



5 RESULTADOS.

5.1 Curvas de calibración de estándares de Absorción Atómica

Una vez realizados los estándares requeridos de la manera que se indica en la sección 4.4; el equipo de absorción atómica Espectronic AA mostró los siguientes resultados después de hacer realizar las graficas pertinentes. Las cuales fueron empleadas en la primera corrida de absorción atómica.

5.1.1 Cadmio

De acuerdo a los datos de absorbancia reportados en la tabla 5.1, la curva de calibración el la reportada para cadmio se muestra en la figura 5.1.

Tabla 5-1 Curva de Calibración para Cadmio.

Concentración (ppm)	Absorbancia
0	0.0003
1	0.0863
2	0.1781
3	0.2718
4	0.3611
5	0.4348

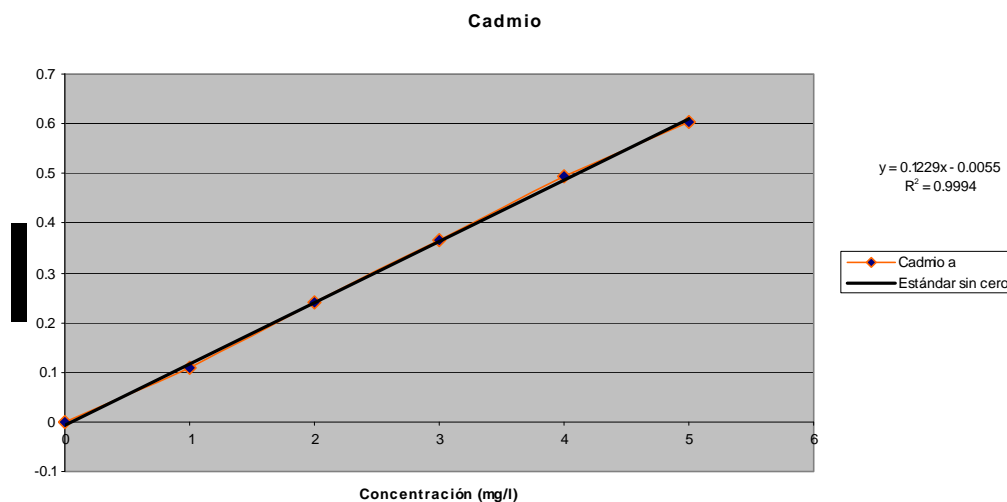


Figura 5-1 Curva de Calibración para Cadmio.



En este caso se empleo para el cálculo de las concentraciones la ecuación 5.1. Resultante del despeje de la regresión sin cero forzado de los datos reportados para cadmio en la sección 4.5; realizada en el programa Excel Microsoft Office Professional Edition 2003.

$$C = \frac{Abs + 0.0055}{0.1229}$$

Ecuación 5.1 concentración de Cadmio

Donde:

C = concentración en mg Cd/l

Abs = Absorbancia

De acuerdo al factor de correlación (R^2) resultante de los datos con un valor de 0.9994; se puede concluir que los resultados de arrojados con el por el equipo de absorción atómica con este estándar son confiables.

5.1.2 Cobre

De acuerdo a los datos de absorbancia reportados en la tabla 5.2, la curva de calibración el la reportada para cadmio se muestra en la figura 5.2.

Tabla 5-2 Curva de Calibración para Cobre.

Concentración (ppm)	Absorbancia
0	0
1	0.0059
2	0.0149
3	0.0236
4	0.0318
5	0.0406

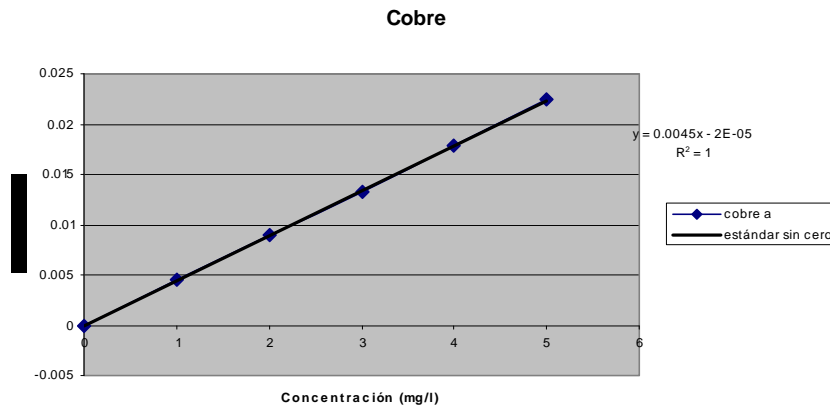


Figura 5-2 Curva de Calibración para Cobre.



En este caso se empleo para el cálculo de las concentraciones la ecuación 5.2. Resultante del despeje de la regresión sin cero forzado de los datos reportados para cadmio en la sección 4.5; realizada en el programa Excel Microsoft Office Professional Edition 2003.

$$C = \frac{Abs + 0.00002}{0.0045}$$

Ecuación 5.2 concentración de Cobre

Donde:

C = concentración en mg/l

Abs = Absorbancia

De acuerdo al factor de correlación (R^2) resultante de los datos con un valor de 1; se puede concluir que los resultados de arrojados con el por el equipo de absorción atómica con este estándar son confiables.

5.1.3 Plomo

De acuerdo a los datos de absorbancia reportados en la tabla 5.3, la curva de calibración el la reportada para cadmio se muestra en la figura 5.3.

Tabla 5-3 Curva de Calibración para Plomo.

Concentración (ppm)	Absorbancia
0	0
1	0.0045
2	0.0089
3	0.0133
4	0.0179
5	0.0224

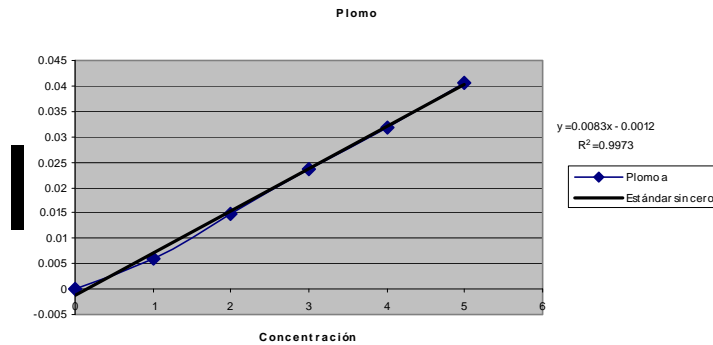


Figura 5-3 Curva de Calibración para Plomo.



En este caso se empleo para el cálculo de las concentraciones la ecuación 5.3. Resultante del despeje de la regresión sin cero forzado de los datos reportados para cadmio en la sección 4.5; realizada en el programa Excel Microsoft Office Professional Edition 2003.

$$C = \frac{Abs + 0.0012}{0.0083}$$

Ecuación 5.3 Concentración de Plomo

Donde:

C = concentración en mg/l

Abs = Absorbancia

De acuerdo al factor de correlación (R^2) resultante de los datos con un valor de .9973; se puede concluir que los resultados de arrojados con el por el equipo de absorción atómica con este estándar son confiables.

5.2 Coagulación y floculación

De acuerdo a la técnica descrita en la sección 4.6, 4.6.1, 4.6.2, 4.6.3 se realizo la determinación del pH óptimo así como la concentración optima de coagulante requerida, con el objetivo de que exista la presencia de los fenómenos de coagulación y floculación en las muestras tratadas y lograr una mayor remoción.

5.2.1 pH Óptimo

Tras haber realizado el experimento con la metodología expuesta en la sección 4.6.1 se determino que para el agua residual tratada con concertación inicial de 16.27 ppm presente los fenómenos de coagulación y floculación de manera óptima el pH debe estar en 4.6. Del mismo modo se determino que para el agua residual tratada con concertación inicial de 51 ppm presente los fenómenos de coagulación y floculación de manera óptima el pH debe estar en 3.48. Esto se determino conforme a los resultados obtenidos con la escala descrita en la sección 4.6. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos

Tabla 5-4 Condiciones Iniciales para Cadmio para Primera Concentración.



RESULTADOS.

Muestra	Concentración inicial	pH inicial	dosis de sulfato de aluminio
Cadmio	16.27	3.31	150 ppm

Tabla 5-5 Resultados de la Primera Concentración.

Sol de NaOH 8N (microlitros)	pH	turbidez				color			Coagulación				Floculación			
		alta	media	baja	cristalino	sin cambio	cambio bajo %	cambio alto %	no	si			no	si		
										bajo	medio	alto		bajo	medio	alto
0	3.31			x		x			x				x			
10	4			x			x			x				x		
11	4.6				x		x					x				x
12	10.73				x		x					x				x



Figura 5-4 Apariencia Inicial de la Primera Concentración de Cadmio.



RESULTADOS.



Figura 5-5 Apariencia con 10 Microlitros de NaOH 8N de la Primera Concentración de Cadmio.



Figura 5-6 Apariencia con 11 Microlitros de NaOH 8N de la Primera Concentración de Cadmio.



Figura 5-7 Apariencia con 12 Microlitros de NaOH 8N de la Primera Concentración de Cadmio.

Tabla 5-6 Condiciones Iniciales para Cadmio para Segunda Concentración.

Muestra	Concentración inicial	pH inicial	dosis de sulfato de aluminio
Cadmio	51	3.03	100 ppm

Tabla 5-7 Resultados de la Segunda Concentración.

Sol de NaOH saturada agregada (microlitros)	pH	Turbidez				Color			Coagulación				Floculación			
		alta	media	baja	cristalino	sin cambio	cambio bajo %	cambio alto %	no	si			no	si		
										bajo	medio	alto		bajo	medio	alto
0	3.03		x				x				x				x	
10	3.29			x			x				x				x	
20	3.33			x			x				x				x	
30	3.43			x				x				x				x
40	3.48				x			x				x				x
50	3.6				x			x				x				x
60	3.84				x			x				x				x
70	5.55				x			x				x				x
80	13.5				x			x				x				x

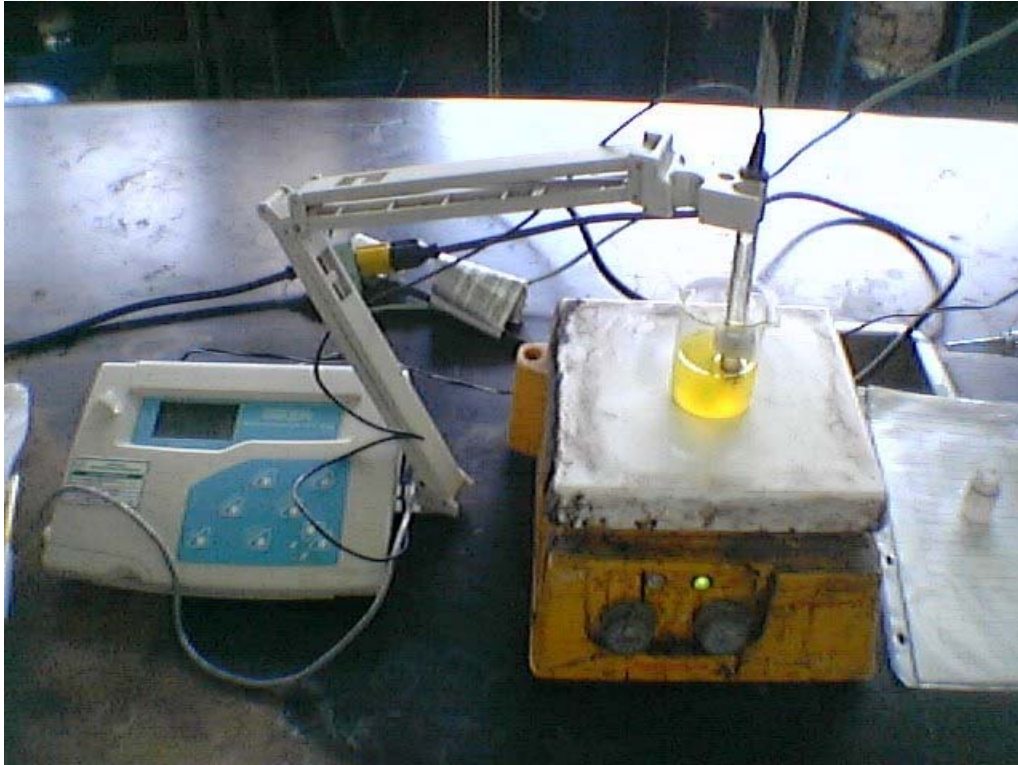


Figura 5-8 Apariencia inicial de la Segunda Concentración de Cadmio.



Figura 5-9 Apariencia con 10 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.



Figura 5-10 Apariencia con 20 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.

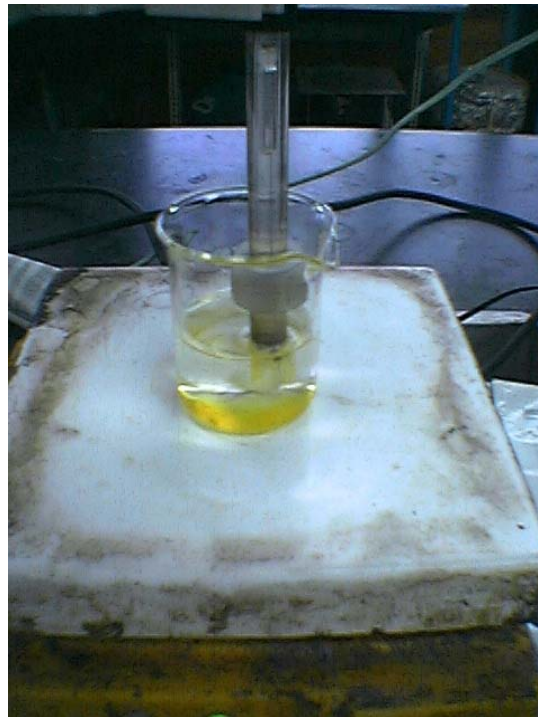


Figura 5-11 Apariencia con 30 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.



RESULTADOS.

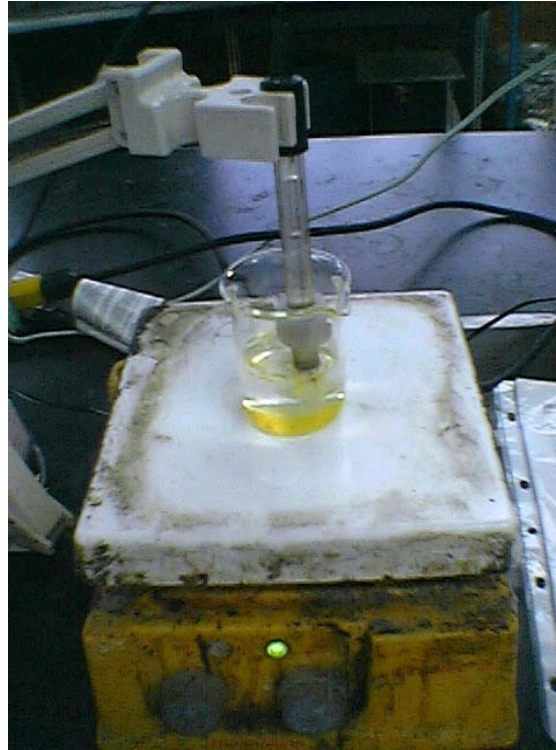


Figura 5-12 Apariencia con 40 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.



Figura 5-13 Apariencia con 50 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.



RESULTADOS.

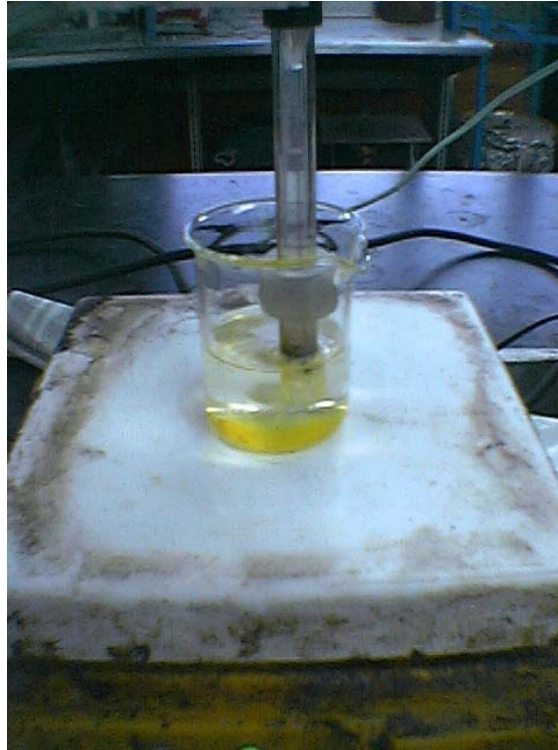


Figura 5-14 Apariencia con 60 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.

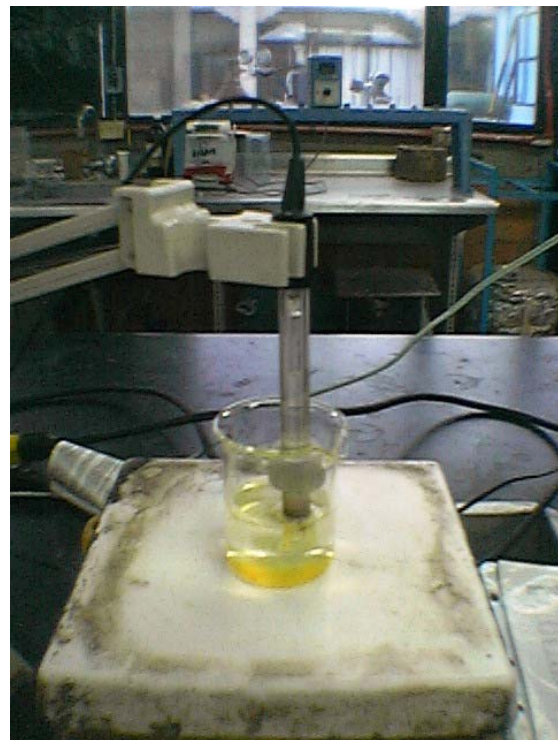


Figura 5-15 Apariencia con 70 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.

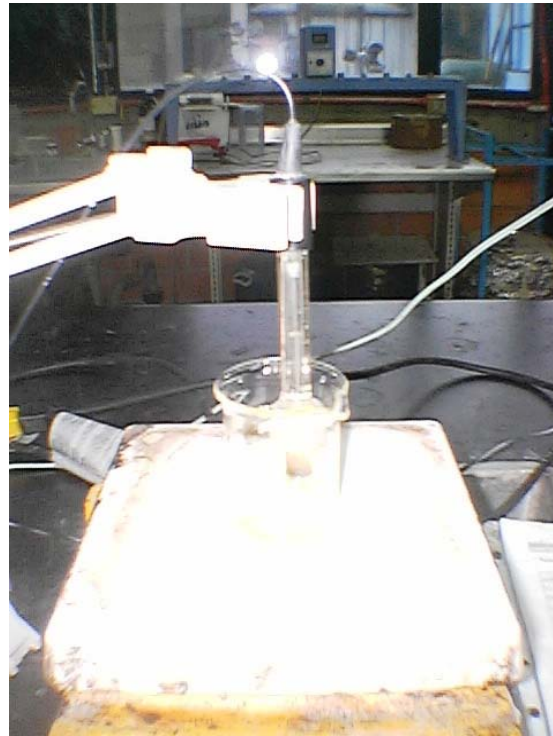


Figura 5-16 Apariencia con 80 Microlitros de NaOH Saturada de la Segunda Concentración de Cadmio.

5.2.2 Concentración de sulfato de aluminio optima

Tras haber realizado el experimento con la metodología expuesta en la sección 4.6.2 se determino que para el agua residual tratada con concertación inicial de 16.27 ppm presente los fenómenos de coagulación y floculación de manera óptima se debe tener una concentración de de 150 ppm de sulfato de aluminio a pH optimo. Del mismo modo se determino que para el agua residual tratada con concertación inicial de 51 ppm presente los fenómenos de coagulación y floculación de manera óptima se debe tener una concentración de de 100 ppm de sulfato de aluminio a pH optimo. Esto se determino conforme a los resultados obtenidos con la escala descrita en la sección 4.6. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 5-8 Condiciones Iniciales para Cadmio Para la Primera Concentración a pH Optimo.

Muestra	Concentración inicial	pH optimo
Cadmio	16.27	4.6



RESULTADOS.

Tabla 5-9 Resultados de la Primera Concentración a pH óptimo.

Solución de sulfato de aluminio al 5% agregada (microlitros)	Turbidez				Color			Coagulación			Floculación				
	alta	media	baja	cristalino	sin cambio	cambio bajo %	cambio alto %	no	si			no	si		
									bajo	medio	alto		bajo	medio	alto
0		x			x			x				x			
50			x			x				x				x	
100			x				x				x				x
150				X			x				x				x
200				X			x				x				x
250				X			x				x				x
300				X			x				x				x

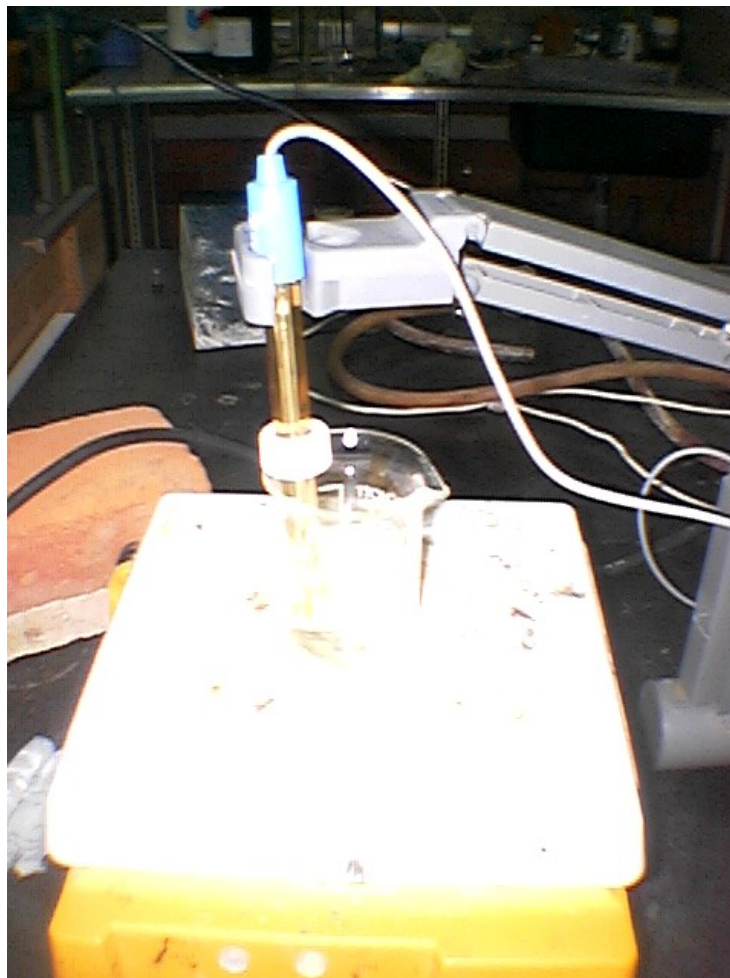


Figura 5-17 Apariencia con 50 ppm de Coagulante de la Primera Concentración de Cadmio a pH Óptimo.



RESULTADOS.



Figura 5-18 Apariencia con 100 ppm de Coagulante de la Primera Concentración de Cadmio a pH Óptimo.



Figura 5-19 Apariencia con 150 ppm de Coagulante de la Primera Concentración de Cadmio a pH Óptimo.



RESULTADOS.

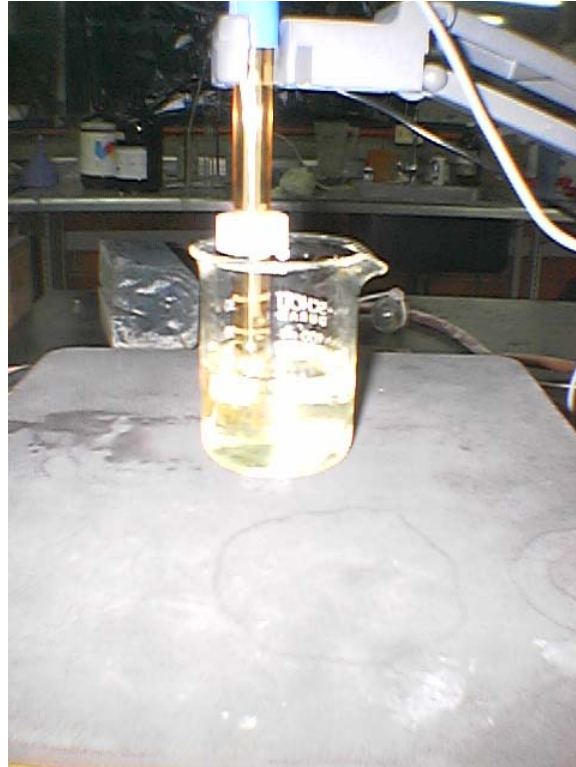


Figura 5-20 Apariencia con 200 ppm de Coagulante de la Primera Concentración de Cadmio a pH Óptimo.

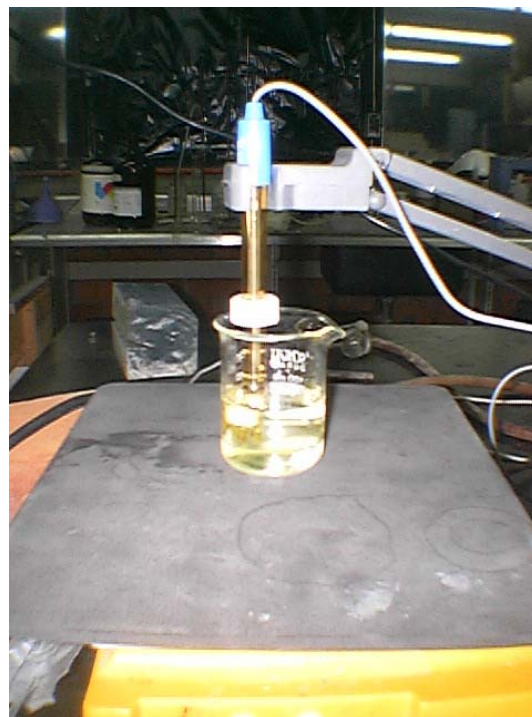


Figura 5-21 Apariencia con 250 ppm de Coagulante de la Primera Concentración de Cadmio a pH Óptimo.



RESULTADOS.



Figura 5-22 Apariencia con 300 ppm de Coagulante de la Primera Concentración de Cadmio a pH Óptimo.

Tabla 5-10 Condiciones Iniciales para Cadmio para la Segunda Concentración a pH Óptimo.

Muestra	Concentración inicial	pH optimo
Cadmio	51	3.48

Tabla 5-11 Resultados de la Segunda Concentración a pH Óptimo.

Solución de sulfato de aluminio al 5% agregada (microlitros)	Turbidez				Color			Coagulación			Floculación				
	alta	Media	baja	cristalino	sin cambio	cambio bajo %	cambio alto %	no	si			no	si		
									bajo	medio	alto		bajo	medio	alto
0	X				x			x				x			
50		x				x			x				x		
100				X			x				x				x
150				X			x				x				x
200				X			x				x				x
250				X			x				x				x
300				X			x				x				x

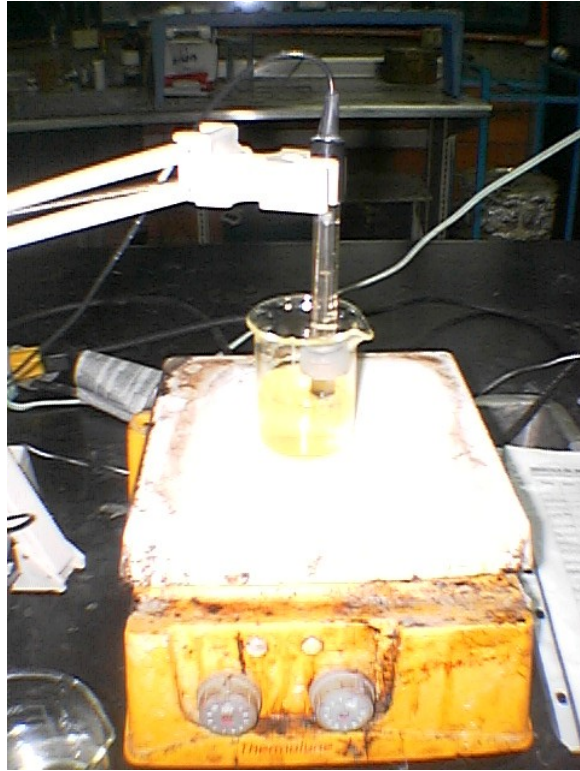


Figura 5-23 Apariencia con 50 ppm de Coagulante de la Segunda Concentración de Cadmio a pH Óptimo.

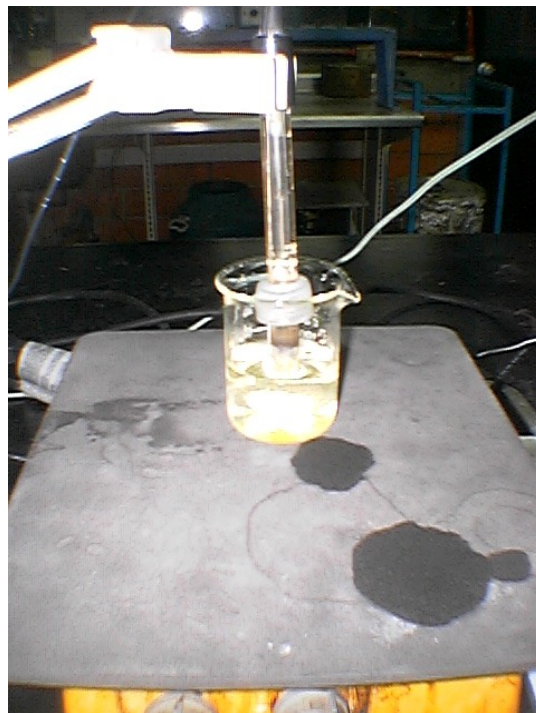


Figura 5-24 Apariencia con 100 ppm de Coagulante de la Segunda Concentración de Cadmio a pH Óptimo.



RESULTADOS.

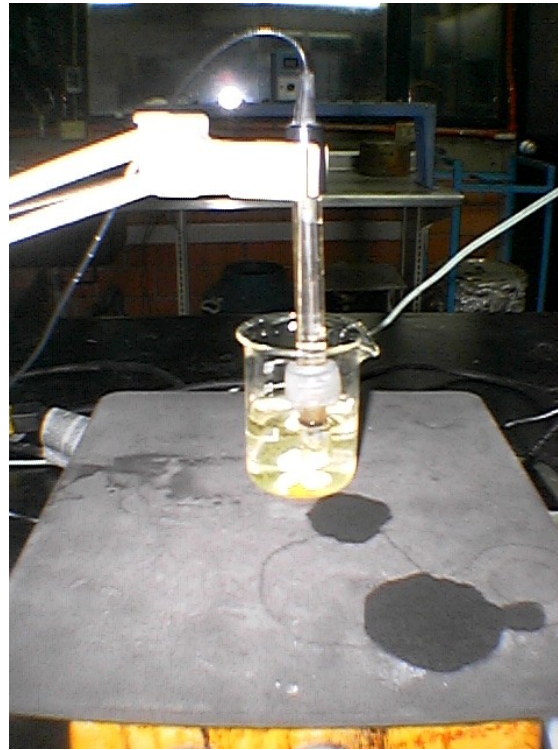


Figura 5-25 Apariencia con 150 ppm de Coagulante de la Segunda Concentración de Cadmio a pH Óptimo.

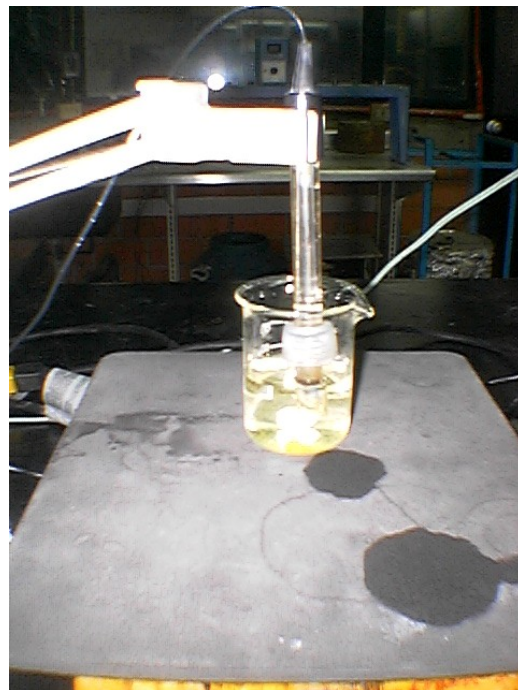


Figura 5-26 Apariencia con 200 ppm de Coagulante de la Segunda Concentración de Cadmio a pH Óptimo.



RESULTADOS.

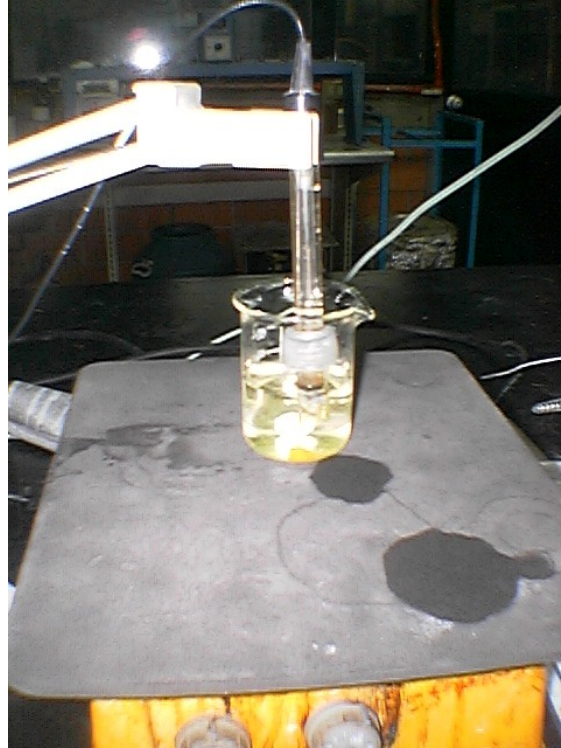


Figura 5-27 Apariencia con 250 ppm de Coagulante de la Segunda Concentración de Cadmio a pH Óptimo.

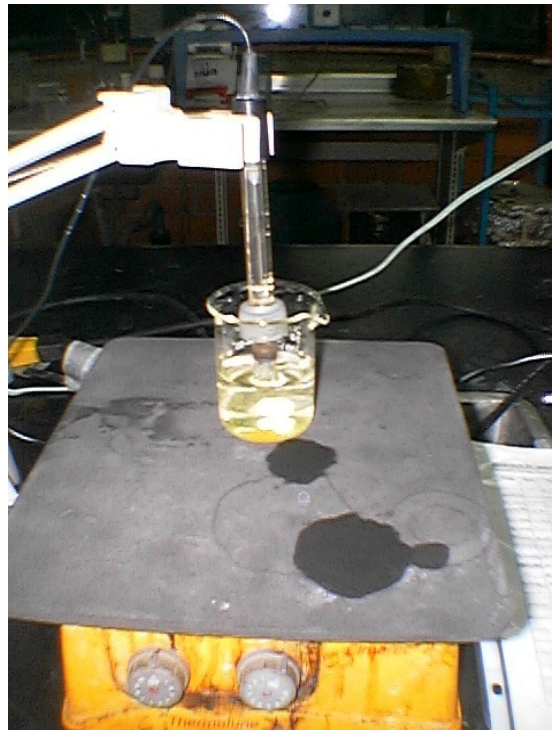


Figura 5-28 Apariencia con 300 ppm de Coagulante de la Segunda Concentración de Cadmio a pH Óptimo.



5.2.3 pH Óptimo y concentración óptima de sulfato de aluminio

De acuerdo a los resultados obtenidos en las secciones 5.2.1 y 5.2.2 y a la metodología propuesta en la sección 4.6, se comprobaron los resultados con aguas residuales tratadas de cobre con concentración de 38.216 y 170.804 para la comprobación de resultados. Del mismo modo se prepararon soluciones de cadmio a pH y concentración de agua residual tratada de cadmio de concentración de 16.738 y 49.815 reportadas por el equipo de absorción atómica. De acuerdo a la escala propuesta en la sección 4.6; los resultados obtenidos al ajustar la concentración y el pH a los valores obtenidos para cadmio demostraron funcionar de manera correcta en las aguas residuales tratadas en cobre. A continuación se muestra un resumen de los resultados

Tabla 5-12 Resultados para la Primera Concentración a Condiciones Óptimas de Cobre.

Solución de sulfato de aluminio al 5% agregada (microlitros)	pH ajustado	Turbidez				Color			Coagulación			Floculación				
		alta	media	baja	cristalino	sin cambio	cambio bajo %	cambio alto %	no	si		no	si			
										bajo	medio		alto	bajo	medio	alto
150	4.1				x			x				x				x



Figura 5-29 Apariencia de la Primera Concentración de Cobre a Condiciones Óptimas.
Tabla 5-13 Resultados para la Segunda Concentración a Condiciones Óptimas de Cobre.



RESULTADOS.

Solución de sulfato de aluminio al 5% agregada (microlitros)	pH ajustado	Turbidez				Color			Coagulación				Floculación				
		alta	media	baja	cristalino	sin cambio	cambio bajo %	cambio alto %	no	si			no	si			
										bajo	medio	alto		bajo	medio	alto	
100	3.4				x			x				x					x

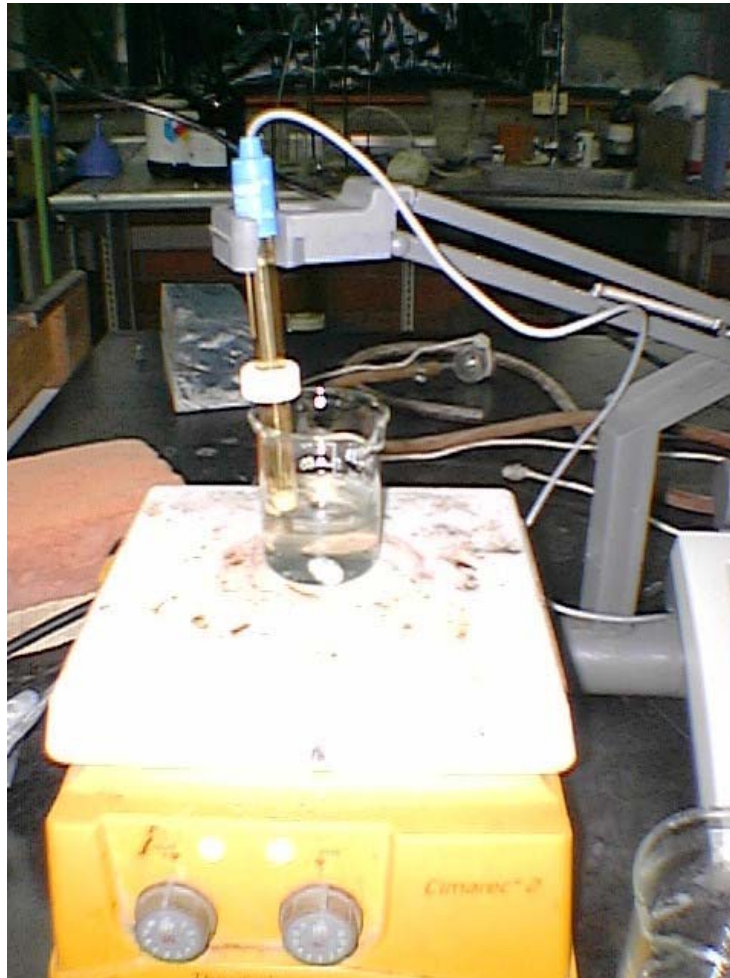


Figura 5-30 Apariencia de la Segunda Concentración de Cobre a Condiciones Óptimas.

Como se puede observar, la técnica de coagulación floculación implementada durante este trabajo, resulta de gran ayuda debido a que se logra reducir de manera importante la turbidez y el color presentes en agua residual; dando así un mejor tratamiento. A continuación se presenta un resumen de resultados



Tabla 5-14 Resumen de Resultados de pH y Dosis de Coagulante Óptimas.

	pH óptimo	Dosis óptima de sulfato de aluminio
Primera concentración	3.43	150 ppm
Segunda concentración	3.48	100 ppm

5.3 Segunda calibración de estándares de absorción atómica

Se realizó una nueva calibración del equipo de absorción atómica para registrar las concentraciones obtenidas después del tratamiento de coagulación floculación descrito en la sección 4.6. A continuación se presentan las curvas de calibración del equipo de absorción atómica para cadmio y cobre.

5.3.1 Cadmio

La nueva curva de calibración fue alimentada con los mismos estándares preparados de acuerdo a la técnica descrita en la sección 4.4. A continuación se presentan los resultados obtenidos por el equipo de absorción atómica.

Tabla 5-15 Segunda Curva de Calibración para Cadmio.

Concentración (ppm)	Absorbancia
0	0.0003
1	0.0863
2	0.1781
3	0.2718
4	0.3611
5	0.4348

Con los nuevos datos obtenidos se graficó la nueva curva de calibración presentada a continuación en la figura 5.29.

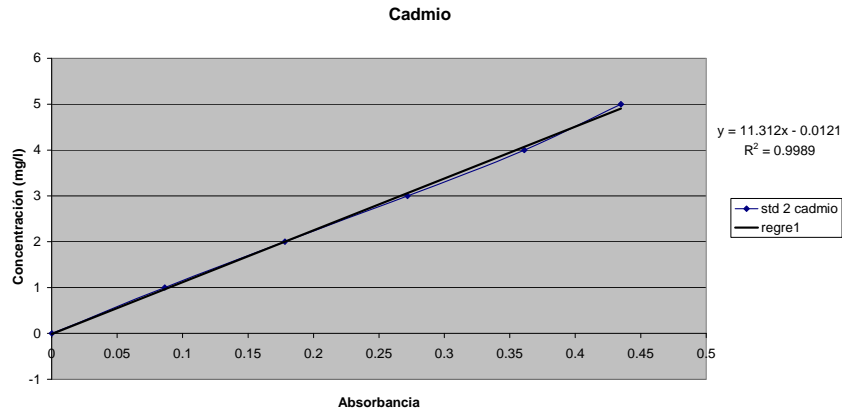


Figura 5-31 Segunda Curva de Calibración para Cadmio.

En este caso se empleo para el cálculo de las concentraciones la ecuación 5.4. Resultante de la regresión sin cero forzado de los datos reportados para cadmio en esta sección; realizada en el programa Excel Microsoft Office Professional Edition 2003.

$$C = 11.321 * Abs - 0.0121$$

Ecuación 5.4 concentración de Cadmio

Donde:

C = concentración en mg Cd/l

Abs = Absorbancia

De acuerdo a la R^2 resultante de los datos con un valor de .9989; se puede concluir que los resultados de arrojados con el por el equipo de absorción atómica con este estándar son confiables.

5.3.2 Cobre

La nueva curva de calibración fue alimentada con los mismos estándares preparados de acuerdo a la técnica descrita en la sección 4.4. A continuación se presentan los resultados obtenidos por el equipo de absorción atómica.



Tabla 5-16 Segunda Curva de Calibración para Cobre.

Concentración (ppm)	Absorbancia
0	0.0003
1	0.0035
2	0.0085
3	0.0136
4	0.0179
5	0.0226

Con los nuevos datos obtenidos se graficó la nueva curva de calibración presentada a continuación en la figura 5.30.

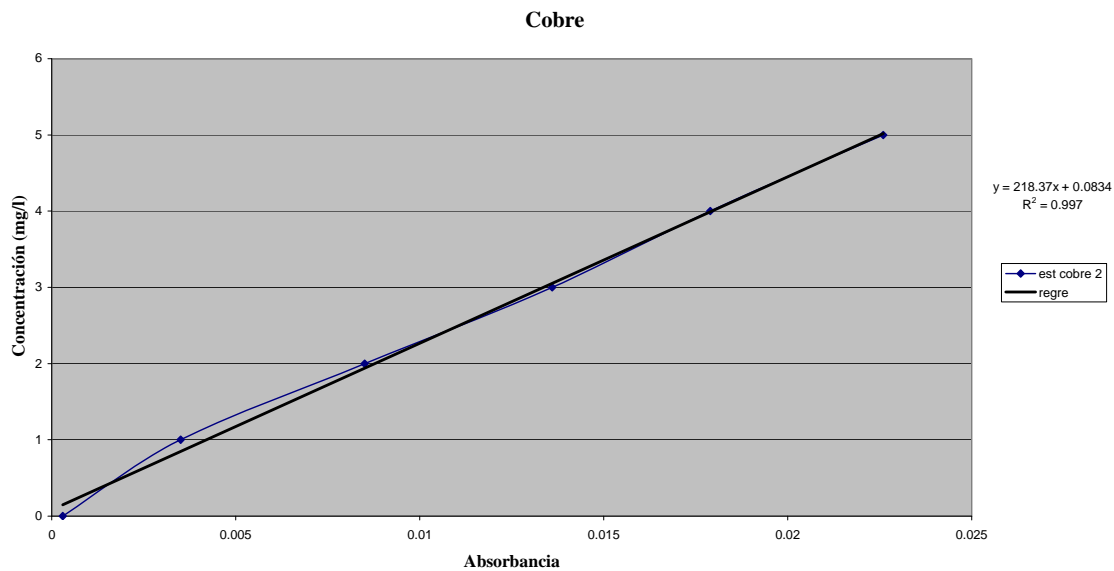


Figura 5-32 Segunda Curva de Calibración para Cobre.

En este caso se empleo para el cálculo de las concentraciones la ecuación 5.5. Resultante de la regresión sin cero forzado de los datos reportados para cobre en esta sección; realizada en el programa Excel Microsoft Office Professional Edition 2003.

$$C = 218.37 * Abs - 0.0834$$

Ecuación 5.5 concentración de Cobre



Donde:

C = concentración en mg Cu/l

Abs = Absorbancia

De acuerdo a la R² resultante de los datos con un valor de .997; se puede concluir que los resultados de arrojados con el por el equipo de absorción atómica con este estándar son confiables.

5.4 Concentraciones resultantes finales

Tras haber realizado la remoción de metales en agua residual mediante insolubilización por sulfuros en una primera etapa para cadmio cobre y plomo; y tras haber realizado un proceso de coagulación floculación en una segunda etapa para las concentraciones intermedias y altas de cadmio y cobre se obtuvieron los siguientes resultados

5.4.1 Plomo

De acuerdo al equipo de absorción atómica con las curvas de calibración resultantes de al sección 5.1 en su apartado 5.1.3 se obtuvieron las siguientes concentraciones finales después del filtrado del agua tratada.

Tabla 5-17 Resumen de Resultados del Tratamiento para Plomo.

Plomo						
Etapa 1	Concentración	Concentración inicial	corrida 1	corrida 2	corrida 3	promedio
	Baja	3.87707793	3.42000915	3.45706878	2.59234406	3.156474
	Intermedia	20.5478073	0.78877535	0.68994967	0.75171572	0.74348025
	Alta	76.0483941	0.76406893	0.70230288	0.77642214	0.74759799

Con esta información se puede determinar que el método es efectivo para remover plomo ya que en las concentraciones intermedia y alta se observa un cambio importante después del tratamiento alcanzando concentraciones similares en ambos casos Para la concentración baja, se puede atribuir el corto alcance de la técnica a que la concentración del metal se encentra en el umbral de solubilidad; este hecho disminuye la eficiencia e imposibilita rendimientos aceptables. A continuación se presenta en la figura 5.30 la tendencia del comportamiento de las concentraciones del plomo soluble durante el tratamiento.

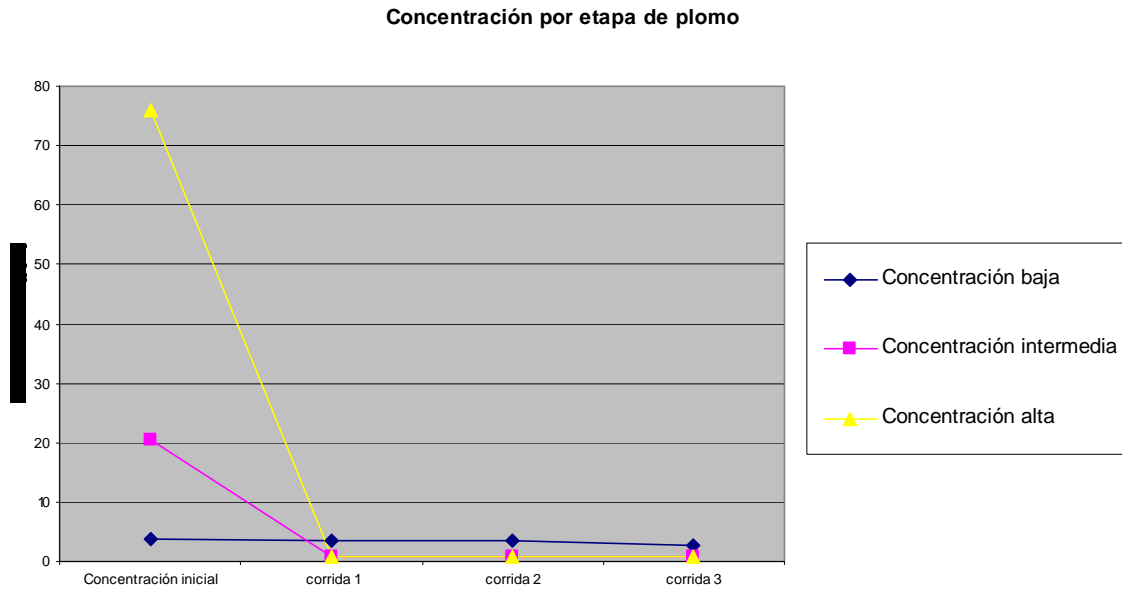


Figura 5-33 Comportamiento Durante el Tratamiento de Plomo.

En esta gráfica se puede observar que para la concentración más baja existe poca o nula remoción, mientras que en las concentraciones intermedia y alta se logra una buena remoción. Las eficiencias obtenidas durante el proceso se presentan en la tabla 5.31 obtenidas con la ecuación 5.6

$$Ef = \left(= \frac{Con_{inicial} - Con_{final}}{Con_{inicial}} \right) * 100$$

Ecuación 5.6

Donde

Ef = eficiencia %

Con_{inicial} = Concentración inicial (mg de metal/l)

Con_{final} = Concentración final (mg de metal/l)

Tabla 5-18 Resumen de Eficiencias del Tratamiento para Plomo.

Etapa	Eficiencia		
	Etapa 1	Etapa 2	Global
	18.6%	0.00%	18.6%
	96.4%	0.00%	96.4%
	99.0%	0.00%	99.0%



Con los resultados anteriores se puede concluir que el tratamiento de remoción es eficiente para concentraciones intermedias y altas con eficiencias superiores a 95% en ambas situaciones alcanzando los límites de normativa mexicana de 1 ppm para descarga en río para riego y de 10 ppm para descarga a suelo para riego de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

5.4.2 Cadmio

De acuerdo al equipo de absorción atómica con las curvas de calibración resultantes de al secciones 5.1 y 5.3 en sus apartados 5.1.1 y 5.3.1 se obtuvieron las siguientes concentraciones finales después del tratamiento con ácido sulfhídrico, coagulación floculación y del filtrado del agua tratada.

Tabla 5-19 Resumen de Resultados del Tratamiento para Cadmio.

Concentración	Cadmio		
	Concentración inicial (ppm)	Promedio de etapa 1 (ppm)	Promedio de etapa 2 (ppm)
Baja	3.3	3.3	3.3
Intermedia	16.7	11.2	0.9
Alta	49.8	10.7	12.8

Con esta información se puede determinar que el método es efectivo para remover plomo ya que en las concentraciones intermedia y alta se observa un cambio importante después del tratamiento alcanzando concentraciones similares en ambos casos. Para la concentración baja, se puede atribuir el corto alcance de la técnica a que la concentración del metal se encuentra en el umbral de solubilidad; este hecho disminuye la eficiencia e imposibilita rendimientos aceptables. A continuación se presenta en la figura 5.31 la tendencia del comportamiento de las concentraciones del cadmio soluble durante el tratamiento.

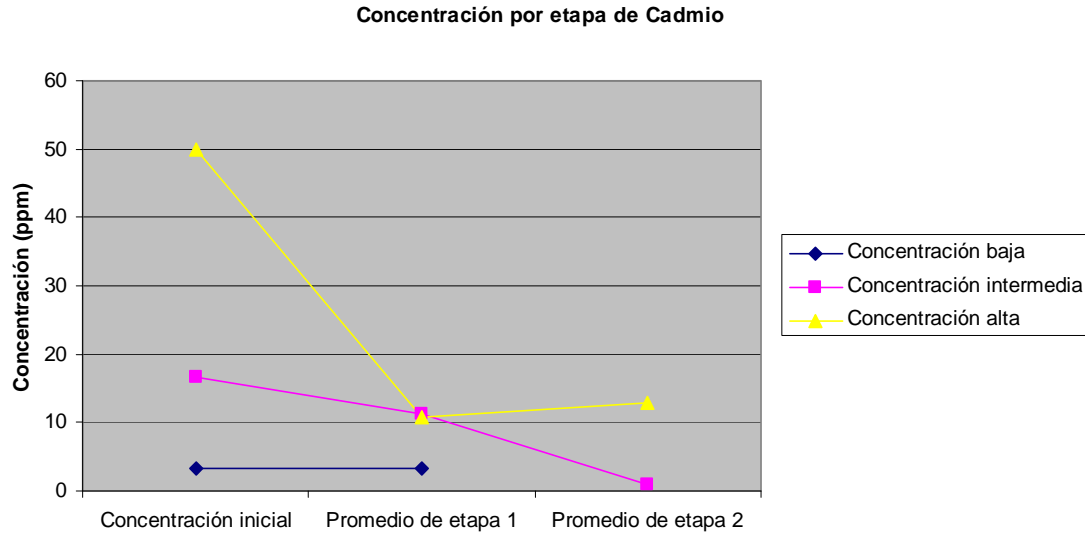


Figura 5-34 Comportamiento por Etapas Durante el Tratamiento de Cadmio.

En el comportamiento observado de este metal puede ser atribuido a dos factores. El primero de error experimental debido al hecho de no lograr alcanzar las mismas ganancias y eficiencias de la lámpara del equipo de absorción atómica en la segunda calibración y a que el sulfuro de cadmio un estado de solubilidad coloidal y a pesar de haber reaccionado se encuentra en la matriz acuosa en el momento de la detección.

En la figura 5.31 se puede observar, a pesar del comportamiento, que para las concentraciones intermedia y alta existe una remoción aceptable; mientras que para la concentración baja la remoción es nula. Las eficiencias obtenidas durante el proceso se presentan en la tabla 5.16 obtenidas con la ecuación 5.6

Tabla 5-20 Comportamiento Eficiencias del Tratamiento para Cadmio.

Eficiencia		
Etapa 1	Etapa 2	Global
0.0%	0.0%	0.0%
32.9%	91.5%	94.3%
78.5%	4.4%	74.2%

Con los resultados anteriores se puede concluir que el tratamiento de remoción es eficiente para concentraciones intermedias con eficiencia cercana al 95% y en concentraciones altas, la eficiencia es solo aceptable en un 74% en ninguna de las se alcanzaron los limites de normativa



mexicana de 0.4 ppm para descarga en río para riego y descarga a suelo para riego de la NOM-001-SEMARNAT-1996. En base a la evidencia anterior, se determina que este tratamiento deberá ser implementado como un tratamiento primario en un tren de tratamiento.

5.4.3 Cobre

De acuerdo al equipo de absorción atómica con las curvas de calibración resultantes de al secciones 5.1 y 5.3 en sus apartados 5.1.2 y 5.3.2 se obtuvieron las siguientes concentraciones finales después del tratamiento con ácido sulfhídrico, coagulación floculación y del filtrado del agua tratada.

Tabla 5-21 Resumen de Resultados el Tratamiento para Cobre.

Cobre			
Concentración	Concentración inicial (ppm)	Promedio de etapa 1 (ppm)	Promedio de etapa 2 (ppm)
Baja	4.4	4.1	4.1
Intermedia	38.2	31.5	12.7
Alta	170.8	11.12	11.2

Con esta información se puede determinar que el método es efectivo para remover plomo ya que en las concentraciones intermedia y alta se observa un cambio importante después del tratamiento alcanzando concentraciones similares en ambos casos. Para la concentración baja, se puede atribuir el corto alcance de la técnica a que la concentración del metal se encuentra en el umbral de solubilidad; este hecho disminuye la eficiencia e imposibilita rendimientos aceptables. A continuación se presenta en la figura 5.32 la tendencia del comportamiento de las concentraciones del cobre soluble durante el tratamiento.



Concentración por etapa de Cobre

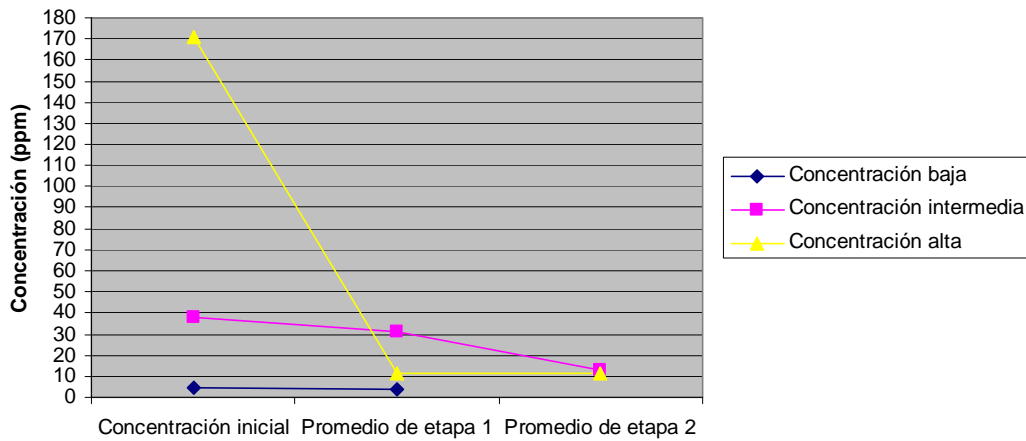


Figura 5-35 Comportamiento por Etapas Durante el Tratamiento de Cobre.

En el comportamiento observado de este metal puede ser atribuido a dos factores. El primero de error experimental debido al hecho de no lograr alcanzar las mismas ganancias y eficiencias de la lámpara del equipo de absorción atómica en la segunda calibración y al haber alcanzado un límite de solubilidad cercano a las 11 ppm el cual puede observarse en las concentraciones intermedia y alta al no poder seguir removiendo una mayor cantidad de cobre. El hecho anterior también indica que al encontrarse la concentración más baja en un punto inferior a límite de las 11 ppm, no es posible remover de manera eficiente el metal. Las eficiencias obtenidas durante el proceso se presentan en la tabla 5.18 obtenidas con la ecuación 5.6

Tabla 5-22 Resumen de Eficiencias del Tratamiento para Cobre.

Etapa	Eficiencia		
	Etapa 1	Etapa 2	Global
Concentración alta	6.3%	0.00%	6.3%
Concentración intermedia	17.6%	59.7%	66.8%
Concentración baja	93.5%	0.00%	93.5%

Con los resultados anteriores se puede concluir que el tratamiento de remoción es eficiente para concentraciones altas con eficiencia cercana al 95% y en concentraciones intermedias la eficiencia es solo aceptable en un 66% en ninguna de las se alcanzaron los límites de normativa mexicana de 6 ppm para descarga en río para riego y descarga a suelo para riego de la NOM-001-SEMARNAT-1996. En base a la evidencia anterior, se determina que este tratamiento deberá ser implementado como un tratamiento primario en un tren de tratamiento.



5.4.4 Comportamiento por concentración

Los datos presentados por metales fueron agrupados en tres separados en tres rangos de concentración para un análisis más profundo. Los rangos seleccionados concentración baja, intermedia y alta.

Los datos de del comportamiento de las concentraciones bajas indican que el método a pesar de lograr hacer que los metales presentes en el agua residual, no es capaz de alcanzar resultados satisfactorios por si solo. El comportamiento de los metales se muestra en la figura 5.33.

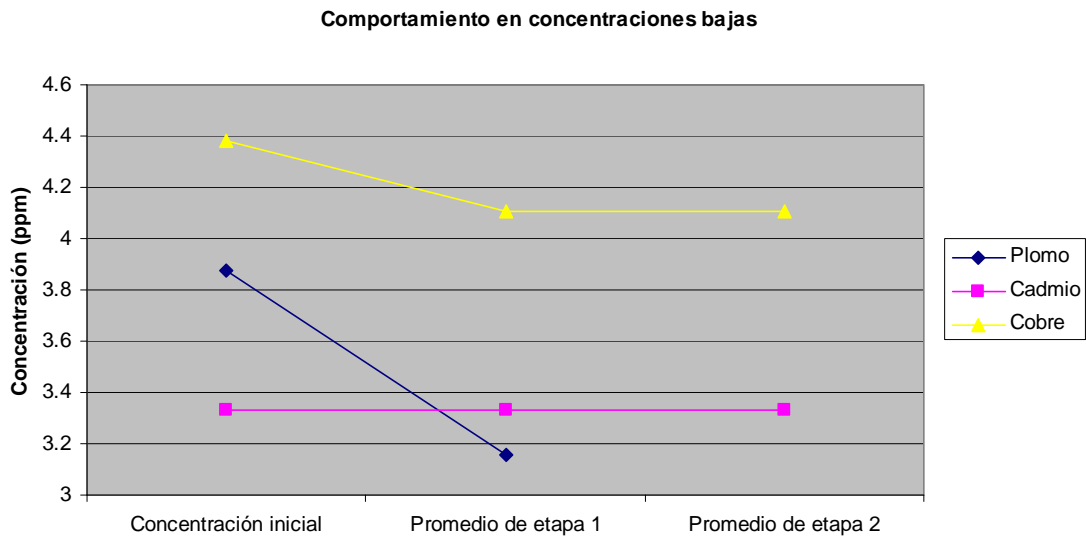


Figura 5-36 Comportamiento de los Metales en Concentraciones Bajas.

Dicho comportamiento se debe a que todas las concentraciones bajas de los metales se encuentran en el límite de solubilidad, impidiendo la correcta remoción del metal a pesar de generar el sulfuro. Con la evidencia anterior se puede determinar que esta técnica de remoción de metales no es la adecuada en concentraciones bajas.

El comportamiento en las concentraciones intermedias y altas demuestra que existe una tendencia de remoción al lograr disminuir la concentración inicial en la primera etapa del tratamiento y esta es complementada con el tratamiento de coagulación floculación en condiciones óptimas. El tratamiento de coagulación floculación debe de ser utilizado solo en el caso de ser



necesario; esto se demuestra con las concentraciones finales de plomo en el efluente final que cumplen con la normativa nacional. Este comportamiento se demuestra en las figuras 5.34 y 5.35.

Comportamiento en concentraciones intermedias

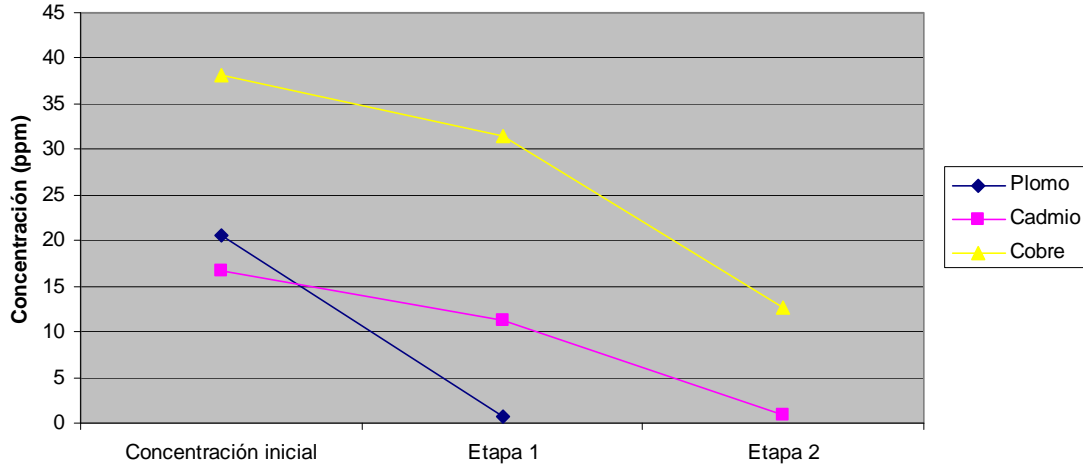


Figura 5-37 Comportamiento de los Metales en Concentraciones Intermedias.

Comportamiento en concentraciones altas

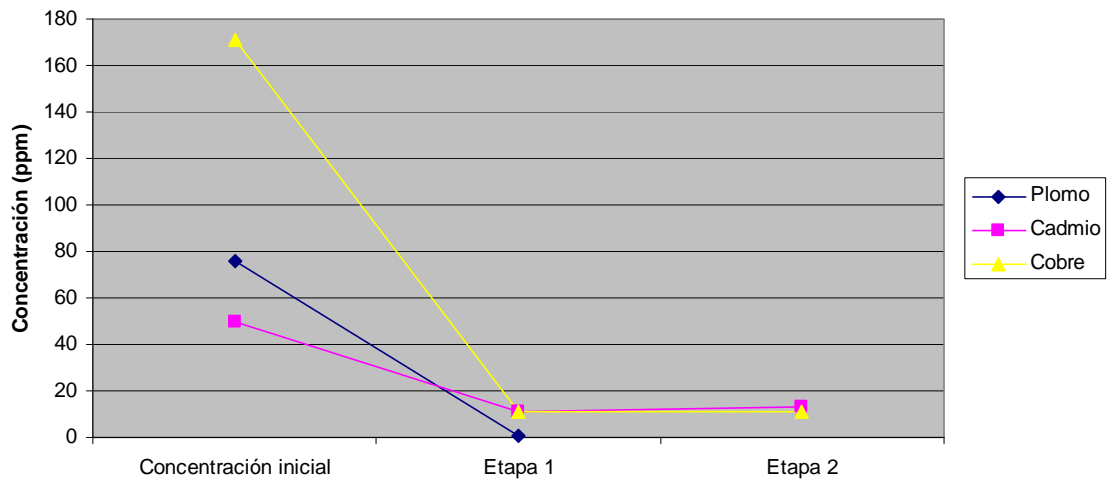


Figura 5-38 Comportamiento de los Metales en Concentraciones Altas.



Con la evidencia anterior se puede concluir que tratamiento es efectivo en concentraciones intermedias y altas con buenos resultados; disminuyendo de manera considerable las concentraciones iniciales.

5.5 Simulación de producción de ácido sulfhídrico

Se realizó la simulación de los reactores se realizo con ayuda del simulador de procesos SuperPro Designer® versión 5.1 con el modulo de incineración provisto por el mismo simulador. Se determino el uso de azufre elemental y aceite residual de automóviles para realizar el proceso de producción de ácido sulfhídrico en un sistema por lotes con duración de 6 horas. Los datos necesarios que no se encontraban cargados en el simulador fueron alimentados de acuerdo a la metodología propuesta en la sección 4.7. A continuación se muestra el diagrama de la planta de producción de ácido sulfhídrico.

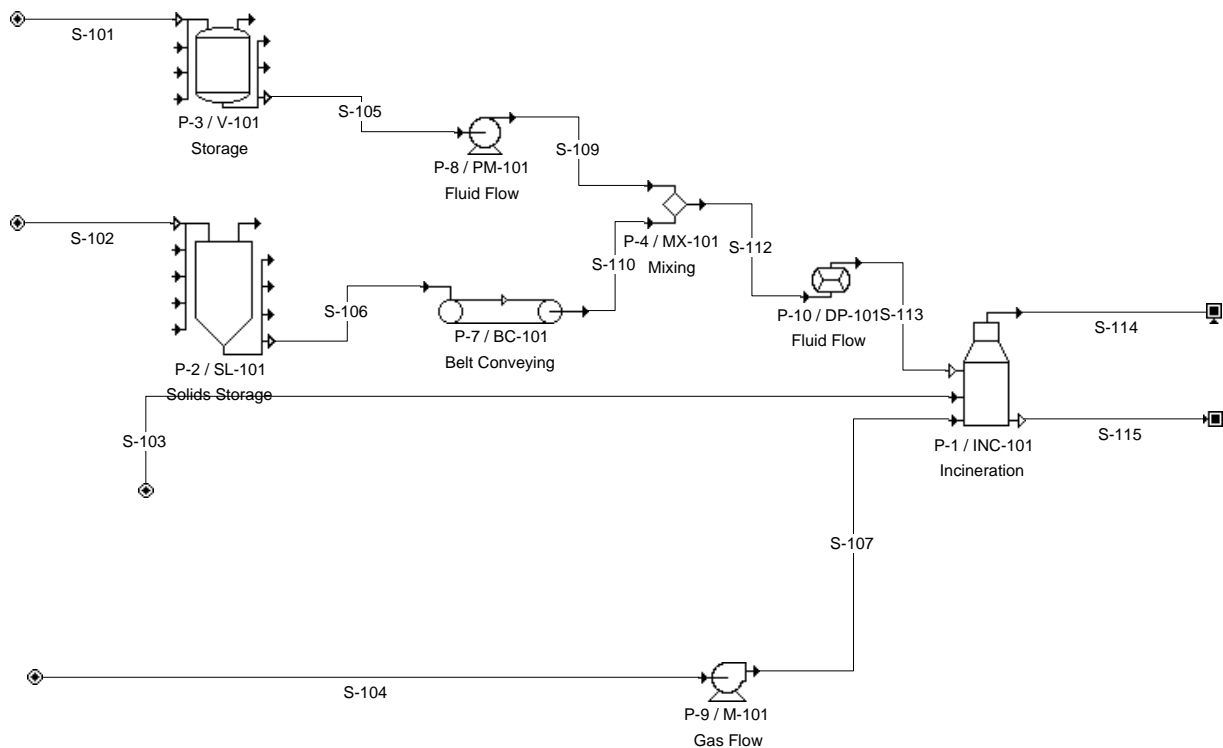


Figura 5-39 Diagrama de Planta.



Los resultados completos de la simulación se presentan la sección de anexos. A continuación se presenta un atabla con el resumen de corrientes de salida del equipo de incineración en sus corrientes S-114 y S-115.

Tabla 5-23 Resumen de Condiciones de Salida del Incinerador.

Corriente	S-114	S-115
Fuente	P-1	P-1
Temperatura (°C)	250	250
Densidad (g/l)	0.709	0.4695
Presión	Atmosférica	Atmosférica
Destino	efluente	efluente

Tabla 5-24 Resumen de Flujos de Salida del Incinerador.

Flujos por corrientes (kg/batch)	S-114	S-115
Ceniza	10	10
CO ₂	3187.3767	0
Nitrógeno	15048.6143	0
Oxígeno	217.5461	0
SO ₂	1960	0
Agua	1183.545	0
Flujo final		
(kg/batch)	21607.082	10
(L/batch)	30596998.9	2146.8258

El flujo volumétrico reportado en por el simulador en la corriente S-114 corresponde a un volumen de 29873.529 m³ de gas por cada 6 horas de operación a una temperatura de 250 °C. Para el correcto análisis de esta corriente en necesario transformar el flujo a condiciones estándar de temperatura y presión de 25 °C (298.15 K) y una atmósfera. Para este análisis se transformara el flujo a m³/min a condiciones estándar con la ecuación 5.6

$$Q_{std} = \frac{Q * T_{std}}{360 * T}$$

Ecuación 5.6 Conversión de flujo



Donde

Q_{std} = Flujo de gas (m^3/min) a condiciones estándar

Q = Flujo de gas por cada 6 horas de operación (m^3)

T_{std} = Temperatura estándar (K)

T = Temperatura de salida de los gases del equipo (K)

La ecuación anterior arroja un resultado de $46.52 \text{ mg}/m^3$ a una temperatura estándar de 25°C (298.15 K) y una atmósfera de presión. Con este resultado se evaluó contra la tabla 1 de la norma mexicana NOM-043-SEMARNAT-1993 que establece los máximos permisibles de emisión de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas en su sección 5 con las ecuaciones 5.7 para zonas críticas del país y 5.8 para el resto de la república.

$$E = \frac{3020}{Q^{.42}}$$

Ecuación 5.7 Emisión en zona crítica

$$E = \frac{4529.7}{Q^{.42}}$$

Ecuación 5.7 Emisión en el resto del país.

Donde

E = Emisión de partículas sólidas en miligramos por metro cúbico normal

Q = Flujo de gas (m^3/min) a condiciones estándar.

Los resultados de estas ecuaciones fueron 601.98 y 902.92 miligramos por metro cúbico normal para zona crítica y el resto del país respectivamente. Los resultados de este análisis dejan ver que en ambos casos cumple con la normativa y no será necesario un sistema de control de emisiones.

El reporte de la corriente S-114 que corresponde a la salida gaseosa del equipo reporta solo salida de SO_2 debido a que en la programación del módulo de incineración del simulador se hace la suposición de que todo el azufre presente se transformara en SO_2 . Por esta razón se hará una conversión del flujo másico de SO_2 a flujo másico de H_2S por medio de la ecuación 5.8



$$M_{H_2S} = M_{SO_2} * \left(\frac{PM_{H_2S}}{PM_{SO_2}} \right)$$

Ecuación 5.8 Flujo másico de H₂S

Donde

M_{H₂S} = flujo másico de H₂S

M_{SO₂} = flujo másico de SO₂

PM_{H₂S} = Peso molecular de H₂S

PM_{SO₂} = Peso molecular de SO₂

Con el flujo másico reportado de la corriente S-114 de la tabla 5.20 de 1960 Kg. de SO₂ por cada 6 horas de producción y con la ayuda de la ecuación anterior, se estima que se obtendrá un flujo de 1041.25 kilogramos de H₂S por cada 6 horas de trabajo del equipo.

Con la evidencia anterior se puede concluir que el método de generación de ácido sulfhídrico es capaz de generar dicho reactivo para la implementación de la técnica de tratamiento de aguas residuales con la técnica de sulfuración.