1 fue posible conocer los caudales F3, F4 y F5 cuyos valores se hallan en la tabla 3.6. Por otro lado haciendo uso de la ecuación 3.8 se determinó el caudal de lodos enviado por el D-300 hacia las lagunas:

$$Q8 = 1087,88 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 1086,48 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 1,40 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

De esta manera se determinó el caudal de lodos enviado por parte de la D-300 y D-100 por ser esta última de igual capacidad nominal. Para conocer la producción del efluente de la planta D-200 se empleó un factor de escala que permitió conocer la producción de lodos para 400 lps de agua tratada.

- **Cálculo del factor de escala (FE)**



**Figura 3.2 Diagrama del filtro Densadeg® 400lps (D-200)**

En la figura 3.2 se tiene:

F2, F7, F9: flujos máxicos de SST del efluente de lavado de los filtros, agua clarificada y agua filtrada, respectivamente (kg SST /h).

Q2, Q7, Q9: caudales del efluente de lavado de los filtros, agua clarificada y agua de lavado de los filtros, respectivamente (m<sup>3</sup>/h).

Conocido el caudal de producción de agua industrial de la planta 400 lps (1440 m<sup>3</sup> /h), y conocida la concentración de SST del agua filtrada establecidas en las consideraciones para el balance, se obtuvo utilizando la ecuación 3.4 el flujo másico F9:

$$F9 = 1440 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{1000} = 1,440 \frac{\text{kg SST}}{\text{h}}$$

El FE se determinará relacionando F9 para una producción de 400 lps y F9 para 300 lps, el valor de F9 para 300 lps se obtuvo igual que el anterior y se encuentra en la tabla 3.6

$$FE = \frac{1,440 \frac{\text{kg SST}}{\text{h}}}{1,080 \frac{\text{kg SST}}{\text{h}}} = 1,333$$

El factor de escala se empleó para multiplicar los flujos másicos de SST de la planta Densadeg® de 300 lps a fin de obtener los correspondientes a la planta de 400 lps. Por ejemplo, para la planta D-300, el flujo másico de entrada (F1) es de 83,77 m<sup>3</sup>/h en invierno, entonces, para la planta de 400 lps el flujo másico de entrada será el mismo valor multiplicado por el FE como se muestra a continuación:

$$F1 (400\text{lps}) = 83,77 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 1,333 = 111,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

En las tablas 3.5 y 3.6 se encuentran los flujos másicos y caudales obtenidos a partir del balance de SST y los caudales de envío diario de lodos hacia las lagunas de secado por las plantas Densadeg® de 300 y 400 lps. Dichos valores no solo permitieron conocer la cantidad de lodos que maneja el actual sistema de lagunas de lodos, sino estimar la capacidad del mismo y la producción de las nuevas plantas de tratamiento de aguas de la misma

tecnología que serán instaladas en el CPJAA con el proyecto de ampliación, lo que se mostrará en adelante.

**Tabla 3.5 Resultados de los flujos máxicos y caudales obtenidos a partir del balance de sólidos suspendidos en las plantas Densadeg® a capacidad nominal**

D-300										
	Flujos máxicos (Kg SST/h)								Caudal (m <sup>3</sup> /h)	
Temporada	F1	F2	F3	F4	F5	F7	F8	F9	Q1	Q8
Invierno	83,77	4,42	8,91	2,18	0,65	5,51	98,32	1,08	1087,88	1,40
Verano	13,78	4,42	8,91	2,18	0,65	5,51	23,46	1,08	1087,73	1,25
D-200										
Invierno	111,67	5,89	11,88	2,91	0,87	7,34	131,06	1,44	1450,26	1,87
Verano	18,37	5,89	11,88	2,91	0,87	7,34	31,27	1,44	1449,88	1,67

**Tabla 3.6 Resultados del envío diario de lodos a las lagunas de secado por parte de las plantas Densadeg® a capacidad nominal**

Temporada	D100 ( m <sup>3</sup> /día)	D200 ( m <sup>3</sup> /día)	D300 ( m <sup>3</sup> /día)	Total de lodos Densadeg® ( m <sup>3</sup> /día)
Invierno	33,60	44,88	33,60	112,08
Verano	30,00	40,08	30,00	100,08

### 3.1.2.3 Sistema de lagunas de secado de lodos

**a. Descripción del proceso:** este sistema está constituido por un múltiple de entrada, cuatro lagunas de secado, una (01) tanquilla colectora de sobrenadante, dos (02) bombas de extracción de sobrenadante y una (01) fosa común para las bombas. Durante todo el año el sistema recibe los lodos

de los adensadores de las plantas Densadeg® y Actiflo®, así como el agua proveniente del lavado de las tuberías de extracción y producto de lluvias.

La filosofía de operación es la siguiente: se habilita la alimentación de lodos a una laguna vacía, en dicha laguna son descargados de forma indiferente los lodos de las plantas de las dos tecnologías, La inspección en campo por parte de los operadores es realizada con frecuencia a fin de visualizar los niveles de agua sobrenadante en la laguna y poner en funcionamiento su retiro y envío a las lagunas de agua cruda. Mientras ocurre el llenado de una (01) laguna (figura 3.3), las demás se encuentran en espera. Cuando se completa el llenado se detiene la descarga de lodos en dicha laguna y se habilita otra que se halle en espera, repitiéndose el proceso para la misma.

El secado de cada laguna, de acuerdo a la experiencia de los operadores tarda cuatro (04) meses en completarse, tiempo después del cual es retirado de forma manual por una cuadrilla de obreros (cada laguna cuenta en su estructura con una rampa que permite introducir maquinaria para la limpieza). La limpieza de una laguna de lodo seco tarda alrededor de cinco (05) días hábiles. El lodo seco es dispuesto como abono en los alrededores del CPJAA.



**Figura 3.3 Laguna de secado de lodos.**

## **b. Componentes**

**b.1 Múltiple de entrada:** se ubica a la entrada del sistema de lagunas, a él llegan las tres líneas de envío de lodos (3"-LD-009-PEAD, 4"LD-027-PEAD y 2 ½"-LD-027-PEAD), conectadas con un ángulo de 45°, y salen las líneas que alimentan a cada una de las lagunas (6"-LD-010-PEAD y 6"-LD-011/012/013/014-PEAD). Las líneas de alimentación de las lagunas poseen una válvula manual en su extremo final, con las cuales se selecciona la laguna que recibirá.

**b.2 Lagunas:** el sistema cuenta con cuatro (04) lagunas, de dimensiones 55,60 x 32,70 m y profundidad variable, con un volumen total de 3000 m<sup>3</sup> de capacidad nominal cada una. Se tienen dos tuberías de recolección de sobrenadante por laguna, una ubicada a nivel medio (cota inferior 1,18 m respecto fondo de la laguna) y otra a un nivel alto (cota inferior 1,80 m respecto al fondo de la laguna, de acuerdo al plano de diseño). En el proceso de llenado una vez que el lodo alcanza el nivel alto, se detiene la alimentación de lodos a esa laguna. Según datos operarios es común que a principios de año el estado del sistema de lagunas sea el siguiente: dos (02) lagunas se encuentran en distintas fases de secado, una (01) laguna se halla recibiendo lodos y una (01) se halla en espera.

**b.2.1 Volumen efectivo a nivel máximo y volumen efectivo a nivel medio:** como parte de la caracterización de este sistema se determinaron los volúmenes definidos por la ubicación de las tuberías de recolección de sobrenadante. A lo largo del cálculo se les referirá como  $V_1$  y  $V_2$ , para los niveles de 1,80 y 1,18 m respectivamente. El cálculo se realizó de acuerdo a los datos obtenidos de los planos de diseño de la estructura digitalizados y empleando el software AutoCAD versión 2009.

• **Consideraciones para el cálculo:**

- Las cuatro lagunas tienen forma trapezoidal, profundidad variable y son iguales una respecto a otra en todas sus longitudes.
- El nivel máximo que alcanza el lodo se ubica a 1,80 m respecto al fondo de la laguna.
- El volumen de la rampa es de 29,68 m<sup>3</sup>.

La profundidad varía entre 1,50 m y 2,30 m, por tal razón se consideró que la manera más adecuada de determinar su volumen era a través de progresivas y medias distancias. Este método de cálculo consiste en dividir la estructura en secciones de longitudes conocidas y determinar el área de cada una de las secciones. El volumen total es la sumatoria de los volúmenes parciales obtenidos entre cada sección.

La figura 3.4, representa una laguna de secado y los cortes realizados para determinar su volumen por el método de progresivas y medias distancias (para ello se empleó el software AutoCAD en su versión 2009).

El V<sub>1</sub> de la laguna fue calculado con la siguiente ecuación:

$$V_f = \left( \sum_{i=1}^n V_{pp} \right) - V_r \quad (\text{Ec 3.12})$$

donde:

**V<sub>f</sub>**: volumen de una laguna de secado de lodos (m<sup>3</sup>).

**V<sub>pp</sub>**: volúmenes parciales obtenidos por progresivas (m<sup>3</sup>).

**V<sub>r</sub>**: volumen ocupado por la rampa (m<sup>3</sup>).

Los volúmenes parciales se obtuvieron a partir de la ecuación:

$$V_{pp} = \text{Area } i \times mD \quad (\text{Ec 3.13})$$

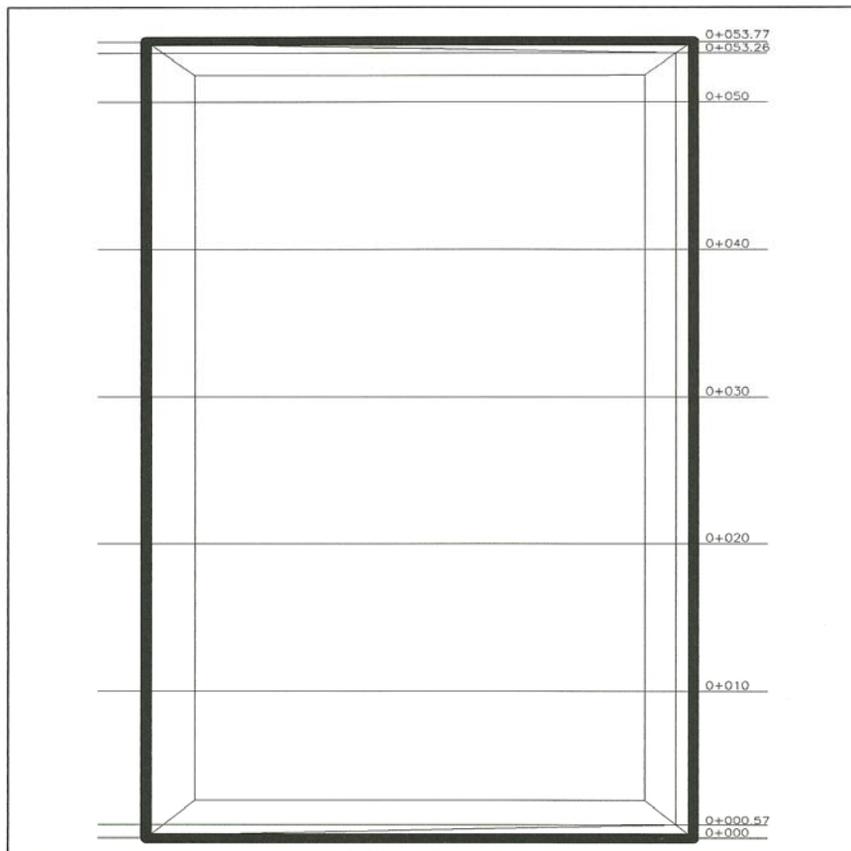
donde:

Area i : suma de dos áreas progresivas (m<sup>2</sup>).

mD: distancia media entre dos áreas progresivas (m).

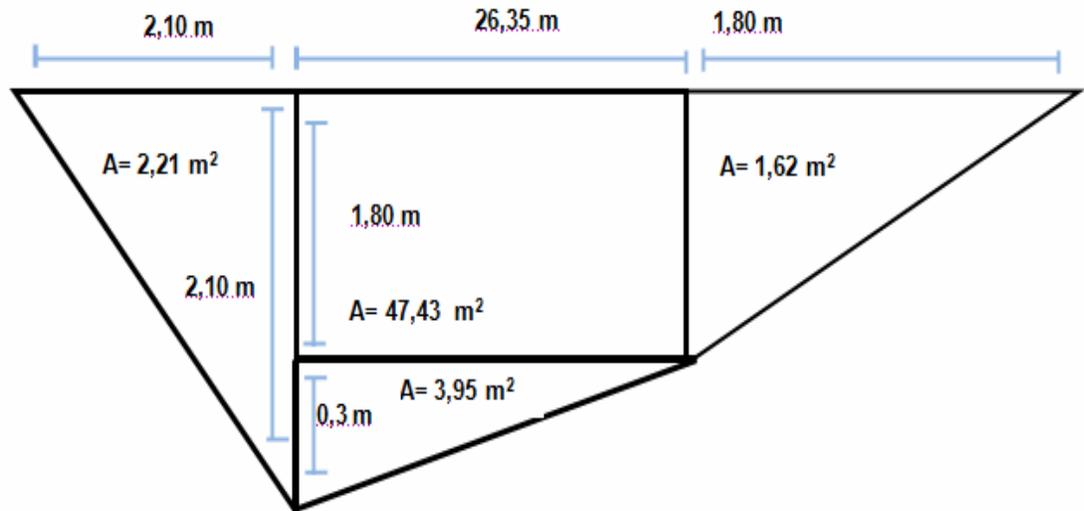
Por ejemplo, para determinar el volumen parcial entre el punto establecido como eje (0+000) y la distancia progresiva inmediata (0+000,57), figura 3.4, se obtuvo el siguiente volumen:

$$V_{pp_1} = 55,21 \text{ m}^2 \times 0,29 \text{ m} = 15,734 \text{ m}^3$$



**Figura 3.4 División en secciones progresivas de una laguna de secado de lodos (generado en AutoCAD 2009).**

El valor del área empleado en la ecuación 3.13 corresponde a la figura 3.5:



**Figura 3.5 Área empleada en el cálculo del volumen de una laguna de secado de lodos.**

El valor de la distancia media así como el resto de los datos se hallan en las tablas 3.7 y 3.8. Todos los volúmenes parciales fueron determinados de esa manera.

Haciendo uso de la ecuación 3.12 y con los datos de la tabla 3.10 se obtuvo el volumen de una laguna de secado hasta un nivel de 1,80 m:

$$V_1 = [15,734 \text{ m}^3 + 520,611 \text{ m}^3 + 4 \cdot (552,080 \text{ m}^3) + 180,088 \text{ m}^3 + 14,023] - 29,68 \text{ m}^3$$

$$V_1 = 2909,096 \text{ m}^3.$$

El volumen a esta altura corresponde el máximo nivel al cual puede retirarse sobrenadante al lodo y el máximo volumen de lodos que puede

acumularse en una (01) laguna de secado (volumen efectivo). Para la tubería de nivel medio fue determinado el volumen  $V_2$ , en la tabla 4.1 se hallan los resultados obtenidos. Los volúmenes calculados por este método son aproximaciones aceptables del valor real del volumen de estructuras que tienen profundidad variable.

El conocimiento del máximo volumen de lodos que puede ser acumulado en una (01) laguna de secado de lodos fue determinante en la caracterización del sistema y en la determinación de la capacidad del mismo. La capacidad estática del sistema, en volumen, es cuatro (04) veces el  $V_1$ .

**Tabla 3.7 Datos para el cálculo del  $V_1$  a través de progresivas y medias distancias**

Distancias progresivas	Área Transversal (m <sup>2</sup> )	Área i (m <sup>2</sup> )	mD (m)	Vpp (m <sup>3</sup> )
<b>0+000,00</b>	0	-	-	-
	-	55,208	0,285	15,734
<b>0+000,57</b>	55,208	-	-	-
	-	110,416	4,715	520,611
<b>0+010,00</b>	55,208	-	-	-
	-	110,416	5,000	552,080
<b>0+020,00</b>	55,208	-	-	-
	-	110,416	5,000	552,080
<b>0+030,00</b>	55,208	-	-	-
	-	110,416	5,000	552,080
<b>0+040,00</b>	55,208	-	-	-
	-	110,416	5,000	552,080
<b>0+050,00</b>	55,208	-	-	-
	-	110,416	1,631	180,088
<b>0+053,26</b>	55,208	-	-	-
	-	55,208	0,254	14,023
<b>0+053,77</b>	0	-	-	-

**Tabla 3.8 Datos para el cálculo del  $V_2$  a través de progresivas y medias distancias**

Distancias progresivas	Area Transversal (m <sup>2</sup> )	Área i (m <sup>2</sup> )	mD (m)	Vpp (m <sup>3</sup> )
<b>0+000,00</b>	0	-	-	-
	-	36,902	0,285	10,517
<b>0+000,57</b>	36,902	-	-	-
	-	73,804	4,715	347,986
<b>0+010,00</b>	36,902	-	-	-
	-	73,804	5,000	369,020
<b>0+020,00</b>	36,902	-	-	-
	-	73,804	5,000	369,020
<b>0+030,00</b>	36,902	-	-	-
	-	73,804	5,000	369,020
<b>0+040,00</b>	36,902	--	-	-
	-	73,804	5,000	369,020
<b>0+050,00</b>	36,902	-	-	-
	-	73,804	1,631	120,374
<b>0+053,26</b>	36,902	-	-	-
	-	36,902	0,254	9,373
<b>0+053,77</b>	0	-	-	-

**b.2.2 Número de lagunas llenadas por año a capacidad nominal:** para la producción actual (1330 lps), anualmente se llenan dos (02) lagunas de lodos de acuerdo a los operadores. Para conocer el número de lagunas que el sistema actual puede llenar si operase a su capacidad nominal (1600 lps de agua industrial) se determinó la masa de sólidos enviada hacia las lagunas de secado a lo largo de un año y se construyó una tabla de distribución de sólidos que mostró los meses en los cuales ocurre el llenado de las lagunas. La forma como fue desarrollado se muestra a continuación:

- **Cálculo de la masa total acumulada (Mt)**

Llamamos Mt a la masa total acumulada en una (01) laguna, la cual está constituida por la masa de sólidos totalmente secos (STS) y el agua que no fue retirada durante el secado.

▪ **Consideraciones para el cálculo:**

- La densidad del lodo a extraer es muy cercana a la densidad del sólido seco, se asumirá igual a  $1300 \text{ kg/m}^3$ , valor tomado del diseño de la planta D-300.
- La Mt ocupa un volumen menor al máximo volumen efectivo de las lagunas debido a la deshidratación del lodo.
- El volumen ocupado por la Mt es de  $2184,56 \text{ m}^3$  (valor obtenido por Pequiven a partir de un levantamiento en campo).
- La humedad de especificación, será la mínima requerida para la extracción de la masa de sólidos acumulados igual a 20% (tabla D.1, anexo D).
- La cantidad de sólidos perdida por sobrenadante es despreciable con respecto al total acumulado.

Entonces la masa de la torta de lodos (Mt) es igual a:

$$Mt = 1300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2184,56 \text{ m}^3 = 2839928 \text{ kg de lodo en especificación}$$

Sabiendo que la humedad es del 20%, se conoce que la fracción de STS es 80%. El producto de la Mt por la fracción de STS en la misma, aportó el valor de la masa de STS acumulados en una laguna, de esta forma:

$$\text{Masa de STS acumulados} = 0,8 \times \frac{\text{kg STS}}{\text{kg SH}} \times 2839928 \text{ kg} = 2271942,40 \text{ kg STS}$$

Con base en el valor obtenido fue posible determinar a lo largo de un año la masa de STS mensual recibida por una (01) laguna de lodos hasta

completar su capacidad y los meses en los que ocurre el llenado. Estos valores se muestran en lo que se denominó tabla de distribución de STS (ver tabla 4.2).

- **Construcción de la tabla de distribución de STS**

Para construir esta tabla era necesario disponer de los caudales mensuales de lodos recibidos, y las fracciones de STS en cada uno. De tal manera que fueron calculados.

- **Consideraciones para el cálculo:**

- El cálculo se realizará a la capacidad nominal del sistema agua industrial (1600 lps).
    - Los STS que entran a la laguna se acumulan en ella hasta un tiempo ( $t_a$ ).
    - La Densidad del lodo Actiflo® que entra a la laguna es 991,59 kg/m<sup>3</sup> (promedio experimental, tabla D.1).
    - La Densidad del lodo Densadeg® que entra a la laguna es 1013,66 kg/m<sup>3</sup> (promedio experimental, tabla D.2).
    - La humedad de descarga del lodo Actiflo® es 96,72 % (promedio experimental, tabla D.3, anexo D).
    - La humedad de descarga del lodo Densadeg® es de 92,43 % (promedio experimental, tabla D.3, anexo D).

- **Caudal y flujos máxicos de lodos**

Los caudales producidos por Actiflo® en invierno y verano, son los promedios de la tabla 3.4, para Densadeg® los valores son los correspondientes a la tabla 3.6, con dichos valores y las densidades de los

lodos se obtuvieron los flujos máxicos. En la tabla 3.9 se muestran los valores de caudal y flujos máxicos enviados a lagunas de secado por mes.

o **Fracción de STS**

Las fracciones máxicas de sólido seco (Y) en los caudales de lodos Actiflo® y Densadeg® se determinaron con la siguiente ecuación:

$$Y=1-W \tag{Ec 3.14}$$

Donde W es la humedad en base húmeda promedio de cada tecnología (kg H<sub>2</sub>O/ kg SH). Para el flujo Actiflo® la fracción que se obtuvo fue:

$$Y_{Actiflo} = 1 - 0,9672 = 0,0328 \frac{\text{kg STS}}{\text{kg SH}}$$

De igual forma se determinó para el lodo Densadeg® y se muestran en la tabla 3.9.

o **Flujo de STS enviado a lagunas**

Se empleó la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo STS} = \sum_{i=1}^n Y_i(F_i) \tag{Ec 3.15}$$

donde:

Flujo STS: (Kg STS/mes)

Y<sub>i</sub>: fracción de STS en el lodo de cada tecnología (kg STS/ kg SH).

F<sub>i</sub>: flujo máxico de lodo enviado hacia las lagunas (kg/ mes).

Para el mes de enero, por ejemplo, haciendo uso de los valores de la tabla 3.9 se obtuvo lo siguiente:

$$\text{Flujo STS} = \left( 0,0327 \frac{\text{kg STS}}{\text{kg SH}} \times \left( 5525387,38 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right) \right) + \left( 0,0757 \frac{\text{kg STS}}{\text{kg SH}} \times \left( 3144859,88 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right) \right)$$

$$\text{Flujo STS} = 418746,06 \frac{\text{kg STS}}{\text{mes}}$$

Con el mismo método fueron determinados el resto de los flujos máxicos de STS que se muestran en la tabla 4.2.

o **Masa de STS acumulada (Mac)**

La masa acumulada fue el indicativo que permitió determinar el mes en que se completaba el llenado de una (01) laguna. Se calculó sumando a las masas generadas por mes. Por ejemplo, para conocer la masa acumulada (Mac) al final de febrero:

$$\text{Mac}_{n+1} = \text{Mac}_n + \text{Mac}_{n+1} \quad (\text{Ec 3.16})$$

donde:

$\text{Mac}_{n+1}$ : masa acumulada a final de mes (Kg STS).

$\text{Mac}_n$ : masa de acumulada del mes inicial (Kg STS).

$\text{Mac}_{n+1}$ : masa generada en el mes final (Kg STS)

Tomando los valores de las masas acumuladas de la tabla de distribución (4.2) y haciendo uso de la ecuación (3.16), se obtuvo que para el final del mes de febrero la masa acumulada fue de:

$$\text{Mac}_{\text{febrero}} = 418746,06 \text{ Kg STS} + 399403,59 \text{ Kg STS} = 818149,65 \text{ Kg STS}$$

Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 4.2, cuando la producción es nominal (1600 lps). En la tabla 3.15 se muestran los resultados obtenidos utilizando la misma metodología para la producción debido a la ampliación, lo cual permitió comparar y determinar la capacidad de manejo de lodos, esto se expone en el apartado 3.3 del presente trabajo.

**Tabla 3.9 Valores de caudales, flujos máxicos y fracciones de STS de los lodos enviados hacia las lagunas de secado a capacidad nominal**

Meses	Caudal m <sup>3</sup> /mes		Flujo Kg/mes		Fracción de STS KgSTS/Kg SH	
	Actiflo®	Densadeg®	Actiflo®	Densadeg®	Actiflo®	Densadeg®
Enero	5572,25	3102,48	5525387,38	3144859,88	0,0327	0,0757
Febrero	5212,75	3002,32	5168910,77	3043331,69		
Marzo	5572,25	3102,48	5525387,38	3144859,87		
Abril	5392,50	3002,40	5347149,08	3043412,78		
Mayo	5652,23	3407,28	5604694,75	3453823,45		
Junio	5469,90	3362,40	5423898,14	3408330,38		
Julio	5652,23	3474,48	5604694,75	3521941,40		
Agosto	5652,23	3474,48	5604694,75	3521941,40		
Septiembre	5469,90	3407,28	5423898,14	3453823,45		
Octubre	5652,23	3474,48	5604694,75	3521941,40		
Noviembre	5469,90	3407,28	5423898,14	3453823,45		
Diciembre	5572,25	3102,48	5525387,38	3144859,88		
<b>TOTAL</b>	66340,62	39319,84	65782695,40	39856949,01		

**Nota:**   meses de invierno.

- **Tiempo de secado**

Por ser el secado el fin del sistema de lagunas en estudio, se determinó un tiempo de secado experimental con el objetivo de compararlo con el tiempo especificado por los operadores (cuatro meses) y poder contar con un dato adicional que permitiese inferir un poco más en el proceso de secado en las lagunas y proponer alguna mejora.

Se realizaron ensayos empíricos de secado de lodos, a condiciones ambientales en el CPJAA. Fueron utilizados recipientes de concreto con el

objeto de simular a pequeña escala el proceso que se lleva a cabo en las lagunas de secado. El secado se realizó en una zona del CPJAA delimitada para tal fin, cercana al laboratorio de calidad de Pequiven donde se encontraban todos los equipos e instrumentos de trabajo necesarios para el estudio.

Los recipientes empleados fueron hechos de forma cilíndrica para poder ser manejados con facilidad y para que su peso no superara el máximo permitido por la balanza dispuesta para el ensayo. Se seleccionaron recipientes de tres alturas diferentes (6, 9 y 20 cm respectivamente) con el objeto de poder evaluar el secado para diferentes espesores. Se secaron 3 muestras de cada espesor y se promediaron los tiempos obtenidos en cada caso.

Con los datos promedio de cada ensayo se construyeron curvas de espesor vs tiempo de secado, las cuales en línea general presentaron una tendencia casi lineal, un ajuste lineal permitió pronosticar los tiempos de secado de lodos para la altura máxima efectiva del nivel de lodos en las lagunas (180 cm de espesor de la capa de lodos). Se obtuvieron un total de cuatro tiempos de secado (uno por cada curva), sin embargo cada uno corresponde a lodos con humedades iniciales diferentes, razón por la cual a partir de esos datos fue construida una curva de pronóstico del tiempo de secado en función de la humedad en base seca del lodo. Los valores de dicha curva corresponden a un espesor constante de 180 cm.

▪ **En el ensayo de secado de lodos se hicieron las siguientes consideraciones:**

- El ensayo está bajo a las mismas condiciones ambientales que las lagunas de secado.
- Las condiciones ambientales presentan poca variación diaria, la diferencia marcada se muestra en las temporadas de invierno y

verano. Según datos del INAMEH y de estudios previos de la calidad del aire en el CPJAA.

- Se consideraron promedios mensuales de las variables ambientales (temperatura, % Hr, presión, radiación, pluviosidad).
- Se asume que las pérdidas de agua por evaporación y por permeabilidad en el ensayo es equivalente a la que ocurre en las lagunas.
- El ensayo no contempla la pérdida de agua por recolección de sobrenadante, el aporte de agua por lavado de las líneas de extracción y pluviosidad, debido a la dificultad para ser simulados por lo tanto, el tiempo que se obtuvo permitió observar la tendencia del tiempo de secado ante la ausencia de estos factores.
- El tiempo de secado de lodos a condiciones ambientales promedio y humedad inicial constante es función del espesor de la capa de lodos a secar.
- El tiempo de secado de lodos a condiciones ambientales promedio y espesor de la capa de lodos constante es función de la humedad.
- El valor de sólidos totales determinado por la norma 2540 G de los Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, corresponde a la masa de sólidos totalmente secos (STS) de una muestra.
- La humedad de especificación de secado del lodo está en un rango de 10% y 20% (0,11 y 0,25 en base seca), ver tabla D.1 del anexo D.

▪ **El ensayo de secado de lodos se llevó a cabo de la siguiente manera:**

1. Se tomaron tres (03) muestras del lodo seco a las texturas a las cuales el lodo es extraído de acuerdo al criterio de los operadores.

Se llevaron a secado constante a 103-105 °C para determinar la humedad (datos en la tabla C.3, anexo C).

2. Se construyeron recipientes de concreto de forma cilíndrica (cilindros de secado), de alturas variables, 6, 9 y 20 cm respectivamente. Con un diámetro interno de 2,54 cm (figura 3.6).
3. Se seleccionaron nueve cilindros de secado, tres de cada altura. Fueron numerados, pesados vacíos y anotado su peso (ver tablas de la C.3 a C.6, anexo C).
4. Se preparó 1 Kg de muestra compuesta de lodos, representativa de la mezcla de lodos que es secada en las lagunas, constituida por 37,54 % en masa lodo Densadeg y 62,47 % en masa Actiflo (estos valores fueron conocidos a partir de los flujos másicos enviados hacia las lagunas de secado por cada planta). Cantidad suficiente para el llenado de los cilindros de secado. Los cilindros de secado fueron llenados hasta el tope con la mezcla de lodos y fueron llevados al exterior del laboratorio, a un área delimitada para el estudio (Figura 3.7).



**Figura 3.6 Cilindros de secado.**



**Figura 3.7 Secado de lodo.**

5. Se determinó la humedad en base seca inicial del lodo expuesto a secado y la masa de sólidos totalmente secos (STS) de cada muestra haciendo uso del ensayo de secado de sólidos totales de la norma 2540 G ( los datos se encuentran en las tablas de la C.3 hasta C.7, anexo C).

o **Procedimiento para determinar los STS**

1. Preparar dos cápsulas de evaporación limpias; llevar a secado a 103-105 °C durante una hora. Llevar al desecador hasta que se haya secado para ser usada.
2. Pesar las cápsulas vacías y agregar de 25 a 50 g de muestra. Las muestras se analizan por duplicado, por lo tanto deben agregarse la misma cantidad de lodo a cada una.
3. Evaporar a secado en un baño de vapor.
4. Llevar las cápsulas a secado en horno a 103-105 °C, por lo menos una hora.
5. Enfriar la placa en el desecador para balancear la temperatura.
6. Pesar las cápsulas y repetir el ciclo hasta obtener un peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor al 4% del peso previo o 0,5 mg. La diferencia entre la muestra y su peso debe concordar dentro del 5% de su peso promedio (ver datos en las tablas de la C.7 a la C.10, anexo C).

o **Cálculo de la humedad inicial del lodo base seca (Xi)**

Para determinar los STS (g) se empleó la siguiente ecuación:

$$STS = (\text{masa de cápsula} + \text{residuo}) - \text{masa de cápsula vacía} \quad (\text{Ec 3.17})$$

Por ejemplo, para el ensayo 1, los sólidos totalmente secos son iguales a:

$$STS = 73,62 \text{ g} - 71,54 \text{ g} = 2,08 \text{ g STS}$$

La masa de sólido húmedo (SH) se determinó con la siguiente ecuación:

$$SH = (\text{masa de cápsula} + \text{muestra inicial}) - \text{masa de cápsula vacía} \quad (\text{Ec 3.18})$$

Para el mismo caso, el ensayo 1, el valor obtenido fue:

$$SH = 96,59 \text{ g} - 71,54 \text{ g} = 25,05 \text{ g SH}$$

Conocidos STS y SH y haciendo uso de la ecuación 2.8, fue posible determinar la humedad inicial del lodo sometido a secado en el ensayo 1:

$$Xi = \frac{25,05}{2,08} - 1 = 11,04 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg STS}}$$

De igual forma se determinaron las humedades iniciales de las muestras de lodos expuestas a secado para el resto de los ensayos, los valores se hallan en la tabla D.3, anexo D.

Los cilindros de secado fueron pesados diariamente y calculada la humedad en base seca del lodo contenido en cada uno, cuando este valor se hallaba dentro del rango establecido para la humedad de especificación el

ensayo ese daba por finalizado. El tiempo transcurrido hasta entonces es el tiempo de secado.

o **Cálculo de las humedades de las muestras en base seca transcurrido el tiempo de secado (Xf)**

Para conocer la humedad de las muestras de lodos expuestas a secado, luego de transcurrido un tiempo de secado (t), se empleó la ecuación 2.10, cuyos valores de STS y SH corresponden al tiempo (t). La variable SH puede determinarse como se ha venido realizando (ecuación 3.18).

Entonces, la masa de STS en la muestra 1 del ensayo 1 fue:

$$STS = \frac{37,44 \text{ g}}{11,04 + 1} = 3,11 \text{ g STS}$$

De la misma manera el cálculo se realizó para todas las muestras de lodos en los cilindros de secado. Los resultados se hallan en la tabla D.4, anexo D.

Obtenido los STS contenidos en los cilindros de secado, era posible conocer la humedad del lodo para cualquier instante de tiempo (t) teniendo SH (t) y usando la ecuación 2.9. De tal forma, que para la muestra 1 del ensayo 1, transcurridos 5 días presentó la siguiente humedad:

$$Xf = \frac{3,58 \text{ g}}{3,11 \text{ g}} - 1 = 0,15 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg STS}}$$

Las Xf de todos los ensayos se hallan en la tabla D.4, anexo D. Con los tiempos de secado obtenidos para cada espesor (tabla D.5), se construyeron las curvas de espesor vs tiempo de secado (figuras D.1, D.2, D.3 y D.4 anexo D) y se realizó un ajuste lineal a cada una. Con las ecuaciones obtenidas a partir del ajuste lineal, fue posible pronosticar, para cada caso en particular, el tiempo de secado (días) que tardaría el lodo en secar hasta

especificación, si el espesor fuese igual a 180 cm. Los valores obtenidos en cada caso se muestran en la tabla 3.10.

El mayor valor de humedad en los ensayos realizados fue de 19,01 kg H<sub>2</sub>O/ kg STS, correspondiente al ensayo 2, gráficamente el tiempo de secado que le corresponde es de 80,86 días aproximadamente 3 meses. Si en promedio la humedad de los lodos enviados hacia las lagunas se mantiene alrededor de este valor ese será el tiempo de secado sin el aporte de sobrenadante.

**Tabla 3.10 Valores de tiempo de secado obtenidos para distintas humedades y un espesor constante igual a 180 cm**

Tiempo de secado (días)	Humedad inicial (Kg H <sub>2</sub> O/Kg STS)
67,41	11,04
80,86	19,01
76,86	11,92
76,86	12,31

Con los valores de la tabla 3.15 se construyó una curva de pronóstico del tiempo de secado, a partir de la cual se puede estimar el tiempo de secado para cualquier humedad de lodo (figura D.5, anexo D).

### **b.3 Subsistema de recolección de sobrenadante**

Descripción del proceso: está constituido por una tanquilla de recolección de sobrenadante (TQ-1801) común a las cuatro lagunas de secado. Una fosa de recolección de sobrenadante (TQ-1802) y dos bombas de combustión interna (1800 A/B) de 60 m<sup>3</sup>/h de capacidad que succionan

el agua de la fosa y la envían al inicio del tratamiento (a lagunas de agua cruda), ver figuras 3.8 a 3.10.



**Figura 3.8 Vista superior de TQ-1801**



**Figura 3.9 Vista superior de la Tubería.**



**Figura3.10 Vista de las bombas 1800 A/B**

El proceso de recolección de sobrenadante fue diseñado para que su operación fuese automática, la fosa TQ-1802 dispone de tres sensores de nivel uno de bajo, uno de alto y otro de muy alto nivel. El arranque y parada de las bombas estaría determinado por el nivel registrado en la fosa, de tal manera que: por alto nivel arranca una bomba, por muy alto nivel arranca la segunda bomba y por bajo nivel en la fosa se detiene el funcionamiento de las bombas hasta que se recupere el nivel. Sin embargo el manejo de las bombas fue cambiado a modo manual, debido a problemas con el sistema de

control de las bombas en temporada de invierno, información suministrada por los operadores. Las bombas son accionadas por motores diesel, tienen a su disposición un tanque de acero al carbono (TK-1800) que tiene una capacidad de 4,24 m<sup>3</sup> para almacenar combustible.

A la descarga de las bombas se encuentra un interruptor de flujo que envía una señal a sala de control cuándo se está enviando sobrenadante a las lagunas de agua cruda, en modo automático.

Los operadores continuamente monitorean el área para:

- Verificar el nivel de sobrenadante en las lagunas y abrir la válvula correspondiente que permite el paso de sobrenadante al TQ-1801 y que por gravedad el sobrenadante es transferido a la fosa (TQ-1802).
- Verificar el nivel de sobrenadante en la fosa y arrancar la bomba para su envío hacia las lagunas de agua cruda.

Tanto el TQ-1801 como TQ-1802 fueron construidos de concreto con dimensiones de L x A x H de: 2 x 2 x 3,2 m para el primero y 4 x 4 x 4 m para el segundo. Lo que les confiere un volumen total de 12,8 y 64 m<sup>3</sup> respectivamente. En cuanto a la capacidad del sistema de sobrenadante, el diseño contempla la recolección para una laguna a la vez, la recepción de un caudal de 60 m<sup>3</sup>/h en la TQ- 1801, luego pasa por gravedad a la línea de aducción de la fosa TQ-1802 y de allí a las bombas de recirculación.

- **Datos adicionales**

- **Aporte anual de agua de lluvia a las lagunas de secado**

Haciendo uso del valor promedio de precipitaciones anuales en el CPJAA fue posible determinar el volumen de agua que aportan a las lagunas de secado,

lo que se logró haciendo uso del área interna de una (01) laguna, el valor de precipitaciones anual y un factor de conversión.

El área interna ( $A_i$ ) de cada laguna es un rectángulo, conocidos de las longitudes de ancho y largo de una laguna se obtuvo el valor del área:

$$A_i = 26,35 \text{ m} \cdot (49,25 \text{ m}) = 1297,74 \text{ m}^2$$

Teóricamente se conoce que 1 mm de lluvia equivale al espesor de la capa que se forma cuando 1 litro de agua cae en 1 metro cuadrado de terreno. Con esta definición y conocida la precipitación anual de 608 mm (60,80 cm) y el área, fue posible conocer el volumen de agua anual aportado a una (01) laguna de secado de lodos:

$$608 \frac{\text{l}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot (1297,74 \text{ m}^2) = 789,03 \text{ m}^3 / \text{año}$$

Anualmente el aporte promedio de agua a cada laguna de secado de lodos por precipitaciones es de 789,03 m<sup>3</sup> este valor se halla en la tabla 3.12.

#### **- Aporte anual de agua de lavado de las líneas de extracción a las lagunas**

Luego de cada extracción las tuberías de las plantas Densadeg® son sometidas a una limpieza, para evitar el taponamiento de las mismas, haciendo pasar un caudal de agua de servicio (Actiflo® realiza la limpieza generalmente en temporada de invierno). El agua desemboca en la laguna de lodos que se encuentre en proceso de llenado en ese instante (ver la figura 3.11). La tabla 3.11 fue generada por el departamento de operaciones de Pequiven, y en ella se observan los caudales de agua de lavado de las líneas de extracción que cada planta envía a lagunas de secado a lo largo de un año.

**Tabla 3.11 Datos anuales de los volúmenes de agua de lavado de líneas de extracción y de agua de lluvia recibido por el sistema de lagunas de secado**

Origen	Diámetro de tubería (m)	Número de extracciones al año	Volumen de agua de lavado/ extracción (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua de lavado (m <sup>3</sup> /año)
D-100	0,1015	70	12,50	851
D-200	0,1016	77	12,50	936
D-300	0,1524	70	27,35	1914
M-600				972
Lluvia				789,03

Fuente: [operaciones Pequiven]



**Figura 3.11 Descarga de lodos en una laguna de secado**

### 3.2 CÁLCULO DEL INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE LODOS DEBIDO A LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL

Como se ha comentado la ampliación contempla la instalación de cinco (05) plantas de tratamiento tecnología Densadeg®, cuatro de 400 lps y una de 300 lps, lo que hará que la nueva producción de agua sea de 3500 lps. Para conocer el nuevo caudal de lodos generados se tomaron los valores de la tabla 3.6, para cada temporada, y se multiplicaron por el número de plantas a instalar. Por ejemplo, para la temporada de invierno, las plantas de 400 lps generarán:

$$\text{Caudal de lodos generados por las plantas de 400 lps} = 4 \times 1,87 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 179,52 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

El caudal generado en la temporada de verano, y los flujos máxicos de las nuevas plantas se hallan en la tabla 3.12. Como se ha venido comentando la mayor producción se da en la temporada de invierno. El aumento de la producción de lodos se calculó con los datos de esta temporada. Se usó la siguiente ecuación:

$$\% A = \frac{Q_a - Q_n}{Q_i} \times 100 \quad (\text{Ec.3.19})$$

donde:

% A: porcentaje de aumento de producción de lodos

Q<sub>a</sub>: caudal de lodos para la ampliación (m<sup>3</sup>/día)

Q<sub>n</sub>: Caudal de lodos nominal del sistema actual (m<sup>3</sup>/día).

**Tabla 3.12 Resultados de la producción de lodos de las nuevas plantas**

Temporada	Lodos a lagunas por nuevas plantas (m <sup>3</sup> /día)		Total de lodos por nuevas plantas	
	Plantas 400	Planta 300	total (m <sup>3</sup> /día)	total (Kg/día)
<b>Invierno</b>	179,52	33,6	213,12	216031,22
<b>Verano</b>	160,32	30	190,32	192919,77

Los caudales actuales y futuros de lodos resultan de la suma de los caudales de las tablas 3.4 y 3.6 y la tabla 3.12 (producto de la ampliación):

$$Q_n = 112,08 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} + 182,33 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 294,41 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$Q_a = 112,08 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} + 182,33 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} + 213,12 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 507,53 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Para calcular el valor estimado del incremento de la producción de lodos con la ampliación se sustituyó  $Q_n$  y  $Q_a$  en la ecuación 3.19 se obtuvo un porcentaje que representa el incremento de la producción de lodos respecto a la capacidad nominal del sistema actual:

$$\% A = \left( \frac{507,53 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} - 294,41 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{294,41 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} \right) \times 100 = 72,39\%$$

Este valor se encuentra en la tabla 3.13.

**Tabla 3.13 Valores de Qa, Qn y porcentaje de incremento en la producción de lodos para la ampliación**

<b>Qa (m3/día)</b>	<b>294,41</b>
<b>Qn (m3/día)</b>	<b>507,53</b>
<b>Incremento en la producción de lodos (%)</b>	<b>72,39</b>

### **3.3 COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN**

Conocida la producción de lodos que se generará debido a la ampliación (ver tabla 3.12), los caudales de las plantas existentes ( ver tablas 3.3, 3.4 y 3.6) y las fracciones de STS de los lodos de cada tecnología (ver tabla 3.9), de la misma forma en que fue explicado en la caracterización del sistema de lagunas de secado de lodos (sección 3.1.2.3) se desarrolló una tabla de distribución de STS, con el objetivo de determinar la cantidad de lodos producto de la ampliación que podría manejar el actual sistema de lagunas de secado. Los nuevos caudales y flujos máxicos mensuales se muestran en la tabla 3.14 y a partir de estos se obtuvo la tabla 3.15, dicha tabla refleja que para el incremento de la producción de lodos, se llenarían anualmente cerca de cinco (05) lagunas de secado, cuando la disponibilidad actual es de cuatro (04) lagunas. Considerando lo anterior, se construyó una tabla (tabla 4.3) a partir de los datos de la tabla 3.16, con la finalidad de determinar la cantidad de lodos de la nueva producción que puede enviarse hacia el sistema de lagunas de secado actual sin superar la capacidad de las mismas. El resultado obtenido se muestra en el capítulo IV.

**Tabla 3.14 Valores mensuales de caudales, flujos másicos y fracciones de STS de los lodos enviados hacia las lagunas de secado para la ampliación**

	Caudal (m <sup>3</sup> /mes)		Flujo (Kg/mes)		Fracción de STS	
	Actiflo	Densadeg	Actiflo	Densadeg	Actiflo	Densadeg
Enero	5572,25	9002,40	5525387,38	9125372,78	0,0327	0,0757
Febrero	5212,75	8921,60	5168910,77	9043469,06		
Marzo	5572,25	9002,40	5525387,38	9125372,78		
Abril	5392,50	8712,00	5347149,08	8831005,92		
Mayo	5652,23	9980,40	5604694,75	10116732,26		
Junio	5469,90	9756,00	5423898,14	9889266,96		
Julio	5652,23	10081,20	5604694,75	10218909,19		
Agosto	5652,23	10081,20	5604694,75	10218909,19		
Septiembre	5469,90	9980,40	5423898,14	10116732,26		
Octubre	5652,23	10081,20	5604694,75	10218909,19		
Noviembre	5469,90	9980,40	5423898,14	10116732,26		
Diciembre	5572,25	9002,40	5525387,38	9125372,78		
<b>Total</b>	66340,62	114581,60	65782695,40	116146784,7		

Nota: ■ meses de invierno.

**Tabla 3.15 Distribución mensual de STS enviados al sistema de lagunas de secado para la ampliación**

Meses	Flujo de STS a lagunas KgSTS/mes	Masa acumulada Kg STS	Capacidad másica /laguna (KgSTS/laguna)
Enero	871470,89	871470,89	2271942,40
Febrero	853613,99	1725084,88	
Marzo	871470,89	<b>324613,36</b>	
Abril	843358,92	1167972,29	
Mayo	949110,15	2117082,44	
Junio	925978,98	<b>771119,01</b>	
Julio	956844,94	1727963,96	
Agosto	956844,94	<b>412866,50</b>	
Septiembre	943198,10	1356064,61	
Octubre	956844,94	<b>40967,15</b>	
Noviembre	943198,10	984165,25	
Diciembre	871470,89	1855636,14	
<b>Total</b>	10943405,74	---	---
<b>Total (MM Kg/año)</b>	10,94	---	2,27

Nota: los valores en negrita indican que en ese mes se produjo el llenado de la laguna.

**Tabla 3.16 Valores de caudales, flujos másicos y fracciones de STS de los lodos enviados hacia las lagunas de secado de lodos por meses adicionando dos (02) plantas 400.**

	Caudal (m <sup>3</sup> /mes)		Flujo (Kg/mes)		Fracción de STS	
	Actiflo	Densadeg	Actiflo	Densadeg	Actiflo	Densadeg
<b>Enero</b>	5572,25	5587,44	5525387,38	5663764,43	0,0327	0,0757
<b>Febrero</b>	5212,75	5526,96	5168910,77	5602458,27		
<b>Marzo</b>	5572,25	5587,44	5525387,38	5663764,43		
<b>Abril</b>	5392,5	540,20	5347149,08	5481062,35		
<b>Mayo</b>	5652,23	6189,84	5604694,75	6274393,21		
<b>Junio</b>	5469,9	6055,20	5423898,14	6137914,03		
<b>Julio</b>	5652,23	7877,04	5604694,75	7984640,37		
<b>Agosto</b>	5652,23	7877,04	5604694,75	7984640,37		
<b>Septiembre</b>	5469,9	6055,20	5423898,14	6137914,03		
<b>Octubre</b>	5652,23	7877,04	5604694,75	7984640,37		
<b>Noviembre</b>	5469,9	6055,20	5423898,14	6137914,03		
<b>Diciembre</b>	5572,25	5587,44	5525387,38	5663764,43		
<b>Total</b>	66340,62	69872,16	65782695,39	70826613,71		

**Nota:**  meses de invierno.

### 3.4 ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE MANEJO DE LODOS

Se llevó a cabo mediante la consulta de las tendencias del mercado y los informes publicados por la CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria) y la PAHO (Pan American Health Organization). Una vez conocidos las tecnologías empleadas en el tratamiento de lodos hidrónicos se estudiaron las características y equipos básicos asociados a su funcionamiento. Se establecieron las ventajas y desventajas de cada tecnología y se calculó el costo de inversión a través de un estudio de orden de magnitud (estimado de costo clase V). Todo lo anterior se hizo con la finalidad de tener criterios claros para aplicar la matriz de evaluación que permitió conocer la mejor opción tecnológica para Pequiven.

### **3.4.1 Tecnologías de deshidratación de lodos hidróxidos**

Las tecnologías de deshidratación de lodos hidróxidos más extendidas son:

- Filtro prensa de placas y marcos.
- Centrifugadora de tazón sólido.
- Filtro prensa de bandas.

### **3.4.2 Aspectos de interés de las tecnologías de deshidratación de lodos hidróxidos**

Para manejar un criterio de selección de tecnologías adecuado fue necesario investigar cómo era el desempeño de los equipos propuestos en la tarea de deshidratar lodos. Se puntualizaron las ventajas y desventajas de cada uno así como su régimen de operación (tablas de la 3.17 a la 3.19).

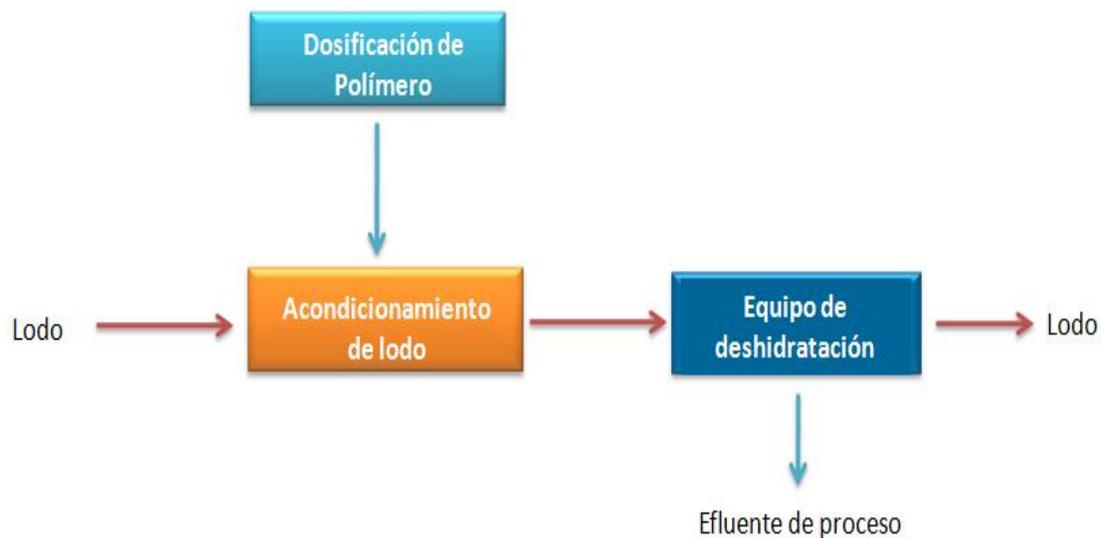
### **3.4.3 Equipos básicos asociados a las tecnologías propuestas**

Los procesos de deshidratación mecánica requieren de un acondicionamiento previo y homogenización de la alimentación (figura 3.12) lo que implica disponer de equipos como: tanques, mezcladores y bombas. Con la finalidad de obtener un costo de inversión representativo de cada tecnología se consideraron algunos equipos básicos asociados a su operación.

Las unidades básicas asociadas a un equipo de deshidratación de lodos son las siguientes:

- **Sistema de dosificación de polímero:** hay muchas variantes en el mercado ajustadas a diferentes requerimientos, para dosificación de químicos sólidos o en solución. para dosificación de soluciones puede estar constituido por un tanque de preparación, tanque de dosificación y bomba.

- **Tanque ecualizador:** es un tanque provisto de un agitador a velocidad controlada y lo suficientemente baja como para que no rompa los flóculos. Este tanque homogeniza la mezcla de lodos a alimentar al proceso y mantiene el flujo continuo de alimentación al equipo. Para los filtros de placas y marcos así como para la centrifugadora es común que la dosificación del polímero se lleve a cabo en esta unidad.
- **Bombas de alimentación de lodos:** envían el lodo al inicio del equipo de deshidratación y deben ser adecuadas para el manejo de fluidos viscosos y sólidos en suspensión.



**Figura 3.12 Proceso de deshidratación mecánica.**

**Tabla 3.17 Aspectos de interés del filtro prensa de placas y marcos**

Proceso	Ventajas	Desventajas
<b>Por carga</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede lograr tortas de 2 a 3 cm de espesor</li> <li>• Se obtienen tortas con 40 a 60 % de sólidos.</li> <li>• Gran variedad de tamaños de las placas.</li> <li>• Posibilidad de usar hasta 150 placas o más.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costos de inversión mayores que para centrifugadoras y filtros prensa de bandas.</li> <li>• Mayor costo por mantenimiento y mano de obra operaria mayor que para centrifugadoras y filtros prensa de bandas.</li> </ul>

**Tabla 3.18 Aspectos de interés de una centrifugadora de tazón sólido**

Proceso	Ventajas	Desventajas
<b>Continuo/ por carga</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede obtener una torta con un contenido de sólidos de 10 a 40 %, dependiendo del tipo de lodos tratados.</li> <li>• Espacio reducido</li> <li>• Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuidados especiales por ruido y vibración.</li> <li>• Desgaste mecánico y alto consumo de energía eléctrica.</li> <li>• Efluente con presencia considerable de sólidos finos</li> </ul>

**Tabla 3.19 Aspectos de interés del filtro prensa de bandas**

Proceso	Ventajas	Desventajas
Continuo	<ul style="list-style-type: none"><li>• De acuerdo al tipo de lodos se pueden obtener tortas con 10 a 35% de sólidos.</li><li>• Bajo costo, similar al de la centrifugadora.</li><li>• Bajo consumo de energía</li><li>• Operación continua. Poco requerimiento de mano de obra.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alta sensibilidad al tipo de lodo.</li><li>• Corta vida útil de la tela filtrante.</li></ul>

#### **3.4.4 Capital de inversión**

Está dado por el capital fijo de inversión y el capital de trabajo. Los costos de un equipo están asociados a la capacidad, material, temperatura y presión de operación. Sin embargo, el proyecto de deshidratación mecánica de lodos se encuentra en la fase de visualización, solo se conoce el caudal de lodos que se alimentará al proceso y el diagrama de bloques (figura 4.6), por esta razón se realizó un estimado de costo de orden de magnitud (clase V) que tiene una desviación de  $\pm 30\%$ , y se usó el “método del equipo entregado” para conocer los costos de inversión.

##### **3.4.4.1 Capacidad del equipo**

La evaluación de costos de orden de magnitud permite hacer estimaciones sobre datos de plantas de capacidad semejante a la planta en estudio. Se solicitó a los proveedores costos de equipos con capacidad para manejar la producción de lodos más un 10%. La producción de lodos para dos (02) plantas de 400 lps y una (01) planta de 300 lps se calculó con la ecuación 3.20.

$$\text{Lodos a deshidratación mecánica} = 2 \times (Q_{8-D-200}) + Q_{8-D-300} \quad (\text{Ec.3.20})$$

donde:

$Q_{8-D-200}$ : caudal de lodos generado por una planta de 400 lps ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

$Q_{8-D-300}$ : caudal de lodos generado por una planta de 300 lps ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

Los datos de Q8 se hallan en la tabla 3.6, el caudal de lodos a deshidratación mecánica obtenido fue:

$$\text{Lodos a deshidratación mecánica} = \left( 1,87 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) + 1,40 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 5,14 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Lodos a deshidratación mecánica} = 123,36 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Por haber considerado un 10 % de sobrediseño para los equipos, se solicitaron costos de equipos con capacidad para manejar  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $130 \text{ m}^3/\text{día}$ ) de lodo. En el caso de los filtros de placas y marcos es común ver en el mercado la capacidad del filtro expresada en volumen de la torta de sólidos, en este caso la torta de sólidos que generaría el filtro para una carga diaria  $130 \text{ m}^3$  es  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### 3.4.4.2 Estimación de costos

*Aguamarket*, proveedor de equipos de de tratamiento de aguas en Latinoamérica, facilitó los costos de los equipos (tablas de la 3.20 a la 3.22).

**Tabla 3.20 Costos de filtro prensa de placas y marcos**

Equipo	Costo del equipo entregado	
	US \$	BsF
<b>Filtro Prensa de placas y marcos</b>	800.000,00	2.080.000,00
<b>Sistema de dosificación de Coagulante/ floculante</b>	26.922,33	69.998,06
<b>Tanque ecualizador</b>	35.436,55	92.135,02
<b>Bomba de alimentación de lodos</b>	6.923,08	18.000,00
<b>Costo total</b>	869.281,96	2.260.133,06

**Tabla 3.21 Costos de una centrifugadora de tazón sólido**

Equipo	Costo del equipo entregado	
	US \$	BsF
<b>Centrifugadora de tazón sólido</b>	350.000,00	910.000,00
<b>Sistema de dosificación de Coagulante/ floculante</b>	26.922,33	69.998,06
<b>Tanque ecualizador</b>	6979,06	18.145,54
<b>Bomba de alimentación de lodos</b>	2.692,30	7.000,00
<b>Costo total</b>	386.593,69	1.005.143,60

**Tabla 3.22 Costos de un filtro prensa de bandas**

Equipo	Costo del equipo entregado	
	US \$	BsF
<b>Filtro prensa de bandas</b>	325.802,85	847.087,00
<b>Sistema de dosificación de Coagulante/ floculante</b>	26.922,33	69.998,06
<b>Tanque ecualizador</b>	6979,06	18.145,54
<b>Bomba de alimentación de lodos</b>	2.692,30	7.000,00
<b>Costo total</b>	362.396,54	942.230,60

El método del equipo entregado, permite determinar el capital de inversión a partir de porcentajes asignados a los factores involucrados en la instalación y arranque de una planta, con base en el costo del equipo una vez adquirido. La tabla 3.23 muestra los rubros y los porcentajes correspondientes. Estos porcentajes fueron ajustados a las características del proyecto. En el caso del costo por terreno, se redujo de 6% a 0% ya que la empresa cuenta con terreno propio. El porcentaje relativo a la ingeniería y supervisión pasó de 32% a 22 %, la empresa cuenta con ingenieros que pueden llevar a cabo la supervisión de la obra.

**Tabla 3.23 Porcentajes en base al costo del equipo entregado para estimar el capital de inversión de plantas procesadoras de sólidos y líquidos (Peters & Timmerhaus, 1993)**

Rubro	% del costo del equipo entregado
<b>I.- Costos directos</b>	
• Costo de equipo + envío	100
• Instalación del equipo	39
• Instrumentación y controles	13
• Tubería	31
• Sistemas eléctricos	10
• Edificios	29
• Mejoras del sitio	10
• Servicios auxiliares	55
• Terreno	6
<b>Total de costos directos</b>	<b>293</b>
<b>II.- Costos indirectos</b>	
• Ingeniería y supervisión	32
• Gastos de Construcción	34
• Honorarios de contratistas	18
• Contingencias	36
<b>Total de costos indirectos</b>	<b>120</b>
<b>Capital fijo de inversión</b>	<b>413</b>
<b>II.-Capital de trabajo</b>	<b>74</b>
<b>Capital total de inversión</b>	<b>487</b>

Las tablas de la E.1 a la E.3 (anexo E), muestran los resultados del método. Los cuales fueron considerados para la evaluación opciones con la matriz.

### **3.4.5 Matriz de valoración**

La herramienta empleada para la selección de la mejor opción tecnológica para Pequiven fue una matriz multicriterio digitalizada suministrada por la empresa (figuras E.1 y E.2, anexo E). Evalúa ocho (08) criterios cónsonos con los requerimientos que debe cumplir la tecnología.

#### **3.4.5.1 Criterios de evaluación**

- **Seguridad y riesgos:** este criterio se refiere a la seguridad que ofrece el sistema en relación a la vida de las personas (empleados, operadores, visitantes) y a la garantía sobre el curso normal, continuidad del proceso, y la integridad estructural de los equipos en general.
- **Flexibilidad operacional:** para el caso de equipos de deshidratación evaluados, este criterio se asocia a la capacidad del sistema para manejar lodos de otra planta en el caso de que la temporada de invierno sea prolongada y las lagunas de secado requieran aliviar carga, y a la facilidad que presenten para operar bajo variantes en la calidad del lodo alimentado, sin comprometer en gran medida la sequedad de la torta de sólidos a obtener.
- **Mantenibilidad:** este criterio está relacionado con que el sistema sea sostenible; es decir, que requiera en la medida de lo posible, la menor intervención de la mano de obra operaria para llevar a cabo el proceso con normalidad. Y que en el caso de presentar fallas el esfuerzo asociado para restituirlo sea bajo.

- **Afectación al ambiente:** se refiere a los daños que pueda ocasionar el sistema al medio. El sistema de deshidratación mecánico pudiera generar inconvenientes de ruidos, vibraciones y derrames de algunos químicos empleados en el acondicionamiento del lodo (polielectrolitos).
- **Confiabilidad:** este criterio considera las fallas que pudieran presentar las opciones evaluadas. Mientras menos fallas presente una tecnología es más confiable.
- **Constructibilidad:** se relaciona con el hecho de que se pueda llevar a cabo la implantación del sistema y considera la complejidad que pudiera presentarse para construir y poner en marcha el sistema además del espacio requerido.
- **Dependencia tecnológica:** facilidad de adquisición de repuestos.
- **Costos:** evaluó la inversión de capital requerida por cada equipo.

#### 3.4.5.2 Metodología para la evaluación de opciones

Para el llenado de la matriz de evaluación (figura E.1, anexo E) se siguieron los siguientes pasos:

- Se colocó en cada fila un criterio y se identificó con una letra. Se disponían de ocho (08) criterios las letras asignadas fueron desde la “A” hasta la “H”.
- Se comparó cada criterio con los demás. Para esta comparación fueron asignados grados de importancia relativa. Al comparar un criterio con otro se colocó el grado de importancia en la casilla correspondiente como lo muestra la figura E.2 los grados de importancia van del 1 al 4, y significan: 1 (ninguna), 2 (baja), 3 (mediana), 4 (alta).
- Se calculó el resultado de los grados de importancia, sumando los valores obtenidos para cada uno de los criterios considerados ( A-H).

- Los resultados obtenidos anteriormente; se linealizaron. Eso se logró realizando una ponderación. donde 1 representa el mínimo valor de la pendiente y 10 el máximo.
- Se colocó en la parte inferior de la matriz las opciones a ser evaluadas.
- Se comparó cada opción respecto a cada uno de los criterios y se le asignó un número de acuerdo a la siguiente escala: 1 (no apropiado), 2 (suficiente), 3 (Bueno), 4 (muy bueno) y 5 (excelente).

Por último se multiplicó el valor obtenido para cada criterio por su peso asociado y se totalizó en la última columna. Se compararon los pesos totales obtenidos para cada una de las opciones evaluadas y se seleccionó la mejor opción (que corresponde a aquella que generó la mayor puntuación). Los resultados se muestran en la figura 4.7.

### **3.5 EQUIPOS, MATERIALES, SUSTANCIAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS**

- **Equipos**

- Balanza digital.

<b>Marca</b>	Denver
<b>Modelo</b>	P-214
<b>Capacidad</b>	210 g
<b>Rango de medicion</b>	0-210 g
<b>Exactitud</b>	0.1 mg

- Balanza digital

<b>Marca</b>	METTLER
--------------	---------

<b>Modelo</b>	PM-4000
<b>Capacidad</b>	4000 g

- Estufa

<b>Marca</b>	GALLENKAMP
<b>Modelo</b>	OVB-300-11OJ oven/sterilizer
<b>Capacidad</b>	26 Kg
<b>Rango de temperatura</b>	30-200 °C
<b>Exactitud</b>	$\pm 1,5 \pm 1$

- Higrotermómetro

<b>Marca</b>	EXTECH
<b>Modelo</b>	445702
<b>Rango de % HR</b>	10 - 99 %
<b>Rango de temperatura</b>	-10 - 60 °C
<b>Exactitud</b>	$\pm 6\% \text{ Hr}, \pm 1^\circ\text{C}, \pm 1,8 \text{ F}$

- Cronómetro.

- Computador: procesador Intel Core Duo 2,66 GHz. Disco duro 149,05 GB. Memoria RAM 2 GB.

- Impresora: marca Hp. Modelo Deskjet 3745.

• Materiales

- Envases plásticos (colectores).
- Recipientes de concreto.
- Cápsulas de porcelana de 90 mm de diámetro.
- Cilindros graduados.
- Beaker.
- Cono de Imhoff.

- Desecador.
- Pinzas.
- Espátula.
- Guantes.
  
- Sustancias
  - Agua destilada.
  
- Herramientas
  - Autocad, versión 2009.
  - Adobe Acrobat Reader 8.0.
  - Paquete de Software de Microsoft Office 2007.

Todos los equipos, materiales, sustancias y herramientas utilizadas estuvieron disponibles en el laboratorio de calidad de Pequiven del CPJAA, ubicado en la ciudad de Barcelona, estado Anzoátegui.

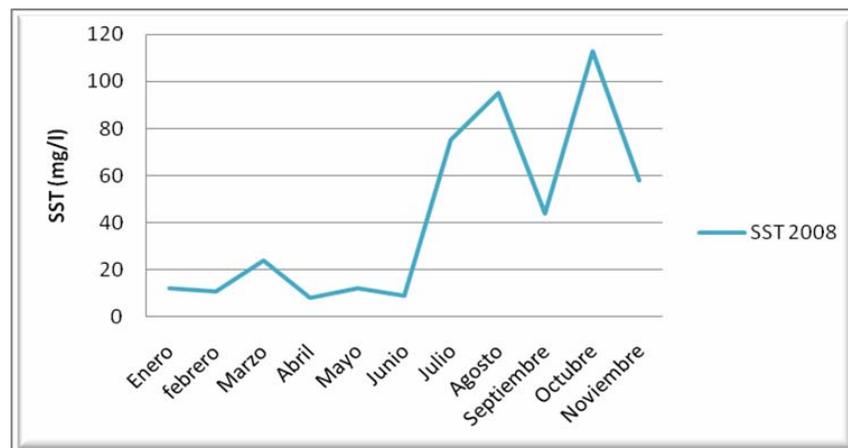
## CAPÍTULO IV

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE MANEJO DE LODOS

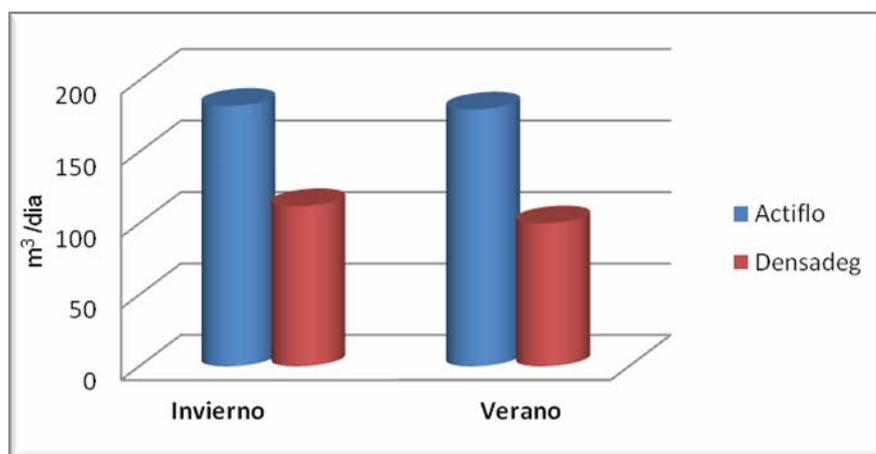
##### 4.1.1 Producción de lodos

El sistema actual está constituido por los espesadores de lodos de las plantas de tratamiento de agua Actiflo® y Densadeg® y el sistema de lagunas de secado de lodos. Su producción depende fundamentalmente del caudal de agua tratada y del contenido de SST que presenta, con marcadas diferencias en las estaciones del año (invierno, verano). La figura 4.1 (los datos de origen se muestran en la tabla F.1, anexo F) evidencia la variación de la concentración de SST por temporada en el agua de alimentación a las plantas.



**Figura 4.1 Variación mensual de SST en EBP-1 para el año 2008.**

En la figura 4.1, se aprecia que existe un comportamiento regular en la estación de verano (que para el 2008 se extendió hasta mayo), y a partir de entonces se observa un cambio brusco de elevación del contenido de SST que marca toda la temporada de invierno. Dicha elevación para aguas con pH alcalino elevado aumentan las dosis de coagulante en el tratamiento (tabla F.2, anexo F), como consecuencia se obtiene una mayor producción de lodos (Reyes, 2003). Con los valores de las tablas 3.4 y 3.6 se construyó la figura 4.2 que representa la generación actual de lodos de cada tecnología por temporada, cuando el sistema de agua industrial opera a capacidad nominal.



**Figura 4.2 Caudales de lodos generados por Densadeg® y Actiflo®.**

La planta Actifló® genera en promedio 182,33 y 179,75 m<sup>3</sup>/día de lodos, mientras que, la totalidad de plantas Densadeg® aporta un caudal promedio de 112,08 y 100,08 m<sup>3</sup>/día en invierno y verano respectivamente. La figura 4.2 muestra un comportamiento poco variable del caudal de lodos generado por la planta Actiflo®, el diseño del adensador está dado para que ingrese un caudal regular cercano a 50 m<sup>3</sup>/día y se extraigan 6 m<sup>3</sup>/día. Por ello los caudales de lodos se mantienen, aunque varían en concentración de sólidos. En cuanto a

Densadeg®, se observa una gran diferencia en cuanto a la producción de lodos respecto a Actiflo®, aunque los caudales de agua procesados por la primera son mayores que el caudal de agua que procesa Actiflo® en el sistema de agua industrial, Densadeg® genera volúmenes de lodos menores, lo cual demuestra su eficiencia en el adensamiento de los lodos en los clarificadores.

#### **4.1.2 Capacidad de manejo**

Para el volumen efectivo de una (01) laguna, se obtuvo un valor de 2909,10 m<sup>3</sup> (tabla 4.1), este volumen está por debajo del volumen nominal por laguna (3000 m<sup>3</sup>), pero está definido por el funcionamiento del sistema de recolección de sobrenadante. Cuando el lodo alcanza el volumen efectivo se detiene el llenado en esa laguna y se inicia el de otra que se halle en espera. El lodo se somete a secado y al final del proceso se obtiene una torta de propiedades sólidas (humedad máxima 20%) que ocupa un volumen en la laguna alrededor de 2184,56 m<sup>3</sup>. Estos resultados muestran que el sistema puede recibir una cantidad de lodos mayor a la marcada por el volumen efectivo, sin embargo, a ese nivel no funcionaría el sistema de recolección de sobrenadante de la tubería superior (1,80 m), lo que probablemente se traduciría en riesgos de desbordamientos en invierno e incremento del tiempo de secado. La manera como opera el sistema actualmente es conveniente.

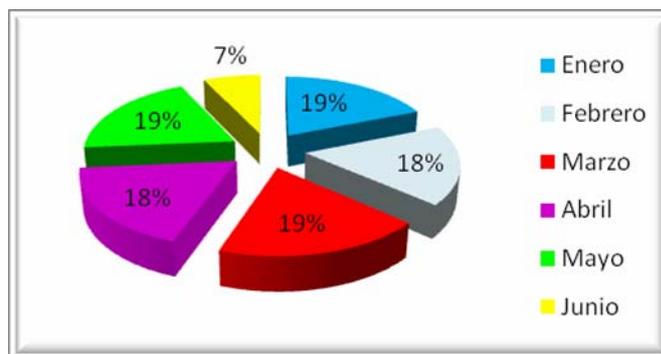
En cuanto al tiempo de secado, los operadores plantean que está alrededor de cuatro (04) meses. A nivel experimental (sin contribución de agua de lavado de líneas ni de la lluvia) se obtuvo un tiempo de secado de tres (03) meses (86,86 días) para un lodo con humedad base seca promedio de 19,01 kg H<sub>2</sub>O/ kg STS. Al comparar estos valores se evidencia el efecto de la contribución de agua de lavado de las líneas de extracción y agua de lluvia (tabla 3.13) sobre el sistema, incrementando en aproximadamente un (01) mes el tiempo de secado.

**Tabla 4.1 Valores de los volúmenes efectivos ( $V_1$  y  $V_2$ ) y volumen total del sistema de las lagunas de secado de lodos**

$V_1$ (m <sup>3</sup> )	$V_2$ (m <sup>3</sup> )	Capacidad estática del sistema de lagunas (m <sup>3</sup> )
2909,10	1934,65	11636,39

La capacidad de las lagunas se estudió desde el punto de vista de los STS acumulados y no del lodo líquido, debido a las continuas pérdidas que se generan en la laguna por permeabilidad, evaporación y recolección de sobrenadante que dificultan la evaluación de la capacidad desde esa perspectiva; el clima de la zona y los factores citados hacen que el sistema a lo largo de su llenado maneje volúmenes que superan su capacidad estática, esto se pudo observar en los caudales mensuales de lodo enviado hacia las lagunas (tabla 3.9), Sin embargo, ese comportamiento no resulta alarmante, ya que se ha comprobado que los lodos enviados hacia las lagunas de secado tienen un gran contenido de agua (ver tabla F.3, anexo F), los valores de porcentajes de humedad reflejados son indicativos de lo expuesto. La masa de STS de la torta de lodos (humedad máxima 20%) está alrededor de 2.27 MM kg (tabla 4.2), el tiempo que tarda una laguna en acumular esta cantidad es el tiempo de llenado.

Al observar la tabla 4.2, se puede decir que cuando el sistema de agua industrial opera a capacidad nominal se llenan aproximadamente dos (02) lagunas y un excedente, lo que equivale a 5,16 MM kg/año. Una (01) laguna puede llenarse entre los meses de enero y junio, y la siguiente desde junio a noviembre, iniciándose el llenado de una tercera laguna en el mes de diciembre. Los datos de la tabla 4.2, este comportamiento puede ser observado gráficamente en la figura 4.3.



**Figura 4.3 Distribución porcentual del aporte mensual (enero-julio) de STS para el llenado de una laguna de lodos.**

**Tabla 4.2 Distribución mensual de STS enviados al sistema de lagunas de secado de lodos cuando el sistema de agua industrial opera a capacidad nominal**

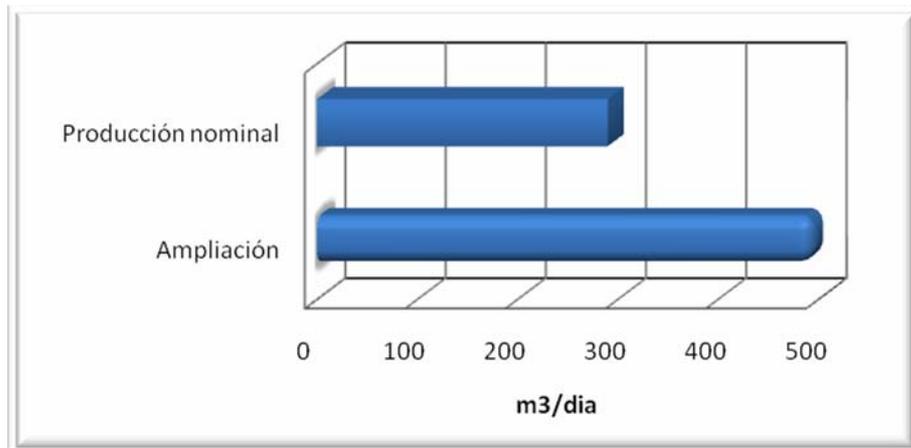
Meses	Flujo de STS a lagunas (kgSTS/mes)	Mac (kg STS)	Capacidad (kgSTS/laguna)
<b>Enero</b>	418746,06	418746,06	2271942,40
<b>Febrero</b>	399403,59	818149,65	
<b>Marzo</b>	418746,06	1236895,71	
<b>Abril</b>	405238,12	1642133,83	
<b>Mayo</b>	444727,95	2086861,79	
<b>Junio</b>	435372,08	<b>250291,47</b>	
<b>Julio</b>	449884,48	700175,95	
<b>Agosto</b>	449884,48	1150060,43	
<b>Septiembre</b>	438815,90	1588876,33	
<b>Octubre</b>	438815,90	2027692,24	
<b>Noviembre</b>	438815,90	<b>194565,74</b>	
<b>Diciembre</b>	418746,06	613311,80	
<b>Total (Kg/año)</b>	5157196,60	---	---
<b>Total (MM kg/año)</b>	5,16	---	2,27

**Nota:** los valores en negrita indican que en ese mes se produjo el llenado de la laguna.

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla anterior, en la temporada de verano el llenado ocurre en casi seis (06) meses, mientras que en invierno el llenado tarda cerca de cinco (05) meses, esto se debe a la diferencia en la concentración de SST en el agua procesada por las plantas, que presenta mayor cantidad de sólidos en los meses de invierno. Hay que acotar que la tabla 4.2 no considera la pérdida de sólidos en el sobrenadante, esto puede justificarse con el hecho de que la mayor parte de los sólidos que constituyen el lodo son sedimentables, la pérdida de sólidos en el sobrenadante resulta poco significativa en comparación con las grandes masas sedimentadas en las lagunas de secado (Arboleda, 2000).

#### **4.2 INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE LODOS DEBIDO A LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL**

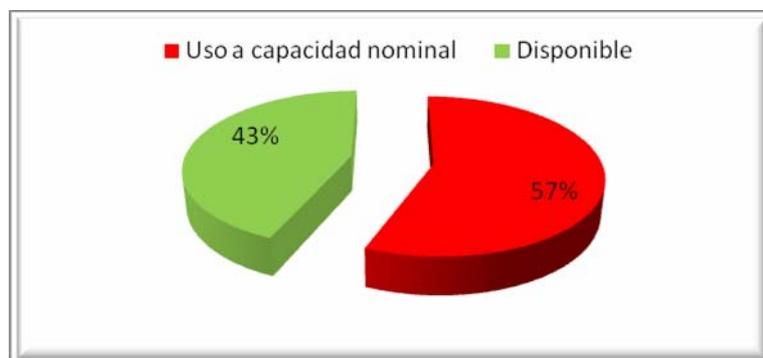
Las nuevas plantas generarán de 213,12 y 190,32 m<sup>3</sup>/día para invierno y verano respectivamente (tabla 3.12). Tomando como referencia la temporada de mayor producción de lodos (invierno) se determinó el incremento debido a la ampliación, la figura 4.4 permite apreciar que la producción de lodo estará por encima del 50% de la actual, alrededor del 72,39 % (tabla 3.13) para ser más exactos. Este comportamiento era de esperarse, puesto que el sistema de agua industrial pasará de manejar 1600 lps a 3500 lps, un poco más del doble de la capacidad actual.



**Figura 4.4 Diferencia entre la producción nominal de lodos en la actualidad y la producción para ampliación**

### 4.3 COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN

En la figura 4.5 se aprecia el uso del sistema de lagunas de secado cuando el sistema de agua industrial opera a su capacidad nominal. Se observa una disponibilidad de un poco menos de dos (02) lagunas de secado para manejar los lodos que generará la ampliación.



**Figura 4.5 Representación porcentual de la disponibilidad del sistema de lagunas de secado.**

Por otro lado, a partir de la tabla de distribución de STS (tabla 3.15) se pudo conocer que para manejar la totalidad de lodos de la ampliación serían necesarias casi cinco (05) lagunas de secado. El sistema no está en la capacidad de recibir todo el caudal de lodos generados por la ampliación, no solo por el excedente que refleja dicha tabla, en general no podría manejar todos los volúmenes asociados a los STS. Entiéndase que realmente se descargan en las lagunas caudales de lodo húmedo (además de agua de lavado de líneas y lluvia) que ocupan un mayor espacio. Producto de la ampliación el caudal recibido por unidad de tiempo será mucho más grande, si se observa la tabla de distribución 3.15 el llenado de las lagunas ocurriría cada dos (02) meses, cuando actualmente ocurre entre cuatro (04) y seis (06) meses (ver tabla 4.2), tiempo durante el cual hay pérdidas por evaporación y permeabilidad (hasta ahora no cuantificables, pero que en la realidad se puede constatar que aumentan la capacidad de la laguna para recibir lodos). Es lógico que las pérdidas en dos (02) meses sean menores a las que se llevan a cabo en el período normal, lo que disminuye el volumen ofrecido por las lagunas.

Debido a que la disponibilidad actual del sistema de lagunas no puede manejar la totalidad de lodos de la ampliación, se estudió la posibilidad de que pudiera manejar la producción de lodos de dos plantas de 400 lps que representa el 42,12 % de la producción de lodos de las nuevas plantas. La tabla 4.3 muestra el resultado de la distribución de STS para el caso. Esta tabla refleja que las lagunas de secado pueden manejar la producción de lodos de dos (02) plantas de 400 lps de la ampliación. Se observa que al año se produciría el llenado de aproximadamente cuatro (04) lagunas, de las cuales una (01) puede ser evacuada y reutilizada en aproximadamente cuatro (04) meses (de mantenerse la tendencia actual del tiempo de secado), lo que le daría cierta holgura al sistema. El excedente de lodos que no será manejado

por las lagunas será enviado a un sistema de deshidratación de lodos, ver figura 4.6.



**Figura 4.6 Propuesta para el tratamiento del excedente de lodos de la ampliación.**

**Tabla 4.3 Distribución mensual de STS enviados al sistema de lagunas de secado adicionando dos (02) plantas 400**

Meses	Flujo de STS a lagunas KgSTS/mes	Masa acumulada Kg STS	Capacidad másica /laguna (KgSTS/laguna)
Enero	609427,13	609427,13	2271942,4
Febrero	593129,47	1202556,61	
Marzo	609427,13	1811983,74	
Abril	589768,19	<b>129809,54</b>	
Mayo	658245,08	788054,62	
Junio	642001,56	1430056,18	
Julio	787710,79	2217766,98	
Agosto	787710,79	<b>733535,37</b>	
Septiembre	642001,56	1375536,93	
Octubre	787710,79	2163247,73	
Noviembre	642001,56	<b>533306,89</b>	
Diciembre	609427,13	1142734,02	
<b>TOTAL (Kg/año)</b>	7958561,22		
<b>TOTAL (MM Kg/año)</b>	7,96		

**Nota:** los valores en negrita indican que en ese mes se produjo el llenado de la laguna.

## **4.4 ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE MANEJO DE LODOS**

### **4.4.1 Selección de tecnología**

La matriz de selección de tecnología (figura 4.7). Permitió elegir la tecnología más adecuada para el manejo de lodos. Se les asignó mayor ponderación a los criterios de seguridad y riesgos, confiabilidad y mantenibilidad, debido a que es necesario que el equipo de deshidratación de lodos seleccionado brinde seguridad tanto en la salud de quienes lo operan como en el cumplimiento de su función dentro del proceso. Es común que los equipos a lo largo de su vida útil presenten alguna falla, se requiere un equipo confiable, es decir, que en la medida de lo posible presente la menor cantidad de fallas, además debe tener facilidades de reparación y requerir poca intervención de mano operaria. Los resultados de las ponderaciones mostrados en la figura 4.7 indican la importancia asignada a un criterio respecto a otro. Se debe observar que los factores costos y afectación al ambiente, fueron los menos ponderados, lo cual no significa que sean los menos importantes, la evaluación de estos factores es necesaria en cualquier proyecto de ingeniería, sin embargo, en línea general las tecnologías de deshidratación de lodos son costosas y ante las necesidades del sistema los costos quedan en menor grado de relevancia. En cuanto al criterio de afectación al ambiente con supervisión adecuada y buen manejo operativo son pocos los daños que las plantas de deshidratación mecánica de lodos pueden causar al ambiente.

De acuerdo a la matriz, la tecnología de deshidratación de lodos que tiene el mayor puntaje (120) fue el filtro prensa de bandas, lo que lo posiciona como la mejor opción tecnológica para la deshidratación de lodos. En segundo lugar estuvo el filtro prensa de placas y marcos (109) y en última posición la centrifugadora de tazón sólido (94). El filtro de placas y marcos es confiable y de gran seguridad pero los costos del equipo y el hecho de que su operación requiera de continua vigilancia operaria

justifican el puntaje totalizado por la matriz. Por otro lado, la centrifugadora de tazón sólido es un equipo que posee un costo de inversión atractivo, sus requerimientos de área son menores a los de las otras tecnologías (una de las principales razones por las cuales se ha seleccionado en plantas de tratamiento de agua en Venezuela), pero los altos costos de energía, mantenimiento por desgaste y problemas asociados a la vibración del equipo justifican que tuviese el menor puntaje en la matriz de selección (Martínez y col, 2005).

El uso de equipos de deshidratación de lodos se ha incrementado en los últimos años, anteriormente las plantas vertían estos efluentes directamente en los cuerpos de agua, práctica que en la actualidad está siendo regulada por las legislaciones ambientales de los países. En países como México y Argentina se han empleado filtros de bandas para la deshidratación de lodos hidróxidos. El filtro prensa de bandas tiene un tiempo de vida útil de aproximadamente quince (15) años, opera de forma continua por lo que los costos de mantenimiento son menores en comparación con las otras tecnologías. Ofrece una torta de sólidos con una sequedad que puede alcanzar hasta 35% y presenta bajo consumo de energía. Lo anterior hace que el filtro de bandas sea una buena opción para tratar lodos de plantas potabilizadoras. Existen en el mercado diferentes diseños de este equipo, la selección de uno u otro modelo depende fundamentalmente de las características del lodo a tratar, por lo tanto se debe realizar estudios fisicoquímicos en detalle del lodo generado por las plantas del CPJAA para la ingeniería de diseño de este equipo. Algunos de los requerimientos más importantes de las plantas de deshidratación que operan con este tipo de equipos son: tanque equalizador, sistema de dosificación, bomba de alimentación, silos de almacenamiento de lodos deshidratados y camiones de carga para el transporte y disposición del lodo. El área que ocupan estos equipos depende tanto del diseño como de la capacidad, se debe tener en cuenta

que un filtro prensa de bandas requerirá cambios del elemento filtrante debido a que éste es de corta vida útil (United Nation, 2003).

#### **4.4.2 Disposición final de lodos**

En concordancia con el artículo 50 del decreto 2635 de la legislación ambiental venezolana el análisis fisicoquímico realizado a los lodos (tabla D.8 ,anexo D) refleja que el lodo del sistema de agua industrial del CPJAA se halla dentro de los límites permisibles para disponer de él mediante la práctica de esparcimiento en suelos, sin embargo, es conveniente mencionar que a nivel mundial se han realizado estudios para el uso de lodos de plantas potabilizadoras como materia prima de productos cerámicos .

En Venezuela se han desarrollado estudios para el uso de lodos hidróxidos como materia prima para la fabricación de productos cerámicos en la facultad de Ingeniería Sanitaria de la UCV (Universidad Central de Venezuela) con buenos resultados (Mesa, 2005), (Cerdeño y col, 2006) y (Márquez y col, 2009).

Por otro lado se han empleado lodos como abono en suelos, sin embargo estos lodos presentan contenido de algunos metales, hidróxidos, compuestos orgánicos y microorganismos que pudieran afectar la calidad de los suelos para su cultivo, por lo que será necesario hacer un estudio detallado al respecto. Es conveniente someter a consideración aplicaciones para el lodo generado en el CPJAA que puedan producir beneficios económicos para la empresa, ya que la cantidad de lodos generada para la ampliación será considerable.

MATRIZ DE EVALUACIÓN DE OPCIONES													
SELECCION OPCIONES SISTEMA MECÁNICO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS - PQV													
PROYECTO:		AMPLIACION SISTEMA TRATAMIENTO DE AGUA											
CRITERIOS DE EVALUACION					GRADOS DE IMPORTANCIA								
A	SEGURIDAD Y RIESGOS				3A	4A	3A	3A	4A	3A	4A		
B	FLEXIBILIDAD OPERACIONAL				3B	3B	3B	3B	3A	3A			
C	MANTENIBILIDAD				3C	3E	3C	3B	3B	3A			
D	AFECTACIÓN AL AMBIENTE				3E	3F	3G	3G	3B	3A			
E	CONFIABILIDAD				4E	4E	3G	3D	3C	4B			
F	CONSTRUCTIBILIDAD				3G	3F	4E						
G	DEPENDENCIA TECNOLÓGICA				3H								
H	COSTOS												
					H	G	F	E	D	C	B	A	
MATRIZ DE OPCIONES	RESULTADO DE LA PONDERACION				3	9	6	18	3	9	19	24	
	PESO	1	AL	10	1	4	2	7	1	4	8	10	TOTAL
1	OPCIÓN 1: FILTRO PRENSA DE PLACAS Y MARCOS				1	3	2	4	4	1	2	4	109
					1	12	4	28	4	4	16	40	
2	OPCIÓN 2: CENTRIFUGADORA DE TAZÓN SÓLIDO				3	2	4	2	3	3	2	3	94
					3	8	8	14	3	12	16	30	
3	OPCIÓN 3: FILTRO PRENSA DE BANDAS				3	2	3	4	3	4	2	4	120
					3	8	6	28	3	16	16	40	
OPCIONES:		1 NO APROPIADO 2 SUFICIENTE 3 BUENO 4 MUY BUENO 5 EXCELENTE											

**Figura 4.7 Resultados de la matriz de evaluación de tecnologías**

#### 4.5 CONCLUSIONES

1. La mayor producción de lodos se presenta en la temporada de invierno con un valor promedio de 182,33 y 112,08 m<sup>3</sup>/día para Actiflo® y Densadeg® respectivamente.
2. El volumen efectivo de una (01) laguna de secado es de 2909,10 m<sup>3</sup>.
3. Los factores climáticos y la permeabilidad de la laguna permiten que los caudales de lodos manejados por el sistema de secado sean superiores a la capacidad estática de las lagunas.

- 4.El tiempo actual de llenado de una (01) laguna de secado está entre cinco (05) y seis (06) meses.
- 5.La torta de lodos de una (01) laguna de secado de lodos tiene una masa de 2,27 MM kg STS.
- 6.La ampliación generará un incremento del 72,39% en la producción de lodos.
- 7.El sistema de lagunas de secado tiene capacidad adicional para recibir el 42,12 % de la producción de lodos de las nuevas plantas.
- 8.El filtro prensa de bandas es la mejor opción para manejar los lodos de la ampliación.

#### **4.6 RECOMENDACIONES**

- 1.Estudiar la ubicación óptima del sistema mecánico de deshidratación de lodos.
- 2.Realizar un análisis fisicoquímico a los lodos a fin de conocer los requerimientos del diseño del filtro de bandas.
- 3.Evaluar los ciclos de extracción de lodos de las plantas Densadeg® para el diseño del sistema de deshidratación de lodos con filtro de bandas.
- 4.Diseñar el tanque ecualizador para garantizar una alimentación continua y homogénea al filtro.
- 5.Evaluar el reuso del agua efluente de filtración de la tecnología seleccionada.

6. Realizar una evaluación de alternativas para el uso de lodos de agua industrial.

7. Llevar un registro de la frecuencia del retiro de sobrenadante del sistema de lagunas y el tiempo de extracción.

8. Realizar mantenimiento al sistema de automatización de las plantas de tratamiento de agua existentes y al sistema de recolección de sobrenadante.

9. Estudiar procesos de deshidratación de lodos que compitan con los sistemas mecánicos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Amendola, L (2004). La confiabilidad desde el diseño de proyectos de mantenimiento. Universidad politécnica de Valencia, España. Extraído el 20 de junio del 2010 desde: [http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Implantacio .pdf](http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Implantacio.pdf)
2. APHA, AWWA & WPCF (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC.
3. Arboleda, J. (2000) .Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia: Mac Graw Hill.
4. Cerdeño, F y col (2006) .Viabilidad técnica del uso de lodos de estaciones de tratamiento de aguas potables (ETAP) en la fabricación de materiales cerámicos para la construcción. Departamento de materiales de construcción - AITEMIN centro tecnológico. Extraído el 10 de junio de 2010 desde: [www.conarquitectura.com/articulos%20tecnicos%20pdf/30.pdf](http://www.conarquitectura.com/articulos%20tecnicos%20pdf/30.pdf).
5. CORPOVEN, S.A. (1986). Estudio de Alternativas disposición de Lodos Planta de Tratamiento de Aguas Crudas. Barcelona.
6. Degremont (1979). Manual técnico del agua. España.
7. EPA (2000). Estimación de costos: conceptos y metodología. Extraído el 20 de junio de 2010 desde:

<http://www.docstoc.com/docs/602941/Cap-tulo-costos-conceptos-y-metodolog/> Estimado-de-

8. Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos (Decreto N°. 2635). (1998, agosto 03) Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 5.245.
9. Garcés, F y Col (1996). Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. Extraído el 19 noviembre de 2009 desde: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02263e09.pdf>.
10. Geankoplis, C. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. México: CECSA.
11. Harvey, D. (2002). Química analítica moderna. España: Mac Graw Hill.
12. Inojosa, J. (2004). Determinación de la calidad fisicoquímica de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales Dos Cerritos, estado Nueva Esparta. Tesis de Grado. Escuela de Ingeniería y Ciencias aplicadas, UDO, Puerto la Cruz.
13. Nalco, (1989). Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. México: Mac Graw Hill.
14. Kirchmer, C. Aspectos químicos y físicos de la coagulación del agua. Extraído el 15 de abril de 2010 desde: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan/007926/07926-08.pdf>
15. Lipesa (1998). Tratamiento químico del agua. Caracas: Impregraf.

16. Márquez, F y col (2009). Comportamiento mecánico y físico de mezclas de lodo-cemento con bajo contenido de materia orgánica para su uso como material de construcción. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería. UCV, Caracas.
17. Martínez, J. y col (2005). Guía para la gestión integral de residuos peligrosos. Centro coordinador del convenio de Basilea para América latina y el Caribe.
18. Martínez, J y col (2005). Guía para la gestión integral de residuos peligrosos. Centro coordinador del convenio de Basilea para América latina y el caribe. Extraído el día 17 de mayo de 2010 desde: [http://cop8.basel.int/centers/proj\\_activ/stp\\_projects/08-03.pdf](http://cop8.basel.int/centers/proj_activ/stp_projects/08-03.pdf)
19. Mesa, J (2005). Minimización de residuos: Hacia el residuo cero. Extraído el 10 de mayo de 2010 desde : [http://www.elaguapotable.com/tratamiento\\_de\\_lodos.htm](http://www.elaguapotable.com/tratamiento_de_lodos.htm)
20. Peters, M y Timmerhaus, K. (1993). Diseño de plantas y economía para ingenieros químicos. España: Mac Graw Hill.
21. Pino, M. (2003). Evaluación de la dosificación de coagulantes y su influencia en las operaciones de coagulación y filtración en plantas de potabilización. Tesis de Grado. Escuela de Ingeniería y Ciencias aplicadas, UDO, Puerto la Cruz.
22. Reyes, V. (2003). Estudio de la eficiencia del modulo Actiflo para la clarificación de agua de río. Tesis de Grado. Escuela de Ingeniería y Ciencias aplicadas, UDO, Puerto la Cruz.

23. Rodier, J. (1987). Análisis de las aguas. Colombia: editorial Omega.
24. Sánchez, C. (2009). Evaluación del reuso del agua de las descargas de lodos provenientes de los clarificadores de la planta potabilizadora de Santa Clara (Clarines). Tesis de Grado. Escuela de Ingeniería y Ciencias aplicadas, UDO, Puerto la Cruz.
25. Sandoval, L. y col (1998). Estudio piloto para reducir el volumen de lodos en plantas potabilizadoras. Trabajo de Investigación. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.
26. United Nation (2003). Waste-water treatment technologies a general review. New York, EEUU. Extraído el 24 de junio de 2010 desde: [www.escwa.un.org/information/publications/edit/.../sdpd-03-6.pdf](http://www.escwa.un.org/information/publications/edit/.../sdpd-03-6.pdf).
27. Villegas, J. y col (2005). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua. Trabajo de investigación. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	<b>EVALUACIÓN DEL MANEJO DE LODOS PARA LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA INDUSTRIAL DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO G/D JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI (CPJAA)</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>Vívenes A., Zulivis M.</b>	<b>CVLAC: 17.222.784</b> <b>EMAIL:</b> <b>zulivisvandrade@gmail.com</b>

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

Coagulación

---

Floculación

---

Lodos

---

Balance

---

Deshidratación mecánica

---

Estimado de costos

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>ÁREA</b>	<b>SUBÁREA</b>
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química

**RESUMEN (ABSTRACT):**

La finalidad de este trabajo fue evaluar la capacidad de las lagunas de secado de lodos para la ampliación del sistema de agua industrial y proponer opciones de tecnología de deshidratación de lodos. Se estudió la producción de lodos de las tecnologías de tratamiento de aguas presentes en el CPJAA (Actiflo® y Densadeg®). Por medio de balances de sólidos suspendidos totales (SST) se determinó el caudal de lodos generados por las plantas Densadeg® obteniendo un caudal promedio de 112,08 m<sup>3</sup>/día y para la planta Actiflo® se determinó el caudal a partir de lecturas diarias del contador de lodos obteniendo un valor de 182,33 m<sup>3</sup>/día, en la temporada de invierno respectivamente. La ampliación incrementará la producción de lodos un 72,39 %. Se realizó una tabla de distribución de sólidos totalmente secos (STS) acumulados en las lagunas a lo largo de un año y se pudo conocer que el sistema de lagunas puede manejar el 42,12 % de la producción de lodos de la ampliación. Se evaluaron las opciones tecnológicas de deshidratación de lodos en el mercado y se empleó una matriz de evaluación que arrojó como mejor opción para deshidratar el excedente de lodos de la ampliación un filtro prensa de bandas.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS (x)	TU	JU
Silva, Héctor	CVLAC:				
	E_MAIL	hectorlsu@yahoo.es			
	E_MAIL				
Andarcia, María	ROL	CA	AS	TU (x)	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL	andarciajeral@gmail.com			
	E_MAIL				
Amundarain, Milena	ROL	CA	AS	TU	JU (x)
	CVLAC:				
	E_MAIL	milena.amundarain@gmail.com			
	E_MAIL				
Moreno, Luis	ROL	CA	AS	TU	JU (x)
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2010	10	15
AÑO	MES	DÍA

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

<b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
TESIS. Evaluación del manejo.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H  
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v  
w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Químico

---

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado

---

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Ingeniería Química

---

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:

---

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

---

**Zulívis M. Vívenes A.**

**AUTOR**

**Ing. Héctor Silva**

**TUTOR**

**Ing. Milena Amundarain**

**JURADO**

**Ing. LuisMoreno**

**JURADO**

**Ing. Yraima Salas**

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**