

**NATURALEZA DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN EL PROCESO DE
POTABILIZACIÓN EN LA PLANTA DE BOSCONIA UTILIZANDO SULFATO DE
ALUMINIO LIQUIDO COMO COAGULANTE**

JOSÉ GABRIEL SALGAR HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2006

**NATURALEZA DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN EL PROCESO DE
POTABILIZACIÓN EN LA PLANTA DE BOSCONIA UTILIZANDO SULFATO DE
ALUMINIO LIQUIDO COMO COAGULANTE**

JOSÉ GABRIEL SALGAR HERNÁNDEZ

**Director:
CARLOS FERNANDO GUERRA
Ingeniero Químico**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2006

CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	112
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. ESTADO DEL ARTE	16
3.1 VERTIMIENTOS DE LA COAGULACIÓN CON SALES DE HIERRO	17
3.2 VERTIMIENTOS PROCEDENTES DEL ABLANDAMIENTO POR PRECIPITACIÓN QUÍMICA	18
3.3 AGUAS DE LAVADO ASCENDENTE EN FILTROS	18
3.4 VERTIMIENTOS CON SOLUCIONES DE SALMUERA AGOTADA	20
3.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS VERTIMIENTOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO	20
3.6 MÉTODOS ACTUALES DE EVACUACIÓN DE LOS VERTIMIENTOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA	21
3.6.1 Evacuación de las aguas residuales obtenidas en la coagulación química	21
3.6.2 Evacuación de las aguas residuales del lavado ascendente de los filtros	23
3.6.3 Evacuación de los precipitados químicos obtenidos en el ablandamiento	23
4. MARCO TEÓRICO	25
4.1 CANTIDADES DE RESIDUOS OBTENIDOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA	25
4.2 MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN	27
4.2.1 Tanque ecualizador	27
4.2.2 Espesamiento	27
4.2.3 Secado de los lodos	28
4.3 DISPOSICIÓN FINAL DE LOS LODOS	30
5. ALCANCES	33
6. LIMITACIONES	35

7. METODOLOGÍA	36
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
8.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS	37
10.2 CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS PARA EL AGUA DEL RÍO SURATA	57
10.2.1 Valores de Turbiedades de todas las muestras.	58
10.2.2 Turbiedades de 990 a 8000	58
10.2.3 Turbiedades menores a 520	59
10.2.4 Turbiedades menores a 100	60
10.3 CALCULO TEÓRICO DE LA CANTIDAD APROXIMADA DE LODOS GENERADOS.	61
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificaciones del Sulfato de Aluminio Tipo B.	13
Tabla 2. Características de los lodos de coagulación con aluminio.	17
Tabla 3. Características de las aguas de lavado ascendente de filtros.	19
Tabla 4. Análisis de una solución agotada de salmuera.	20
Tabla 5. Características de las aguas residuales procedentes de diversos procesos de tratamiento de agua potable.	21
Tabla 6. Métodos de eliminación de aguas residuales originadas en plantas de tratamiento de agua (Dean).	22
Tabla 7. Evacuación de las aguas de lavado filtros (Dean).	23
Tabla 8. Evacuación agua ablandamiento (Black).	24
Tabla 9. Balance de materia para la reacción que ocurre en el proceso de la coagulación del agua cruda (Kiely).	26
Tabla 10. Resultados del tratamiento de alumbre mediante lagunas (Neubauer).	29
Tabla 11. Criterios de diseño de filtros de vacío.	30

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Comportamiento de pH vs Tiempo en el Sedimentador.	39
Gráfica 2. Comportamiento del pH vs Tiempo en el Filtro.	39
Gráfica 3. Turbiedad vs Tiempo en el Sedimentador.	40
Gráfica 4. Turbiedad vs Tiempo en el Filtro.	40
Gráfica 5. Comportamiento del Color vs Tiempo en el Sedimentador.	41
Gráfica 6. Comportamiento del Color vs Tiempo en el Filtro.	41
Gráfica 7. Comportamiento de la Conductividad vs Tiempo en el Sedimentador.	42
Gráfica 8. Comportamiento de la Conductividad vs Tiempo en el Filtro.	42
Gráfica 9. Comportamiento de la Temperatura vs Tiempo en el Sedimentador.	43
Gráfica 10. Comportamiento de la Temperatura vs Tiempo en el Filtro.	43
Gráfica 11. Sólidos Totales y Suspendidos vs Tiempo.	44
Gráfica 12. Sólidos Sedimentables vs Tiempo.	44
Gráfica 13. Sólidos Totales y Suspendidos vs Tiempo.	45
Gráfica 14. Sólidos Sedimentables vs Tiempo.	45
Gráfica 15. Comportamiento de la DBO ₅ y DQO vs Tiempo.	46
Gráfica 16. Comportamiento de la DBO ₅ y DQO vs Tiempo.	46
Gráfica 17. E. Coli vs Tiempo.	47
Gráfica 18. Coliformes Totales vs Tiempo.	47
Gráfica 19. Aerobios Mesófilos vs Tiempo.	48
Gráfica 20. E. Coli vs Tiempo.	48
Gráfica 21. Coliformes Totales vs Tiempo.	49
Gráfica 22. Aerobios Mesófilos vs Tiempo.	49
Gráfica 23. Contenido de Mercurio vs tiempo.	52
Gráfica 24. Contenido de Hierro vs Tiempo.	53
Gráfica 25. Contenido de Aluminio vs tiempo.	53
Gráfica 26. Contenido de Plomo vs Tiempo.	54

Gráfica 27. Contenido de Cobre y Zinc vs Tiempo.	54
Gráfica 28. Contenido de Mercurio vs Tiempo.	55
Gráfica 29. Contenido de Hierro vs Tiempo.	55
Gráfica 30. Contenido de Aluminio vs Tiempo.	56
Gráfica 31. Contenido de Plomo vs Tiempo.	56
Gráfica 32. Contenido de Cobre y Zinc vs Tiempo.	57
Gráfico 33. Valores de turbiedades de las muestras.	58
Gráfico 34. Turbiedades de 990 a 8000	58
Gráfico 35. Turbiedades menores a 520.	59
Gráfico 36. Turbiedades menores a 100.	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Datos del Sedimentador	70
Anexo B. Datos del Filtro	71
Anexo C. Datos del Filtro	72
Anexo D. Análisis Trimestral Agua Cruda	73

NATURALEZA DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN EL PROCESO DE POTABILIZACION EN LA PLANTA DE BOSCONIA UTILIZANDO SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO COMO COAGULANTE.

AUTOR: José Gabriel Salgar Hernández

PALABRAS CLAVES: Lodos, Potabilización, Coagulación, Filtración, Sedimentación, Turbiedad, Sólidos suspendidos.

CONTENIDO: En el presente estudio se efectuó una caracterización de los lodos provenientes del lavado de filtros y purgas de sedimentadores de la planta de Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, donde se efectuó el cambio de sulfato de aluminio sólido por el líquido (coagulante empleado) el cual por contener menor cantidad de material insoluble reducirá el impacto ocasionado por las descargas de lodos (con respecto a las descargas anteriores) del río Suratá que es cuerpo receptor.

La planta de Bosconia está ubicada en el Kilómetro 2 vía Suratá, y su bocatoma está ubicada a 500 metros por la vía, aproximadamente. El caudal máximo de tratamiento es de 2000 L/S, consta de dos desarenadores, dos presedimentadores, 16 cámaras de floculación, (cuatro por cada sedimentador), cuatro sedimentadores, doce filtros y un tanque de almacenamiento de 10000 m³ de volumen. Para el presente trabajo se escogió un sedimentador previamente lavado con el fin de descartar la presencia de residuos provenientes del sulfato de aluminio sólido, también se escogió un filtro el cual recibe agua de este sedimentador.

Los parámetros analizados en los lodos fueron: pH, turbiedad, color, conductividad, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, DBO₅, DQO, mercurio, hierro, aluminio, plomo, cobre, cinc, Coliformes totales, aerobios mesófilos y Escherichia Coli.

Los parámetros analizados en el agua del río Suratá fueron: pH, turbiedad, color, conductividad, Sólidos totales, Sólidos suspendidos, Sólidos sedimentables.

Se estableció una correlación entre la turbiedad y los sólidos suspendidos del río Suratá con el fin de calcular teóricamente, la cantidad aproximada de lodos generados en los sedimentadores mediante la siguiente ecuación:

$$S = 8,34Q (0,44 A 1 + SS + A)$$

Donde:

S: Lodo producido (libras/día)

Q: Caudal de la planta (millones de galones por día).

Al: Dosis de sulfato de aluminio (mg/1)

SS: Sólidos suspendidos (mg/1)

A: Otros aditivos (polímero, carbón activado, arcilla) mg/1

MONOGRAFÍA.

Facultad de Ingeniería Química, Especialización en Ingeniería Ambiental
Director, Carlos Fernando Guerra

NATURE OF THE PRODUCED MUDS IN THE PROCESS DE POTABILIZACION IN THE PLANT DE BOSCONIA USING SULFATE OF LIQUID ALUMINUM AS CLOTTING.

AUTHOR: José Gabriel Salgar Hernández

KEY WORDS: Muds, Potabilización, Clotting, Filtration, Sedimentation, Turbidity, suspended Solids.

CONTENT: presently study was made a characterization of the muds coming from the laundry of filters and purges of sedimentadores of the plant of Bosconia of the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga, where the change of sulfate of solid aluminum was made by the liquid (coagulant employee) which will reduce the impact caused by the discharges of muds to contain smaller quantity of insoluble material (with regard to the previous discharges) of the river Suratá that is receiving body.

The plant of Bosconia is located in the Kilometer 2 via Suratá, and its bocatoma it is located to 500 meters by the road, approximately. The maximum flow of treatment is of 2000 L/S, it consists of two desarenadores, two presedimentadores, 16 floculación cameras, (four for each sedimentador), four sedimentadotes, twelve filters and a tank of storage of 10000 m³ of volume. For the present work a sedimentador was chosen previously laundry with the purpose of discarding the presence of residuals coming from the sulfate of solid aluminum, also a filter the one was chosen which receives water of this sedimentador.

The parameters analyzed in the muds were: pH, turbidity, color, conductivity, total solids, solids suspended, solid sedimentables, DBO₅, DQO, mercury, iron, aluminum, lead, copper, zinc, Coliformes total, aerobic mesófilos and Escherichia Coli.

The parameters analyzed in the water of the river Suratá were: pH, turbidity, color, conductivity, total Solids, Solids suspended, Solid sedimentables.

A correlation settled down between the turbidity and the suspended solids of the river Suratá with the purpose of calculating theoretically, the approximate quantity of muds generated in the sedimentadores by means of the following equation: $S = 8,34Q (0,44 A1 + SS + TO)$

Where:

S: produced Mud (libras/día)

Q: Flow of the plant (millions of gallons per day).

To the: Dose of aluminum sulfate (mg/1)

SS: suspended Solids (mg/1)

To: Other preservatives (polymer, activated coal, clay) mg/1

Monograph
Ability of Chemical Engineering
Specialization in Environmental Engineering
Director: Carlos Fernando Guerra

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente una de las preocupaciones a nivel mundial es la preservación del medio ambiente y un aumento en el interés sobre métodos alternativos de producción y tecnologías mas limpias, ligados a la prestación de servicios que ayuden al mejoramiento de las condiciones de vida del ser humano, causando el menor daño posible al entorno y por consiguiente a la salud pública.

Los estudios de los procesos de potabilización del agua cruda deberían ser de mayor interés a nivel local y mundial en los centros de investigación, ya que el suministro de agua de óptima calidad para el consumo humano conlleva diversos problemas ambientales , siendo el mas preocupante el vertimiento (descargas) de lodos, en aguas de desecho (lavado de filtros y purgas de sedimentadotes) a los cuerpos de agua, lo que plantea una serie amenaza para el desarrollo sostenible y daños ecológicos irreparables en algunos casos.

Actualmente la industria del agua potable tiene un gran reto para explorar nuevas técnicas para el manejo, control adecuado y posterior disposición de los residuos (lodos) generados en las plantas de tratamiento.

El acueducto metropolitano de Bucaramanga teniendo el compromiso ambiental como uno de sus valores institucionales no ha sido ajeno a esta problemática y es así como se han realizado estudios de caracterizaciones de las aguas residuales provenientes de las distintas plantas de potabilización.

En la planta de tratamiento de Bosconia se implementó el sulfato de aluminio líquido tipo "B" como una alternativa en el proceso de coagulación, el cual presenta un contenido menor de material insoluble que el sulfato sólido tipo "B" empleado anteriormente.

Tabla 1. Especificaciones del Sulfato de Aluminio Tipo B.

COMPONENTES	SÓLIDO NTC-531		LÍQUIDO NTC-531	
	Alúmina(%Al ₂ O ₃)	Mayor a 15.2	15.6 – 15.9	Mayor a 7.3
Hierro, %Fe ₂ O ₃	Menor a 2	1.7 – 1.9	Menor a 1.2	0.85 – 0.95
Insolubles, %	Menor a 8	5.0 – 5.5	Menor a 0.1	0.01 – 0.04
Densidad, g/ml	-	-	No es norma	1.32 – 1.34

Fuente: Disponible en: www.sulfoquimica.com.co¹⁷

A través de este estudio se hará una caracterización de lodos provenientes del lavado de filtros y de purgas de sedimentadores.

La descarga de residuos (Aguas residuales, lodos) de las plantas de tratamiento de agua potable ha planteado problemas que, en algunos casos han adquirido bastante gravedad. El efecto más obvio de la descarga de estos sólidos en una corriente de agua es la formación de depósitos o bancos de lodos en los tramos después del vertimiento de las aguas residuales de dichas plantas de tratamiento. A su vez, estos depósitos pueden recubrir y por tanto retrasar el desarrollo de organismos Bénticos del lecho que son una fuente de alimentación de los peces. Por consiguiente, la presencia de estos depósitos puede perjudicar el desove y cría de peces. Desde el punto de vista estético, la descarga de los residuos de tratamiento de aguas es perjudicial, porque aumenta considerablemente la turbiedad y el color de las aguas receptoras, disminuyendo sensiblemente su capacidad como lugar de esparcimiento y recreo. Un aumento de la turbiedad también puede favorecer otros cambios químicos y biológicos más sutiles en las aguas receptoras. Por ejemplo, la menor penetración de la luz se traducirá en una disminución de la actividad fotosintética de las plantas acuáticas.

Las partículas suspendidas pueden brindar superficies favorables al desarrollo bacteriano y la demanda de oxígeno de estos residuos, aunque pequeña y muy

lenta, no beneficia en nada a las condiciones de la corriente de agua. Todos estos problemas se agravan cuando estos residuos no se descargan en los ríos, sino en lagos o lo que aún es peor, en ríos tributarios de embalses situados aguas abajo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Efectuar la caracterización de las aguas residuales provenientes del proceso de potabilización del agua, en las etapas de filtración y sedimentación de la planta de tratamiento de Bosconia, del acueducto metropolitano de Bucaramanga, utilizando como coagulante sulfato de Aluminio líquido tipo “B”.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los lodos provenientes del lavado de filtros y de las purgas de sedimentadores.
- Establecer una correlación entre los sólidos suspendidos y la turbiedad, para el agua cruda.
- Calcular teóricamente la cantidad aproximada de los lodos generados con base en los sólidos suspendidos.

3. ESTADO DEL ARTE

Uno de los aspectos más críticos en la operación de plantas de tratamiento es el manejo de los lodos producidos en los procesos de sedimentación y filtración, según sean provenientes de coagulación con sulfato de aluminio, o de compuestos férricos, para remoción de color o turbiedad, ya que tanto sus características fisicoquímicas como sus volúmenes son distintos en cada caso.

Los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40 %. Sin embargo en las plantas que remueven hierro y manganeso los filtros retienen la mayoría de los lodos con valores del 50 al 90%.

Los análisis físico-químicos de los residuos obtenidos en la coagulación con sales de aluminio han proporcionado una información significativa sobre los subproductos generados conocidos como lodos, aunque ésta puede deducirse de las características del coagulante empleado para el tratamiento.

Por regla general, el pH de la suspensión es neutro, ya que oscila entre 6 y 8. Aunque se ha medido la DBO a los cinco días, seguramente el valor obtenido no es tan significativo como el de la DBO a largo plazo. En la tabla 1 se pone de manifiesto la demanda de oxígeno al cabo de cinco, siete y veintisiete días en el caso de los vertimientos de coagulación química con aluminio de una planta de tratamiento de agua (planta A) de 3.950 m³/h de capacidad.

Este aumento creciente puede considerarse indicativo del bajo régimen de biodegradabilidad de la materia orgánica presente.

Tabla 2. Características de los lodos de coagulación con aluminio.

PLANTA	DBO mg/l	DQO mg/l	pH	Sólidos totales mg/l	Sólidos volátiles mg/l	Sólidos suspendidos mg/l	Sólidos volátiles suspensión mg/l
A	41 (5 días) 72 (7 días) 144 (27 días)	540	7,1	1159	571	1110	620
B	90 (5 días)	2100	7,1	10016	3656	5105	2285
C	108 (5 días)	15500	6	16830	10166	10044	9000
D	44 (5 días)	-	6	-	-	15790	4130

Fuente: Russellmann, Heinz B. Characteristics of water treatment plant waste disposal from water and wastewater treatment processes.

La elevada proporción de DQO a DBO₅ (13:1) confirma esta estabilidad de la fracción orgánica. En la planta A la concentración de sólidos suspendidos supone un 0.1% de la concentración de sólidos. Este valor es más bien bajo, teniendo en cuenta que los residuos de la coagulación con aluminio suelen tener una concentración de sólidos en suspensión que oscila entre 0.5 y 2 %. Aunque la fracción volátil de los sólidos en suspensión suele ser del orden del 56 % de los sólidos totales, esto no refleja la fracción orgánica presente ya que una gran parte de la pérdida registrada en la combustión se debe probablemente al agua ligada al óxido de aluminio hidratado (Ver tabla 2).

3.1 VERTIMIENTOS DE LA COAGULACIÓN CON SALES DE HIERRO

Los vertimientos producidos en la coagulación del agua con sales de hierro son análogos a los obtenidos en la coagulación con sales de aluminio. La diferencia obvia es que el grueso del vertimiento está constituido por óxidos férricos hidratados más que por los de aluminio. Como los óxidos férricos son insolubles en una zona mucho más amplia de pH que los de aluminio, el pH del agua en

contacto con aquellos puede variar en una escala más amplia. Es en parte por esta razón por la que las sales de hierro se emplean profundamente en la coagulación subsiguiente al ablandamiento y en la eliminación del color de las aguas blandas. El empleo más extendido de los coagulantes de aluminio que los de hierro en la técnica de tratamiento de agua se debe fundamentalmente a consideraciones económicas¹.

3.2 VERTIMIENTOS PROCEDENTES DEL ABLANDAMIENTO POR PRECIPITACIÓN QUÍMICA

La composición de los lodos obtenidos en la precipitación de la dureza del agua con cal y soda varía en función de la del agua cruda y de las dosificaciones de los productos químicos empleados en el ablandamiento. Es evidente que en el caso de esta agua, cada una de las cuales contenía inicialmente una cantidad baja de magnesio, los precipitados contienen del orden del 90 % de carbonato cálcico y del 2 al 7% de óxido de magnesio. Sin embargo, estos resultados no pueden considerarse como típicos, ya que muchas plantas de ablandamiento de aguas producen residuos con proporciones muchos mayores de óxido de magnesio².

3.3 AGUAS DE LAVADO ASCENDENTE EN FILTROS

Los vertimientos de las aguas de lavado ascendente de los filtros se parecen bastante a los materiales sedimentados que suelen encontrarse en las unidades de pre-tratamiento, que generalmente son de sedimentación. Los óxidos hidratados de aluminio, hierro, manganeso y magnesio, los carbonatos de calcio y hierro y los silicatos constituyen la mayor fracción de estos.

¹ RUSSELLMANN, Heinz B. Characteristics of water treatment plant waste disposal from water and wastewater treatment processes. Urbana. Febrero, 1968.

Disponible en: www.acueductodebucaramanga.com.

² *Ibidem*.

También puede existir materia orgánica en la forma de algas, plancton, bacterias formadoras de limos y carbón activo agotado. Como los filtros de arena rápidos pueden favorecer un desarrollo biológico abundante, el agua de lavado ascendente puede contener una fracción mucho mayor de materia orgánica de la que tienen los sólidos procedentes de las unidades de sedimentación.

La tabla 3 proporciona algunos datos sobre las características de algunas aguas de lavado ascendente de los filtros. Los valores muy bajos de la DBO₅ y relativamente elevados de la DQO son indicativos de la presencia de una pequeña cantidad de materia orgánica relativamente estable. En aquellas plantas en las que se emplea normalmente la coagulación con aluminio, tanto las cantidades de los sólidos totales como las aguas de lavado ascendente del filtro es inferior al 0.01%. Para la concentración de los sólidos en las aguas de lavado ascendente hay que recurrir con mayor frecuencia a procesos químicos o físicos de coagulación.

Tabla 3. Características de las aguas de lavado ascendente de filtros.

PLANTA	DBO ₅ mg/l	DQO mg/l	pH	Sólidos mg/l			
				ST	STV	SST	SSV
A	4.2	28	7.8	121	44	47	31
B	3.7	75	7.2	378	115	104	53
C	2.8	160	7.8	166	45	75	40

Fuente: Russellmann, Heinz B. Characteristics of water treatment plant waste disposal from water and wastewater treatment processes.

3.4 VERTIMIENTOS CON SOLUCIONES DE SALMUERA AGOTADA

El análisis químico de una solución de salmuera agotada se presenta en la tabla 4; en la que se pone de manifiesto que aproximadamente la mitad del residuo sólido está constituido por cloruro de sódico, mientras que el resto corresponde a los cloruros de calcio y magnesio.

Tabla 4. Análisis de una solución agotada de salmuera.

CONSTITUYENTE	CONCENTRACIÓN mg/l
Sodio y potasio	3325
Calcio	1720
Magnesio	600
Cloruros	9600
Sulfatos	328
Sólidos disueltos	15656

Fuente: HANEY, Paul. Disposal from cation-exchange. J. AWWA. 41:829. 1949.

3.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS VERTIMIENTOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO

Algunos cálculos aproximados de ciertas propiedades físicas de los residuos obtenidos en las plantas de tratamiento de agua figuran en la bibliografía sobre esta materia. En la tabla 5 se recopilan algunos de estos datos obtenidos en diferentes investigaciones.

Tabla 5. Características de las aguas residuales procedentes de diversos procesos de tratamiento de agua potable.

Características	Coagulación con aluminio	Ablandamiento con cal	Lavado ascendente del filtro
% sólidos	0.2 – 2 %	2 – 15%	0.01 – 0.1 %
Color	Gris	Blanco	Castaño
Olor	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Recuento Bacteriano	Elevado	Bajo	Elevado
Sedimentabilidad	Pobre: 50 % en 8Horas	50% en 8 días	80 % en 24 horas
Filtrabilidad seg^2/g	Pobre 2×10^9	Pobre	Pobre
Viscosidad, $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{seg}$	0.03 no newtoniano	---	0.01 (agua)
Capacidad de deshidratación	Concentración hasta un 10% de sólidos en dos días en lechos de arena	Se compacta lentamente hasta un 50% de humedad en sedimentadores	Debe coagularse y sedimentarse

Fuente: Russellmann, Heinz B. Characteristics of water treatment plant waste disposal from water and wastewater treatment processes.

3.6 MÉTODOS ACTUALES DE EVACUACIÓN DE LOS VERTIMIENTOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA

3.6.1 Evacuación de las aguas residuales obtenidas en la coagulación química. En el año 1952 un cuestionario que se envió a todos los ingenieros sanitarios norteamericanos permitió recoger los siguientes datos sobre la evacuación de residuos en 1530 plantas de tratamiento de agua potable, sin incluir las que se dedican al ablandamiento, los datos se encuentra en la tabla 6.

Tabla 6. Métodos de eliminación de aguas residuales originadas en plantas de tratamiento de agua (Dean).

Método de eliminación	Porcentaje
A cursos de agua o lagos	92.4
Al alcantarillado o desagües superficiales	3.5
Al alcantarillado sanitario	0.3
A eras de secado	3.1

Fuente: DEAN, John B. Disposal of wastes from filter plants and coagulation Basins. J. AWWA. 45:11. 1953.

Otros datos interesantes obtenidos en el cuestionario se refieren al esquema de las plantas de filtración y a los métodos de separación de los residuos de los sedimentadores. En las tres cuartas partes de las plantas estudiadas la coagulación y sedimentación preceden a la filtración rápida con arena; en el 17 % tan sólo se emplea filtración por regla general en filtros de arena lentos, y en el 6% se recurre a la presedimentación como paso previo a la coagulación y sedimentación. En lo que concierne a la eliminación de sólidos de los tanques de sedimentación, el 91% de las plantas realizan el lavado con mangueras para la separación intermitente de aquellos, mientras que otro 9% dispone para la eliminación continua de dichos sólidos.

De los datos obtenidos del cuestionario salta a la vista que, con una excepción notable, hasta ahora no se han realizado prácticamente estudios a escala piloto sobre la concentración de sólidos por filtración a vacío. Además, todos los encuestados indicaron que estos residuos (subproductos del tratamiento no tenían ninguna utilidad para fines económicos), lo que hoy día piensan las entidades encargadas del tratamiento del agua potable en países en desarrollo.

Resumiendo, la evacuación de los sólidos depositados en la coagulación química es prácticamente universal y muy sencilla; su descarga intermitente en la masa de agua natural más próxima.

3.6.2 Evacuación de las aguas residuales del lavado ascendente de los filtros. Las aguas de lavado de los filtros se desechan aproximadamente del mismo modo que los residuos de la coagulación química. El estudio de las técnicas de evacuación empleadas en 1699 plantas de tratamiento de los Estado Unidos puso de manifiesto lo siguiente.

Tabla 7. Evacuación de las aguas de lavado filtros (Dean).

Método de eliminación	Porcentaje
A una corriente de agua o lago	82.6 %
A una alcantarilla o desagüe superficial	10.7 %
A una alcantarilla sanitaria	2.5 %
A estanques de los que los sólidos no se eliminan	1.9 %
A lechos de secado	0.8 %

Fuente: DEAN, John B. Disposal of wastes from filter plants and coagulation Basins. J. AWWA. 45:11. 1953.

Como las aguas de lavado de los filtros tienen turbiedades inferiores a 1000 UNT, la opinión general es que su descarga en los ríos o lagos no es perjudicial, es por tanto que faltan más investigaciones para garantizar que estas no afectan al medio donde son descargadas.

3.6.3 Evacuación de los precipitados químicos obtenidos en el ablandamiento. Los resultados de una encuesta efectuada entre los ingenieros de los veintinueve Estados de la Unión que cuentan con el mayor número de plantas de ablandamiento de agua se publicaron (Black A.P, 1949)⁵. Los datos se obtuvieron en 371 plantas de ablandamiento con cal la mayor parte que se

encuentra en los Estados de Ohio (109), Illinois (41), Florida (31), Kansas (26), Pennsylvania (23), Iowa (20) y Missouri (19).

Los métodos empleados de evacuación de sólidos de estas plantas están en resumen tabla 8.

Tabla 8. Evacuación agua ablandamiento (Black).

Método de eliminación	Porcentaje
Descargas a una corriente	58.4%
Descarga en lechos o estanques de lodo	29.6%
Descarga en el alcantarillado	8.6%
Descarga en lechos de agua no circulante	2.1%

Fuente: BLACK, AP. Disposal of softening plant waste. J. AWWA. 41:819. 1949.

La descarga de los residuos del ablandamiento en el alcantarillado sanitario de la ciudad de Lebanon (Indiana) fue motivo que se alegó para explicar el mal funcionamiento y atascamiento de los digestores para el tratamiento de las aguas residuales. No obstante, en dicha ciudad se observó que podían obtenerse unos lodos relativamente estables mezclando los lodos primarios del alcantarillado con los residuos obtenidos en el ablandamiento. Esta práctica puede ofrecer perspectivas muy favorables en aquellas tierras agrícolas de carácter ácido.

Williamson (1949) estudió el empleo de los residuos de ablandamiento con cal como coagulantes de los lodos de las aguas negras crudas y los estudios piloto realizados en Daytona Beach (Florida) que se podía obtener una reducción del 70 al 80 % de la DBO recurriendo a un estancamiento de una hora después de añadir a las aguas negras crudas el residuo obtenidos en el ablandamiento con cal.¹

¹ BLACK, AP. Disposal of softening plant waste. J. AWWA. 41:819. 1949.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CANTIDADES DE RESIDUOS OBTENIDOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

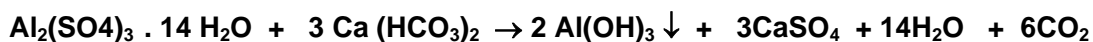
Hudson ha calculado que los residuos de las plantas de tratamiento de agua ascienden a unas 10^6 Ton/año, mientras que los lodos obtenidos en las plantas de tratamiento de aguas negras vienen a ser del orden de 10^7 Ton/año. Aunque el cálculo de estas cantidades totales no carece de interés, si se desea planificar la evacuación de sólidos a escala regional es preciso idear algún procedimiento para calcular las producciones actuales y futuras de estos lodos.

Un procedimiento para estimar la cantidad de sólidos secos producidos en las plantas de tratamiento de agua pudiera basarse en el cálculo de dicha cantidad por cada millón de litros de agua tratada, que, a continuación se multiplicaría por el volumen total tratado. Cuando el agua se trata para eliminar la turbiedad, por ejemplo, con sulfato de aluminio, los valores medios de ésta y de las dosis de alumbre pudieran emplearse para calcular el peso en seco de los sólidos producidos por cada millón de litros de agua cruda tratada. A este respecto, conviene subrayar que mientras que la turbiedad de las distintas aguas superficiales puede variar de modo considerable en función del tiempo o de la estación, las dosis de coagulante aplicadas suelen ser relativamente constantes.

De acuerdo con la estequiometría que gobierna la reacción que ocurre cuando adicionamos al agua cruda un coagulante en este caso sulfato de aluminio, para producir un flóculo de hidróxido de aluminio, se puede determinar la cantidad de

lodo producido en una planta de tratamiento de agua de una manera teórica. La siguiente es la reacción que ocurre.¹⁻²⁻³

Ecuación (1)



El balance de materia (pesos moleculares) es el siguiente para la ecuación (1):

Tabla 9. Balance de materia para la reacción que ocurre en el proceso de la coagulación del agua cruda (Kiely).

Reactivos y Productos	Gramos (gr)
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$	594
$3 \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	486
$2 \text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow$	156
3CaSO_4	408
$14\text{H}_2\text{O}$	252
6CO_2	264

Fuente: KIELY, Gerard. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión ambiental. Volumen I. España: Mc Graw-Hill. 2000. 177-180 p.

Es decir 594 gr. de sulfato de aluminio producen 156 gr. de lodo de hidróxido de aluminio y así sucesivamente. Como ejemplo se tiene que 100 Kg. por día de sulfato de aluminio usado diariamente produce 26 Kg. de lodo de hidróxido de aluminio.

¹ ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tomo 1. Bogotá: Mc Graw-Hill. 1994.

² BARRENECHE, John Jairo. Optimización de los Procesos de clarificación del agua mediante el uso de polielectrolitos sintéticos en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Tesis de Grado.

³ Coagulación y Floculación de Contaminantes de Agua. Disponible en: www.procesosvirtuales.com

4.2 MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN

El tratamiento y disposición de los lodos consta de las siguientes unidades que se tratarán a continuación.

4.2.1 Tanque ecualizador. Este tiene por objeto recibir el agua proveniente de los desagües de la planta y almacenarla para poder extraer de ahí el caudal continuo con que se va a alimentar los espesadores.

Los desagües se producen por pulsos de pocos minutos, cada vez que se lava un filtro o que se abre una de las válvulas de lavado (o purga) de los sedimentadores, de manera que requiere de un tanque grande para manejar dichos caudales variables, en que el nivel del agua pueda subir y bajar según las necesidades y ser desde ahí trasladado por bombeo continuo a los espesadores. Cuando se conoce la secuencia probable de lavado de los filtros y apertura de válvulas, es fácil calcular el volumen del tanque ecualizador, de acuerdo con los volúmenes que se generan. De lo contrario, puede asumirse la hipótesis de que su capacidad debe ser como mínimo, la suficiente para almacenar el producido de dos lavados continuos de los filtros cada uno de 15 minutos o sea 30 minutos de lavado a rata máxima para evitar problemas de nivel, simultáneamente la descarga de la purga de los sedimentadores durante esa media hora, sin rebosarse, menos el flujo que pasa a los espesadores durante el tiempo programado para el lavado de las estructuras hidráulicas antes mencionadas¹.

4.2.2 Espesamiento. Uno de los métodos usados para el tratamiento de lodos es el espesamiento. El espesamiento por gravedad remueve exceso de agua mediante decantación y concentra los sólidos por medio de la sedimentación. El agua decantada se recupera y se recicla o se dispone. El lodo espesado se procesa adicionalmente para su posterior disposición. En general el espesamiento

se utiliza para disminuir el volumen de residuo que debe procesarse en un tratamiento posterior. Se utilizan para dicho propósito sedimentadores convencionales flujo horizontal, sedimentadores de tasa alta, agitadores y centrífugas, con y sin ayudas de sedimentación. También las estructuras de espesamiento son circulares con un puente barre lodos que gira lentamente para agitar los sólidos y conseguir que compacten en el fondo, de donde son extraídos por gravedad o por bombeo hacia un sistema de secado mecánico o hidráulico³.

4.2.3 Secado de los lodos

- **Secado hidráulico.** Es el menos mecanizado pero el que requiere mayor área. Puede ser secado gravitacional, en grandes lechos de arena drenados por un sistema de tuberías perforadas, sobre los que se depositan los lodos espesados con polímeros y se los deja ahí al sol y al aire para que se deshidraten naturalmente. Ya secos, se remueven las tortas con un cargador y se llevan en volquetas al sitio de disposición final. La eficiencia del lecho de secado en arena depende del acondicionamiento con un polímero y el clima predominante en la planta, lo cual hace que el periodo de secado pase de días a semanas según los anteriores aspectos mencionados.

Las lagunas de secado de lodos son grandes estanques de sedimentación, con un efluente controlado. El lodo húmedo se bombea a la laguna y se deja sedimentar. Cuando la laguna se llena, se saca de servicio y se deja en reposo. Periódicamente se extrae el sobrenadante hasta obtener un lodo adecuado para disponer aproximadamente, las características principales de estas lagunas son una carga de sólidos = 40 – 80 Kg/m²d, una profundidad 1 – 2 metros, y una planta debe tener dos lagunas para que sean rotadas en su funcionamiento periódicamente.

¹ ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Op. Cit.

Un estudio hecho sobre el tratamiento de lodos de alumbre mediante lagunas, revela los resultados mostrados en la tabla 10; para un lodo proveniente de una unidad de clarificación de agua de flujo ascensional^{3, 7, 13, 18,19}.

Tabla 10. Resultados del tratamiento de alumbre mediante lagunas (Neubauer).

PARÁMETRO	LODO AFLUENTE	LODO EFLUENTE
Sólidos totales mg/l	4300	387
Sólidos suspendidos mg/l	3600	24
Sólidos volátiles mg/l	1000-1500	80
DBO mg/l	36-77	16
DQO mg/l	500-1000	30
pH	7.4	7.0
Turbiedad UNT	1500	100
Sólidos sedimentables ml/l	500-800	80

Fuente: NEUBAVER, W. K. Waste alud sludge treatment. J. AWWA. Vol. 60. No. 7. Julio, 1968.

- **Secado mecánico.** Son muchos los equipos mecánicos que se mercadean para el secado de lodos; deben consultarse al respecto las respectivas casas fabricantes. Hay sistemas centrífugos, filtros prensa de banda sin fin, filtros prensa de placas, compresores, filtros de vacío, prensas de tornillo, etc.

Lo importante es conocer la experiencia que tiene el suministrador involucrado en utilizar su sistema para lodos de aguas potables, que tienen características muy diferentes de las de los lodos aguas residuales domesticas e industriales.

Algunos criterios típicos de diseño de filtros de vacío se incluyen en la tabla 11.

Tabla 11. Criterios de diseño de filtros de vacío.

PARAMETRO	LODO DE ALUMBRE	LODO DE CAL
% de sólidos del lodo afluyente	1-6 %	5-30%
Carga hidráulica m ³ /m ² d	2-5 m ³ /m ² d	2-5 m ³ /m ² d
Producción de sólidos Kg/m ² d	85-150 Kg/m ² d	470-2350 kg/m ² d
Concentración de la pasta %	15-25 %	45-65 %
Velocidad del tambor, RPM	0.2-0.5 RMP	0.2-0.5 RMP
Presión de operación vacío, cm Hg	25-65 cm Hg	25-65 cm Hg

Fuente: MONTGOMERY, J.M. Consulting Engineers, INC. water treatment principles and design, Wiley. 1985.

Como se mencionó antes las centrífugas también se usan para desaguar los lodos, a pesar de su consumo alto de energía. Existen dos tipos principales de centrífugas: las de voluta y las de cesta. La centrífuga de voluta opera en continuo y la de cresta opera por cochadas.¹⁻²⁻³⁻⁴⁻⁵⁻¹

4.3 DISPOSICIÓN FINAL DE LOS LODOS

El flujo efluente extraído de los tanques y del proceso de secado, tiene por lo general características que permiten disponerlo en la fuente receptora, sin problemas, salvo la autoridad sanitaria lo prohíba, o estudios de toxicidad determinen lo contrario. En ese caso, esas aguas pueden recircularse así: la de los espesadores se lleva, al comienzo de los procesos de tratamiento, a la mezcla rápida y los del secado de lodos, al tanque ecualizador o a los espesadores.

¹ ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Mc Graw Hill Tomo 1 Bogotá, 1994.

² DEAN, John B. Disposal of wastes from filter plants and coagulation Basins. J AWWA. 45:11.1953.

³ MONTGOMERY, J.M. Consulting Engineers, INC. water treatment principles and design. Wiley. 1985.

⁴ NEUBAUER, W.K. Waste alum sludge treatment. J AWWA. Vol 60. N° 7. Julio de 1968.

⁵ Disponible en: acsmedioambiente.com/equipos/deshidratador_de_lodos.htm

Cabe advertir que la recirculación del flujo de lavado puede tender a concentrar los metales pesados y pesticidas, cuando los hay, e incluso protozoarios en el agua tratada, y en ocasiones perjudica el proceso de potabilización del agua poniendo en riesgo la salud humana, de manera que debe estudiarse muy a fondo este problema antes de tomar cualquier decisión al respecto, mediante un completo análisis de aguas y pruebas piloto.

En el tratamiento sobre el suelo, el lodo se riega o incorpora dentro de la capa superficial de suelo para la descomposición, estabilización e inmovilización de sus constituyentes. El lodo se ha aplicado a tierras de cultivos, áreas de minería abandonadas y como material de cobertura en rellenos sanitarios. De esta manera se obtiene la disposición final del lodo y además; se modifican las propiedades del suelo y se reciclan materiales útiles del lodo.

Los lodos de plantas de purificación de agua pueden modificar favorablemente el pH y la capacidad de retención de agua del suelo, aunque tienen poco valor fertilizante. La adición periódica de cal a suelos agrícolas para prevenir su acidificación es una práctica muy usada en diferentes lugares; por ello, la disposición de lodos de ablandamiento con cal sobre tierras cultivadas se ha utilizado desde hace más de 50 años, con aceptación amplia. La capacidad de neutralización de suelos ácidos, que poseen los lodos de ablandamiento con cal, es grande, frecuentemente mayor que la de la cal comercial. Los suelos se neutralizan con cal para obtener un pH de 6 a 6.5 % según el tipo de cultivo.

Dependiendo del pH inicial, se aplican lodos de ablandamiento con cal cada tres años a tasas de 5-10 mg/ha; pero de acuerdo con el ECC (equivalencia con carbonato de calcio), dichas tasas pueden ser mayores (Elliot, 1991)^{3,5}. Para reducir el volumen de lodos a un valor mínimo y esterilizar el residuo final, se usa el proceso de incineración. La incineración de lodo es, por lo tanto, un proceso de

¹ Disponible en: http://usuarios.lycos.es/drinkingwater/tratamiento_de_lodos.htm

combustión controlada para reducir lodos secos a productos gaseosos y a un residuo final o ceniza. Es un método costoso que requiere espesamiento y desaguado previo del lodo, el proceso de secado y combustión se compone, generalmente de las etapas siguientes: calentamiento del lodo a 100 grados centígrados, evaporación del agua del lodo, incremento de la temperatura del vapor del agua y del aire del gas e incremento de la temperatura del lodo seco al punto ignición. Para una reacción completa y operación apropiada, el proceso requiere combustible, aire, tiempo, temperatura y turbulencia adecuada. Los lodos de alumbre tienden a endurecer los suelos; por ello se disponen en rellenos sanitarios o en suelos para dicho propósito específico, esto ocurre de acuerdo a la concentración de aluminio y hierro que presente el lodo.¹⁻²⁻³⁻⁴⁻⁵⁻⁶

¹ ARBOLEDA VALENCIA. Op. Cit.

² BLACK, AP. Disposal of softening plant waste. J AWWA. 41:819. 1949.

³ DEAN, John B. Op. Cit.

⁴ HANEY, Paul. Disposal from cation-exchangue. J AWWA. 41:829. 1949.

⁵ NEUBAVER. Op. Cit.

⁶ RUSSELLMANN, Heinz B. Characteristics of water treatment plant waste disposal from water and wastewater treatment processes, Urbana, febrero 1968.

5. ALCANCES

En el presente trabajo se hará una caracterización de los lodos provenientes de las descargas generadas en el proceso de potabilización del agua en la planta de Bosconia - Bucaramanga (Stder.), teniendo presente que en esta planta se realizará el cambio de coagulante sólido a líquido, el cual al tener menor cantidad de material insoluble reducirá la contaminación (con respecto a las descargas anteriores) del río Suratá, que es el cuerpo de agua receptor de los lodos.

La planta de Bosconia cuenta con cuatro sedimentadores y doce filtros; para el presente estudio se escogerá un sedimentador previamente lavado con el fin de descartar la presencia de residuos provenientes del sulfato de aluminio sólido; también se escogerá un filtro el cual recibe agua de este sedimentador. Los sedimentadores y filtros escogidos serán el cuatro y el nueve respectivamente.

El estudio será únicamente de las descargas de lodos y no se hará caracterización aguas abajo del vertimiento. Se tomaran muestras diarias del agua del río Suratá durante el presente estudio y se analizaran los siguientes parámetros:

- Turbiedad.
- Conductividad.
- Color.
- pH.
- Sólidos totales.
- Sólidos suspendidos.
- Sólidos sedimentables.

Se hará el cálculo teórico de la cantidad de lodos generados con base en los sólidos suspendidos del agua del río Suratá, se establecerá una correlación entre la turbiedad y los sólidos suspendidos.

6. LIMITACIONES

Debido a la necesidad de utilizar sulfato de aluminio sólido el cual llevaba un considerable tiempo de almacenamiento, no se realizaron más caracterizaciones de lodos.

El presente trabajo no se puede comparar con las demás caracterizaciones de lodos (cada tres meses) debido a que no se han tenido en cuenta la toma de muestras correspondientes a los diferentes periodos climáticos.

7. METODOLOGÍA

El sedimentador en estudio se lavo y llenó el 18 de febrero. La primera muestra se tomo a los 5.8 días (140 horas), la segunda a los 15.8 días (380 horas) y la tercera a los 26 días (624 horas de funcionamiento) (tratamiento) y para el filtro a las 47, 65 y 101 horas de funcionamiento.

Las muestras que se tomaran serán compuestas de la siguiente manera:

Para el sedimentador 4: 0, 1, 2, 3, 4, 5 minutos.

Para el filtro 9: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 minutos.

Estos tiempos obedecen a un estudio realizado en la planta de Bosconia

Los parámetros a analizar serán:

*p.H, Turbiedad, Conductividad.

*Sólidos totales, Sólidos suspendidos, Sólidos sedimentables.

*DBO₅, DQO.

*Microbiológicos: Coliformes totales, Escherichia coli, Aerobios mesófilos.

*Metales: Mercurio, Hierro, Cobre, Plomo, Aluminio, Zinc.

Simultáneamente se tomará una muestra diaria del Río Suratá a la cual se le evaluarán los siguientes parámetros: pH, Turbiedad, Color, Conductividad, Sólidos totales, Sólidos suspendidos y Sólidos sedimentables.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS

Según las pruebas analizadas, que se tomaron durante el estudio se consideró para un mejor entendimiento, agrupar ciertos parámetros, y los que son controlados por la legislación se compararon con el Decreto 1594 de junio de 1984 para verificar su cumplimiento.

- Analizando los resultados (ver gráficas 1 y 2) se concluye que tanto para el retrolavado de filtros como para la purga de sedimentadores, el pH de los lodos presenta un incremento moderado con el tiempo de muestras, es decir el pH mas alto corresponde a la ultima muestra tomada, esto debido a la variación de temperatura durante la lectura de las muestras y a la acumulación de $Al(OH)_3$ en los lodos. El decreto 1594 de junio de 1984 en el capitulo VI articulo 72 que cita sobre vertimientos a cuerpos de agua, el rango permitido para el pH es de 5 a 9, considerando lo anterior la Planta de Bosconia cumple con las normas de vertimientos para el parámetro citado.

- La Turbiedad presenta un incremento debido a la acumulación de lodos con el tiempo de trabajo tanto para el sedimentador como para el filtro. (Ver gráficas 3 y 4).

- El color no fué un parámetro significativo ya que su incremento es despreciable con respecto a las turbiedades correspondientes. Lo anterior es consecuencia de los diferentes procesos que anteceden a la formación de lodos: coagulación, floculación y sedimentación en los cuales se produce la remoción de color. (Ver gráficas 5 y 6).

- La conductividad tiene relación directa con las dosis aplicadas de Sulfato de Aluminio y principalmente con los iones Al^{+3} y Fe^{+3} presentes en los lodos. Su incremento moderado se debe probablemente a un exceso de coagulante. (Ver gráficas 7 y 8).

- La Temperatura de los lodos esta determinada en el Decreto 1594 de 1984 capitulo VI, articulo 72 y su valor máximo permitido es de 40°C. Todos los vertimientos de lodos de la Planta de Bosconia durante el presente estudio cumplen con esta norma. (Ver gráficas 9 y 10).

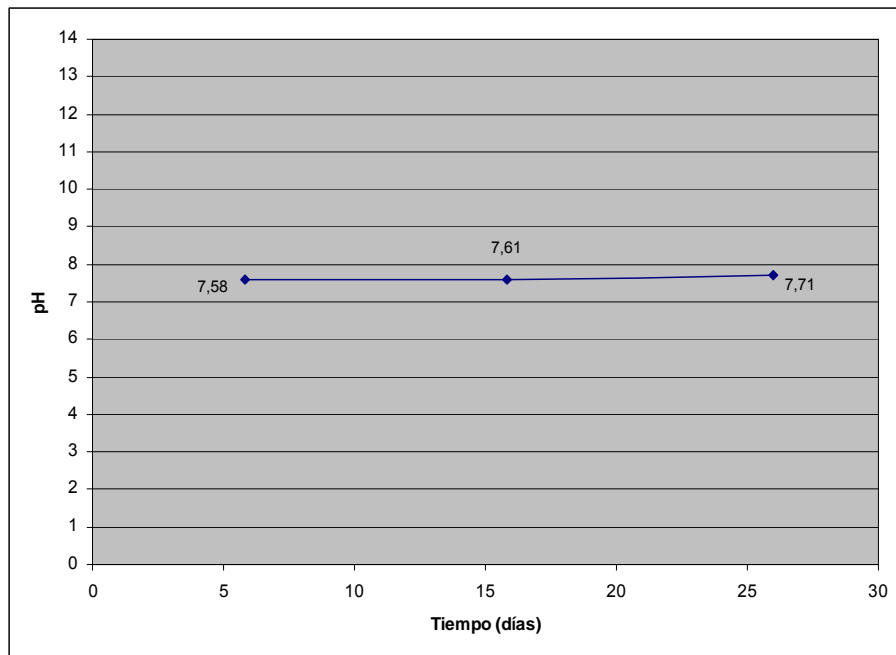
- En las gráficas (11, 12, 13 y 14) se pueden observar que los valores para los sólidos totales, suspendidos y sedimentables aumentan proporcionalmente con la turbiedad y el tiempo de trabajo del filtro y del sedimentador.

El Decreto 1594 del 84 en el capitulo VI, articulo 72 establece una remoción mayor del 50% en carga para sólidos suspendidos. Los vertimientos de la Planta de Bosconia durante el presente estudio no cumplen con esta exigencia.

- Respecto a los parámetros de DBO_5 y DQO se concluye que a mayor acumulación de materia orgánica en los lodos se obtienen valores más altos para los parámetros en mención. (Ver gráficas 15 y 16). El decreto 1594 de 1984 capitulo VI articulo 72 establece una remoción mayor al 20% en carga, para la DBO. Actualmente, la planta de Bosconia no cumple con la norma citada.

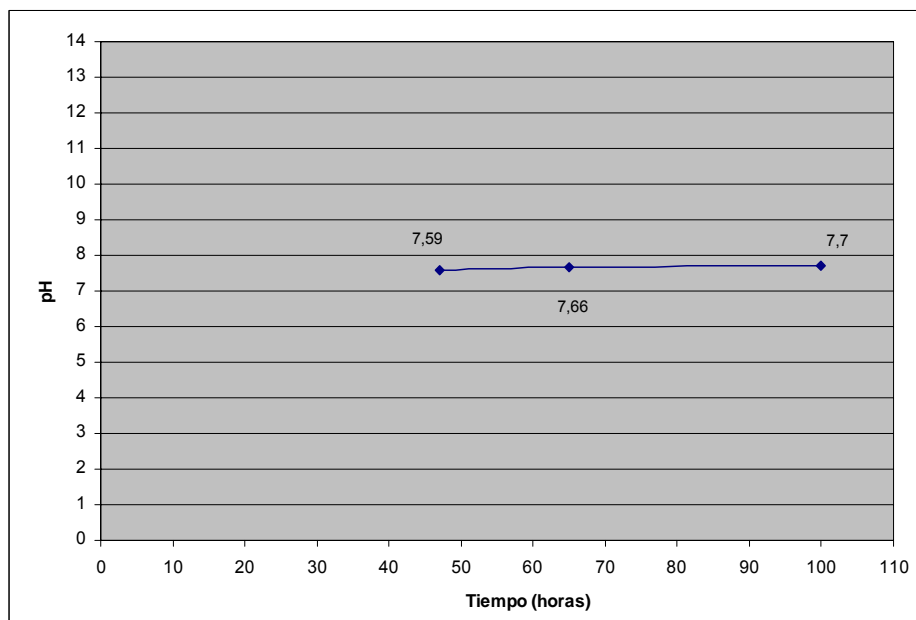
- Durante los procesos de floculación y sedimentación se da una remoción significativa de microorganismos los cuales quedan atrapados en los flóculos y se precipitan por acción de la gravedad, produciendo su acumulación con el tiempo. (Ver gráficas 17, 18, 19, 20, 21, 22).

Gráfica 1. Comportamiento de pH vs Tiempo en el Sedimentador.



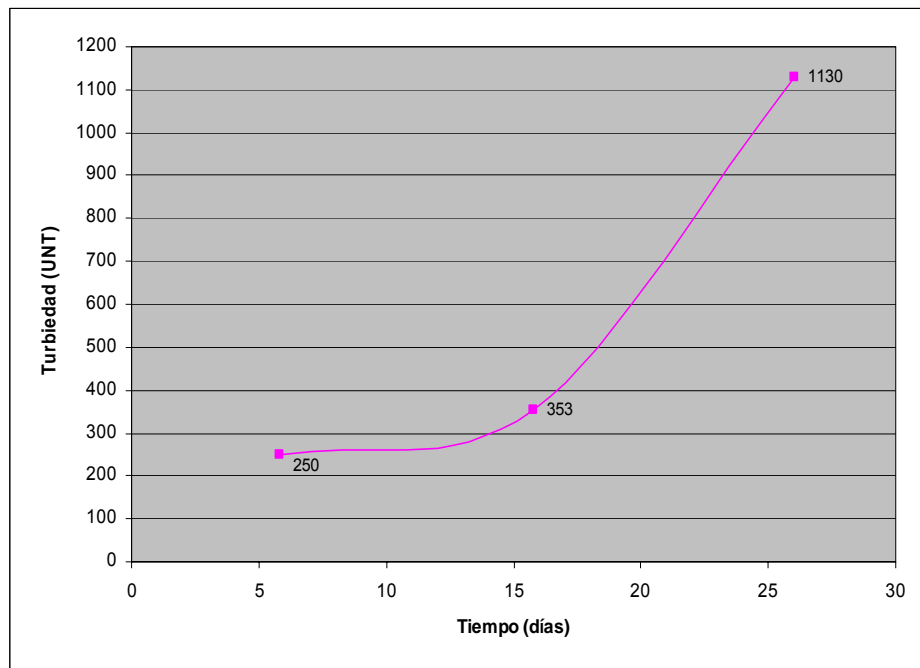
Fuente: Autor.

Gráfica 2. Comportamiento del pH vs Tiempo en el Filtro.



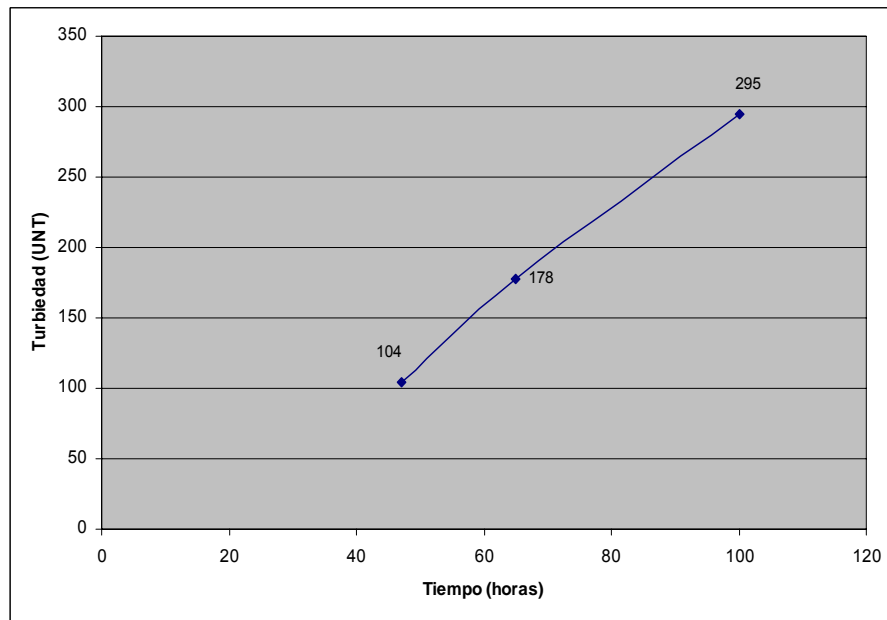
Fuente: Autor.

Gráfica 3. Turbiedad vs Tiempo en el Sedimentador.



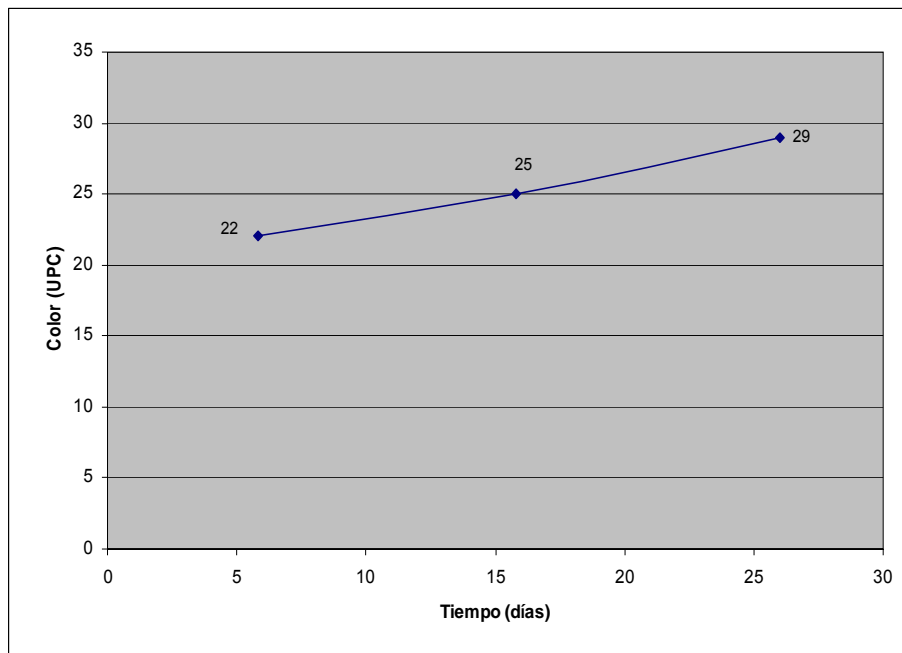
Fuente: Autor.

Gráfica 4. Turbiedad vs Tiempo en el Filtro.



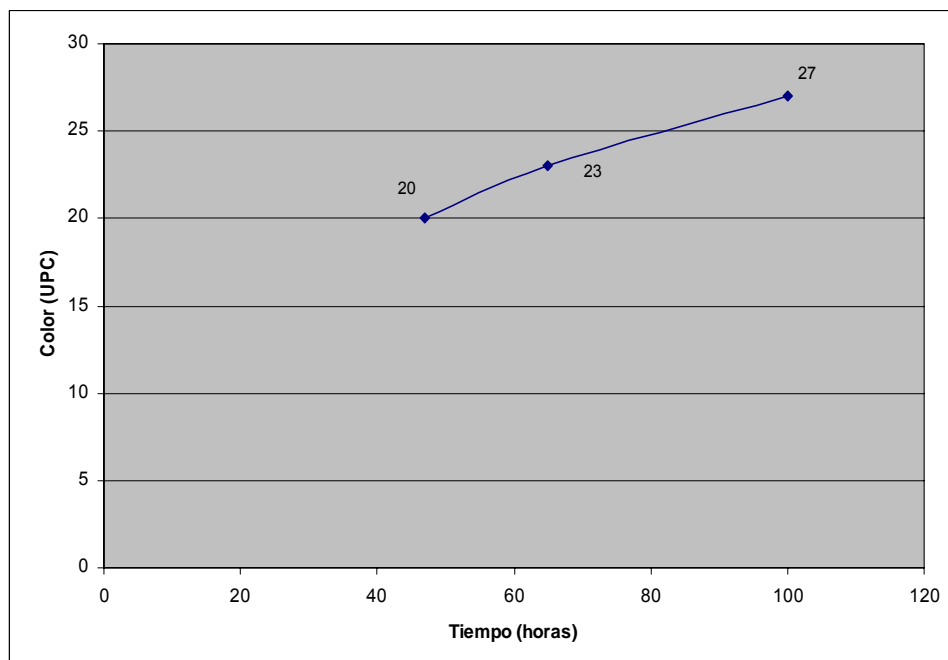
Fuente: Autor.

Gráfica 5. Comportamiento del Color vs Tiempo en el Sedimentador.



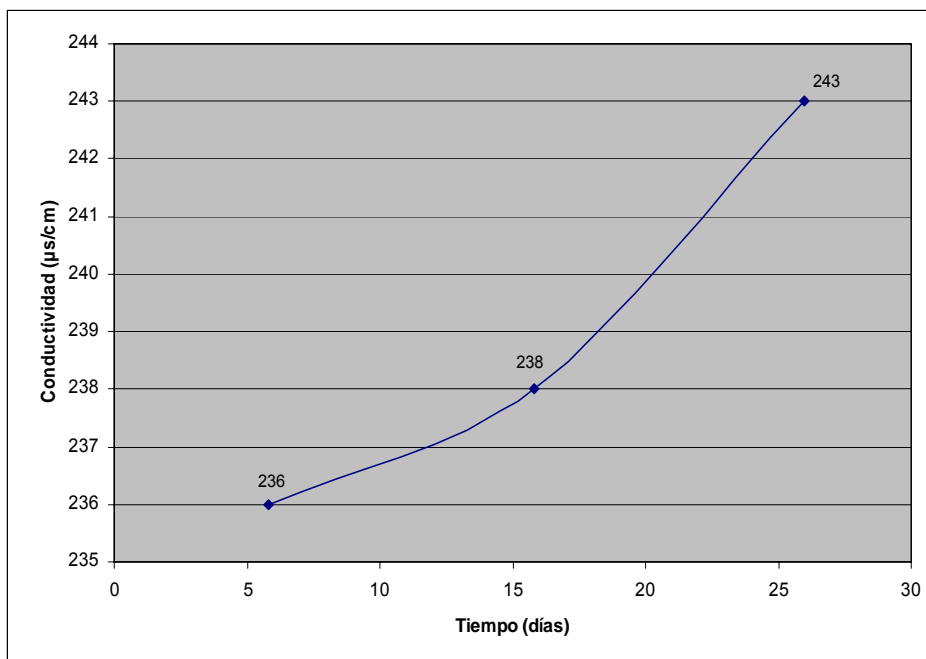
Fuente: Autor.

Gráfica 6. Comportamiento del Color vs Tiempo en el Filtro.



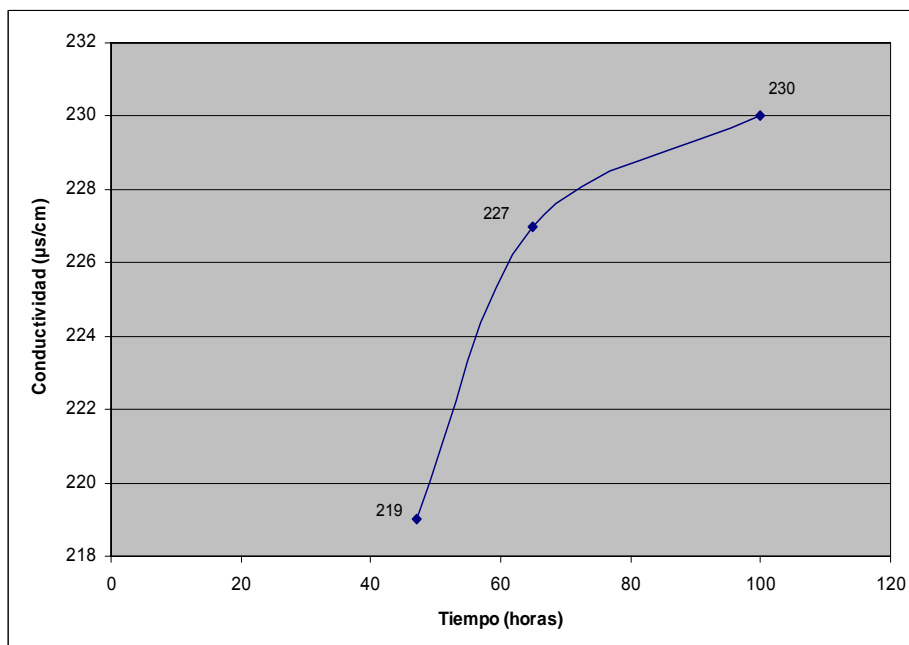
Fuente: Autor.

Gráfica 7. Comportamiento de la Conductividad vs Tiempo en el Sedimentador.



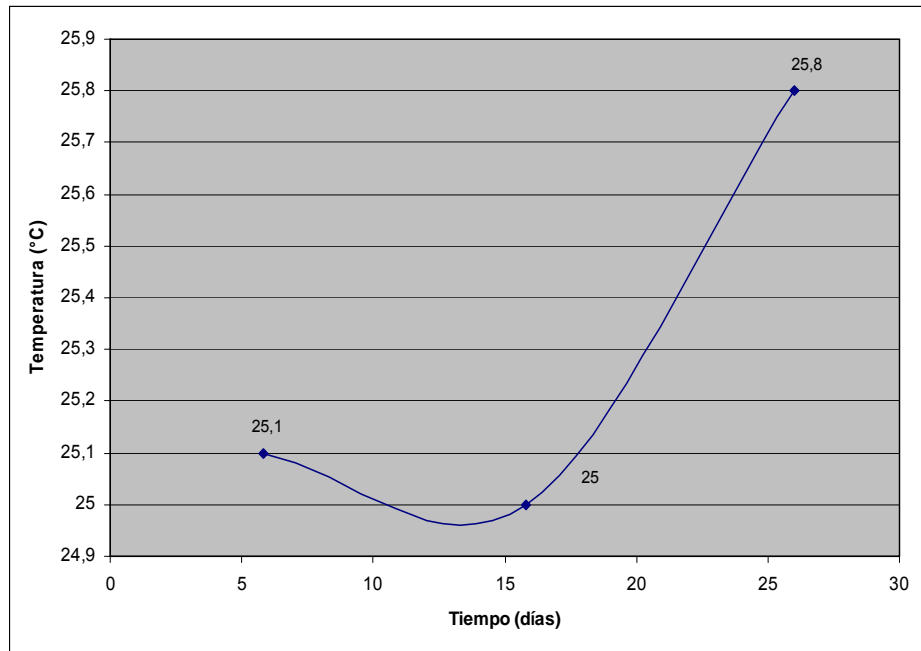
Fuente: Autor.

Gráfica 8. Comportamiento de la Conductividad vs Tiempo en el Filtro.



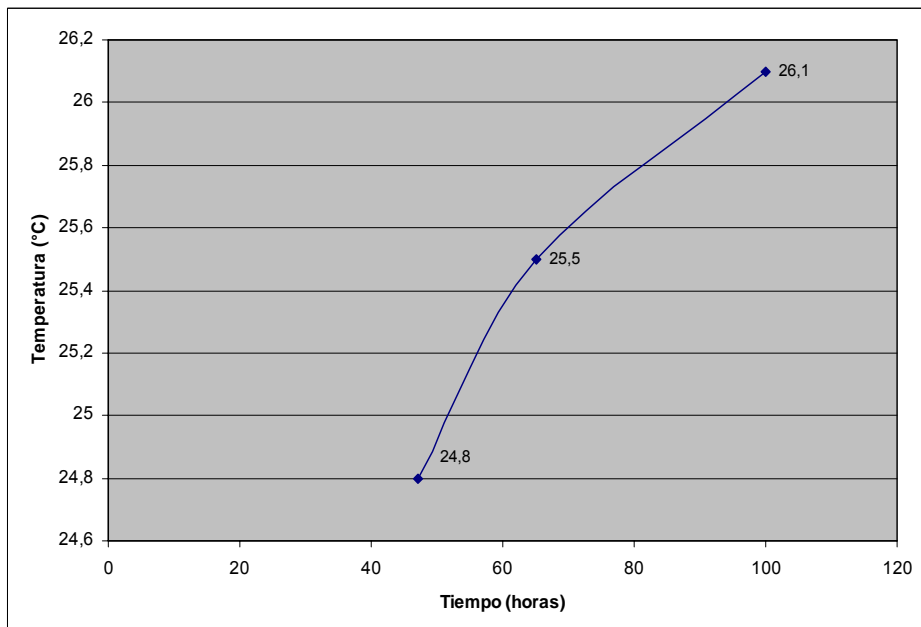
Fuente: Autor.

Gráfica 9. Comportamiento de la Temperatura vs Tiempo en el Sedimentador.



Fuente: Autor.

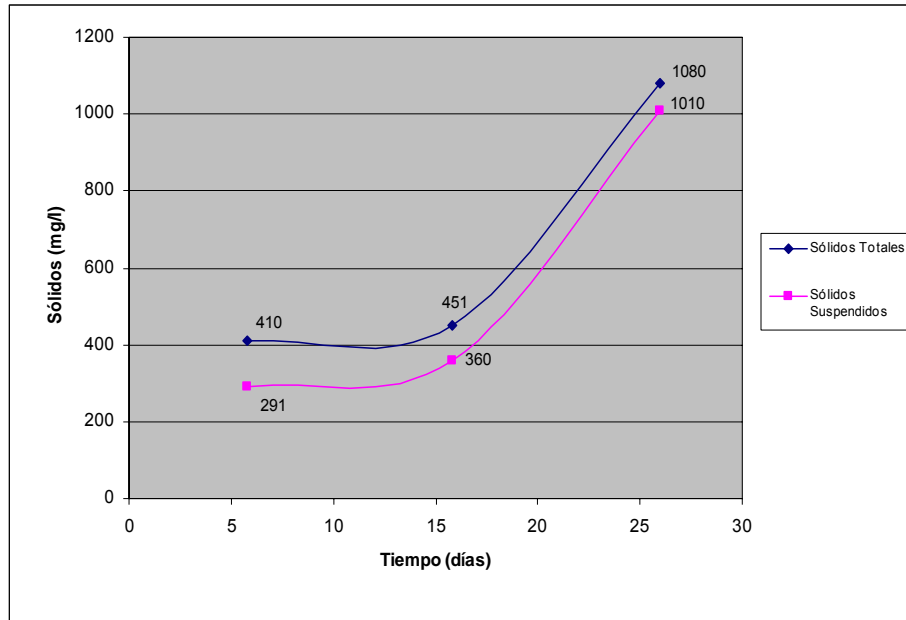
Gráfica 10. Comportamiento de la Temperatura vs Tiempo en el Filtro.



Fuente: Autor.

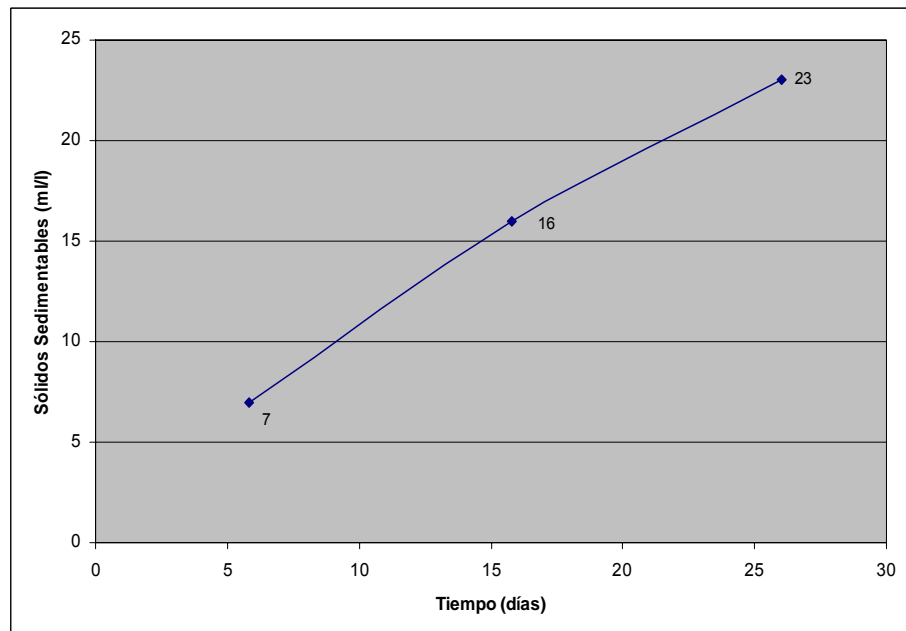
→ Sedimentador

Gráfica 11. Sólidos Totales y Suspendidos vs Tiempo.



Fuente: Autor.

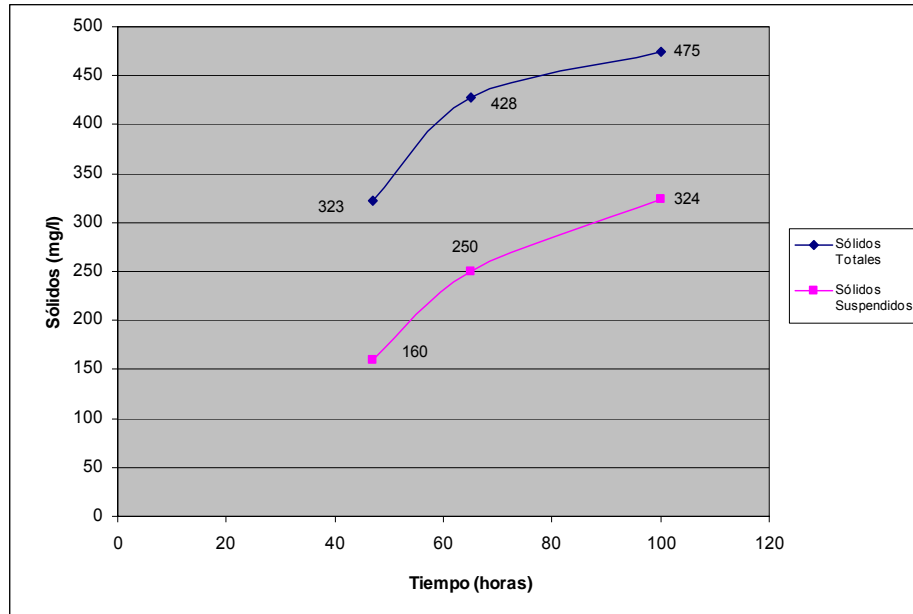
Gráfica 12. Sólidos Sedimentables vs Tiempo.



Fuente: Autor.

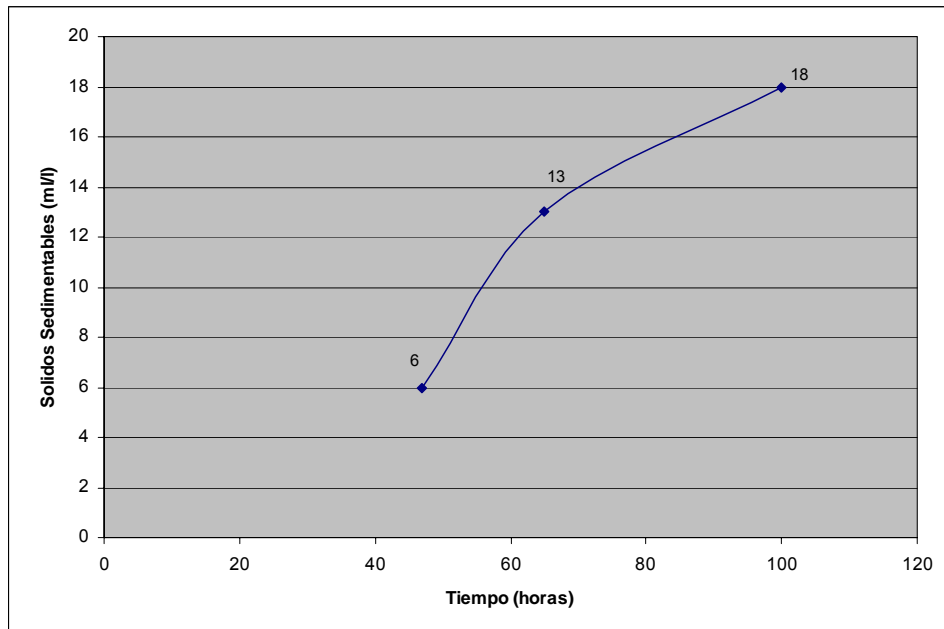
→ Filtro

Gráfica 13. Sólidos Totales y Suspendidos vs Tiempo.



Fuente: Autor.

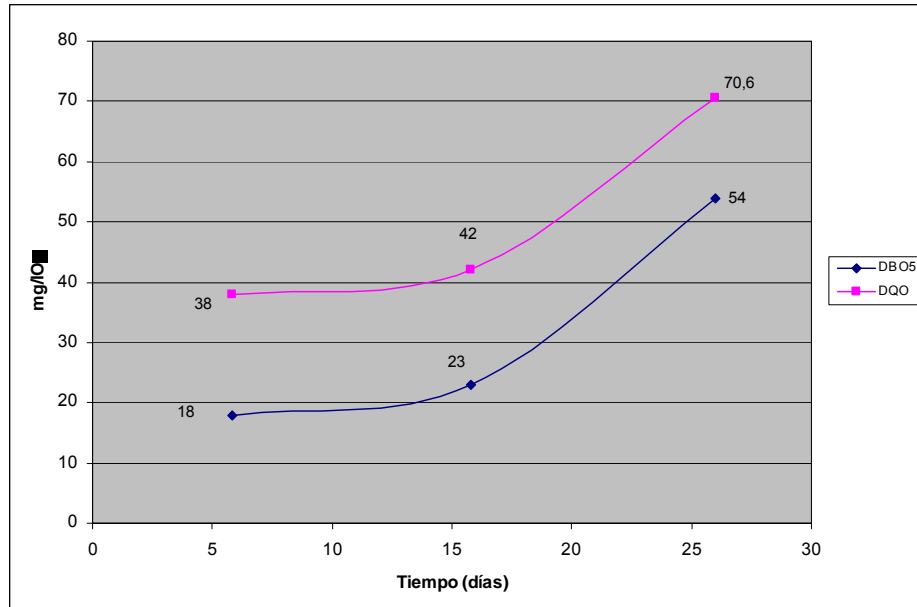
Gráfica 14. Sólidos Sedimentables vs Tiempo.



Fuente: Autor.

→ Sedimentador

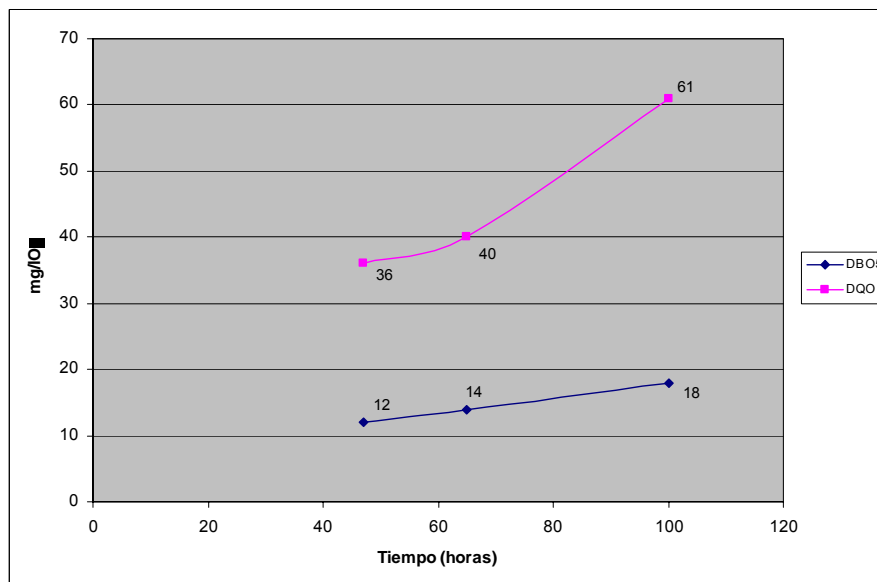
Gráfica 15. Comportamiento de la DBO₅ y DQO vs Tiempo.



Fuente: Autor.

→ Filtro

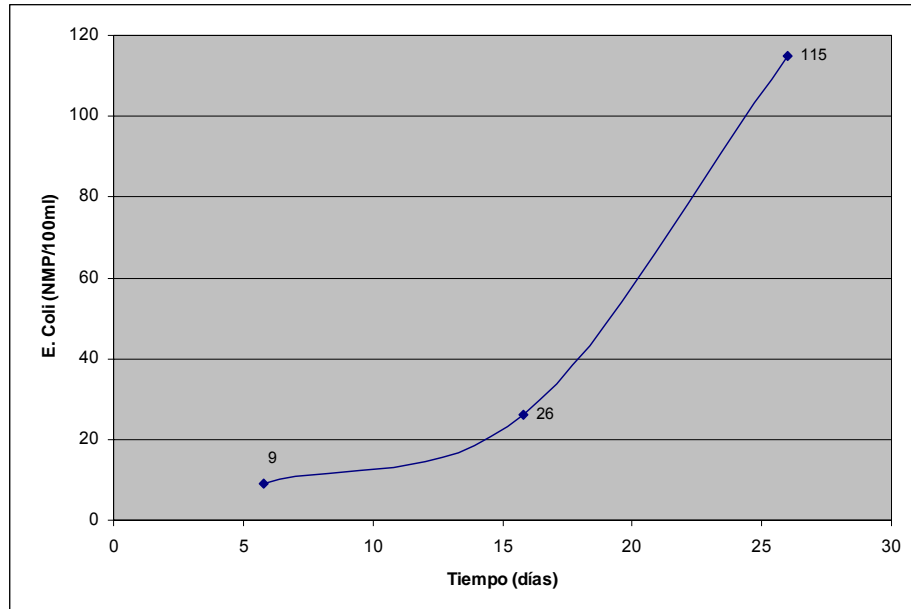
Gráfica 16. Comportamiento de la DBO₅ y DQO vs Tiempo.



Fuente: Autor.

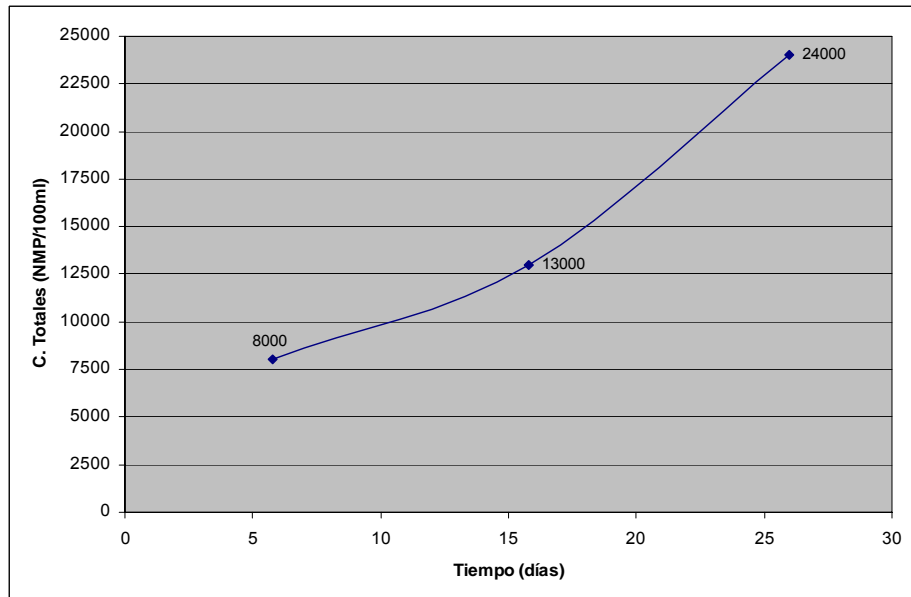
→ Sedimentador

Gráfica 17. E. Coli vs Tiempo.



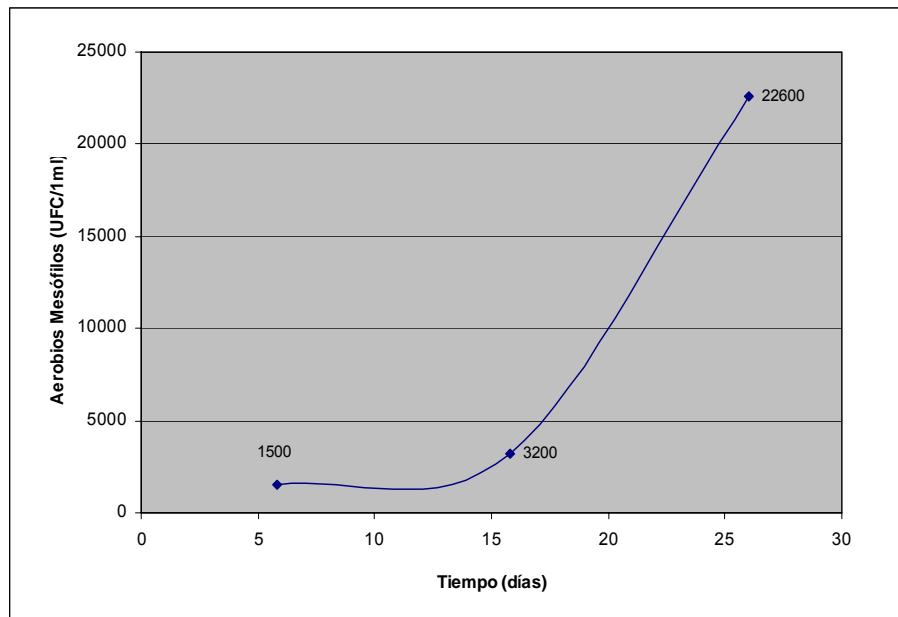
Fuente: Autor.

Gráfica 18. Coliformes Totales vs Tiempo.



Fuente: Autor.

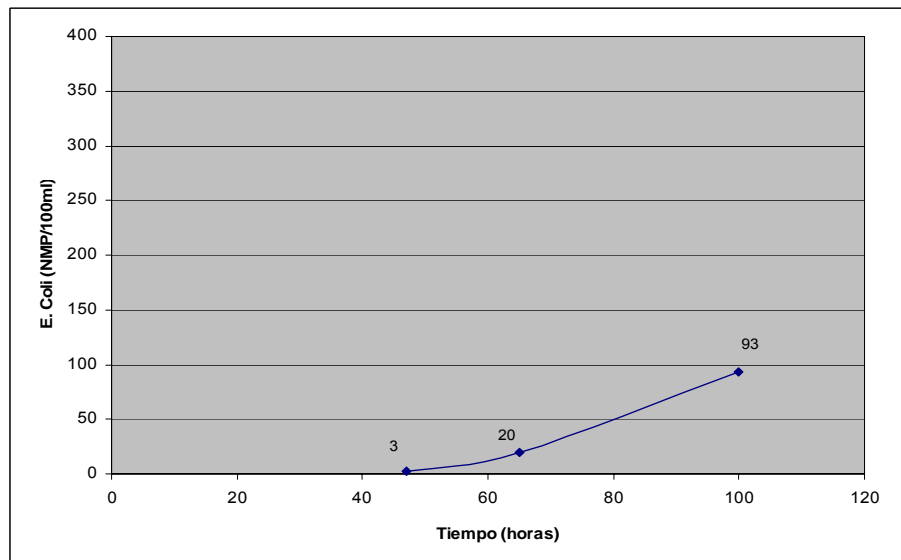
Grafica 19. Aerobios Mesófilos vs Tiempo.



Fuente: Autor.

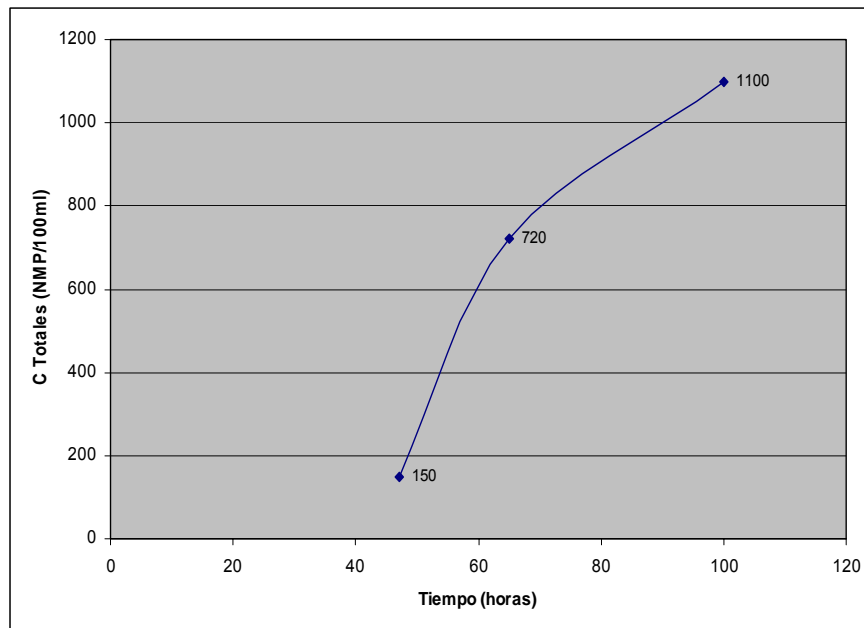
→ Filtro

Gráfica 20. E. Coli vs Tiempo.



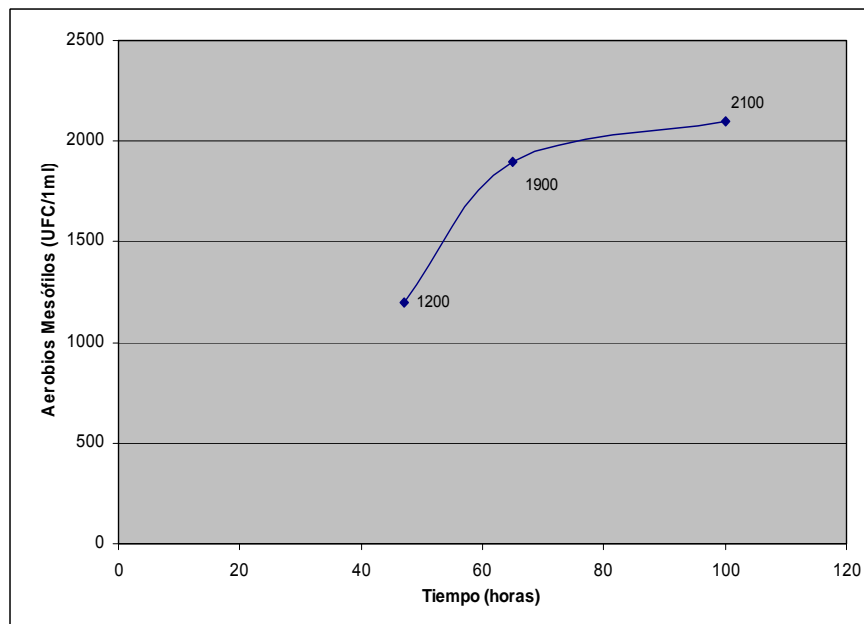
Fuente: Autor.

Gráfica 21. Coliformes Totales vs Tiempo.



Fuente: Autor.

Gráfica 22. Aerobios Mesófilos vs Tiempo.



Fuente: Autor.

→ **Mercurio**

En la parte alta del Río Surata se encuentra la explotación aurífera de los distritos mineros de Vetas y California, que generan vertimientos que transportan grandes cargas de sedimentos. Estos a su vez, con una marcada frecuencia se presentan contaminados con residuos de mercurio.

La mayoría de los establecimientos mineros de los mencionados distritos, en su afán de recuperar con un alto rendimiento el oro contenido en los concentrados de la molienda, optan por moler estos concentrados en pequeños molinos de bola “se conocen como barriles amalgamadores”. Estos son cargados con unos 50 kg de mineral aproximadamente y un poco de agua. Junto con esta carga suelen agregar a manera de tanteo, cierta cantidad de mercurio metálico que también será molido con el mineral incluido.

En el caso del distrito minero de Vetas, los sedimentos contaminados con Hg van a parar al río del mismo nombre y en el caso del distrito de California, estos caen a la quebrada La Baja. Las dos corrientes receptoras, el río Vetas y la quebrada La Baja, son afluentes del río Suratá, por lo tanto estas dos corrientes son las vías de ingreso del metal contaminante a la corriente del río Suratá.

La fracción de Mercurio que se asoció con los sedimentos en el proceso anteriormente descrito continúa ligada a ellos a lo largo del desplazamiento migratorio en la corriente, constituyendo coloides causantes de turbiedad. Así como las partículas de fácil sedimentación, de tal forma que el desplazamiento no resulta uniforme si no por el contrario tiende a sedimentar y estratificarse en el fondo y las orillas del río; hecho que depende del caudal con que el río se está moviendo. De tal forma que al aumentar la turbulencia por acción de las lluvias, el material sedimentado se suspende de nuevo y continúa su proceso migratorio en la corriente. Por esta razón siempre que se presentan fluctuaciones en el caudal,

fluctúa también la turbiedad y por consiguiente, los niveles de mercurio en la corriente.

Es de gran importancia tener presente que el tipo de Mercurio que por vertimientos ingresa al caudal del río Surata, es Mercurio metálico asociado a las partículas de turbiedad. Este Mercurio es totalmente insoluble en el agua. Se halla contenido en los sedimentos, es decir en la fase sólida, de tal manera que esta agua al ser sometida a un proceso de tratamiento convencional para eliminar los sólidos y coloides suspendidos (coagulación, floculación, sedimentación, filtración) elimina también el Mercurio en forma total; presentándose entonces en los lodos que quedan en los sedimentadores y el lecho filtrante de antracita-arena de la Planta de Bosconia. Como el Mercurio metálico absorbe también hasta la más pequeña de las partículas coloidales y estas no sedimentan fácilmente, es necesario desestabilizarlas y aglutinarlas con algún coagulante (sulfato de aluminio), para que estos precipiten y con ellos toda posibilidad de mercurio asociado.

Cuando la concentración de mercurio en el río es superior a $2\mu\text{g/l}$ se hace una predosificación de Sulfato de Aluminio con el fin de reducir las concentraciones de mercurio y así dar cumplimiento al Decreto 1594 de 1984 capítulo IV artículo 38.

- Según las gráficas 23 y 28 el agua de retrolavado de filtros presenta concentraciones más bajas que las purgas de los sedimentadores. Esto es muy relevante porque en los sedimentadores se elimina un alto porcentaje de turbiedad asociado al mercurio. Al igual que los parámetros anteriores, las concentraciones de Mercurio tanto en el retrolavado de los filtros como en la purga de sedimentadores aumentan con el tiempo de tratamiento.

El Mercurio es considerado como un parámetro de interés sanitario y su concentración límite es de $20\mu\text{g/l}$. Considerando lo anterior la Planta de Bosconia cumple con los parámetros de vertimiento durante el presente estudio.

→ **Hierro y Aluminio**

Proviene principalmente del Sulfato de Aluminio, empleado como coagulante y su concentración aumenta proporcionalmente con el tiempo de trabajo (tratamiento). El hierro y aluminio no son considerados como sustancias de interés sanitario, por lo tanto no están estimados en las normas de vertimientos. (Ver gráficas 24, 25, 29 y 30).

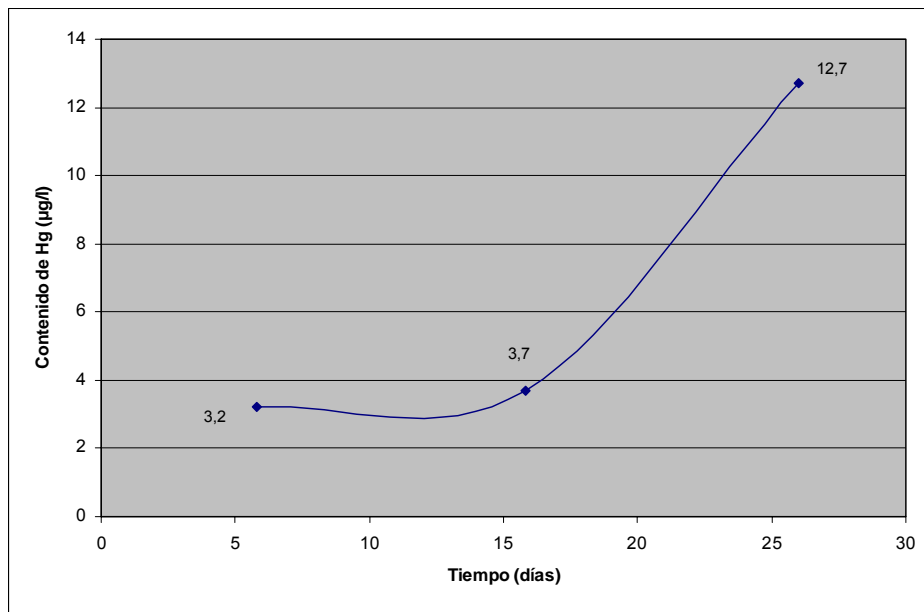
→ **Plomo, Cobre y Zinc**

Al igual que los otros metales aumentan con la concentración de lodos un porcentaje que proviene del agua cruda y el resto del Sulfato de Aluminio. (Ver gráficas 26, 27, 31 y 32).

- **Sedimentador**

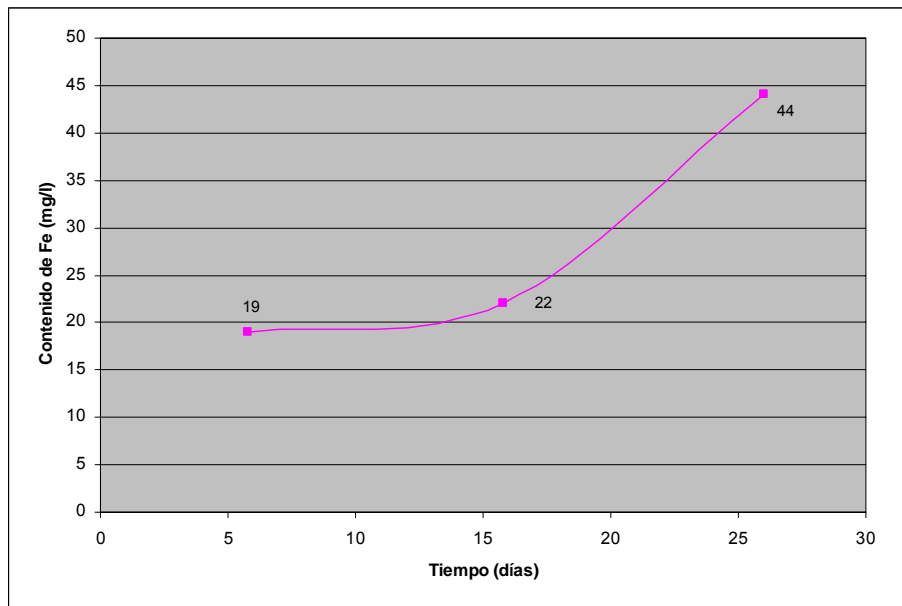
- Mercurio, hierro, aluminio, plomo, cobre y zinc.

Gráfica 23. Contenido de Mercurio vs tiempo.



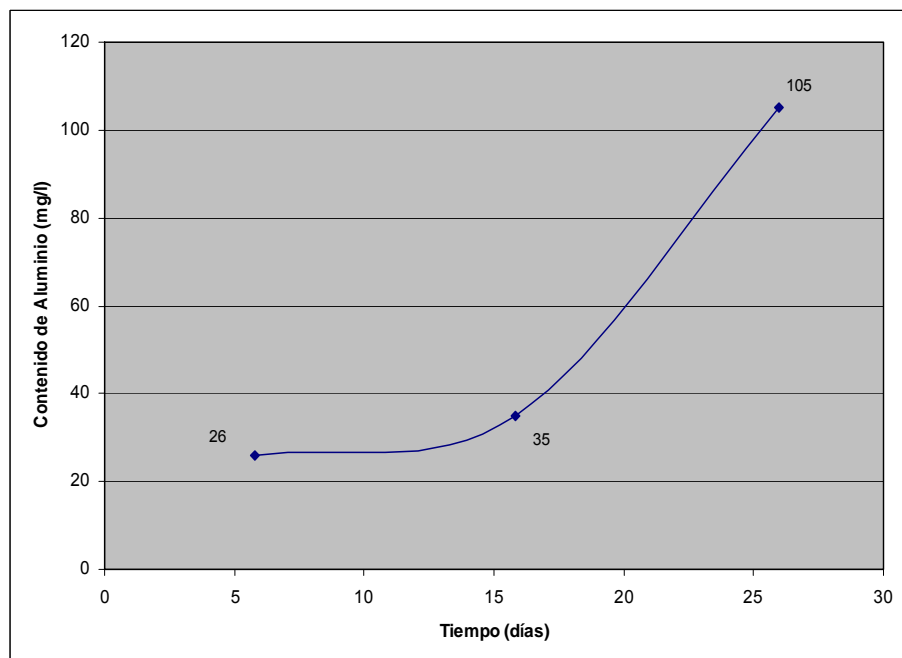
Fuente: Autor.

Gráfica 24. Contenido de Hierro vs Tiempo.



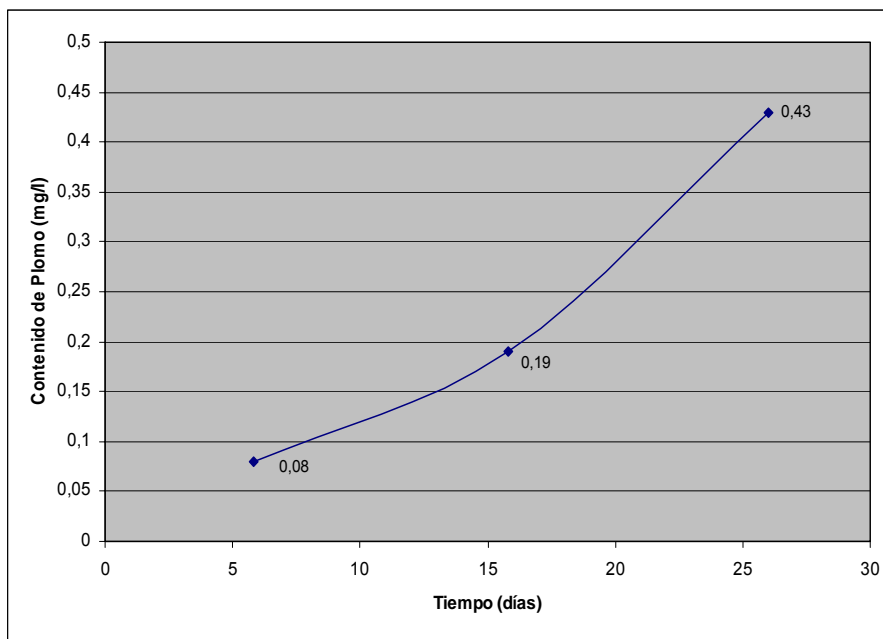
Fuente: Autor.

Gráfica 25. Contenido de Aluminio vs tiempo.



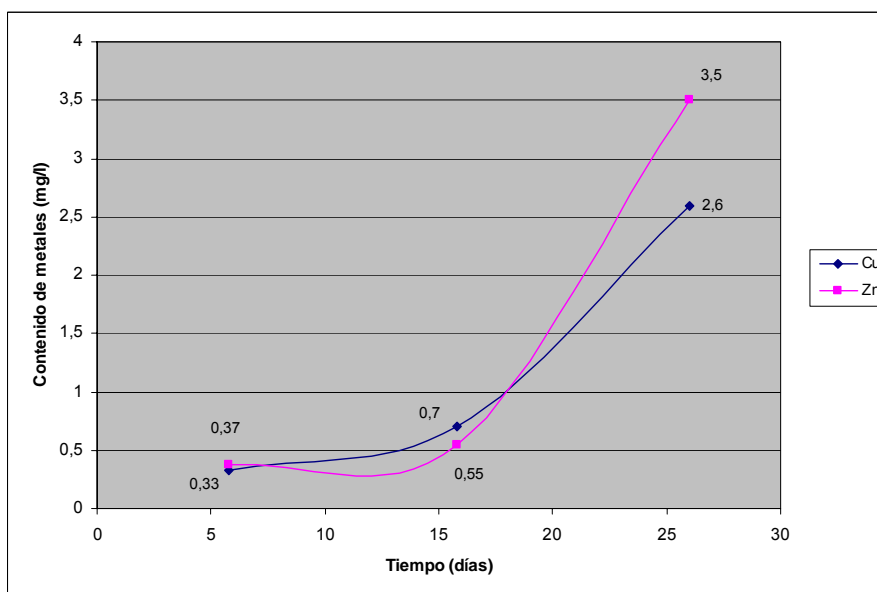
Fuente: Autor.

Gráfica 26. Contenido de Plomo vs Tiempo.



Fuente: Autor.

Gráfica 27. Contenido de Cobre y Zinc vs Tiempo.

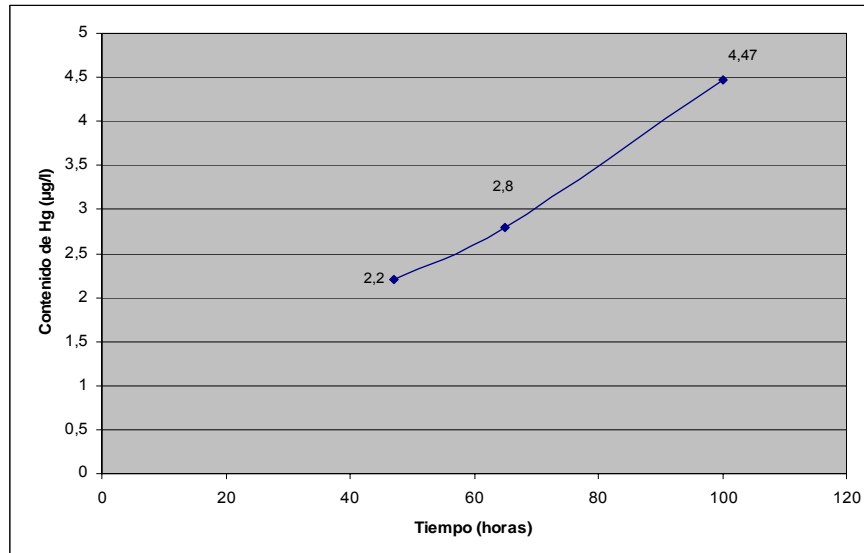


Fuente: Autor.

- **Filtro**

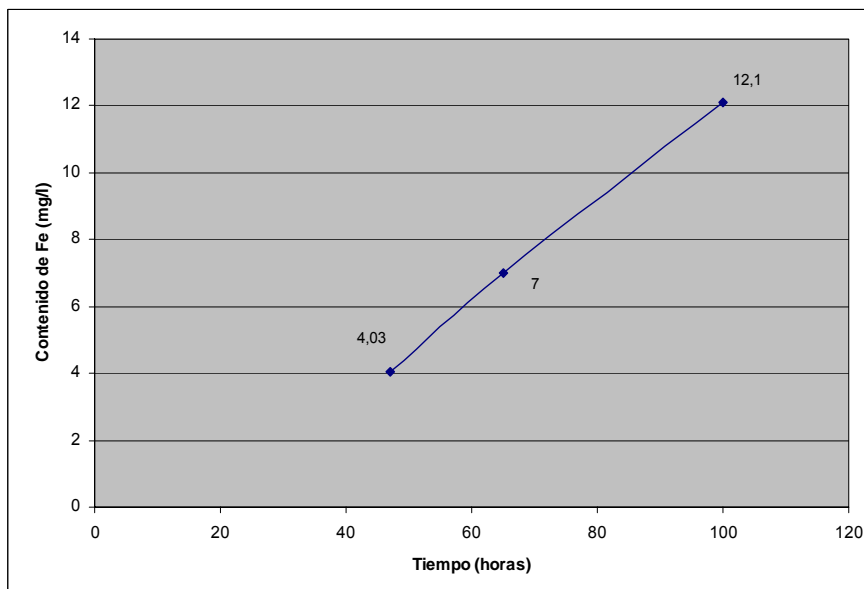
- Mercurio, hierro, aluminio, plomo, cobre y zinc.

Gráfica 28. Contenido de Mercurio vs Tiempo.



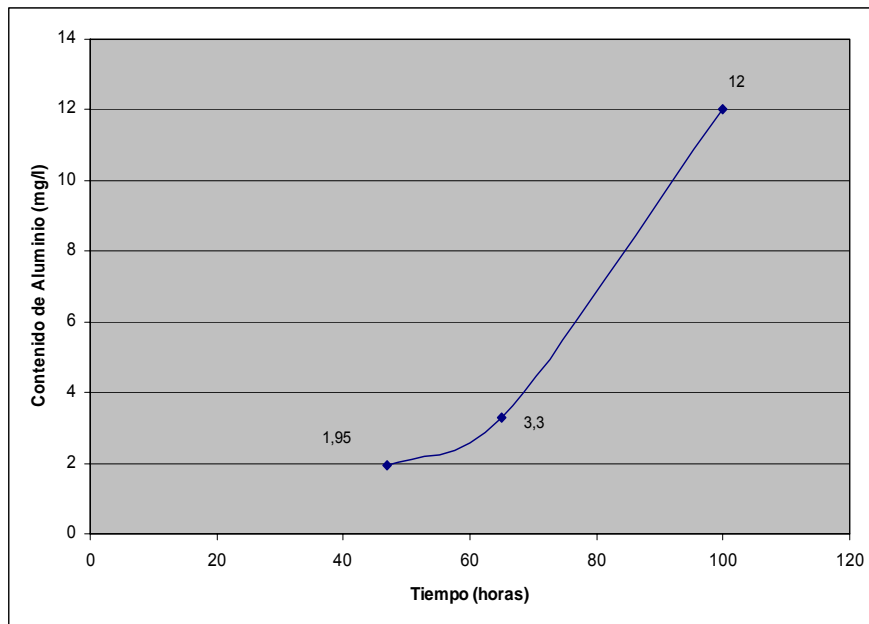
Fuente: Autor.

Gráfica 29. Contenido de Hierro vs Tiempo.



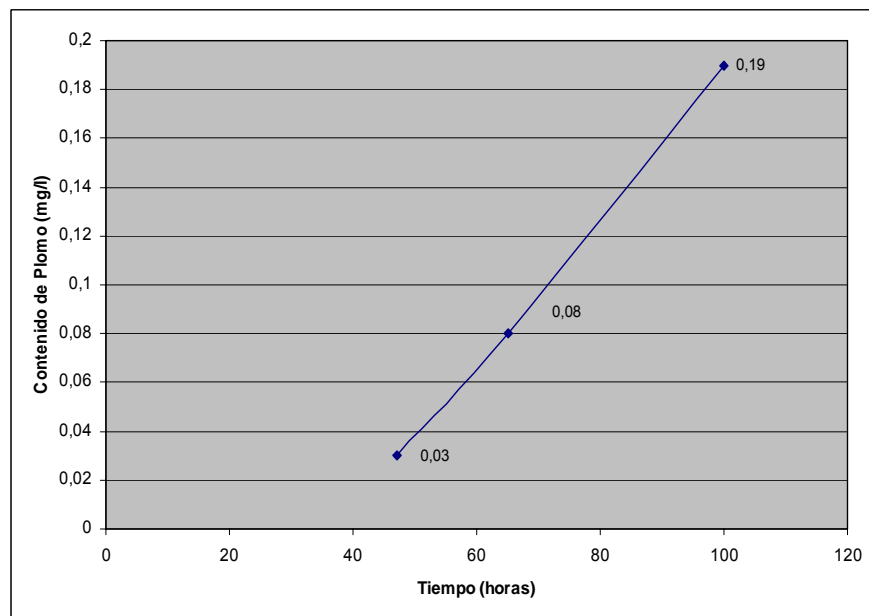
Fuente: Autor.

Gráfica 30. Contenido de Aluminio vs Tiempo.



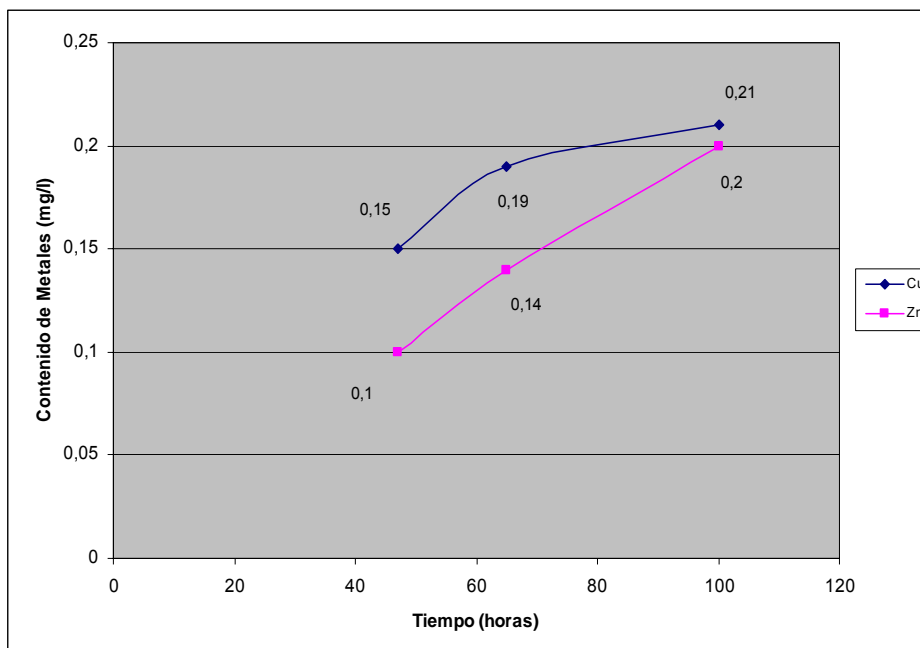
Fuente: Autor.

Gráfica 31. Contenido de Plomo vs Tiempo.



Fuente: Autor.

Gráfica 32. Contenido de Cobre y Zinc vs Tiempo.



Fuente: Autor.

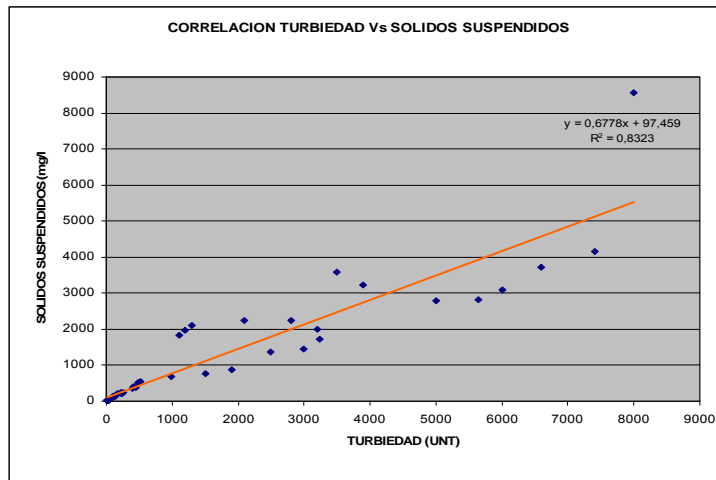
10.2 CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS PARA EL AGUA DEL RÍO SURATA

Para establecer la correlación entre Turbiedad y sólidos suspendidos, se agruparon los datos de la siguiente manera:¹

¹ AMERICAN WASTER WATER ASOCIATION. Calidad y Tratamiento del Agua. Quinta Edición. Mc Graw-Hill. 2002.

10.2.1 Valores de Turbiedades de todas las muestras.

Gráfico 33. Valores de turbiedades de las muestras.

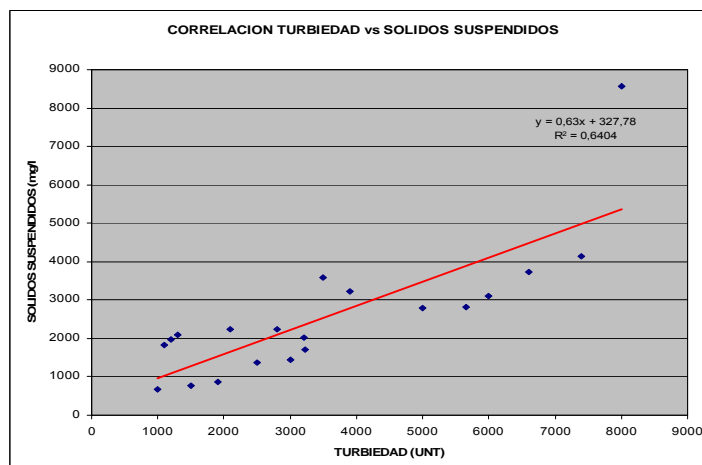


Fuente: Autor.

Se observa que no existe un buen factor de correlación ya que la proporcionalidad entre la turbiedad y los sólidos suspendidos no es directa.

10.2.2 Turbiedades de 990 a 8000

Gráfico 34. Turbiedades de 990 a 8000.

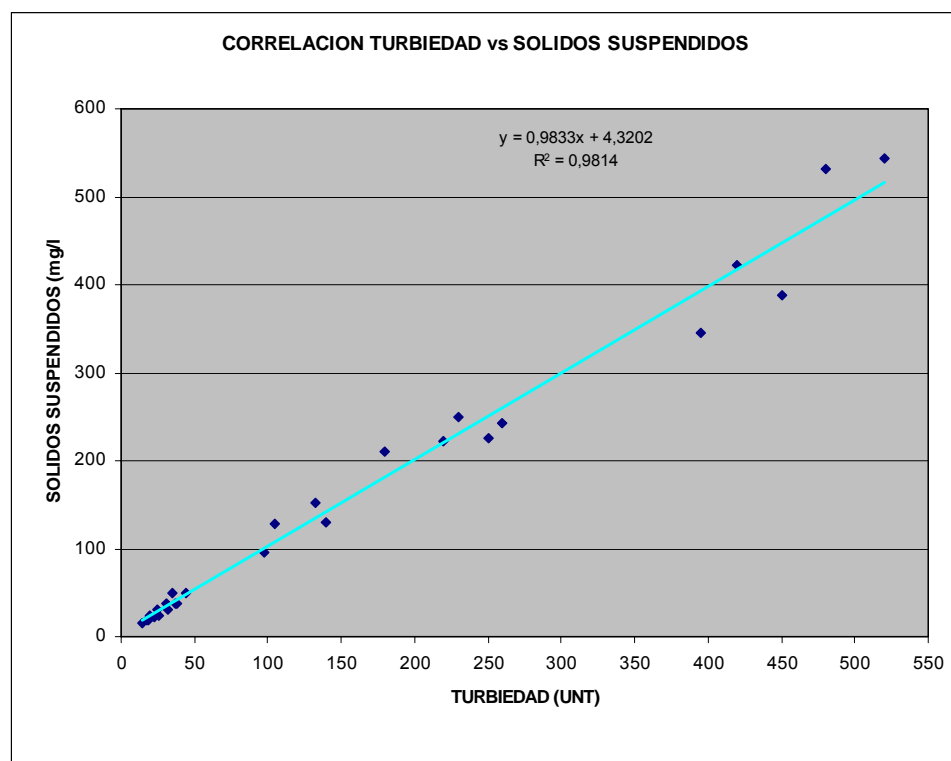


Fuente: Autor.

El factor de correlación fue inferior al valor hallado en el análisis de la anterior gráfica puesto que no se tomaron en cuenta los valores de turbiedad menores a 990. Tampoco se dio una proporcionalidad directa entre la Turbiedad y los sólidos suspendidos.

10.2.3 Turbiedades menores a 520

Gráfico 35. Turbiedades menores a 520.

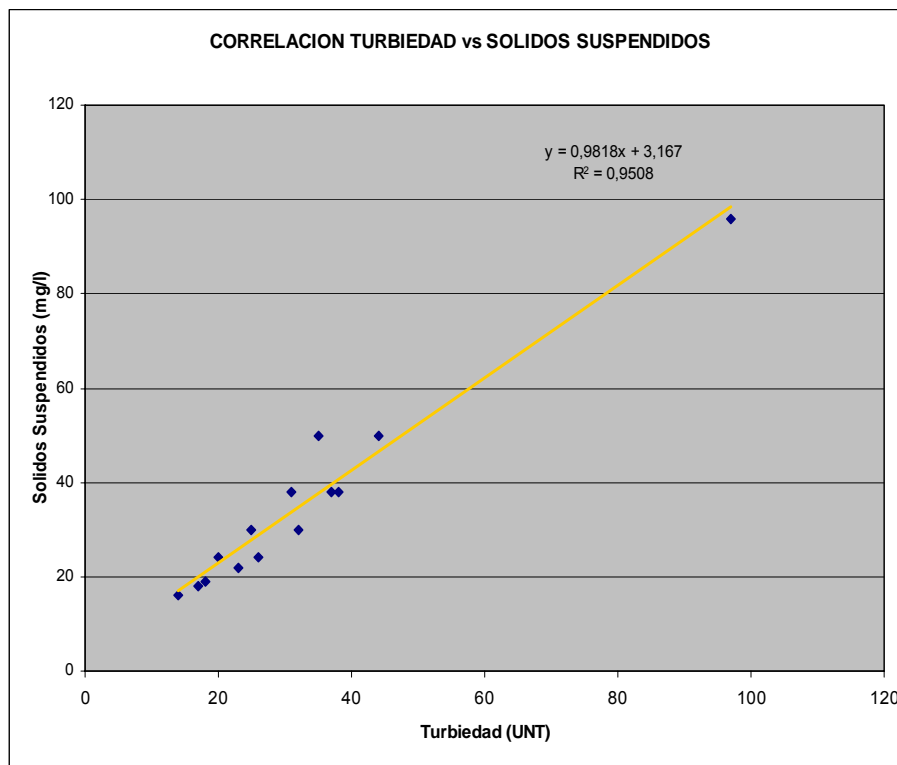


Fuente: Autor.

En este caso mejora el factor de correlación debido a que hay una proporcionalidad directa entre los valores de turbiedad y sólidos suspendidos.

10.2.4 Turbiedades menores a 100

Gráfico 36. Turbiedades menores a 100.



Fuente: Autor.

Aunque en esta gráfica el factor de correlación es un poco menor que el anterior, la proporcionalidad es mejor debido a que los valores son inferiores y por lo tanto las diferencias son igualmente menores.

Para turbiedades mayores que 100 UNT la relación de proporcionalidad entre la turbiedad y los sólidos suspendidos no es directa, debido a que el Río Suratá tiene varios afluentes (río Tona, río Vetás y río Charta) los cuales proporcionan diferentes sedimentos (partículas en suspensión) principalmente en periodos de invierno, por lo tanto esto se ve reflejado en la prueba de sólidos suspendidos; además se necesita mayor cantidad de muestras para obtener mejores resultados.

Sin embargo en un 70% del año las turbiedades del río son inferiores a 100, periodo en los cuales e podría aplicar la anterior correlación.

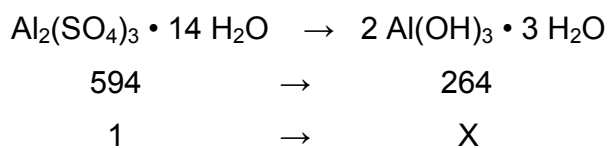
10.3 CALCULO TEÓRICO DE LA CANTIDAD APROXIMADA DE LODOS GENERADOS.

La cantidad de lodos generados puede calcularse fácilmente en el proceso de coagulación. Cuando el sulfato de aluminio se añade al agua la reacción con respecto a la producción de lodos esta típicamente representada por la siguiente ecuación simplificada.¹



El peso molecular del sulfato de aluminio es de 594 g/mol-g y del hidróxido de aluminio es de 264 g/mol-g.

Un miligramo por litro de sulfato de aluminio añadido al agua producirá aproximadamente 0.44 mg/l de sólidos aluminicos inorgánicos, como se indica en la siguiente relación:



Donde:

$$X = 264/594 = 0.44 \text{ mg/l}$$

¹ AMERICAN WASTER WATER ASOCIATION. Calidad y Tratamiento del Agua. Quinta Edición. Mc Graw-Hill. 2002.

Los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda producen un peso equivalente de lodos sólidos por no ser reactivos.

La cantidad de lodos producidos en una planta de potabilización utilizando el sulfato de aluminio como coagulante es¹:

$$S = 8.34 Q (0.44 * Al + SS + A)$$

Donde:

S = lodo producido (libras/día)

Q = caudal de la planta (millones de galones por día)

Al = dosis de sulfato de aluminio (mg/l)

SS = sólidos suspendidos (mg/l)

A = otros aditivos (polímero, carbón activado o arcilla) (mg/l)

Tomando los promedios diarios para los caudales, dosis de sulfato de aluminio, y sólidos suspendidos y promediando los valores anteriores durante el tiempo de estudio tenemos:

Q = 19.85 millones de galones por día

Al = 23.82 mg/l

SS = 32,5 mg/l

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$S = 8.34 Q (0.44 * Al + SS)$$

$$S = 8.34 * 19.85 *(0.44 * 23.82+ 32.5)$$

S = 7115.42 libras/día de lodos (aproximadamente)

S = 3.23 ton/día de lodos

En 39 días de estudio:

$$S = 3.23 * 26$$

$$S = 83.99 \text{ ton aproximadamente.}$$

CONCLUSIONES

- La acumulación de lodos aumenta los niveles de turbiedad, sólidos, DQO, DBO₅, microorganismos y los metales analizados.
- Los parámetros estudiados fueron mayores en los vertimientos de los sedimentadores que en los vertimientos de los filtros.
- El análisis de color a los lodos no fue representativo tanto para el lavado de filtros como para las purgas de los sedimentadores.
- Los valores de pH, temperatura, mercurio, cobre y plomo se encuentran dentro de los parámetros permitidos según la legislación.
- Los parámetros que durante el estudio realizado en la Planta de Bosconia no cumplen con los valores estipulados dentro de la legislación fueron los sólidos suspendidos y la DBO₅.
- Se obtuvo una relación directamente proporcional entre la turbiedad y sólidos suspendidos para valores de turbiedades menores a 100 UNT.
- Para valores de turbiedades mayores a 100 UNT no se logró una relación directamente proporcional entre la turbiedad y los sólidos suspendidos.

RECOMENDACIONES

- Instalar medidores de turbiedad a la salida de cada filtro ya que el retrolavado se esta llevando a cabo por turbiedad del agua filtrada de una sola galería de filtros o por nivel de agua.
- Establecer un cronograma para revisión de los filtros (expansión del lecho filtrante y formación de bolas de barro).
- Definir un plan para las purgas de los sedimentadores, con el fin de evitar la acumulación y acceso de lodos hacia los filtros.
- Mantener en óptimas condiciones las compuertas y la instrumentación neumática para que garantice la operación de lavado de filtros y purga de sedimentadores en cualquier momento.
- Cuando por circunstancias del tratamiento se necesite aumentar el caudal (> 1000 l/s) se haga de forma gradual para evitar el arrastre de sedimentos hacia los filtros debido a la turbulencia generada.
- Hacer análisis de Mercurio a la salida de los sedimentadores como indicador en la purga de estos, para evitar que pase residual de mercurio a los filtros.
- Realizar un estudio técnico / económico para la viabilidad, diseño e instalación de un sistema de tratamiento y disposición final de los lodos generados en la planta de Bosconia.
- Hacer la caracterización de lodos durante un periodo mas largo de tiempo.

- Hacer análisis de metales pesados al sulfato de aluminio con el fin de cuantificar su aporte a los lodos.
- Establecer una correlación entre la Turbiedad y los sólidos suspendidos para valores de turbiedades del agua cruda mayores que 100 UNT.

BIBLIOGRAFÍA

American Waster water Asociation. Calidad y tratamiento del agua. Quinta Edición. Mc Graw-Hill. 2002.

APPA, AWWA, WPCF. Standards methods of the examination of water and wastewater. Edición 19.

ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Mc Graw Hill Tomo 1 Bogotá, 1994.

BARRENECHE, John Jairo. Optimización de los Procesos de Clarificación del Agua Mediante el Uso de Polielectrolitos Sintéticos en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Tesis de grado.

BLACK, AP. Disposal of softening plant waste. J AWWA. 41:819. 1949.

Coagulación y Floculación de Contaminantes de Agua. Disponible en:
www.procesosvirtuales.com.

DEAN, John B. Disposal of wastes from filter plants and coagulation Basins. J AWWA. 45:11.1953.

DECRETO 1594. República de Colombia, 1984.

HANEY, Paul. Disposal from cation-exchangue. J AWWA. 41:829. 1949.

KIELY, Gerard. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión ambiental. Vol I. España. Mc Graw Hill. 2000. 177-180 p.

KIELY, Gerard. Ingeniería ambiental fundamentos entornos tecnologías y sistemas de gestión. Madrid: McGraw Hill Tomo 2. 1999.

MONTGOMERY, J.M Consulting Engineers, INC water treatment principles and design, Wiley. 1985.

NEUBAVER, W.K . Waste alum sludge treatment. J AWWA. Vol 60. Nº 7. Julio de 1968.

ROMERO, R.Jairo. Calidad del Agua. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería.

RUSSELLMANN, Heinz B. Characteristics of water treatment plant waste disposal from water and wastewater treatment processes, Urbana, febrero 1968.

www.acueductodebucaramanga.com

www.sulfoquímica.com.co/

www.pqp.com.co

www.acsmedioambiente.com/equipos/desidratador_de_lodos.htm

http://usuarios.lycos.es/drinkingwater/tratamiento_de_lodos.htm

ANEXOS

Anexo A. Datos del Sedimentador

Tiempo (días)	pH	Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
5,8	7,58	250	22	236
15,8	7,61	353	25	238
26	7,71	1130	29	243

Sólidos totales (mg/l)	S. Suspendidos (mg/l)	S. Sedimentables (ml/l)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	DBO5 (mg/lO ₂)
410	291	7	25,1	18
451	360	16	25,0	23
1080	1010	23	25,8	54

DQO (mg/l)	E. coli (NMP/100ml)	C. totales (NMP/100ml)	Aerob. mesófilos (UFC/1ml)	Hg ($\mu\text{g}/\text{l}$)
38	9	8000	1500	3,2
42	26	13000	3200	3,7
70,6	115	24000	22600	12,7

Al (mg/l)	Fe (mg/l)	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)
26	19	0,08	0,33	0,37
35	22	0,19	0,7	0,55
105	44	0,43	2,6	3,5

Anexo B. Datos del Filtro

Tiempo (horas)	pH	Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
47	7,59	104	20	219
65	7,66	178	23	227
100	7,7	295	27	230

S. totales (mg/l)	S. suspendidos (mg/l)	S. sedimentables (ml/l)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	DBO5 (mg/1O2)
323	160	6	24,8	12
428	250	13	25,5	14
475	324	18	26,1	18

DQO (mg/l)	E. coli (NMP/100ml)	C. totales (NMP/100ml)	Aerob. mesófilos (UFC/1ml)	Hg ($\mu\text{g}/\text{l}$)
36	3	150	1200	2,2
40	20	720	1900	2,8
61	93	1100	2100	4,47

Al (mg/l)	Fe (mg/l)	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)
1,95	4,03	0,03	0,15	0,1
3,3	7	0,08	0,19	0,14
12	12,1	0,19	0,21	0,2

Anexo C. Valores de turbiedad y sólidos suspendidos del Río Suratá

Fecha	Hora	Turbiedad (UNT)	S. Suspendidos (mg/l)
12/03/2005	08:00 a.m.	44	50
13/03/2005	08:00 a.m.	31	38
14/03/2005	08:00 a.m.	17	18
16/03/2005	08:00 a.m.	32	30
17/03/2005	08:00 a.m.	37	38
18/03/2005	08:00 a.m.	38	38
20/03/2005	08:00 a.m.	25	30
23/03/2005	08:00 a.m.	18	19
25/03/2005	08:00 a.m.	14	16
31/03/2005	08:00 a.m.	26	24
01/04/2005	08:00 a.m.	20	24
02/04/2005	10:00 a.m.	990	680
03/04/2005	08:00 a.m.	35	50
04/04/2005	08:00 a.m.	23	22
06/04/2005	08:00 a.m.	132	152
04/05/2005	06:00 p.m.	220	222
04/05/2005	04:00 p.m.	230	250
04/05/2005	05:00 p.m.	250	226
04/05/2005	02:00 p.m.	260	242
04/05/2005	12:00 p.m.	395	346
04/05/2005	11:00 a.m.	420	422
04/05/2005	10:00 p.m.	450	388
04/05/2005	10:00 a.m.	520	544
05/05/2005	03:00 p.m.	97	96
05/05/2005	02:00 p.m.	105	128
05/05/2005	12:00 p.m.	140	130
05/05/2005	05:00 a.m.	480	532
08/05/2005	05:00 a.m.	2500	1370
08/05/2005	04:00 a.m.	3200	2010
10/05/2005	01:00 p.m.	180	210
11/05/2005	02:00 a.m.	3230	1720
11/05/2005	01:00 a.m.	3500	3576
16/05/2005	12:00 p.m.	6600	3730
17/05/2005	09:00 p.m.	5000	2782
17/05/2005	02:00 a.m.	5650	2826
17/05/2005	01:00 a.m.	6000	3102
17/05/2005	08:00 p.m.	7400	4148
19/05/2005	08:00 a.m.	1500	764
19/05/2005	07:00 a.m.	1900	878
19/05/2005	04:00 a.m.	3000	1452
22/05/2005	11:00 p.m.	8000	8565
05/06/2005	01:00 a.m.	2100	2237
05/06/2005	02:00 a.m.	2800	2250
06/06/2005	11:00 p.m.	1200	1982
07/06/2005	12:00 a.m.	1300	2100
09/06/2005	12:00 a.m.	1100	1820
13/06/2005	10:00 p.m.	3900	3215

Anexo D. Análisis Trimestral Agua Cruda

AÑO 2005

Metales	Unidades	Mar-16	Jun-10	Sep-22
Aluminio	mg/L Al	0,05	0,00	0,03
Zinc	mg/L Zn	0,06	0,03	0,23
Cobre	mg/L Cu	0,05	ND	0,2
Plomo	mg/L Pb	ND	ND	0,07
Mercurio	ug/L Hg	1,21	0,12	1,93
Hierro Total	mg/L Fe	0,77	4,05	5