

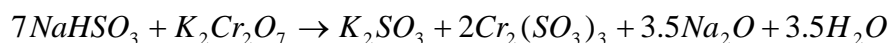
## **6. Resultados**

### **6.1. Condiciones de seguridad**

El trabajar con residuos peligrosos requiere especiales medidas de seguridad al manejarlos. En este caso se prepararon soluciones sintéticas emulando las concentraciones de los efluentes residuales y para ello fue necesario además del uso del equipo ordinario de laboratorio (bata y lentes de seguridad) usar guantes para evitar el contacto de los metales con la piel. En el caso de las operaciones de calcinación y vidriado el uso de pinzas para crisol y guantes de asbesto es necesario ya que las temperaturas de trabajo son muy elevadas.

### **6.2. Preparación de las muestras sintéticas**

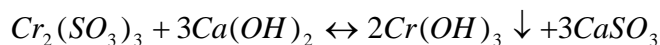
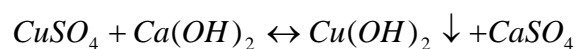
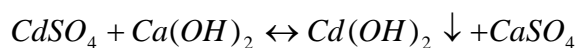
Se prepararon las muestras sintéticas mencionadas anteriormente (ver tabla 5.2). En el caso del cadmio la solución fue de aspecto incoloro, la del cobre fue azulada y la de cromo anaranjada. Ésta última fue tratada añadiendo bisulfito de sodio para llevar a cabo la reducción de  $\text{Cr}^{+6}$  a  $\text{Cr}^{+3}$ , mediante la siguiente reacción:



De acuerdo a esta reacción la relación bisulfito de sodio: dicromato de potasio es de 7:1, por lo que se hizo el cálculo para añadir  $\text{NaHSO}_3$  en cantidad suficiente para reducir todo el cromo presente. Produciendo una solución de color verdoso, lo cual es indicativo del estado de oxidación del cromo.

### 6.3. Prueba de Jarras

Se preparó un litro de las soluciones anteriormente mencionadas (ver tabla 5.2) y se vertieron 100 ml de cada una en siete vasos de precipitados a los cuales se les fue añadiendo por mililitros una solución de cal sobresaturada. Después de añadir cada mililitro las soluciones se agitaron magnéticamente con el objeto de homogeneizar la concentración y así obtener una medición más precisa del pH. Estas muestras se dejaron en reposo por espacio de 30 minutos para permitir la precipitación:



Posteriormente se tomaron muestras del sobrenadante de cada una y se midió la turbidez utilizando el programa *3750 Turbidity Absorbance 5000 FAU*

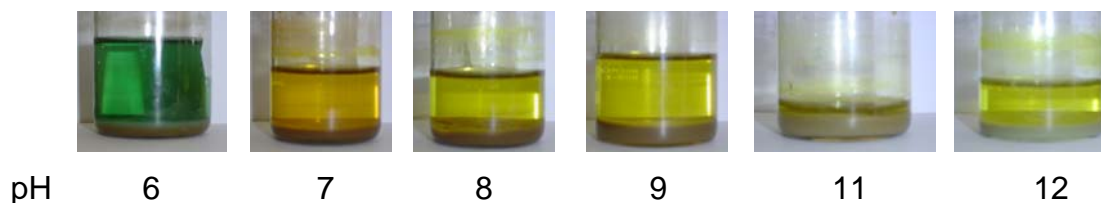
disponible en el espectrofotómetro mencionado anteriormente (ver tabla 5.1), obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 6.1. Turbidez medida para cada solución a distinto pH**

COBRE		CADMIO		CROMO	
pH	Turbidez	pH	Turbidez	pH	Turbidez
6.15	12	6.25	3	6	8
7	8	7.35	4	7	4
8	6	8	1	8	2
9	3	9	4	9	1
10	4	10	12	10	2
11	7	11	24	11	8
11.6	27	11.6	106	12	11

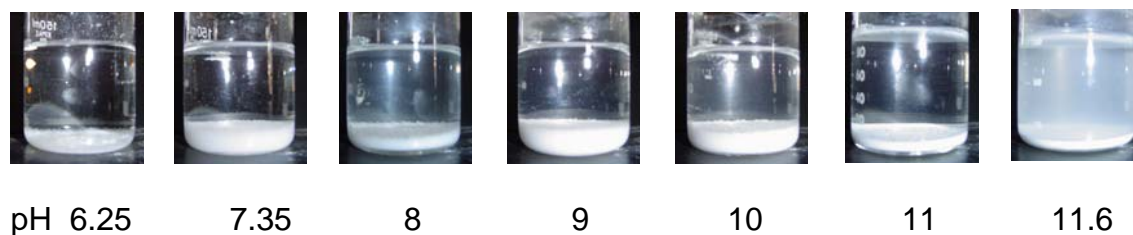
La tabla anterior muestra los valores obtenidos para turbidez de cada una de las soluciones, en ella se demuestra que el pH óptimo para precipitar los metales es de 9 para el cromo y el cobre y de 8 para el cadmio.

#### CROMO



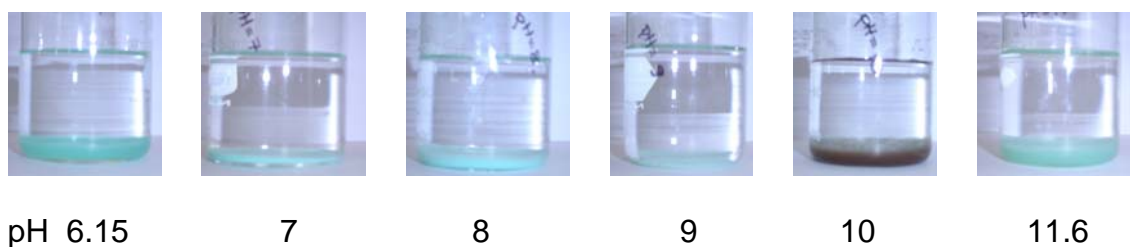
*Figura 6.1. Soluciones de cromo con distintas alcalinidades*

#### CADMIO



*Figura 6.2. Soluciones de cadmio con distintas alcalinidades*

## COBRE



*Figura 6.3. Soluciones de cobre con distintas alcalinidades*

El cromo produjo soluciones de color verde con precipitados del mismo color pero con tono un poco más pálido. Las soluciones de cadmio produjeron precipitados blancos y en el caso del cobre se produjo un precipitado azul cielo que con el paso del tiempo y el secado produjo tonalidades verde pálido muy parecido al de los lodos de cromo.

En el siguiente gráfico se muestra que el pH óptimo para la precipitación del cromo y el cobre es 9 y para el cadmio es 8. Lo cual coincide con la fuente bibliográfica consultada (METCALF: 2000).

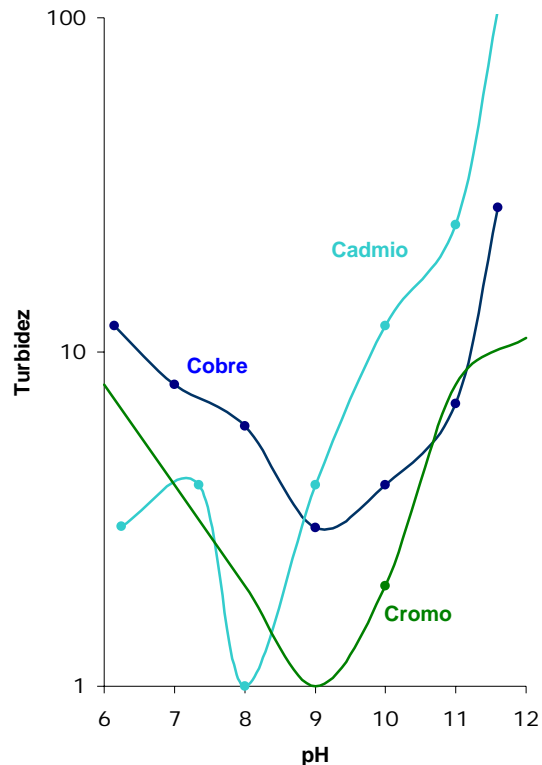


Figura 6.4. Gráfica de turbidez contra pH

#### 6.4. Velocidad de sedimentación

Se determinó el efecto del sulfato de aluminio  $Al_2SO_4$  para verificar si este favorece la coagulación. Se añadieron 1ml y 2ml de una solución al 1% p/v a un volumen conocido de solución de cobre que ya había sido ajustada al pH óptimo y se tomó lectura del tiempo que tardaba en sedimentar.

**Tabla 6.2. Efecto del coagulante en la velocidad de sedimentación**

Sin Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		Con 1ml Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		Con 2ml Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	
Tiempo (s)	Distancia (u)	Tiempo (s)	Distancia (u)	Tiempo (s)	Distancia (u)
2	20	7.23	17	7.14	14
3	25	8	20	8.28	20
4.2	30	9.18	25	12	32
8.4	40	11	30	15.34	40
19.45	50	16	40	29.55	51
<b>V<sub>promedio</sub></b>	<b>6.5617579</b>	19.45	45	<b>V<sub>promedio</sub></b>	<b>2.275272</b>
		29.25	50		
		<b>V<sub>promedio</sub></b>	<b>2.4035607</b>		

En la tabla anterior se puede observar que el efecto del coagulante resultó contrario a lo que se esperaba ya que disminuyó la velocidad de sedimentación de la muestra por ello se decidió omitir su uso en experimentos posteriores.

### 6.5. Volumen y densidades de los lodos

Determinadas las condiciones de experimentación, se prepararon 6 litros de cada solución y se ajustaron al pH óptimo para la precipitación de cada metal. Dichas soluciones se dejaron reposando por 4 horas para después separar los lodos por decantación y dejarlos secar a la intemperie extendidos sobre una charola de plástico.

El volumen que ocupaban los lodos respecto al resto de la solución se determinó midiendo la altura de estos en el vaso de precipitados para calcular el porcentaje que representan de la altura total. Conociendo el volumen de los lodos es posible determinar su densidad aparente estableciendo la relación que guarda con la masa de sólido producida. En cada caso se pesaron los lodos colectados después del secado.

**Tabla 6.3. Características de los lodos**

<b>Metal</b>	<b>Volumen de lodos %</b>	<b>Peso lodo seco (g/l)</b>	<b>ml/l</b>	<b><math>\rho</math> (g/ml)</b>
Cromo	9.09	0.76	181.81	0.00415
Cobre	4.85	1.75	96.96	0.01803
Cadmio	17.39	2.8	347.82	0.00805

Los lodos secos fueron colectados y molidos en un mortero para disminuir su tamaño de partícula.



*Figura 6.5. Aspecto de los lodos secos*

## 6.6. Resultados de la pruebas de calcinación

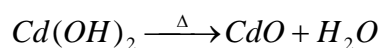
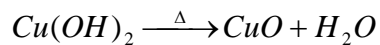
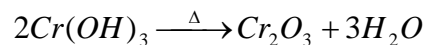
Los lodos secos fueron calcinados en la mufla a 1 000° C para lograr la oxidación de los metales, obteniendo los siguientes resultados:



Figura 6.6. Aspecto de los lodos calcinados

El óxido de cromo dio un color verde más intenso que el de los lodos sin calcinar, el cobre en cambio se tornó color gris y el cadmio produjo óxido color marrón. La figura anterior muestra los óxidos después de calcinados y molidos.

Las reacciones que se llevaron a cabo en este caso fueron:





## 6.7. Elaboración de mezclas para vitrificación

La composición del vidriado se estableció en base a los datos reportados en la tesis “Diseño de un equipo de vitrificación para la fijación de contaminantes metálicos” (SOSA: 2004) en la cual ya habían sido probadas las condiciones para la producción de vidrio a nivel laboratorio. La mezcla seleccionada en este caso fue la siguiente:



Figura 6.7. Mezcla de vidrio

Tabla 6.4. Composición del vidrio

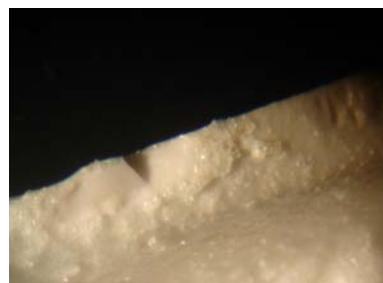
Componente	% p/p
Arena sílica	60
Cal	12.5
Sosa	17.5
Alúmina	10

A la mezcla de vidrio se le añadieron los tres óxidos para producir vidriados con cada metal al 1, 2 y 5%.

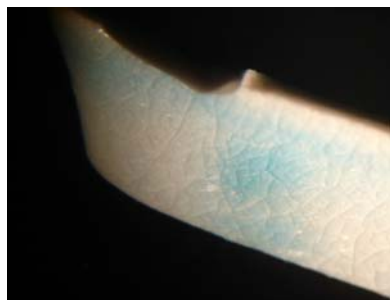
Tabla 6.5. Composiciones de los vidriados

Componente	% p/p		
	Arena Sílica	0.59	0.59
Cal	0.12	0.12	0.12
Sosa	0.17	0.17	0.17
Alúmina	0.10	0.10	0.10
Óxido metálico	0.01	0.02	0.05

Una vez añadido el óxido correspondiente a cada muestra, se agregó agua hasta lograr la consistencia adecuada para que esta se adhiriera a la cerámica formando una capa uniforme.



a) Cadmio



b) Cobre



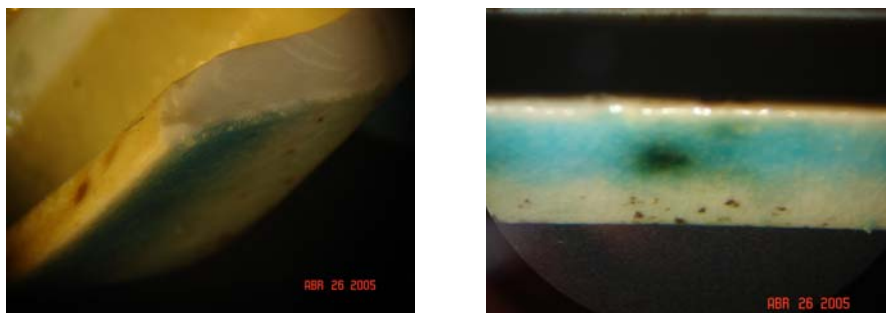
c) Cromo

*Figura 6.8. Vidriados al 1% con calentamiento a 1100° C.*

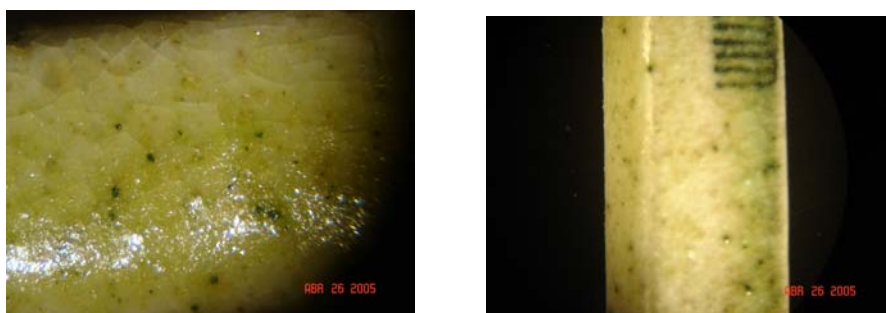
La figura anterior muestra el aspecto de los vidriados obtenidos con los distintos metales después de precalentar por dos horas a 800° C y calentar a 1100° C durante otras dos horas para después dejar enfriar dentro de la mufla.

En estas imágenes se puede observar que en los tres casos el vidrio formado tiene una textura rugosa además de estar agrietado, esto puede ser debido a que no se alcanzó la temperatura necesaria para la sinterización de los elementos que lo forman. Esto también se ve reflejado en el moteado de las piezas ya que sólo la de cadmio presentó un color uniforme. Además, en el caso del cromo las fotografías muestran la formación de vidriado en ciertas partes y otras sin recubrimiento alguno. Esto se debe al exceso de agua presente en la solución de vidrio que hace que se formen hojuelas al evaporarse comenzando el calentamiento.

Por ello se realizó nuevamente el experimento, esta vez dejando secar las piezas recubiertas para eliminar el exceso de agua antes de meterlas a la mufla y aumentando la temperatura de calentamiento hasta  $1\ 150^{\circ}\text{C}$ . Además se añadió óxido para lograr una composición del 2% p/p.



a) Cobre



b) Cromo



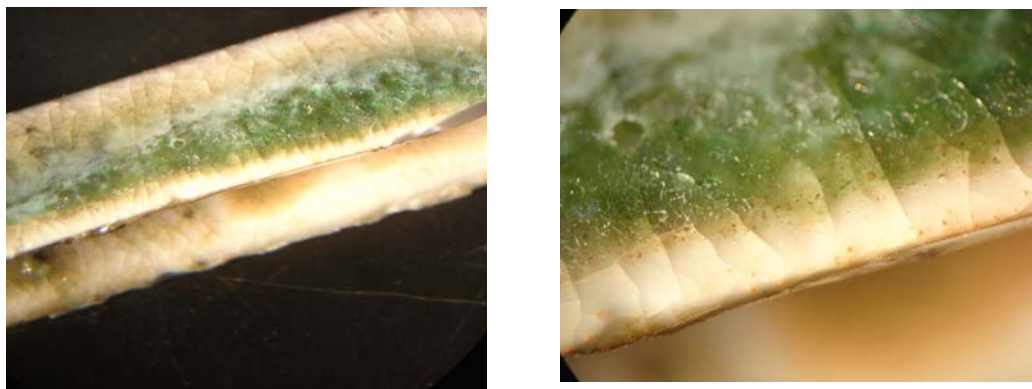
c) Cadmio

Figura 6.9. Vidriados al 2%, con secado preliminar y calentamiento a 1 150° C.

En este caso los vidriados obtenidos muestran colores más intensos debido a la mayor concentración de óxido agregada. En el caso del cobre el color se concentró en las orillas de la pieza, esto puede deberse a la forma de las cerámicas utilizadas para vidriar; el cromo presentó un color más homogéneo aunque con algunos puntos esto puede ser debido a que su fusión no se llevó a cabo completamente; el cadmio continúa dando color blanco homogéneo en toda la pieza.

También se logró corregir el problema del vidriado heterogéneo ya que en todos los casos se obtuvo una capa uniforme recubriendo las piezas. La textura en este caso tampoco fue la deseada ya que todavía es rugosa y se ve agrietada.

Se llevó a cabo una tercera prueba con la misma concentración de óxido pero esta vez a 1250° C con el objeto de favorecer la sinterización de los componentes del vidrio.



a) Cromo



b) Cobre



c) Cadmio

Figura 6.10. Vidriados con 2% de óxido producidos a 1250° C.

La textura de los vidriados obtenidos en este caso es de excelente calidad ya que son totalmente lisos. Sin embargo, el color deja mucho que desear en el caso del óxido de cromo ya que produjo un tono verde grisáceo en el que se observan puntos oscuros. En el caso del óxido de cobre el color es azul claro y otra vez migró hacia las orillas de la pieza dejando el resto sin color. El óxido de cadmio siguió dando resultados satisfactorios tanto en textura como en color. Una característica común a los tres vidriados es la presencia de grietas, esto puede deberse a un enfriado demasiado rápido o al choque térmico que pueden sufrir las piezas al abrir la compuerta de la mufla.

Se llevó a cabo otro experimento a 1250° C esta vez con 5% de óxido en la mezcla.



a) Cromo



b) Cadmio



c) Cobre

Figura 6.11. Vidriados al 5% horneados a 1250° C.



La textura obtenida en los tres vidriados fue la deseada. En cuanto al color el cromo presentó distintos tonos y puntos de color más oscuro; el cobre presentó un tono azul-verdoso homogéneo, más denso que los obtenidos anteriormente; el cadmio no presentó ningún cambio de color respecto a los experimentos anteriores.

### 6.8. Cálculo de rendimientos

En este caso es necesario tomar en cuenta la cantidad de aguas residuales que produce la industria de los acabados metálicos. Debido a la falta de datos exactos se tomó en cuenta una producción de 7 500 galones diarios, es decir, el efluente de tres baños de 2 500 galones por día. El cálculo se hizo tomando la cantidad de lodos producida por litro de solución de cada una de las sales, obtenida en los resultados de la experimentación.

**Tabla 6.6. Producción anual de óxido a partir de lodos (7 500 gal)**

	Lodo seco g/l	Producción	
		kg/día	kg/año
<i>Cromo</i>	1.0850	30.80	11243.4
<i>Cobre</i>	0.5831	16.55	6042.24
<i>Cadmio</i>	0.2517	7.14	2607.91

La tabla anterior muestra la producción anual esperada a partir del efluente mencionado anteriormente. Los datos muestran que la mayor producción sería la de óxido de cromo aunque esta lleva aunado el costo de algún agente reductor, como el bisulfito de sodio para lograr el cambio de valencia del cromo. El cobre aunque presenta un rendimiento mucho menor que el cromo produce cantidades significativas de óxido. Por su parte, contrario a lo que se esperaría, el cadmio es el que presenta un menor rendimiento ya que proviene del efluente más concentrado y produce la menor proporción de lodos, aunque el color logrado en sus vidriados fue el de mejor calidad en los tres metales estudiados.

### 6.9. Costos de producción y análisis económico preliminar

Se llevó a cabo un análisis de costos estableciendo la producción de pigmento esperada anualmente, 780 kg. Los cálculos se hicieron en base a los siguientes datos:

**Tabla 6.7. Efluente tratado para una producción de 3 kg/día**

	Lodo seco g/l	Producción		Agua tratada	
		kg/día	kg/año	l/año	l/día
<i>Cromo</i>	1.0850	3.00	780	718894	2764.98
<i>Cobre</i>	0.5831	3.00	780	1337716	5145.06
<i>Cadmio</i>	0.2517	3.00	780	3099338	11920.53

En base a esta producción se hizo el cálculo de los costos del equipo, instalación, materias primas y operación anuales. Se realizó solamente un análisis económico para los tres metales ya que el tren de proceso sería el mismo y lo único que cambia es la cantidad de cal utilizada y en el caso del cromo la utilización de bisulfito de sodio como agente reductor, ambos tienen un costo muy bajo por lo que no provocan cambios representativos en los costos anuales de producción.

En este análisis se propone la obtención de materias primas utilizando como proveedor sólo los efluentes residuales por ello, el único costo en material está representado por la utilización de carbonato de calcio. La cantidad de carbonato a utilizar difiere de acuerdo al metal tratado, en este caso se tomó como base para el cálculo la cantidad requerida para la producción de cadmio, ya que es el que presenta la mayor demanda. En el caso del cromo se requiere un gasto adicional en agente reductor, en este caso, bisulfito de sodio.

**Tabla 6.8. Costo anual de materias primas**

Materias Primas		\$ USD/kg	kg/año	\$ USD/año
Bisulfito de Sodio	NaHSO <sub>3</sub>	0.82142857	825.260267	677.89
Carbonato de Calcio	CaCO <sub>3</sub>	0.20535714	15496.6887	3182.36

Fuente: Química Industrial Olympus, S.A. de C.V. (Bisulfito de sodio \$9.2; cal \$2.3; incluyen I.V.A.)

El proceso considerado constituye una micro empresa por lo que la adquisición de un terreno al inicio de las operaciones representaría un gasto muy fuerte, por esto se consideró una renta de \$10,000 pesos mensuales.

Los costos del equipo utilizados para este análisis fueron los que se muestran en la tabla 6.10. Se tomó en cuenta el tren de proceso propuesto en la figura 6.12 y el equipo necesario para el área administrativa de una micro empresa (mobiliario y equipo de cómputo).

**Tabla 6.9. Costo del equipo**

<b>Concepto</b>	<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo (pesos)</b>
Mezclador	500 lts agitador 5 hp	1	199150
Clarificador	500 lts	1	132500
Secador	10 kg/h	1	79600
Horno para cerámica	250 piezas	1	14600
Molino de bolas	1 hp (1.5 kg/hr)	1	15900
Bomba (lodos)	5 hp	1	571.43
Equipo de Cómputo		2	39850
Mobiliario		1	66400
Bomba (agua)	1 hp	1	571.43

Fuente: Guías Empresariales, Secretaría de Economía 2005.

El gasto por mano de obra se calculó tomando en cuenta una persona por operación y dos personas en el área administrativa. El salario considerado fue de \$62 pesos diarios que corresponde al salario mínimo vigente para profesionales reportado en el portal de Internet del Gobierno Federal para el área geográfica del estado de Puebla.

**Tabla 6.10. Gastos por sueldos**

<b>Operación</b>	<b>Personal</b>
Mezclado	1
Clarificado	1
Secado	1
Calcinado	1
Molienda	1
Oficinas	2
Salario	62.00
<i>Total (pesos)</i>	\$112,840.00

Para el cálculo anterior se tomó en cuenta un año de 260 días ya que la empresa sólo laboraría 5 días a la semana un turno de 8 horas.

El gasto energético se estimó para cada equipo y el costo por energía eléctrica se cálculo en base a la tarifa 2, baja tensión, establecida por la Comisión Federal de Electricidad.

**Tabla 6.11. Costo de la energía eléctrica.**

<b>Servicio</b>	<b>Pesos</b>
50 primeros KW	1.445
50 KW siguientes	1.745
KW adicionales	1.924
Tarifa general	37.01

**Tabla 6.12. Gasto por energía eléctrica**

Equipo	Consumo energético	
	kW/día	kW/año
Mezclador	3.73	969.8
Secador	14.4	3744
Horno	139.2	36192
Molino	0.01554167	4.0408333
Bomba	3.73	969.8
E. Cómputo	6	1560
Total		43439.641
*Total+10%		47783.605
Costo (pesos)		91939.766

\*Se agregó un 10% al valor total para considerar imprevistos.

En base a los datos anteriores se obtuvo el costo anual de producción de \$71,174.77 USD.

**Tabla 6.13. Costo anual de producción**

Costos de Operación USD	
Equipo	49030.61
Materia Prima	3860.25
Mano de obra	10075
Energía eléctrica	8208.91
<i>Total</i>	<b>\$71,174.77</b>

El análisis de costos se llevó a cabo utilizando el software realizado en una tesis anterior. La tasa de costo de capital utilizada fue la reportada por Grupo HSBC el 3 de Mayo de 2005.

**Tabla 6.14. Datos utilizados para el análisis económico (SÁMANO: 2005)**

## Estados Financieros Anuales

<b>Inversión Inicial</b>		Producción de Pigmentos
Proceso		
Costo de equipo nuevo (\$USD)		\$49,030.00
Materia Prima		\$3,860.25
Inversión Inicial		\$52,890.25
<b>Variables Económicas</b>		
Costo de Capital (%)	k	<b>0.1115</b>
Años de Vida Económica del Proyecto	n	<b>10</b>
Inflación (%)	i	<b>0.02</b>
<b>Análisis de Flujo Económico Anual</b>		
	0	1
Unidades Producidas (kg/año)		780.00
Precio de venta por Kg		<b>\$75.00</b>
Ganancias por venta		\$58,500.00
Ganancia por reuso de residuos		\$1,841.41
Ganancias totales		\$60,341.41
Costos por energía eléctrica		\$8,208.91
Costo de materias primas		\$3,860.25
Costo de producción		\$12,069.16
Depreciación anual del equipo		\$4,903.00
Gastos Administrativos		\$20,789.29
Ingreso Antes de Impuestos		\$22,579.97
I.V.A.		<b>0.15</b>
I.S.R.		<b>0.34</b>

En cuanto a los indicadores de rentabilidad del proceso los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 6.15. Parámetros de rentabilidad (SAMANO: 2005)**

Valor Presente Neto (\$USD)	VPN	\$20,778.05
Tasa Interna de Rendimiento (%)	TIR	20%
Periodo de Recuperación de la Inversión (Años)	PRI	4.40

Estos datos se obtienen estableciendo un costo de venta de \$65 USD por kilogramo de pigmento, ya que este valor dio el ajuste para obtener una tasa interna de retorno mayor a la TIIE, que actualmente esta alrededor de 11.15% (valor publicado en el Diario Oficial de la Federación, 3 de Mayo de 2005); además de permitir la recuperación de la inversión en menos de 5 años y superar la tasa establecida para el costo de capital.

En cuanto al costo por kilogramo de pigmento, el valor comercial de estos óxidos a la fecha oscila entre \$2,000 y \$2,500 pesos por cada 500 gramos (valor proporcionado por El Crisol, S.A. de C.V.). Comparando el costo establecido para recuperar la inversión, \$840 (\$75 USD) pesos por kilogramo, el ahorro generado es del 80% aproximadamente, lo cual representa una disminución considerable y hace de esta una opción competitiva comercialmente.

#### **6.10. Diagrama de proceso para la producción**

La producción a gran escala de óxidos metálicos para su utilización como pigmentos para cerámica requiere de seis etapas principales:



- ✓ Bombeo de lodos
- ✓ Mezclado
- ✓ Precipitación
- ✓ Secado
- ✓ Calcinación
- ✓ Molido
- ✓ Almacenamiento o empaque

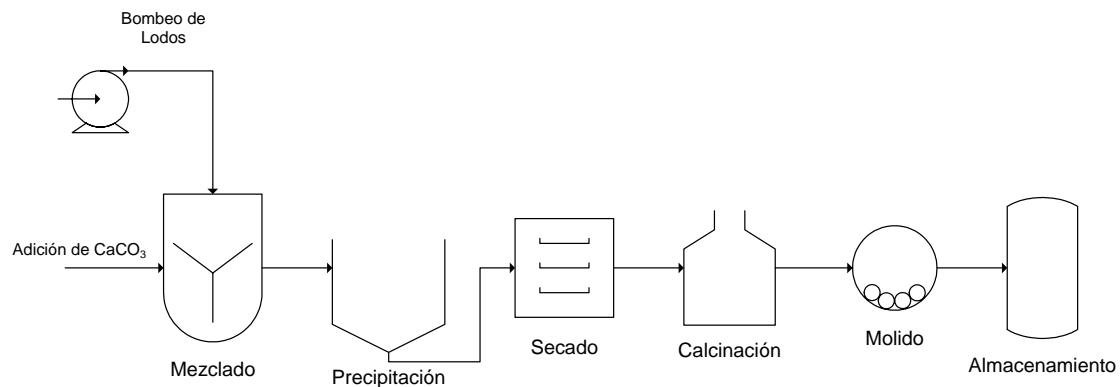


Figura 6.12. Diagrama del proceso de producción de pigmentos

### *Bombeo de lodos*

Este depende directamente de la ubicación de la planta ya que si ésta se encontrara ubicada próxima a alguna industria que produzca que el efluente propuesto como proveedor de materias primas, el bombeo podría realizarse directamente desde las unidades que desechan el caudal; siendo este el caso óptimo. De otra forma el sería más conveniente comenzar el proceso con los lodos secos para facilitar su transporte hacia el lugar en que serían procesados.

### *Mezclado*

Este se lleva a cabo en un tanque agitado en el cual se adiciona el carbonato de calcio logrando una mezcla homogénea y el pH propuesto anteriormente para favorecer la separación del metal.

### *Precipitación*

Se propone el uso de un tanque clarificador en el cual se separarían los lodos por el fondo y se retiraría el efluente con el contenido metálico disminuido.

### *Secado*

Esta operación se lleva a cabo en un secador de charolas.

### *Calcinación*

Se puede llevar a cabo en un horno para cerámica a 1000° C durante dos horas.

### *Molido*

Es parte fundamental del proceso ya que tiene por objeto disminuir y homogeneizar el tamaño de partícula de los óxidos, lo cual tiene repercusión directa en la distribución del color en el vidriado ya que puede favorecer el mezclado y la sinterización durante la cocción de este.

### Almacenaje o empaque

Esto dependerá del mercado al que se quiera alcanzar ya que estos pigmentos se venden en pequeñas cantidades para ser usados por artesanos, pueden venderse en cantidades industriales para fábricas de cerámica, talavera, loza, pinturas, etc. o bien producirse dentro de las mismas. Lo cual modificaría el tren de proceso de la siguiente manera:

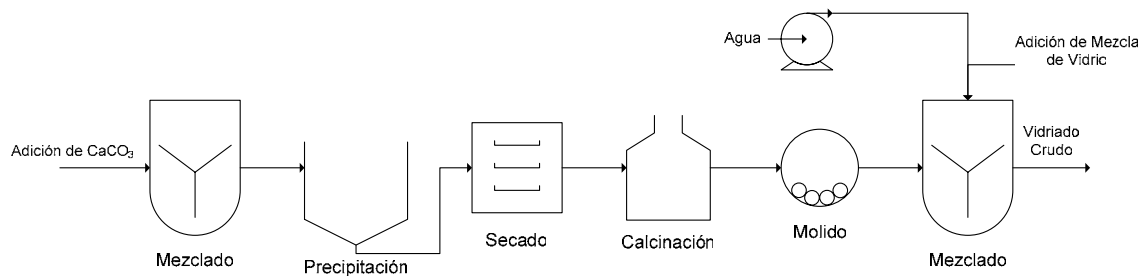


Figura 6.13. Diagrama del proceso de producción de pigmentos y vidriado

En el caso anterior (fig. 6.13) sería necesaria la adición de otro tanque agitado en el que se agregaría el óxido metálico y agua a una mezcla de vidrio previamente preparada. Dicha mezcla se tendría en tanques en los cuales se sumergirían las piezas cerámicas a vidriar para después hornearlas. En el caso de la producción de pinturas en este último mezclador se añadiría el aglutinante y el solvente.