



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA

# UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
POSGRADO  
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**Optimización de un Método Químico de Precipitación *in Situ*  
para la Eliminación de Iones Cromo VI en Solución y Evaluar el Efecto  
de la Presencia de Iones Hierro II en la Precipitación**

## TESIS

Que para obtener el Grado de:

**Maestría en  
Ciencias de la Ingeniería**

Presenta:

***María Engracia Arce Corrales***

Hermosillo, Sonora

Agosto de 2006

# UNIVERSIDAD DE SONORA

APROBACIÓN DEL COMITÉ ACADÉMICO DE LA TESIS:

“OPTIMIZACIÓN DE UN MÉTODO QUÍMICO DE PRECIPITACIÓN *IN SITU*  
PARA LA ELIMINACIÓN DE IONES CROMO VI EN SOLUCIÓN Y EVALUAR  
EL EFECTO DE LA PRESENCIA DE IONES HIERRO II EN LA  
PRECIPITACIÓN”

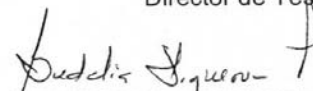
Presentada por:

**María Engracia Arce Corrales**

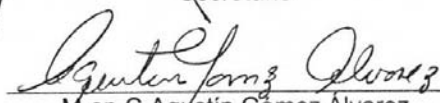
Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del  
Comité Académico, quienes la han encontrado satisfactoria


  
M en C Clara Rosalía Álvarez Chávez  
Director de Tesis

  
M en C Leticia García Rico  
Asesor Externo

  
M en C Gudelia Figueroa Preciado  
Secretario

  
Dr Luis Alonso Almazán Holguín  
Vocal

  
M en C Agustín Gómez Álvarez  
Suplente

  
Dr Manuel Pérez Tello  
Coordinador

## **DEDICATORIAS**

*A ti Señor, gracias por tu infinita bondad y por todas tus bendiciones.*

*Para ti PAPA que con tu ejemplo de hombre trabajador y fuerte me enseñaste lo importante que es no doblegarse ante el trabajo duro y las adversidades y por el contrario saber sacar ventaja de ello para así cumplir con las metas propuestas.*

*A ti MAMA, que desde donde estas sigues protegiéndome y haciéndome cada vez más falta*

*A mis hermanos, quienes junto con sus familias le ponen "la sal y pimienta" a mi vida.*

*A mi nieto Carlitos, el más preciado de todos mis tesoros.*

*A la familia Salido Álvarez, Cano, Rossy, Lore y alejandrito, "mi otra familia", simplemente ¡GRACIAS!, los quiero mucho.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la Universidad de Sonora, mi alma mater por siempre.*

*A la División de Ingeniería, particularmente al Posgrado en Ciencias de la Ingeniería.*

*Al Departamento de Ciencias Químico-Biológicas y Programa Institucional de Salud y Seguridad Ambiental de la Universidad de Sonora, por las facilidades prestadas para la realización de esta tesis.*

*A todo el personal del laboratorio de Metalurgia del Departamento de Ingeniería Química.*

*A la Directora de mi tesis, MC Clara Rosalía Álvarez Chávez, por el apoyo tan incondicional y total así como su tolerancia y consejos para la realización de este trabajo.*

*A mi amigo y maestro MC Agustín Gómez Álvarez, simplemente, ¡GRACIAS!*

*A mi comité de Tesis: MC Leticia García Rico, MC Gudelia Figueroa Preciado y Dr Luis Alonso Almazán Holguín, por sus sugerencias y el tiempo que me prestaron para la realización de este trabajo.*

*A todos mis profesores de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, en especial al MC Jaime Varela Salazar.*

*A mi "porra oficial": Chabelita, Virginia, Coyito, Griselda y Anita, por su apoyo y consejos.*

*En lo general, a todos los que me apoyaron de una u otra manera ¡GRACIAS!*

## CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	x
RESUMEN.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 General.....	4
2.2 Específicos.....	4
3. HIPÓTESIS.....	5
4. JUSTIFICACIÓN.....	6
5. ANTECEDENTES.....	9
5.1 Procesos Aplicados para el Tratamiento de Residuos Acuosos con Metales Pesados.....	9
5.1.1. Procesos Físicos.....	10
5.1.2. Procesos Biológicos.....	11
5.1.3 Procesos Químicos.....	13
5.2 Importancia Analítica de los Diagramas Eh-pH (Diagramas de <i>Pourbaix</i> ).....	16

## CONTENIDO (continuación)

5.2.1 Definición y Construcción de los Diagramas Eh-pH (Diagramas de <i>Pourbaix</i> ).....	18
5.2.2 Procedimiento General para la Construcción de los Diagramas Eh-pH.....	20
5.3 Aplicación del Análisis de Superficie de Respuesta en los Procedimientos de Optimización.....	27
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
6.1 Descripción General del Trabajo.....	30
6.2 Procedimiento Empleado para la Remoción de Iones Cromo en Solución.....	30
6.3. Determinaciones Analíticas.....	32
6.3.1 pH.....	32
6.3.2 Potencial de Óxido-Reducción.....	32
6.3.3 Análisis de Metales Totales (Cromo y Hierro).....	32
6.3.4 Análisis de Cromo VI.....	34
6.3.5 Control de Calidad del Análisis de Metales Pesados (Cromo y Hierro).....	34
6.4 Diseño Experimental.....	35

## CONTENIDO (continuación)

6.5 Análisis Estadístico.....	36
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
7.1 Proceso de Reducción.....	42
7.2 Proceso de Precipitación.....	47
7.3 Evaluación de la Eficiencia del Proceso de Precipitación Optimizado en una Solución Conteniendo Iones Hierro II.....	49
7.4 Análisis de la Superficie de Respuesta.....	53
8. CONCLUSIONES.....	55
9. RECOMENDACIONES.....	57
10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	58
10.1 Referencias de Internet.....	66
ANEXO 1.....	67
Superficie de Respuesta Experimento I.....	67
ANEXO 2.....	69
Superficie de Respuesta Experimento II.....	69