



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN UNITARIA DE
SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO A NIVEL LABORATORIO, MEDIANTE LA
EVALUACIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS DE INTERACCIÓN
INFLUYENTES Y DE RESPUESTA**

Claudia Beatriz Montenegro Franco

Asesorado por el Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

Guatemala, marzo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN UNITARIA DE
SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO A NIVEL LABORATORIO, MEDIANTE LA
EVALUACIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS DE INTERACCIÓN
INFLUYENTES Y DE RESPUESTA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

CLAUDIA BEATRIZ MONTENEGRO FRANCO
ASESORADO POR EL ING. QCO. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MARZO DE 2009

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN UNITARIA DE
SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO A NIVEL LABORATORIO, MEDIANTE LA
EVALUACIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS DE INTERACCIÓN
INFLUYENTES Y DE RESPUESTA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 26 de agosto de 2008.



Claudia Beatriz Montenegro Franco

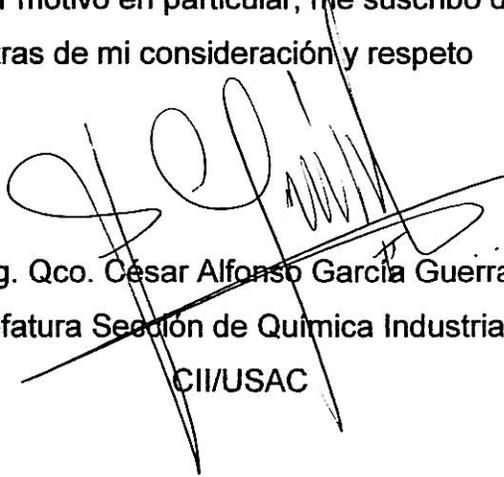


Guatemala, 13 de noviembre de 2008

Ingeniero Williams Álvarez M.
Director de Escuela de Ingeniería Química
Presente

Mediante la presente me dirijo a usted para informarle que como asesor de trabajo de graduación de la estudiante de Ingeniería Química Claudia Beatriz Montenegro Franco con carné no. 200312509 **titulado "Estudio Experimental de la Operación Unitaria de Separación Sólido-Líquido a Nivel Laboratorio Mediante La Evaluación de Diversos Parámetros de Interacción Influyentes y de Respuesta"**, he aprobado el informe final de dicho trabajo de graduación.

Sin otro particular motivo en particular, me suscribo de usted con las muestras de mi consideración y respeto


Ing. Qco. César Alfonso García Guerra
Jefatura Sección de Química Industrial
CII/USAC





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Guatemala, 11 de Febrero de 2009
Ref. EI.Q.050.2009

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-007-09-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria **CLAUDIA BEATRIZ MONTENEGRO FRANCO**, identificada con carné No. **2003-12509**, titulado: "**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN UNITARIA DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO A NIVEL LABORATORIO MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS DE INTERACCIÓN INFLUYENTES Y DE RESPUESTA**" el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico César Alfonso García Guerra, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Montenegro Franco** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Teresa Libey de León Arana, M.Sc. INGENIERA QUÍMICA

COORDINADORA

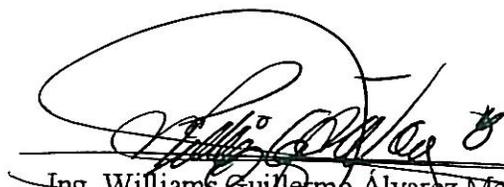
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación de la estudiante **Claudia Beatriz Montenegro Franco** titulado: **“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN UNITARIA DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO A NIVEL LABORATORIO, MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS DE INTERACCIÓN INFLUYENTES Y DE RESPUESTA”**, procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M.Sc.
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, marzo de 2,009

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.029.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN UNITARIA DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO A NIVEL LABORATORIO, MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS DE INTERACCIÓN INFLUYENTES Y DE RESPUESTA.** presentado por la estudiante universitaria **Claudia Beatriz Montenegro Franco**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Reinos
DECANO



Guatemala, marzo de 2009

/cc

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II:	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III:	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV:	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V:	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR:	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR:	Ing. César Alfonso García Guerra
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

DEDICATORIAS

A Dios,

Porque Él le da sentido a mi vida, me ha acompañado en todo momento y hoy me permite cumplir este sueño, como se lo pedí cuando empecé esta carrera diciéndole que si lograba cumplirlo iba a ser para gloria y honra Suya.

A mi abuelito José Adrián Montenegro (q.e.p.d),

Porque siempre confiaste y creíste en mi, ayudándome y dándome consejos cuando más lo necesitaba y porque sé que te hubiese gustado poder verme llegar hasta acá.

AGRADECIMIENTOS A

Dios,
porque sin Él nada de esto fuera posible.

Mis padres,
por creer en mí, por su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

Mi asesor, el Ing. César García,
por su asesoramiento científico y estímulo para seguir creciendo
intelectualmente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
GLOSARIO	XXIII
RESUMEN	XXXI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XXXIII
OBJETIVOS	XXXV
HIPÓTESIS	XXXVII
JUSTIFICACIÓN	XXXIX
INTRODUCCIÓN	XLV
1. MARCO TEÓRICO	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Sustancias extraíbles de los árboles	4
1.2.1 Extractivos del follaje	4
1.2.2 Extractivos de la madera	4
1.2.3 Extractivos de la corteza	5
1.2.3.1 Fracción lipofílica	6
1.2.3.2 Fracción hidrofílica	6
1.2.4 Taninos	7
1.2.4.1 Clasificación	7
1.2.4.1.1 Taninos hidrolizables	7
1.2.4.1.2 Taninos condensados	8
1.2.4.2 Extracción de taninos	9
1.2.4.2.1 Decantación/filtración	10
1.2.4.2.2 Decoloración	10
1.2.4.2.3 Evaporación	10

1.3 Los Manglares	11
1.3.1 Regiones geográficas de los manglares	11
1.3.2. Mangle Rojo	12
1.3.2.1 Distribución geográfica	12
1.3.2.2 Usos	13
1.4 Separación sólido-líquido	15
1.4.1 Naturaleza del material	18
1.4.1.1 Sustancias biológicas	18
1.4.1.2 Materiales inorgánicos y orgánicos	18
1.4.2 Preparación del sólido	19
1.4.2.1 Materiales inorgánicos y orgánicos	19
1.4.2.2 Materiales animales y vegetales	20
1.4.3 Naturaleza del disolvente	21
1.4.3.1 Fluidos incompresibles	21
1.4.3.1.1 Disolventes Polares	21
1.4.3.1.2 Disolventes no polares	21
1.4.3.2 Fluidos compresibles	21
1.4.3.3 Fluidos supercríticos	22
1.4.3.4 Mezclas de disolventes	22
1.4.3.4.1 Cambio en el pH	22
1.4.3.4.2 Cambio en la constante dieléctrica	23
1.4.4 Factores que influyen en la velocidad y eficiencia de lixiviación	25
1.4.4.1 Temperatura	25
1.4.4.2 Características del solvente	25
1.4.4.3 Características de las partículas	26
1.4.4.4 Agitación	29
1.4.4.5 Tiempo de residencia	32
1.4.4.6 Relación sólido/líquido	34

1.4.4.7	Etapas de extracción	34
1.4.5	Monitoreo del proceso	35
1.4.5.1	Densidad	35
1.4.5.2	Ph	36
1.4.5.3	Viscosidad	36
1.4.5.4	Color	36
1.4.5.5	Pérdida de peso del sólido	37
1.4.5.6	Tamizaje fotoquímico	37
1.4.5.7	Índice de refracción	37
1.4.5.8	Sólidos extractables	37
1.4.6	Técnicas de operación y equipo en la lixiviación	38
1.4.7	Consideraciones en el diseño del equipo de lixiviación	38
1.4.7.1	Geometría del recipiente	38
1.4.7.2	Requerimientos del equipo	38
1.4.7.3	Contenido del sólido	38
1.4.7.4	Proporción volumétrica material/recipiente	39
1.4.7.5	Intercambiador de calor	39
1.4.8	Eficiencia de las etapas de lixiviación	39
1.4.9	Balance de materia	40
1.4.9.1	Balance de materia en una etapa	40
1.4.9.1.1	Sólido por lixiviar	41
1.4.9.1.2	Solución extractiva al inicio	41
1.4.9.1.3	Sólido lixiviado	41
1.4.9.1.4	Solución extractiva al final	42
1.5.	Diseño de tanques con agitación para contacto líquido sólido	43
1.5.1	Suspensión de sólidos	43
1.5.2	Cálculo de la potencia requerida para extracción a nivel laboratorio	44
1.6	Equilibrio de ionización para una solución	

de la sal de ácido dibásico Na ₂ A	54
1.6.1 Equilibrios de ionización para una solución de la sal ácida dibásica NaHA	55
1.6.2 Equilibrios de ionización para soluciones de las sales de ácido dibásico NaHA y Na ₂ A	56
1.7 Capacidad Amortiguadora	57
2. MARCO METODOLÓGICO	59
2.1 Localización	59
2.2 Recursos humanos	59
2.3 Obtención de las muestras	60
2.4 Diseño experimental	61
2.4.1 Modelos matemáticos	61
2.4.2 Análisis estadístico	61
2.5 Generación de Datos	66
2.6 Metodología experimental	68
2.6.1 Materiales y equipo a utilizar en la experimentación	68
2.6.1.1 Materia prima	68
2.6.1.2 Cristalería	69
2.6.1.3 Equipo	70
2.6.1.4 Reactivos	73
2.6.2 Equipo de lixiviación con reflujo	74
2.6.3 Técnica de extracción de sólidos solubles a nivel Laboratorio	75
2.6.4 Impacto ambiental	78
2.6.4.1 Soluciones de sulfito de sodio	78
2.6.4.2 Corteza de mangle rojo	78
3. RESULTADOS	79

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
BIBLIOGRAFÍA	109
APÉNDICES	111
ANEXOS	149

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagrama de Ishikawa para la operación unitaria de lixiviación	XLI
2	Taninos hidrolizables	8
3	Flavan-3,4-diol	9
4	Mangle rojo	12
5	Al interior de los bosques de mangle rojo.	14
6	Matraz de Le Chatelier	28
7	Capa límite de una placa plana	30
8	Lixiviación en una etapa	41
9	Gráfica T/di	48
10	Diagrama de Ishikawa únicamente con los parámetros considerados para la operación experimental a nivel laboratorio	68
11	Cantidad de corteza de mangle para tamaños de partícula correspondientes a tamices 50/80 y 10/14	69
12	Plancha de calentamiento	70
13	Bomba de vacío	70
14	Balanza	71
15	Potenciómetro	71
16	Conductímetro	72
17	Incubadora	72
18	Lámpara Estroboscópica	73
19	Solución de sulfito de sodio	73

20	Equipo de lixiviación con reflujo.	74
21	Diagrama de flujo para el proceso de extracción de sólidos solubles.	75
22	Gráfica de la evolución del pH en función del tiempo para la maceración dinámica de corteza de mangle rojo utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/10 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.	79
23	Gráfica de la evolución del pH en función del tiempo para la maceración dinámica de corteza de mangle rojo utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/15 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.	80
24	Gráfica de la evolución del pH en función del tiempo para la primera etapa de monitoreo de la maceración dinámica de corteza de mangle rojo para los dos tamaños de partícula, las dos relaciones sólido/líquido (w/v) y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.	81
25	Gráfica de la evolución de la densidad en función del tiempo para el monitoreo de la maceración dinámica de corteza de mangle rojo, utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/10 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.	82

26	Gráfica de la evolución de la densidad en función del tiempo para la maceración dinámica de corteza de mangle rojo, utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/15 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.	83
27	Gráfica de correlaciones lineales para el segundo período de monitoreo de los sólidos extractables en función del tiempo para la lixiviación de corteza de mangle rojo para todas las combinaciones de concentración de coadyuvante, tamaño de partícula y relación sólido/líquido (w/v) utilizadas.	84
28	Diseño de las unidades de maceración dinámica	89
29	Toma de muestras para el monitoreo de la lixiviación	90
30	Medición del pH durante el monitoreo	90
31	Curva de disociación del ácido sulfuroso	93
32	Monitoreo de los sólidos extractables	96
33	Medición de la densidad para el monitoreo	98
34	Procedimiento para la elaboración de Trabajo de graduación acerca del monitoreo de la lixiviación	110
35	Diagrama de lixiviación para el proceso de extracción de taninos del mangle rojo	111
36	Cuadro de distribución de diferencia significativa en los parámetros estudiados para el análisis de varianza del pH	141
37	Cuadro de distribución de diferencia significativa en los parámetros estudiados para el análisis de varianza de la densidad	143
38	Cuadro de distribución de diferencia significativa en los parámetros estudiados para el análisis de varianza de los sólidos extractables	145

39	Ficha de seguridad del sulfito de sodio	146
40	Corte longitudinal tangencial de madera de mangle rojo 40 aumentos	149
41	Corte Longitudinal Tangencial de Madera de Mangle Rojo. Aumento: 100	150
42	Corteza de mangle rojo. 40 aumentos	151
43	Corteza de mangle rojo teñido. 100 aumentos.	152
44	Corteza de mangle rojo 400 aumentos	153
45	Corte longitudinal tangencial de madera de mangle rojo. 400 aumentos.	154

TABLAS

I	Comparación en la composición química de madera y corteza de coníferas.	6
II	Datos de potencia y rpm requeridas para las distintas soluciones.	53
III	Variables para el diseño factorial.	63
IV	Análisis de varianza para un experimento de tres factores con n réplicas.	65
V	Períodos para el monitoreo de la lixiviación.	67
VI	Monitoreo para el curso de la lixiviación.	67
VII	Correlaciones lineales para el segundo y tercer período de monitoreo de pH en función del tiempo a 60°C y 1000 rpm.	85
VIII	Correlaciones lineales para el segundo y tercer período de monitoreo de la densidad en función del tiempo a 60°C y 1000 rpm.	86

IX	Tabla. Correlaciones lineales para el segundo período de monitoreo de los sólidos extractables en función del tiempo a 60°C y 1000 rpm.	87
X	Cambio de pH total en las soluciones extractoras de acuerdo a la concentración de coadyuvante con la que fueron preparadas	92
XI	Capacidad amortiguadora para las soluciones de sulfito de sodio a diferentes concentraciones.	95
XII	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm	112
XIII	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm	113
XIV	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm	113
XV	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	114
XVI	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	114
XVII	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	115

XVIII	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm	115
XIX	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm	116
XX	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	116
XXI	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	117
XXII	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	117
XXIII	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	118
XXIV	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	119
XXV	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	120

XXVI	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	120
XXVII	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	121
XXVIII	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	122
XXIX	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	122
XXX	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	123
XXXI	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	124
XXXII	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	124
XXXIII	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	125

XXXIV	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	126
XXXV	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	126
XXXVI	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	127
XXXVII	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	127
XXXVIII	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	127
XXXIX	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	128
XL	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	129

XL I	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	129
XL II	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	130
XL III	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	130
XL IV	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	131
XL V	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	131
XL VI	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	132
XL VII	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	132
XL VIII	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	133

- XLIX Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na_2SO_3 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm. 133
- L Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na_2SO_3 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm. 134
- LI Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na_2SO_3 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm. 134
- LII Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na_2SO_3 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm. 135
- LIII Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na_2SO_3 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm. 135
- LIV Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na_2SO_3 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm. 136
- LV Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na_2SO_3 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm. 136

LVI	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm.	137
LVII	Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	137
LVIII	Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	138
LIX	Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na ₂ SO ₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm.	138
LX	Análisis de varianza unifactorial para el pH.	139
LXI	Análisis de varianza de tres factores para el pH.	140
LXII	Análisis de varianza unifactorial para la densidad.	141
LXIII	Análisis de varianza de tres factores para la densidad.	142
LXIV	Análisis de varianza unifactorial para los sólidos extractables..	143
LXV	Análisis de varianza de tres factores para los sólidos extractables	144

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
u_o	Velocidad inicial del fluido
c_{Ao}	Concentración inicial de soluto
u_x	Velocidad del fluido en un punto x de la superficie
c_{Ai}	Concentración de soluto en el fluido en la superficie del sólido
A	Disolvente puro
B	Coadyuvante
C	Soluto soluble
κ	Constante dieléctrica
Y	Sólido por lixiviar
Z	Solución extractiva al inicio de la operación
W	Sólido lixiviado
V	Solución de lixiviación obtenida al final de la extracción
X_{AZ}	Fracción másica de agua en la solución extractiva al inicio de la operación
X_{AW}	Fracción másica de agua en el sólido lixiviado.

X_{AV}	Fracción másica de agua en la solución extractiva al final de la operación.
X_{BZ}	Fracción másica de coadyuvante en la solución extractiva al inicio de la operación.
X_{BW}	Fracción másica de coadyuvante en el sólido lixiviado.
X_{BV}	Fracción másica de coadyuvante en la solución extractiva al final de la operación.
X_{CY}	Fracción másica de solutos solubles en el sólido por lixiviar.
X_{CW}	Fracción másica de solutos solubles en el sólido lixiviado.
X_{CV}	Fracción másica de solutos solubles en la solución extractiva al final de la operación.
ρ_m	Densidad de la suspensión
Φ_{Sm}	Fracción de volumen de sólidos en la suspensión.
V_m	Volumen de la suspensión
Z'	Altura arriba del plano medio del impulsor superior.
N	Número de impulsores sobre el eje.
$V_{t,S}$	Velocidad terminal de asentamiento
Re	Número de Reynolds

Φ_{SS}	Fracción volumen de sólidos en el lecho de sólidos después de la sedimentación final en un líquido tranquilo.
P	Potencia del agitador
G	Aceleración de la gravedad
Gc	Factor de conversión
T	Diámetro del tanque
Di	Diámetro del impulsor
Dp	Diámetro de la partícula
$\Delta\rho$	Cambio de la densidad
μ_L	Viscosidad del fluido
μ_m	Viscosidad de la suspensión
N	Rapidez de giro
C'	Distancia, impulsor hasta el fondo del tanque
Ss	Sólido libre de adsorbato
ρ_L	Densidad del fluido
ρ_p	Densidad de la partícula
k_1	Constante de equilibrio no. 1 de la sal de un ácido diprótico
k_2	Constante de equilibrio no. 2 de la sal de un ácido diprótico
$\text{pH}_{\text{osistema}}$	PH inicial del sistema
k_w	Producto iónico del agua
$C_{s,1}$	Molaridad inicial de la sal NaHA.
$C_{s,2}$	Molaridad inicial de la sal Na ₂ A

pK_w	Logaritmo negativo del producto iónico del agua.
β	Capacidad amortiguadora
pH_{exp}	PH medido experimentalmente
C_{NaHA}	Concentración de la sal NaHA
C_{Na_2A}	Concentración de la sal Na ₂ A
C_0	Concentración inicial de la solución
C_x	Concentración de la solución al momento x.
ΔF	Diferencia entre el valor F crítico y el valor F experimental.
$p(\Delta F)$	Logaritmo de la diferencia entre el valor F crítico y el valor F experimental.

GLOSARIO

Absorción	Proceso en el cual átomos, moléculas o iones pasan de una primera fase a otra incorporándose al volumen de la segunda fase.
Ácidos nucleicos	Biopolímeros constituidos de mononucleótidos y fosfatos.
Adsorción	Proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material
Albura	Capa blanda de la madera de los árboles, de color blanquecino, situada entre la corteza y el duramen.
Álcali	Compuesto químico que acepta protones, tiene un pH por encima de 7.0. Tiene carácter básico y en disolución acuosa da lugar a la formación de iones hidróxido.

Alcaloides

Cualquiera de los compuestos orgánicos nitrogenados, sintetizados, generalmente, a partir de aminoácidos, de carácter básico, que se extraen de ciertos vegetales y que tienen propiedades alcalinas.

Aminoácido

Sustancia química orgánica en cuya composición molecular entran un grupo amínico y otro carboxílico. Son los componentes básicos de las proteínas.

Constante dieléctrica

Un parámetro característico de la capacidad relativa de un material dieléctrico en un capacitor para producir un almacenamiento de energía.

Corteza

Parte externa del tronco y las ramas de árboles y plantas

Difusión

Distribución espontánea de la materia, calor o momento, es un tipo de fenómeno de transporte. Es el movimiento de partículas desde los puntos de alta concentración hacia los de baja concentración.

Duramen	Parte central, más seca, dura y oscura del tronco y de las ramas más gruesas de un árbol.
Éster	Compuesto orgánico formado por la combinación de un ácido orgánico y un alcohol.
Esteroides	Estructura policíclica de la que derivan compuestos de interés biológico notable, tales como esteroides, ácidos biliares, hormonas, etc.
Estomas	Pequeños poros de las plantas localizadas en la superficie de sus hojas.
Fitoquímica	Conocimiento químico de los principales constituyentes en una planta, estudio de los métodos adecuados de extracción, separación e identificación de sustancias en forma selectiva o general.
Flavonoides	Término genérico con que se identifica a una serie de metabolitos secundarios de las plantas que se caracterizan por ser polifenólicos y solubles en agua.

Geotropismo

Tendencia de una planta en su crecimiento, causado por la gravedad. Los tallos principales de una planta presentan un geotropismo negativo al crecer hacia arriba. Las raíces principales son positivamente geotrópicas, ya que crecen hacia abajo debidamente orientadas en la dirección del estímulo de la gravedad.

Hidrólisis

Es una reacción química del agua con una sustancia. Entre las sustancias que pueden sufrir esta reacción se encuentran numerosas sales, que al ser disueltas en agua, sus iones constituyentes se combinan con los iones hidronio u oxonio, H_3O^+ o bien con los iones hidroxilo, OH^- , o ambos.

Lenticela

En la epidermis de las plantas leñosas, protuberancia visible a simple vista, de forma lenticular, que reemplaza a los estomas de la desaparecida epidermis.

Lignina

Polímero amorfo polifenólico que une las fibras de la madera en el árbol y le proporciona rigidez y su color marrón.

Lixiviación

Proceso en el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

Maceración

Proceso de extracción sólido-líquido. El producto sólido posee una serie de compuestos solubles en el líquido extractante que son los que se pretende extraer.

Metabolitos secundarios

Compuestos químicos sintetizados por las plantas que cumplen funciones no esenciales en ellas, de forma que su ausencia no es fatal para la planta, no tienen un rol directo en el crecimiento o reproducción.

Monosacáridos

Son los carbohidratos más sencillos, conteniendo de tres a seis átomos de carbono. Compuesto orgánico en el que dos átomos de carbono se hallan unidos por un enlace doble.

Neumatóforo

Raíz de geotropismo negativo que aparece en las plantas de zonas muy anegadas, sirviendo para la respiración.

Oligosacáridos

Son polímeros de monosacáridos, formados por la unión de 2 a 10 moléculas de ellos.

Ósmosis

Difusión de un solvente a través de una membrana semipermeable, desde una solución más diluida a una mas concentrada

PH

Medida cuantitativa de la acidez o basicidad (alcalinidad) de una solución líquida y se representa en una escala que va de 0 a 14 siendo 7 el valor neutro, por ejemplo el valor de 1 es el de una solución muy ácida y el de 14 muy alcalina.

Plántula

La planta en sus primeros estadios de desarrollo, desde que germina hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas.

Polaridad

Es una propiedad de las moléculas que representa la desigualdad de las cargas eléctricas en la misma. Al formarse una molécula de forma covalente el par de electrones tiende a desplazarse hacia el átomo que tiene mayor carga nuclear (más número de protones). Esto origina una densidad de carga desigual entre los núcleos que forman el enlace.

Polifenoles

Grupo de sustancias químicas encontradas en plantas y caracterizadas por la presencia de más de un grupo fenol por molécula.

Polímero

Macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

Polisacárido

Hidrato de carbono que, como el almidón o la celulosa, está formado por varios monosacáridos

Saponinas

Son carbohidratos de esteroides, llamadas así por sus propiedades como las del jabón: cada molécula está constituida por un elemento soluble en lípidos (el esteroide) y un elemento soluble en agua (el azúcar), y forman una capa jabonosa cuando son agitadas en agua.

Suberina

Polímero presente en las paredes celulares de las partes subterráneas de las plantas terrestres, además de en las partes leñosas y en donde hubo heridas que sanaron. Su estructura química es pobremente conocida.

Taninos

Son una mezcla variable y compleja de compuestos químicos, de sabor amargo y astringente, pero en general son ésteres de una azúcar con un número variable de ácidos fenólicos

RESUMEN

Se llevó a cabo el proceso de lixiviación de la corteza de mangle rojo (*Rhizophora mangle*), con el fin de monitorear el proceso por medio de la medición de tres parámetros respuestas: pH, densidad y cantidad de sólidos extractables, en función del tiempo.

Dichos parámetros respuesta fueron evaluados en diferentes tratamientos en los que se realizaron variaciones del tamaño de partícula de la corteza de mangle rojo, de la relación sólido/líquido y de la concentración de coadyuvante (sulfito de sodio (Na_2SO_3)).

Para ello se armó una unidad de maceración dinámica constituida por un balón de extracción, un condensador para evitar pérdidas del solvente, una plancha de calentamiento y cáscaras de coco cubriendo el balón para disminuir las pérdidas de calor. Posteriormente, cada hora se introdujo una manguera y se succionaron alícuotas con la ayuda de una jeringa para proceder a la medición del pH, la densidad y los sólidos extractables.

El pH se midió con un potenciómetro previamente calibrado, la densidad se midió con un micropicnómetro y para los sólidos extractables se colocaron alícuotas de la solución sobre recipientes tarados para secarlas en un horno por 12 horas y así determinar la cantidad de sólidos remanentes.

A partir de estos datos fue posible mostrar el comportamiento de los parámetros respuesta ya mencionados en función del tiempo por medio de representaciones gráficas. Y además, se lograron determinar modelos matemáticos que los describen respectivamente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La lixiviación como operación unitaria puede estudiarse y evaluarse en distintos niveles: a nivel submicro, a nivel micro, a nivel macro y supramacro, entre otros. Siendo siempre el fin convencional el buscar la manera de elevar la eficiencia de la extracción. Para conseguir esto, generalmente se hace un escalamiento desde el nivel más pequeño hacia el más grande, a partir de un experimento de laboratorio o planta piloto hasta una unidad de escalamiento completa, como puede ser a nivel industrial.

Entonces, sin la existencia de un modelo micro o semimicro que brinde resultados importantes rindiendo una alta eficiencia mediante lixiviación, sería mucho más difícil conseguir el mismo fin en unidades de escalamiento mayores. Sin embargo, si se logra determinar un modelo de este tipo, será posible por medio de correlaciones, extrapolar para niveles mayores.

OBJETIVOS

General

Evaluar una técnica experimental de lixiviación a nivel laboratorio con base en el manejo de tres factores operacionales y tres parámetros respuesta en función del tiempo.

Específicos:

1. Analizar la variación del **parámetro pH** en función del **tiempo durante el curso de la lixiviación** por **efecto combinado de los factores operacionales**: tamaño de partícula de corteza de mangle, concentración del coadyuvante (sulfito de sodio, Na_2SO_3) y relación corteza de mangle/volumen de la solución extractora.
2. Analizar la variación del **parámetro densidad** en función **del tiempo durante el curso de la lixiviación por efecto combinado de los factores operacionales**: tamaño de partícula de corteza de mangle, concentración del coadyuvante (sulfito de sodio, Na_2SO_3) y relación corteza de mangle/volumen de la solución extractora.

3. Analizar la variación del **parámetro sólidos extractables** en función del **tiempo durante el curso de la lixiviación por efecto combinado de los factores operacionales**: tamaño de partícula de corteza de mangle, concentración del coadyuvante (sulfito de sodio, Na_2SO_3) y relación corteza de mangle/volumen de la solución extractora.

4. Elaborar un modelo matemático de regresión lineal o no lineal de acuerdo a los tres parámetros respuesta evaluados con base en la combinación de factores operacionales y en función del tiempo.

HIPÓTESIS

Es posible evaluar la técnica de lixiviación tipo maceración dinámica con reflujo a nivel laboratorio para establecer una evolución de respuesta en función de tres parámetros medibles (pH, densidad y sólidos extractables).

JUSTIFICACIÓN

La lixiviación es una operación unitaria sumamente útil en la industria química; sin embargo, en muchas ocasiones no se toman en cuenta todas las variables que influyen de manera importante en el éxito de la misma.

Por ello, en el presente trabajo se han identificado los factores más importantes a considerar al momento de realizar una extracción sólido-líquido.

De acuerdo al diagrama de Ishikawa presentado en esta sección (figura 1), es necesario tomar en cuenta la naturaleza del material con el que se va a trabajar, pues éste puede ser de tipo orgánico, inorgánico o biológico (ya sea animal o vegetal). Y de esto dependerá la preparación que deba recibir el mismo, como por ejemplo que tipo de secado y molienda es la más recomendada.

Además, es importante considerar las características de las partículas; tales como su densidad, geometría, tamaño y porosidad. Debido a que todas ellas influyen en la manera en que se lleva a cabo la extracción.

Asimismo, deberá determinarse la naturaleza del solvente, pues éste puede ser un fluido compresible, incompresible o incluso un fluido supercrítico cuando se trabaja en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico y que al encontrarse en este estado eleva su poder disolvente.

Siendo más frecuente el uso de fluidos incompresibles, los cuales pueden ser polares, no polares o bien soluciones de dos o más. La elección del mismo dependerá principalmente de las características del sólido y de la afinidad hacia el componente que se desea extraer.

En ocasiones, es de suma utilidad el uso de un coadyuvante que, tal como su nombre lo indica, contribuye con el disolvente para permitir la efectividad de la extracción. Entre los mecanismos por medio de los cuales actúan los coadyuvantes como facilitadores de la lixiviación se encuentran la neutralización, la formación de complejos, el cambio en la constante dieléctrica de la solución y la redoximetría; entre otros.

Sin embargo, un coadyuvante también puede actuar como protector o preservante. Por ejemplo, existen preservantes que inhiben la inversión de la sacarosa o también antimicrobianos que reducen el riesgo de fermentaciones; tales como el ácido cítrico o el tolueno.

Las condiciones del entorno, principalmente la temperatura y la presión de operación son fundamentales para la operación unitaria. Excepto en el caso en el que se trabaje con fluido supercrítico, comúnmente la lixiviación se realiza a presión atmosférica. Ahora bien, la temperatura puede ser inferior o igual al punto de fusión, corresponder al punto de ebullición del disolvente o al estado supercrítico. Además, la lixiviación puede llevarse a cabo a temperatura ambiente o a una temperatura específica.

En cuanto al proceso de extracción, la extracción puede ser de tipo estática o dinámica. En la extracción estática ambas fases se encuentran inmóviles, mientras que la extracción dinámica se refiere a la presencia de dos fases en movimiento y requiere, por lo tanto, de mezcla y agitación o de dispersión. Con base en estos tipos de extracción, existen diversas técnicas que pueden emplearse: la maceración estática o dinámica, la percolación y el lavado.

Un aspecto de relevancia durante el proceso de extracción es el tiempo de residencia del material, el cual es función del tamaño de partícula y de factores de transferencia de masa y de operación (tal como la agitación). Además, el tiempo de extracción puede estar constituido por una única etapa o por etapas múltiples.

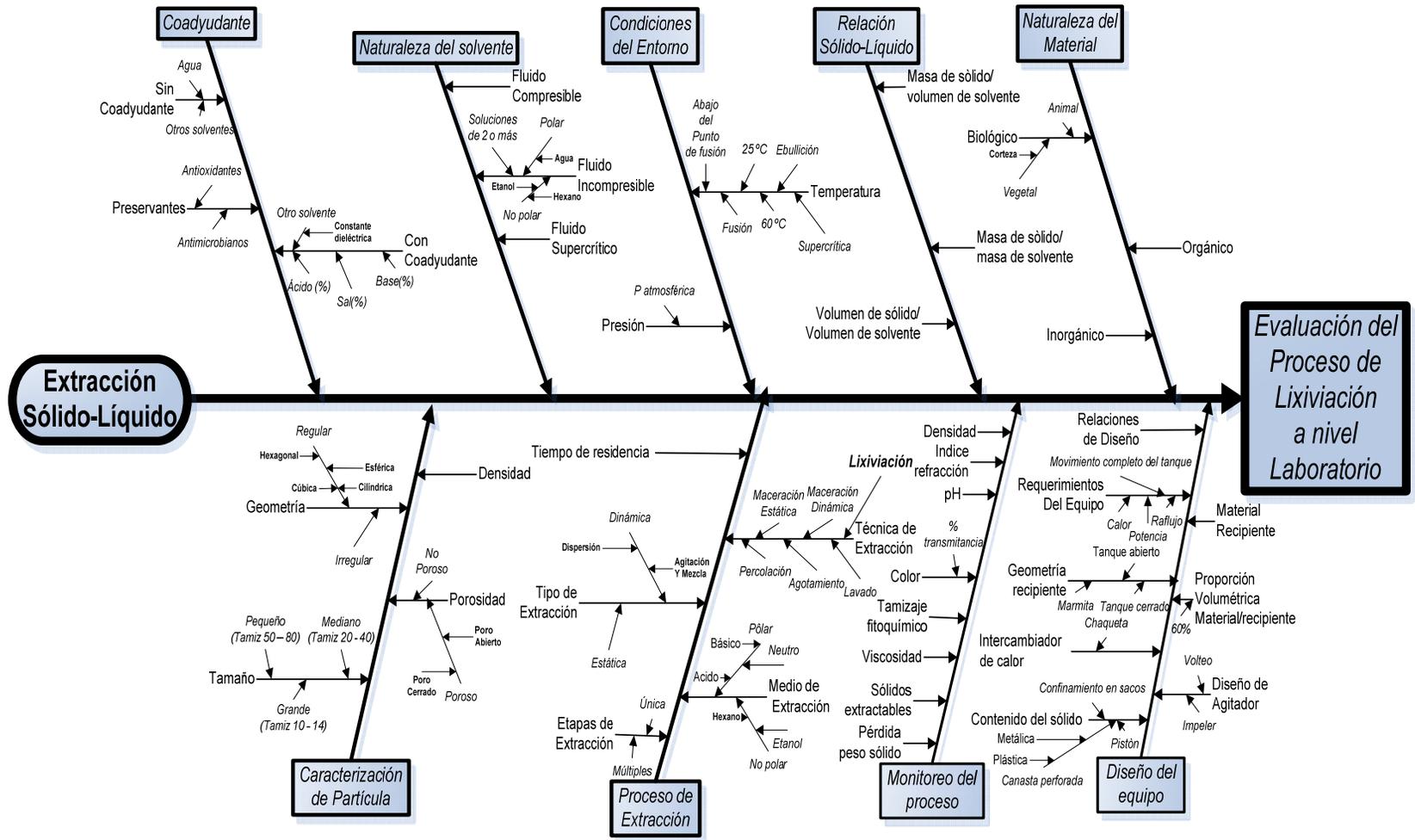
Para observar el curso de la lixiviación debe realizarse un monitoreo constante. Esto, por medio de la medición de ciertos parámetros medibles que varían a lo largo de la extracción. Por ejemplo, pueden existir variaciones en el pH, en la densidad, en el índice de refracción, en la viscosidad, en el color, en los sólidos extractables, etc.

Por último, para el diseño del equipo existen relaciones de diseño, requerimientos específicos de potencia, calor, reflujo y movimiento completo del tanque. Asimismo, debe evaluarse el material y geometría más adecuada del recipiente. El sólido puede colocarse en sacos, en una canasta perforada o estar sometido a la acción de un pistón.

Por otro lado, es necesario determinar una proporción volumétrica material/recipiente adecuada que impida que el sólido salpique o se acumule en las paredes del recipiente.

Con respecto a la agitación, ésta puede conseguirse con el uso de impellers o por medio del volteo del tanque. Finalmente, puede ser útil el uso de un intercambiador de calor, tal como una chaqueta de calentamiento, que permita evitar las pérdidas de calor en el sistema.

Figura 1 Diagrama de Ishikawa para la operación unitaria de lixiviación



Fuente: Referencias 1-11

INTRODUCCIÓN

El proceso de lixiviación es una de las operaciones unitarias más antiguas y más utilizadas en la industria química. Consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla sólida, debido al contacto con un disolvente líquido.

La lixiviación juega un papel importante en muchas industrias, siendo la metalúrgica la que más la utiliza, debido a que se emplea en el procesamiento de aluminio, cobalto, manganeso, níquel y zinc.

Asimismo es utilizada en la industria azucarera para separar el azúcar de la remolacha por lixiviación con agua caliente, en la industria farmacéutica se recuperan medicamentos a partir de las raíces y hojas de plantas, en la industria alimenticia se preparan café y té por medio de operaciones de lixiviación y en la industria curtidora se utilizan taninos que se disuelven a partir de diferentes cortezas arbóreas mediante lixiviación.

Sin embargo, para obtener altas eficiencias de lixiviación es necesario tomar en cuenta distintos factores. Por ello, en el presente trabajo con base a la relevancia de información se ha planteado un diagrama de espina de pescado (Ishikawa) y se han identificado dichos factores claves a seleccionar para mejorar la eficiencia de lixiviación.

Entre estos se encuentran: la naturaleza y características del material y del solvente, la utilización de coadyuvantes, las condiciones del entorno y la relación sólido/líquido. Además es de importancia determinar el tipo de proceso de extracción a utilizar (lixiviación, percolación, maceración o lavado) y realizar un constante monitoreo del proceso por medio de algunos parámetros indicativos del curso de la lixiviación (pH, viscosidad, densidad, color, sólidos extractables, etc.). Finalmente, deben considerarse los aspectos relacionados con el diseño del equipo, tales como el material y geometría del recipiente, el diseño del agitador, los requerimientos de potencia, calor y reflujo; entre otros.

Siendo así el fin principal de este trabajo de investigación evaluar el efecto de diversos parámetros, de acuerdo a un sólido a tratar y medir la evolución del extracto en función del tiempo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

En los últimos 5 años, del 2003 al 2007, se han realizado 33 estudios de trabajos de graduación referentes al tema de lixiviación; principalmente para la obtención de distintos compuestos a partir de materiales vegetales. Sin embargo, se ha dado más énfasis a la caracterización de los compuestos obtenidos, a su calidad y a sus propiedades fisicoquímicas; relegando la operación unitaria de lixiviación y a los parámetros de operación necesarios para obtener rendimientos más eficaces y eficientes de extracción.

En cuanto al disolvente utilizado, no se ha explicado adecuadamente el criterio de la elección del mismo, es decir cuál es la interacción que efectúa y que permite la disolución.

En algunos casos se han utilizado mezclas de etanol, generalmente al 70% (v/v), sin informar que el uso del mismo se ha debido a que favorece la solubilidad del compuesto a extraer por medio de un cambio en la constante dieléctrica de los solventes constituyentes de la mezcla, lo cual conlleva a un cambio en la polaridad de la misma.

En otras ocasiones, comúnmente para extracción de taninos se ha utilizado sulfito de sodio, pero no se ha explicado cómo este coadyuvante permite que se dé la extracción; cómo por medio de hidrólisis alcalina neutraliza los taninos de naturaleza ácida, logrando que estos pasen a su forma iónica conjugada, la cual es más soluble y fácil de lixiviar puesto que se encuentran en medio acuoso.

Otro factor que no se ha explicado con respecto a la mezcla utilizada como medio extractor; comúnmente mezclas de agua-etanol al 70% v/v es que, tal como se mencionó anteriormente, la constante dieléctrica conseguida de la mezcla modifica la constante dieléctrica del agua y del etanol, modificando también así su polaridad y su capacidad de asociación a otras moléculas.

En el caso del sulfito de sodio, la práctica común ha sido utilizar una solución al 2% (w/v), olvidando que lo más importante es el pH de la solución a la concentración elegida. Es decir, que como la extracción de taninos se lleva a cabo por medio de hidrólisis alcalina, el efecto de la misma dependerá del pH, el cual a la vez es función de la concentración de sulfito de sodio.

Respecto al tiempo de extracción, generalmente se ha elegido un tiempo en el que se considere que se ha conseguido el agotamiento. Esto último, determinado simplemente por medio del color obtenido de la solución extractiva, ya que se supone que se alcanza un punto en el que ya no se puede extraer más puesto que el disolvente empleado ya se observa de un color demasiado pálido. Pero esto la mayoría de las veces no se ha determinado con un colorímetro, sino simplemente por un método visual.

Asimismo, el monitoreo del proceso ha sido escaso puesto que no se ha determinado constantemente a lo largo del mismo algún parámetro que indique cómo se está llevando a cabo la extracción, tal como puede ser la viscosidad, la densidad, el pH, etc.

Además, la relación sólido/líquido convencional ha sido 1/10 (w/v), pero no se ha estudiado si ésta es la más adecuada. No se ha determinado si existe otra relación mayor que permita que la extracción se realice de manera más eficiente, puesto que esto ocasionaría una disminución en los costos de evaporación del disolvente; una vez terminada la extracción, para la concentración de los taninos.

Otros de los aspectos que no se han estudiado, sino que sólo se han aceptado como adecuados, debido a que existen investigaciones realizadas por otras fuentes que los acreditan como tales; son la temperatura, el tamaño de partícula y la agitación requerida.

Finalmente, con respecto a la unidad de lixiviación, por lo general se ha utilizado un beaker para colocar al solvente extractor con el material sólido, ignorando que éste no es el más adecuado, ya que debido a su forma y a la agitación producida; residuos del sólido pueden quedarse adheridos a las paredes del recipiente. Además, se ha utilizado reflujo en el sistema, pero tampoco se ha enfatizado que esto se debe a que por medio de éste se consigue un control de la evaporación del disolvente, evitando así pérdidas del mismo debido a que permite que lo que se evapora se vuelva a condensar. El hecho de que ocurra o no evaporación dependerá de la presión de vapor del disolvente, la cual es función de la temperatura.

A la vez, tampoco se ha buscado alguna manera de lograr un calentamiento uniforme del recipiente que contiene el sólido con el líquido, obviando el uso de algún material aislante para dicho fin.

1.2 Sustancias extraíbles de los árboles

Existe una considerable variación en la distribución de los extraíbles en un árbol; ellos se encuentran distribuidos en follaje, madera, corteza y raíces. La corteza y las raíces son las partes donde se encuentran en mayor concentración los extraíbles.

Por lo general, se refieren a una inmensa variedad de compuestos orgánicos que en términos de trabajo se pueden remover de la pared celular mediante disolventes orgánicos o bien mediante arrastre de vapor.

1.2.1 Extractivos del follaje

Oscilan entre 30-36 %. Pueden dividirse en dos grandes grupos: las sustancias solubles en agua y los solubles en disolventes orgánicos. Entre las sustancias solubles en agua extraídas del follaje se encuentran diferentes clases: Vitaminas (C, B1, B2, B6, H, ácido fólico), compuestos nitrogenados), ácidos, sustancias fenólicas, azúcares (mono y oligosacáridos) y cenizas. Mientras que en disolventes orgánicos fundamentalmente se extraen grasas, resinas y ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, ceras y fitoesterinas

1.2.2 Extractivos de la madera

Son sustancias que pueden extraerse mediante agua, disolventes orgánicos, vapor de agua y mediante un exprimido mecánico.

Entre las sustancias extraíbles se encuentran los más diversos compuestos orgánicos e inorgánicos y su presencia en diferentes especies es relativa.

A los azúcares, el almidón y algunos compuestos nitrogenados se les encuentra en la albura. Las sustancias fenólicas se encuentran normalmente en el duramen. Aproximadamente de 3-10 % de la madera seca está constituida por sustancias extraíbles.

1.2.3 Extractivos de la corteza

Químicamente ***la corteza difiere de la madera por la presencia de polifenoles y suberina, así como por la presencia de un menor porcentaje de polisacáridos y un porcentaje más alto de extractivos.***

Algunas comparaciones de los porcentajes de sustancias presentes en la corteza y madera se muestran en la tabla I a continuación.

Tabla I. **Comparación en la composición química de madera y Corteza de coníferas**

Sustancia	Madera	Corteza
Lignina	25-30%	40-55%
Polisacáridos	66-72%	30-48%
Extractivos	0,2-0,9%	0,2-2,5%
Cenizas	0,2-0,6%	> 2,0

Fuente: Einsparh, 1976.

Los extractivos se dividen en lipofílicos e hidrofílicos, aunque no existen fronteras que los delimiten. El contenido es superior que en la madera. **Varía entre 20-40 % de masa de corteza seca.** Incluye a un grupo heterogéneo de sustancias.

1.2.3.1 Fracción lipofílica

Extraíbles con disolventes apolares (éter etílico, diclorometano, etc.). Consisten en grasas, ceras, terpenos y terpenoides y alcoholes alifáticos superiores.

1.2.3.2 Fracción hidrofílica

Comprende los extraíbles en agua sola o con disolventes polares (acetona, alcohol etílico, etc.). **Contienen grandes cantidades de constituyentes fenólicos, muchos de ellos, especialmente taninos condensados (ácidos fenólicos) pueden ser extraídos sólo como sales con disolución diluida de álcali.**

1.2.4 Taninos

Los taninos son sustancias que se producen en diversas partes de las plantas, como son: corteza, frutos, hojas, raíces y semillas. Los taninos son polímeros polifenólicos producidos en las plantas como compuestos secundarios y que tienen la habilidad de formar complejos con proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos, esteroides, alcaloides y saponinas.

Los taninos son una mezcla variable y compleja de compuestos químicos, de sabor amargo y astringente, pero en general son ésteres de una azúcar con un número variable de ácidos fenólicos.

1.2.4.1 Clasificación

Los taninos pueden ser hidrolizables o condensados.

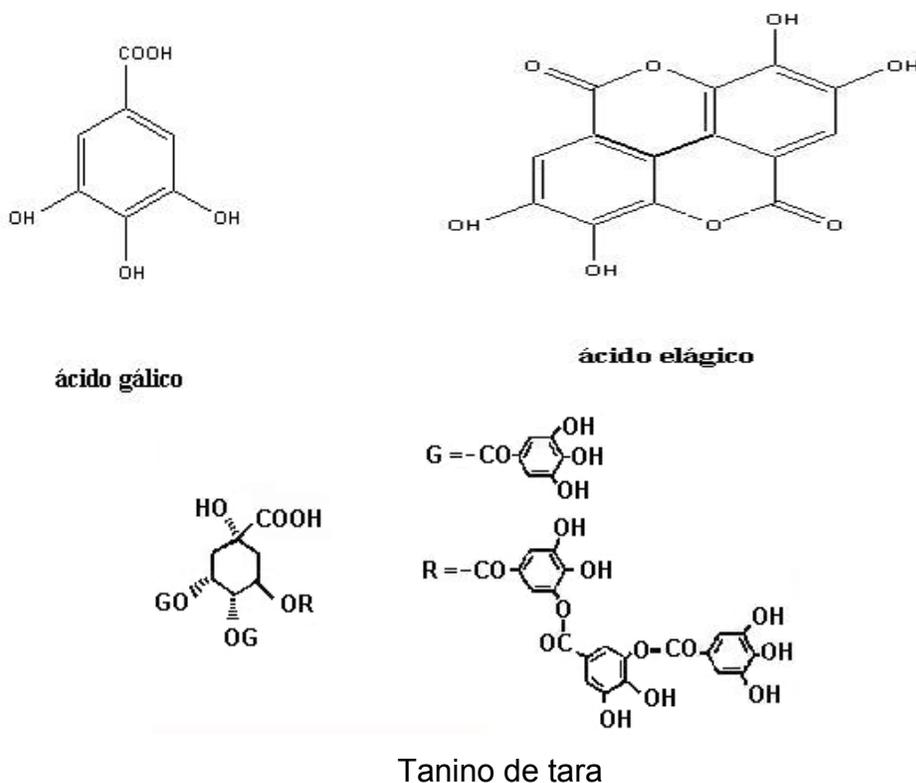
1.2.4.1.1 Taninos hidrolizables

Son polímeros heterogéneos formados por ácidos fenólicos, en particular ácido gálico, y azúcares simples. Son más pequeños que los taninos condensados y son hidrolizados con más facilidad, sólo basta ácido diluido para lograrlo. Algunos de estos taninos se muestran en la siguiente figura. Dependiendo del tipo de ácido que produce por la reacción se subdividen:

a) Galotaninos, caracterizados por la presencia de ácido galotánico.

b) Elagitaninos, su componente principal es el ácido elágico.

Figura 2. Taninos hidrolizables

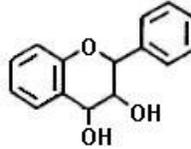


Fuente: Referencia 7

1.2.4.1.2 Taninos condensados

Son derivados de unidades de flavan-3,4-dioles (leucoantocianidinas o proantocianidinas monómeras), conocidos actualmente también como proantocianidinas condensadas. Tal como se muestra en la figura no. 2. Es decir, que están constituidos por unidades flavonoides, y que son polímeros de un flavonoide llamado antocianidina. Estas unidades soportan diversos grados de condensación, carbohidratos y restos de aminoácidos. Se presentan generalmente en la madera, la corteza y las raíces de plantas como el quebracho, caña agria, eucalipto, oyamel y el mangle, entre otras.

Figura 3. Flavan-3,4-diol



Flavan-3,4-diol

Fuente: Referencia 7

Los taninos se presentan en especies de familias vegetales de todo el mundo, se han identificado muchas especies de plantas que contienen varias cantidades de taninos, ***entre las principales familias botánicas con importancia en la obtención de taninos se pueden citar a la familia Rhizophoraceae, a la cual pertenece el mangle rojo o Rhizophora mangle.***

1.2.4.2 Extracción de taninos

La práctica común para la lixiviación como medio de extracción de taninos consiste en utilizar como solvente una solución de sulfito de sodio al 2% (p/p) a una temperatura de 70-80°C

En estos casos, ***la cantidad de licor tánico que se obtiene de la extracción es de aproximadamente de un 33% del total del peso incorporado, con un 10% de sólidos.*** Aunque estos valores dependerán en realidad de las condiciones de operación.

Los pasos siguientes en el proceso de extracción de taninos, incluyen:

1.2.4.2.1 Decantación/filtración

Sea cual sea el método utilizado, la extracción da como resultado un líquido concentrado oscuro con impurezas no tánicas. El proceso de filtrado elimina las impurezas y el líquido se vuelve translúcido, aunque todavía es rojo moreno.

Además, la solución de taninos se enfría para luego dejarla reposar en decantadores por algunas horas, con el objeto de que decanten algunas impurezas tales como gomas, polvo, etc.

1.2.4.2.2 Decoloración

El siguiente paso es la decoloración, mediante un tratamiento químico a base de dióxido de azufre (llamado "sulfitación"), o la evaporación directa.

1.2.4.2.3 Evaporación

El siguiente paso del proceso es la evaporación del líquido resultante, para concentrar los taninos.

Se pueden realizar en tanques cerrados o abiertos (esto último está prohibido para los taninos decolorados porque se emite SO_2 a la atmósfera), que se calientan con un agitador que constantemente evita que el tanino se pegue al fondo. El proceso se lleva a cabo hasta obtener la concentración deseada. Generalmente el agua se elimina hasta una cantidad aproximada de un 37% del agua incorporada en el solvente.

1.3 Los Manglares

El manglar es un tipo de ecosistema considerado a menudo un tipo de bioma, formado por árboles muy tolerantes a la sal que ocupan la zona intermareal de las costas de latitudes tropicales de la Tierra .

Los manglares son agrupaciones de árboles que poseen ciertas adaptaciones que les permiten sobrevivir y desarrollarse en terrenos anegados (terrenos inundados o inundables) que están sujetos a intrusiones de agua salada o salobre. Entre sus adaptaciones se pueden mencionar las siguientes:

- Tolerancia a altos niveles de salinidad.
- Raíces aéreas que estabilizan al árbol en terrenos blandos.
- Semillas flotantes.
- Estructuras especializadas para permitir la entrada de oxígeno y la salida de bióxido de carbono (lentícelas y neumatóforos).

1.3.1 Regiones geográficas de los manglares

Los manglares se encuentran en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Por lo general están asociados a las zonas costaneras de dichas regiones y pueden encontrarse en contacto directo con el mar, asociados a las riberas y desembocaduras de los ríos, o bordeando lagunas costaneras.

1.3.2. Mangle Rojo

Su nombre científico es *Rhizophora mangle*, aunque comúnmente es conocido como mangle rojo. Tiene raíces de sostén y posee lenticelas; las semillas germinadas (plántulas) son colgantes, de color verde o pardas; el tono de color bajo la corteza del árbol va de rosa a bastante rojo; la parte inferior de la hoja tiene pequeños puntos de color verde profundo.

Figura 4. Mangle rojo



Fuente: Referencia 2

1.3.2.1 Distribución geográfica

Especie con un amplio patrón de distribución. Se le encuentra a lo largo de las costas del Golfo, el Pacífico y el Caribe, en latitudes tan extremas como Isla San Esteban en Baja California o Huixtla, en el sur de Chiapas.

En Guatemala, los manglares se encuentran ubicados en las costas del Pacífico en los departamentos de San Marcos, Retalhuleu, Escuintla, Santa Rosa y Jutiapa y en el Atlántico en el departamento de Izabal.

1.3.2.2 Usos

- Se ha utilizado como adhesivo en la fabricación de triplay
- Elaboración de artículos torneados.
- La corteza produce un tinte azul para teñir tejidos de algodón
- El jugo fermentado produce una bebida embriagante.
- En la construcción rural y marina, por ejemplo, las hojas son empleadas en los techos rurales.
- ***La corteza y raíz son fuente importante de taninos (10 a 40 %) que se emplean en el curtido de pieles, tinción de cuerdas, redes y sedales.***
- La madera se utiliza para hacer puentes, pilotes, postes de casas, vigas, horcones, durmientes, muebles, diques, costillas para embarcaciones, fabricación de barcos y pisos, remos e instrumentos empleados en las artes de pesca.
- Se utiliza como antidiarréico, para el asma, hemoptisis, mordedura o picadura de animales marinos venenosos, diversas heridas, tuberculosis, lepra, hemorragias, etc.

Figura 5. Al interior de los bosques de mangle rojo.



Fuente: Referencia 2

1.4 Separación sólido-líquido

Las operaciones unitarias regidas por la transferencia de materia incluyen al proceso de separación, el cual está basado en la disolución de uno o varios componentes de una mezcla en un disolvente selectivo. El producto a extraer puede estar formando parte de un sólido o de un líquido distinguiéndose así dos tipos principales de separación: separación sólido-líquido y extracción líquido-líquido.

La separación sólido-líquido consiste en la separación de uno o varios solutos contenidos en una fase sólida, mediante su contacto con un disolvente líquido que los disuelve selectivamente, pudiendo tratarse de una simple disolución física o de una reacción química que libera al soluto de la matriz sólida.

Ha recibido muchos nombres, según la técnica más o menos compleja utilizada para llevarla a cabo. ***Según sus aplicaciones, se conoce como lavado, percolación y maceración. Aunque comúnmente, a todas ellas se les ha denominado bajo el nombre de lixiviación.***

La palabra lixiviación procede del latín “Lixiva” que significa lejía, la cual quiere decir agua en que se han disuelto álcalis o sus carbonatos. En Roma esta palabra se usaba para describir los jugos que destilaban las uvas o las aceitunas antes de ser machacadas Actualmente la palabra lejía se refiere a un líquido corrosivo y transparente de olor muy fuerte, formado por una disolución de álcalis o sales alcalinas, que se emplea para blanquear la ropa y desinfectar.

Si se pretende obtener un componente no deseado de un sólido se denomina lavado, por ejemplo en la purificación de cualquier tipo de precipitado es precisa la total eliminación del líquido madre en el seno del cual se formó el precipitado y en el que quedan disueltas aquellas sustancias contaminantes no precipitadas, por medio de lavados con disolventes capaces de ir extrayendo, en sucesivas operaciones, todos los productos extraños al precipitado.

Percolación se emplea para indicar que existe el vertido de un líquido sobre un sólido, el disolvente se renueva de modo continuo y debido a ello mantiene el gradiente de concentración lo más alto posible, el disolvente corre de arriba a abajo a través del sólido y el disolvente puro desplaza al que contiene la sustancia extraída.

En este caso, puede incluirse también a la extracción por soxhlet, que consiste en un aparato de extracción semicontinua, pues una de las fases el sustrato se agrega sólo al principio mientras que el solvente de extracción cumple un ciclo de extracción y purificación continua. La purificación se realiza en forma paralela por destilación del solvente, de manera que el sustrato siempre está en contacto con el solvente puro.

La maceración se divide en estática o dinámica. La primera consiste en mantener sumergida por un tiempo suficiente una sustancia sólida en un líquido para extraer de ella las partes solubles en el mismo, mientras que la segunda consiste en que el material se pone en contacto permanente con el solvente, realizando agitación para influenciar el gradiente de concentración. De modo, que la extracción puede llevarse a cabo más rápidamente por medio de maceración dinámica que con maceración estática.

En una operación de lixiviación típica, la mezcla sólida a ser separada está formada de partículas insolubles y de partículas solubles en determinado disolvente. De modo que el solvente agregado debe corresponder a las características físico-químicas de los componentes a extraer del sólido utilizado.

De este modo ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, lo que permite una separación de los componentes originales del sólido. La solución obtenida como producto consiste en el disolvente y en el soluto soluble.

En un caso ideal, todo el soluto es disuelto por el solvente y ningún otro componente es obtenido simultáneamente. Sin embargo, ***en realidad no se logra extraer el material deseable en su totalidad y también es posible que otros componentes sean disueltos debido a que presentan solubilidad en el medio seleccionado y por lo tanto también serán obtenidos como producto.*** No pudiendo evitarse esto en la mayoría de los casos, pues no existe un solvente específico y único para cada componente. Además de que por lo general no se utilizan solventes puros, por lo que el agua se ve involucrada, y en ésta última una gran variedad de componentes se solubilizan.

Por todo esto, es necesaria una separación y purificación del componente deseado, luego de su extracción.

1.4.1 Naturaleza del material

Al momento de elegir un material como fuente de un compuesto extractable de interés, es necesario primeramente hacer esta selección con base en la cantidad del compuesto a extraer contenida en el material, pues es importante que la contenga en cantidades considerables.

1.4.1.1 Sustancias biológicas

En la industria de procesos biológicos y alimenticios, muchos productos se separan de sus estructuras originales mediante lixiviación. Por ejemplo el azúcar se separa por lixiviación de la remolacha con agua caliente; los aceites vegetales se recuperan a partir de semillas, como las de soya, ricino, girasol y algodón mediante lixiviación con disolventes orgánicos y el tanino se disuelve a partir de la corteza, raíces y hojas de plantas.

En el caso de los materiales vegetales, los compuestos están asociados a azúcares (agliconas), por lo que azúcares de este tipo serán extraídos en cantidades considerables conjuntamente con el compuesto deseado.

1.4.1.2 Materiales inorgánicos y orgánicos

Los procesos de lixiviación son de uso común en la industria metalúrgica. Los metales útiles suelen encontrarse en mezclas con grandes cantidades de constituyentes indeseables y la lixiviación permite extraerlos en forma de sales solubles.

Por ejemplo, los minerales de cobre se disuelven preferentemente por lixiviación con ácido sulfúrico o soluciones amoniacales, y el oro se separa de sus minerales con la ayuda de soluciones de cianuro de sodio.

1.4.2 Preparación del sólido

El éxito de una lixiviación y la técnica que se va a utilizar dependen con mucha frecuencia de cualquier tratamiento anterior que se le pueda dar al sólido.

1.4.2.1 Materiales inorgánicos y orgánicos

El método de preparación del sólido depende en alto grado de la proporción del constituyente soluble presente, de su distribución en el material sólido original, de la naturaleza del sólido, que puede estar constituido por células vegetales o el material soluble estar totalmente rodeado por una matriz de materia insoluble, y del tamaño de partícula original.

Si las partículas del material soluble están completamente rodeadas de una matriz de materia insoluble. Entonces, el disolvente se debe difundir hacia el interior para ponerse en contacto y disolver el material soluble, y después difundirse hacia el exterior antes de poder lograr una separación.

En muchos casos, a trituración y molienda de estos sólidos acelerará bastante la acción de lixiviación, porque las porciones solubles son entonces más accesibles al disolvente, aumentando así la velocidad de lixiviación.

Sin embargo, cuando la sustancia soluble está distribuida más o menos uniformemente en todo el sólido aun en solución del sólido, la acción de lixiviación puede proporcionar canales para el paso del disolvente fresco, por lo cual se puede prescindir de una molienda muy fina. La molienda de las partículas es innecesaria cuando el material soluble está disuelto en una solución adherida al sólido. Entonces se puede emplear un simple lavado similar al de precipitados químicos.

1.4.2.2 Materiales animales y vegetales

Los cuerpos vegetales y animales tienen una estructura celular y los productos naturales que se van a lixiviar a partir de estos materiales se encuentran generalmente dentro de las células. En ocasiones, la velocidad de lixiviación es bastante baja, debido a que las paredes celulares constituyen una resistencia adicional a la difusión.

Si las paredes celulares permanecen intactas después de la exposición a un disolvente adecuado, entonces en la acción de lixiviación interviene la ósmosis del soluto a través de las paredes celulares. Éste puede ser un proceso lento. Sin embargo, moler el material lo suficientemente pequeño como para liberar el contenido de las células es poco práctico y algunas veces indeseable.

En cambio, puede cortarse el material de manera apropiada (por ejemplo, en rebanadas delgadas) para que sea más pequeña la distancia necesaria para que el disolvente se difunda y llegue a las células individuales. En otros casos, el secado de los materiales antes de la extracción puede ayudar a romper las paredes celulares. De esta manera, el disolvente ataca directamente al soluto.

Además, con algunos materiales puede emplearse un proceso de laminación para formar pequeñas escamas, lo que permite que las paredes se rompan y el compuesto deseado quede más accesible a la acción del disolvente.

1.4.3 Naturaleza del disolvente

Los disolventes utilizados en procesos de lixiviación pueden ser principalmente fluidos incompresibles, compresibles o supercríticos.

1.4.3.1 Fluidos incompresibles

Aquellos fluidos en los cuales las variaciones de volumen son insignificantes a medida que aumenta la presión. Este tipo de fluidos son los más comúnmente utilizados, los cuales a su vez pueden ser:

1.4.3.1.1 Disolventes Polares

Tales como agua, acetona, etanol, etc.

1.4.3.1.2 Disolventes no polares

Tales como hexano, benceno, heptano , etc.

1.4.3.2 Fluidos compresibles

Aquellos fluidos en los cuales al variar la presión su volumen también varía notablemente.

1.4.3.3 Fluidos supercríticos

Se encuentran en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico, por lo que poseen propiedades intermedias entre líquidos y gases. La propiedad más importante que presentan es su elevado poder disolvente en estado supercrítico.

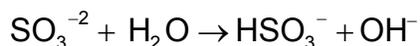
1.4.3.4 Mezclas de disolventes

Usualmente también pueden emplearse mezclas de dos o más disolventes, como el caso en el que es necesario utilizar un coadyuvante con el fin de facilitar el proceso de extracción. El uso de un coadyuvante se realiza principalmente con dos fines:

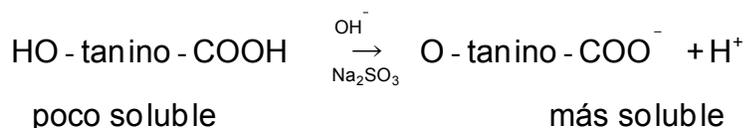
1.4.3.4.1 Realizar un cambio en el pH

Por medio de una sal, un ácido o una base se puede modificar el pH de la solución extractiva, por ejemplo ***puede utilizarse una base como el sulfito de sodio para crear una solución alcalina que por medio de hidrólisis permita neutralizar los iones ácidos provenientes de los taninos y así permitir la extracción de los últimos.***

Esto debido a que la hidrólisis del sulfito de sodio produce una disolución alcalina



Y como los taninos son de carácter ácido, al reaccionar con el sulfito de sodio, de carácter alcalino, los taninos pierden átomos H^+ por medio de su neutralización o bien, disociación y entonces se transforman a su forma iónica conjugada, la cual posee mayor solubilidad.



Y esto explica por qué ***los taninos condensados (ácidos fenólicos) pueden ser extraídos sólo como sales con disolución diluida de álcali.***

1.4.3.4.2 Realizar un cambio en la constante dieléctrica

La constante dieléctrica (κ) de un solvente muestra que tanto esta sustancia está polarizada y la capacidad de asociación del solvente a otras moléculas. Cuanto más polar es un solvente, mayor es su constante dieléctrica. Además, compuestos ionizables y/o altamente polares se disuelven en solventes de alta constante dieléctrica, mientras que compuestos apolares se disuelven en solventes de baja constante dieléctrica.

De modo que ***con la mezcla de dos o más solventes se puede conseguir un cambio en la constante dieléctrica de la mezcla resultante, la cual dependerá de la constante dieléctrica de cada solvente y de su respectivo porcentaje en la mezcla.***

$$\kappa = \frac{\kappa_A(\%_A) + \kappa_B(\%_B) + \dots + \kappa_n(\%_n)}{100} \quad (\text{ec. 1})$$

Por ejemplo, puede realizarse la mezcla de dos solventes, uno que posee una constante dieléctrica muy baja y otro que tiene una muy alta, de modo que al mezclarlos se obtiene una solución con una constante dieléctrica intermedia que permita una extracción eficiente, debido a que de esta manera se logra modificar la polaridad de dichos solventes, y por tanto su capacidad de asociación a otras moléculas.

Tal es el caso del agua pura que tiene una constante dieléctrica de 78.3 y el etanol de 24.3. Entonces, al preparar una solución de agua con etanol, en un porcentaje determinado, por ejemplo al 70% (p/p), puede conseguirse una solución con una constante dieléctrica adecuada para la extracción,

$$\kappa = \frac{78.3(30\%) + 24.3(70\%)}{100} = 40.5$$

Entonces, la constante dieléctrica de la mezcla resultante es de 40.5, la cual otorga a la solución la facultad de unirse más fácilmente con las moléculas del componente que se está extrayendo.

Finalmente, además de un coadyuvante, puede ser útil agregar un preservante tal como un antioxidante o antimicrobiano que permita conservar en buen estado a la solución extractiva cuando esta tiene el peligro de oxidarse, fermentarse o descomponerse.

1.4.4 Factores que influyen en la velocidad y eficiencia de lixiviación

En general, la velocidad de extracción es afectada por los siguientes factores:

1.4.4.1 Temperatura

Al aumentar la temperatura se aumenta la velocidad de lixiviación porque la solubilidad del soluto es mayor y porque a la vez aumenta la transferencia de masa. A temperaturas elevadas la viscosidad del líquido es menor y mayores las difusividades, lo que incrementa la rapidez de lixiviación.

Sin embargo, la temperatura máxima para cada sistema está limitada por: el punto de ebullición del solvente, el punto de degradación del producto y/o del solvente, solubilidad de impurezas y por economía.

1.4.4.2 Características del solvente

En primer lugar, para la elección de un solvente adecuado es necesario considerar las solubilidades de los compuestos a tratar. Además, debe tomarse en cuenta si el tipo de solvente permitirá una fácil separación del mismo del extracto, luego de completada la lixiviación. La concentración de la solución extractora es importante para soluciones acuosas, debido a la saturación y a la existencia de reacciones químicas.

En pocas palabras, el solvente utilizado debe ser afín con el componente a extraer. Dependiendo del solvente empleado puede ocurrir lixiviación por medio de una reacción química o simplemente por una solubilización favorecida.

1.4.4.3 Características de las partículas

Primeramente, debe considerarse el tamaño de partícula adecuado. ***La reducción de partículas tiene gran importancia, porque aumenta el área de contacto y disminuye el tiempo necesario para la extracción***, sobre todo para sólidos de baja porosidad. Por otro lado, al maximizar el contacto de área por unidad de volumen se reduce el tamaño del equipo.

Sin embargo, al romper completamente la estructura se puede perder la selectividad y obtener muchos productos indeseables, por lo que es necesario evaluar el tamaño de partícula óptimo.

Si se va a lixiviar un sólido en la forma de grandes rocas, con frecuencia se debe decidir si han de triturarse hasta pedazos grandes, si ha de realizarse la lixiviación por percolación o si se molerán finamente y si la lixiviación será realizada mediante agitación y sedimentación.

Entre algunas consideraciones se encuentran las siguientes. ***El molido fino es más costoso, pero proporciona una lixiviación más completa y más rápida***. Tiene la desventaja de que siendo el peso del líquido asociado con el sólido sedimentado tan grande como el peso del sólido, más, se utilizará una cantidad considerable de disolvente para eliminar del sólido lixiviado el soluto y la solución resultante estará diluida.

Las partículas trituradas grandes, por otra parte, se lixivian con más lentitud y posiblemente de modo menos completo, pero a lo largo del drenado pueden retener relativamente poca solución, requieren menos lavado y, por lo tanto, proporcionan una solución final más concentrada.

En el caso de sólidos más fibrosos, se ha demostrado que la lixiviación es por lo general más eficiente en un tanque bien agitado que por percolación, probablemente debido a que la gran cantidad de retención estática del líquido hace imposible la obtención de cantidades importantes del soluto.

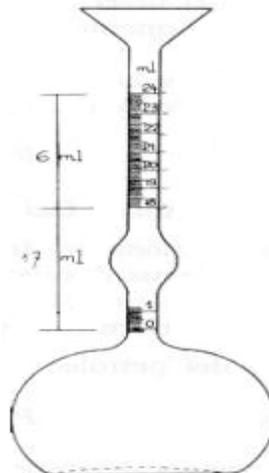
Asimismo, debe estudiarse la geometría de la partícula, pudiendo ser ésta irregular o regular. Si es regular pueden encontrarse formas cúbica, hexagonal, esférica o cilíndrica.

Otra característica importante es la porosidad, ya que esta propiedad permite que el líquido penetre a través de los canales formados por los poros dentro del sólido, aumentando así el área activa para la extracción. Sin embargo, pueden existir sólidos no porosos o con poros cerrados; causando mayor dificultad en el momento de extracción.

Finalmente, debe determinarse la densidad de la partícula observando la existencia o no de un cambio en la misma al cambiar el tamaño de la partícula, lo cual puede dar una idea de su porosidad. Esto puede llevarse a cabo con el uso de un matraz de Le Chatelier (fig. 3), de la siguiente manera:

1. Agregar un volumen definido de un solvente que no lixivie ni reaccione con la partícula sólida, en la mayor medida posible.
2. Leer el volumen inicial obtenido
3. Pesar una cantidad definida del sólido con un tamaño de partícula establecido.
4. Permitir que escapen todas las burbujas de aire provenientes de las porosidades, dejando el recipiente en reposo por un tiempo prudente.
5. Leer el volumen final, el cual se ha desplazado debido a la presencia del sólido.
6. Determinar la densidad conociendo la masa de sólido añadida y el cambio de volumen obtenido.

Figura 6. Matraz de Le Chatelier



Fuente: Referencia 6

1.4.4.4 Agitación

La agitación da una mayor eficiencia en la extracción debido a que disminuye la película de fluido que cubre la superficie del sólido en reposo y que actúa como una resistencia a la difusión. De modo que ayuda a la transferencia de masa y asegura una mezcla adecuada cuando corresponde a una cantidad de rpm adecuada, ya que si es demasiado alta también puede ocasionar problemas como salpicaduras que ocasionen la acumulación de residuos en las paredes del recipiente.

En este punto es necesario mencionar la diferencia entre mezcla y agitación, ya que ***la agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una manera específica, normalmente en un patrón circulatorio dentro de algún tipo de contenedor.*** Y ***mezcla es una distribución aleatoria, dentro y a través una de otra, de dos o más fases inicialmente separadas.***

La difusión de un componente a través de una mezcla generalmente ocurre debido a un gradiente de concentración del mismo, por lo que el componente se mueve en una dirección tal que iguale las concentraciones, disminuyendo así el gradiente con el tiempo en cuanto se alcanza el equilibrio. En la lixiviación, primeramente ocurre la difusión del soluto a través de la fase sólida y luego la difusión dentro del líquido. Debido a esto, alrededor de la partícula se van formando y acumulando capas de concentración elevada del extracto, y conforme va transcurriendo el tiempo estas capas irán desapareciendo y trasladándose hacia la fase líquida debido al gradiente de concentración existente, el cual es el eje fundamental de la transferencia de masa, partiendo del área de mayor concentración al área de menor concentración.

Este fenómeno puede ocurrir de manera más rápida cuando participa además la agitación. **Si existe agitación, el rompimiento de las capas de alta concentración que rodean al material sólido ocurrirá en un tiempo menor. Y entonces se logra una difusión facilitada.**

En cambio, **si no se agita el líquido; como en el caso de la maceración estática, las masas del compuesto se van acumulando de la misma manera que en el caso anterior, pero se desplazarán de manera mucho más lenta,** poco a poco debido a un fenómeno convectivo.

De manera más clara puede explicarse por medio de la siguiente figura (fig. 6)

Figura 7. Capa límite de una placa plana

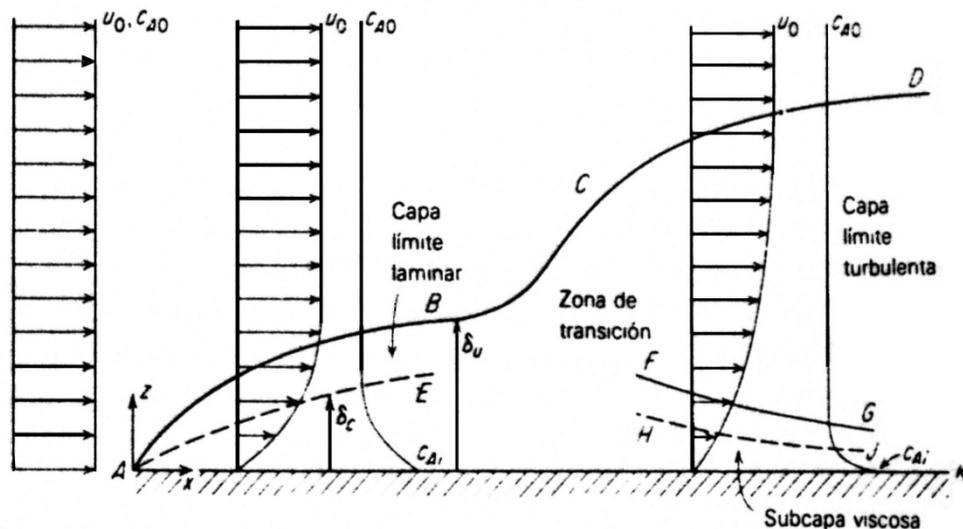


Figura 3.10 Capa límite de una placa plana.

Fuente: Robert Treybal, Operaciones de Transferencia de masa, pág 730

Cuando una de las fases es un sólido, la velocidad del fluido paralela a la superficie en la interfase es cero.

En la figura se muestra un fluido con una velocidad uniforme u_o y una concentración uniforme de soluto c_{Ao} se encuentra con una superficie sólida lisa AK. Puesto que la velocidad u_x es cero en la superficie y aumenta a u_o a cierta distancia arriba de la placa, la curva ABCD separa la región de velocidad u_o de la región de menor velocidad, llamada la capa límite.

Cuando la transferencia de masa se efectúa desde la superficie hasta el fluido, como sucede cuando un sólido se disuelve en un líquido, la concentración de soluto en el fluido es c_{Ai} , en la superficie del sólido y es mayor que c_{Ao} . Por esto, se afirma que en la superficie del sólido se encuentra una región de mayor concentración. Existe, entonces, una curva AE y también una HJ, que separan regiones de concentración uniforme c_{Ao} de regiones con valores más elevados de c_A , que corresponden a una capa límite de concentración.

En conclusión, es importante hacer una distinción entre la difusión molecular, que es un proceso lento, y el mezclado más rápido que puede lograrse mediante agitación mecánica y por movimiento de convección del fluido. ***Sin agitación, el proceso ocurre, pero es muy lento. La agitación mecánica produce el rápido movimiento de grandes masas de fluido, o remolinos, característicos del flujo turbulento, que acarrear el extracto consigo.*** Este método de transferencia de soluto se conoce como difusión de remolino o turbulenta, por oposición a la difusión molecular.

En cambio, la difusión molecular se trabaja con el movimiento de las moléculas individuales a través de una sustancia debido a su energía térmica.

Pero, evidentemente dentro de cada remolino, por pequeño que sea, la uniformidad se alcanza por difusión molecular, que es el último proceso.

1.4.4.5 Tiempo de residencia

El tiempo de lixiviación es un factor importante que incide en el porcentaje de recuperación del soluto. Por lo general, a mayor tiempo de contacto, mayor será la cantidad extraída. Sin embargo, transcurrido cierto tiempo de lixiviación, la extracción del material cesa, debido a que el sólido está completamente agotado.

El tiempo de extracción depende principalmente del tamaño de la partícula y de la influencia de factores de transferencia de masa y de operación.

El tiempo de extracción en realidad puede fraccionarse para explicarse los fenómenos de transferencia de masa ocurridos:

1. El disolvente se transfiere del volumen de solución a la superficie del sólido, es decir se da el fenómeno de adsorción inicialmente.
2. Después, dicho solvente penetra o se difunde en el sólido por medio de adsorción.
3. El soluto se disuelve en el disolvente.

4. Entonces, el soluto se difunde a través de la mezcla del sólido y disolvente hasta la superficie de la partícula. Esto ocurre debido a que los poros se han saturado, y existe por lo tanto un gradiente de concentración entre estos y las afueras de los mismos. De modo, que los poros saturados se drenan debido al efecto de la difusión.

5. Finalmente, el soluto se transfiere a la solución general.

Debido a estos fenómenos, el sólido va volviéndose cada vez más poroso, lo cual aumenta el área de contacto y facilita el proceso de extracción.

El aumento en la porosidad del sólido puede determinarse experimentalmente por medio del cambio en la densidad del sólido antes de lixiviar y del sólido ya agotado.

Por otro lado, entre los factores operacionales que interfieren en el tiempo de extracción, se puede mencionar a la agitación en el caso de la maceración dinámica, ya que la agitación permite que los fenómenos de transferencia de masa mencionados ocurran más rápidamente.

En el caso de la percolación, el tiempo que debe considerarse es el tiempo de residencia, es decir el tiempo que tarda el solvente en atravesar al sólido lixiviable.

1.4.4.6 Relación sólido/líquido

Al variar la proporción existente entre el sólido y el disolvente pueden observarse cambios significativos en la eficiencia de lixiviación, pues ésta dependerá de la solubilidad del soluto y la acción del disolvente durante la transferencia de masa. Asimismo deberá considerarse la saturación de la solución extractora; ya que al alcanzarse este punto cesará su capacidad de extracción. Aunque, también es importante mencionar que por razones de economía no es conveniente utilizar una proporción sólido/líquido demasiado pequeña, puesto que la solución obtenida se encontrará muy diluida; por lo que será necesario un gasto mayor en recursos para la concentración posterior de la misma.

Por otro lado, la proporción sólido/líquido incide en el área de contacto, la cual también es importante para el proceso de difusión. Esta relación puede expresarse como: masa de sólido/volumen de solvente, masa de sólido/masa de solvente o bien volumen de sólido/volumen de solvente.

1.4.4.7 Etapas de extracción

La extracción puede llevarse a cabo en una única etapa o en etapas múltiples. Esto dependerá del equipo utilizado y de las condiciones del proceso.

Por ejemplo utilizando soxhlet, el mismo sistema permite la obtención de varias etapas, ya que el equipo continuamente se está drenando y volviendo a llenar, sin embargo en otro tipo de equipo como un tanque o recipiente cualquiera en el que se permite que ocurra la maceración, puede trabajarse solamente en una etapa o bien en etapas múltiples.

Pero en este último caso las diversas etapas no pueden lograrse automáticamente, sino que deberán conseguirse por medio del experimentador que deberá realizar la separación del sólido del líquido y la renovación del solvente continuamente para cada etapa.

Entonces, ***en el caso de las etapas múltiples, sí interesa que el solvente llegue a saturación, no así en el caso de una etapa en el que este aspecto realmente no es relevante.***

Finalmente, ***para una única etapa el gradiente de concentración disminuye en función del tiempo y para etapas múltiples también, pero en este último caso el gradiente puede recuperarse gracias a la renovación del solvente.***

1.4.5 Monitoreo del proceso

Existen diferentes parámetros que pueden medirse continuamente con el fin de monitorear el proceso, entre estos están:

1.4.5.1 Densidad

Por medio del cambio en la densidad de la solución puede observarse el avance de la extracción, puesto que conforme transcurra el tiempo, la solución deberá volverse cada vez más densa debido a la presencia de más soluto extraíble.

1.4.5.2 pH

El pH puede ser un indicativo de la forma en que se está llevando a cabo el proceso, ya que la solución extractiva, conforme ocurre el proceso de extracción puede irse acidificando, neutralizando o bien alcalinizando, dependiendo del tipo de soluto que se está extrayendo y de la reacción que se lleve a cabo entre éste y el disolvente.

Por ejemplo, ***al extraer taninos con una solución de sulfito de sodio, la solución primeramente alcalina se va acercándose a un pH de 7 debido a la neutralización de los iones ácidos provenientes de los taninos.***

1.4.5.3 Viscosidad

Al igual que la densidad, la viscosidad de la solución va aumentando con el tiempo de extracción debido a la presencia de mayor cantidad de soluto extraíble.

1.4.5.4 Color

El color de la solución varía conforme ocurre la lixiviación, puesto que a medida que se extrae el soluto, la solución adquiere un color más oscuro cada vez; sin embargo cuando ya se ha agotado el sólido, la solución irá tornándose cada vez más pálida. Esto puede estarse monitoreando midiendo continuamente el porcentaje de transmitancia por medio de un colorímetro.

1.4.5.5 Pérdida de peso del sólido

El sólido perderá peso debido al proceso de extracción de solutos a partir del mismo, Por ello, puede pesarse el sólido al inicio y al final del proceso completo para determinar la cantidad extraída de solutos por medio de diferencia.

1.4.5.6 Tamizaje fitoquímico

Indica qué tipo y qué cantidades de metabolitos se encuentran en el material biológico. Pero, sólo puede determinarse al inicio y al final del proceso completo, indicando así las clases y cantidades de compuestos extraídos.

1.4.5.7 Índice de refracción

Es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en la sustancia o el medio transparente. Se puede medir con un refractómetro en el que se compara el ángulo de incidencia con el ángulo de refracción de la luz de una longitud de onda específica, observando así las variaciones en el mismo a medida que ocurre la extracción.

1.4.5.8 Sólidos extractables

Pueden determinarse los sólidos extractables a lo largo del proceso, por medio de la toma de pequeñas muestras de la solución y colocándolas en un horno adecuado para permitir la evaporación del líquido y así calcular la cantidad de sólidos presentes.

1.4.6 Técnicas de operación y equipo en la lixiviación

Algunas industrias requieren un tipo especial de equipo, pero en general las dos técnicas usadas son: rociar el líquido sobre el sólido o sumergir el sólido completamente en el líquido. El equipo usado en cada caso depende mucho de la forma física de los sólidos y del costo.

Las partículas trituradas (grandes) son tratadas en lechos fijos por métodos de percolación. Y las partículas molidas (finamente divididas) son puestas en suspensión en tanques llenos de solvente por medio de agitación.

1.4.7 Consideraciones en el diseño del equipo de lixiviación

1.4.7.1 Geometría del recipiente

El recipiente puede ser un tanque abierto, un tanque cerrado o bien una marmita.

1.4.7.2 Requerimientos del equipo

Entre estos se encuentran: calor, potencia, reflujo y movimiento completo del tanque.

1.4.7.3 Contenido del sólido

El sólido puede colocarse en una canasta perforada, confinarse en sacos o estar sujeto a la acción de un pistón.

1.4.7.4 Proporción volumétrica material/recipiente

El solvente junto con el sólido deben ocupar aproximadamente un 60% del tamaño del recipiente, para que la agitación puede efectuarse correcta y uniformemente.

1.4.7.5 Intercambiador de calor

Es necesario para evitar pérdidas de calor, lo cual puede conseguirse principalmente por medio de una chaqueta de calentamiento.

1.4.8 Eficiencia de las etapas de lixiviación

Si se proporciona un tiempo adecuado de contacto entre el sólido y el disolvente, todo el soluto se disuelve; entonces, la mezcla es una suspensión de sólidos insolubles sumergidos en una solución de soluto en el disolvente. Luego, las fases insolubles se separan físicamente por sedimentación, filtración o drenado y toda la operación constituye una sola etapa.

Si la separación mecánica del sólido y el líquido fuese perfecta, no habría soluto asociado con el sólido que sale de la operación y se habría logrado en una sola etapa la separación completa del soluto y del sólido insoluble. Esta sería una etapa ideal, con una eficiencia de etapa del 100%.

En la práctica, la eficiencia de las etapas es generalmente bastante menor que ésta: (1) es posible que el soluto no se haya disuelto por completo debido a un tiempo insuficiente de contacto; ***(2) existe soluto que por alguna razón (normalmente falta de molienda) queda ocluida dentro de la partícula del sólido;*** ***(3) probablemente sea imposible realizar una perfecta separación mecánica del líquido-sólido,*** así que los sólidos que salen de la etapa siempre retendrán cierta cantidad de líquido y de soluto disuelto asociado.

Cuando el soluto es adsorbido en el sólido, la sedimentación o drenaje imperfectos darán una eficiencia menor de etapa, aunque se logre el equilibrio entre las fases líquida y sólida.

1.4.9 Balance de materia

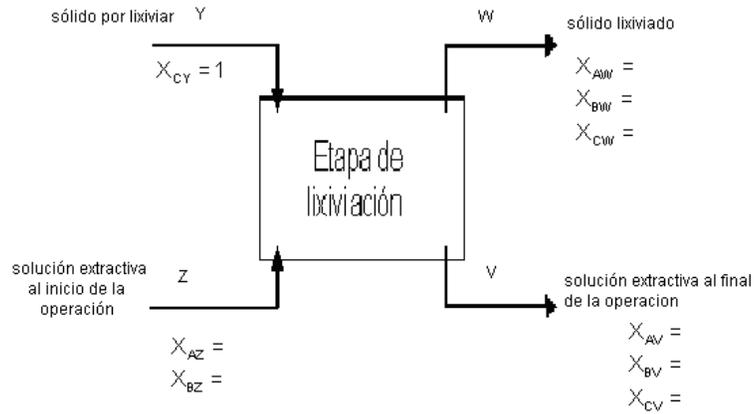
En los procesos de lixiviación deberá considerarse como condición de equilibrio aquella que se presenta cuando todo el soluto es disuelto en el solvente. Es posible que en algunos casos el sólido contenga una porción acarreadora insoluble, pero para fines de presente trabajo se considerará que todo el soluto se disuelve en el disolvente.

El sistema a estudiar consta de tres componentes, disolvente puro (A), el coadyuvante alcalino (B) y el soluto soluble (C).

1.4.9.1 Balance de materia en una etapa

En la siguiente figura se representa esquemáticamente la operación de lixiviación en una etapa. Esta etapa incluye la operación completa: mezcla y separación de las fases.

Figura 8. Lixiviación en una etapa



1.4.9.1.1 Sólido por lixiviar

Está compuesto por soluto soluble (C).

Por lo tanto, se tiene: Sólido por lixiviar = C

1.4.9.1.2 Solución extractiva al inicio de la operación

Esta corriente, también llamada líquido lixivante, está compuesta, o por solvente puro o por solvente con coadyuvante.

Considerando el segundo caso, en el que se utiliza un coadyuvante, se tiene: Solvente=A+B

1.4.9.1.3 Sólido lixiviado

Después de la operación de lixiviación se separan las dos fases y el sólido lixiviado quedará con algo de solución remanente asociada al sólido.

De acuerdo con lo anterior, se tiene: Sólido lixiviado = A+B +C

1.4.9.1.4 Solución extractiva al final de la operación

Esta corriente es la solución concentrada, llamada también extracto o miscela. Sus componentes son: solvente puro (A), coadyuvante (B) y soluto en solución (C).

Por lo tanto, se tiene: Solución de lixiviación= A+B+C

De acuerdo con los términos definidos, un balance de masa total, será:

$$Y + Z = W + V \quad (\text{ec. 2})$$

Un balance de disolvente puro (A),

$$ZX_{AZ} = WX_{AW} + VX_{AV} \quad (\text{ec. 3})$$

Un balance de coadyuvante alcalino (B),

$$ZX_{BZ} = WX_{BW} + VX_{BV} \quad (\text{ec. 4})$$

Un balance de soluto (C),

$$YX_{CY} = WX_{CW} + VX_{CV} \quad (\text{ec. 5})$$

Sin embargo, la ec. 5, también puede expresarse como

$$YX_{CY} = W(1 - X_A - X_B)_W + V(1 - X_A - X_B)_V \quad (\text{ec. 6})$$

1.5. Diseño de tanques con agitación para contacto líquido sólido

Los tanques poseen profundidades de líquido de 0.75 a 1.5 diámetros del tanque. Se utilizan cuatro amparas de pared, generalmente de un doceavo de diámetro de ancho, para eliminar vórtices en los tanques abiertos y producir el movimiento vertical del líquido que se necesita para levantar las partículas sólidas. Con frecuencia se arreglan dejando un claro, que puede ser de la mitad del espesor de las mamparas, entre la mampara y la pared del tanque para prevenir la acumulación de sólidos detrás de las mamparas.

1.5.1 Suspensión de sólidos

A menos que los sólidos estén suspendidos en el líquido las rapidezces de transferencia de masa se modifican seriamente. La potencia requerida del agitador P_{\min} para suspender partículas de tamaño y densidad uniforme hasta una altura arriba del plano medio del impulsor superior, está dada por:

$$\frac{Pg_c}{gn\rho_m v_m V_{tS}} = \Phi_{Sm}^{2/3} \left(\frac{T}{d_t} \right)^{1/2} \exp\left(4.35 \frac{Z'}{T} - 0.1\right)$$

Ecuación. 7

En donde ρ_m , Φ_{Sm} , v_m son las propiedades de la suspensión debajo de la altura Z' , n es el número de impulsores sobre el eje. V_{tS} debe ser la velocidad terminal de asentamiento de esferas simples calculada mediante

$$V_{tS} = \frac{gd_p^2 \Delta\rho}{18\mu_L}$$

Ecuación 8

Para números de Reynolds Re del impulsor menores de 25000 se debe multiplicar la potencia por $4000 Re^{-0.8}$.

El número de Reynolds del impulsor es $d_i^2 N \rho_m / \mu_m$. La densidad y viscosidad de la solución se obtienen por medio de:

$$P_m = \phi_{Sm} \rho_p + (1 - \phi_{Sm}) \rho_L$$

$$\mu_m = \frac{\mu_L}{(1 - \phi_{Sm} / \phi_{SS})^{1.8}}$$

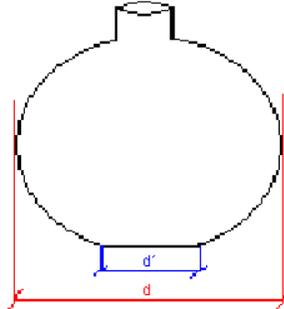
Ecuación 9 y 10

ϕ_{SS} es la fracción volumen de sólidos en el lecho de sólidos después de la sedimentación final en un líquido tranquilo. Si no hay datos medidos, ésta puede calcularse aproximadamente como 0.6. Los resultados son malos con respecto a números de Reynolds del impulsor menores de 1000.

1.5.2 Cálculo de la potencia requerida para extracción a nivel laboratorio.

Se desea extraer el colorante natural de la corteza de mangle rojo (*Rhizophora mangle*). Se realizarán lotes de 300 ml con soluciones de sulfito de sodio como coadyuvante (0 M, 0.05 M y 0.5 M). Las relaciones sólido/líquido son 1 gr de materia prima./ 10 ml de solvente y 1 gr de materia prima./ 5 ml de solvente. Además se utilizarán dos tamaños de partícula, uno que pasa por un tamiz 10 y se retiene en un tamiz número 14, con un tamaño de partícula promedio de 1.6891 mm; el otro tamaño de partícula corresponde a una partícula que pasa por un tamiz 50 y se retiene en un tamiz 80, teniendo un tamaño promedio de 0.238 mm. La distancia del impulsor hasta el fondo del tanque es cero. La temperatura a la que se llevará a cabo la extracción es de 60° C.

La geometría del tanque es de la siguiente manera:



De modo que cuenta con dos diámetros:

$$d' = 0.055 \text{ m}$$

$$d = 0.11 \text{ m}$$

Por lo que se tomará el diámetro promedio para la realización de los cálculos:

$$(d+d')/2 = (0.055+0.11)/2 = 0.0825 \text{ m}$$

Calcular la potencia necesaria.

Solución:

A partir de la definición de número de Potencia,

$$g_c P = P_o \rho_m d_i^5 N^3 \quad \text{Ecuación 11}$$

Si las partículas se desean levantar a una altura $Z' = 0.10 \text{ m}$ arriba del impulsor, el volumen de la suspensión se obtiene por medio de:

$$v_m = \frac{\pi T^2 (Z' + C')}{4}$$

Ecuación. 12

$$T = 0.11 \text{ m}$$

$$Z' = 0.10 \text{ m}$$

$C' = 0$, Sustituyendo ecuación 6

$$v_m = \pi * (0.0825)^2 * (0.10) / 4$$

$$v_m = 5.3456E-4 \text{ m}^3$$

- Cantidad de compuesto libre de adsorbato se determina por medio de la relación líquido / sólido de 10/1

$$S_s = \frac{1 \text{ kg Mp}}{10 \text{ l Na}_2\text{SO}_3} * 0.3 \text{ l Na}_2\text{SO}_3 = 0.03 \text{ kg Mp}$$

$$S_s = \frac{1 \text{ kg Mp}}{5 \text{ l Na}_2\text{SO}_3} * 0.3 \text{ l Na}_2\text{SO}_3 = 0.06 \text{ kg Mp}$$

- Volumen del sólido

$$\text{Volsolido} = 0.03 \text{ kg Mp} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ Mp}}{2500 \text{ kg Mp}} = 1.2E - 5 \text{ m}$$

$$\text{Volsolido} = 0.06 \text{ kg Mp} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ Mp}}{2500 \text{ kg Mp}} = 2.4E - 5 \text{ m}$$

- Fracción de volumen de sólidos en la suspensión debajo de Z'

Esto se determina por medio de la relación del volumen del sólido y de la suspensión:

$$\varphi_{Sm} = \frac{\text{Volumensolido}}{\text{volumensuspensión}}$$

$$\varphi_{Sm} = \frac{1.2E - 5}{5.3456E - 4} = 0.0224482$$

$$\varphi_{Sm} = \frac{2.4E - 5}{5.3456E - 4} = 0.0448965$$

- Densidad de la suspensión debajo de Z'

La densidad de la suspensión se calcula por medio de la ecuación 9

$$\rho_m = 0.0224482 * 2500 + (1 - 0.0224482)(997.08) = 1030.81792 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Velocidad terminal de sedimentación

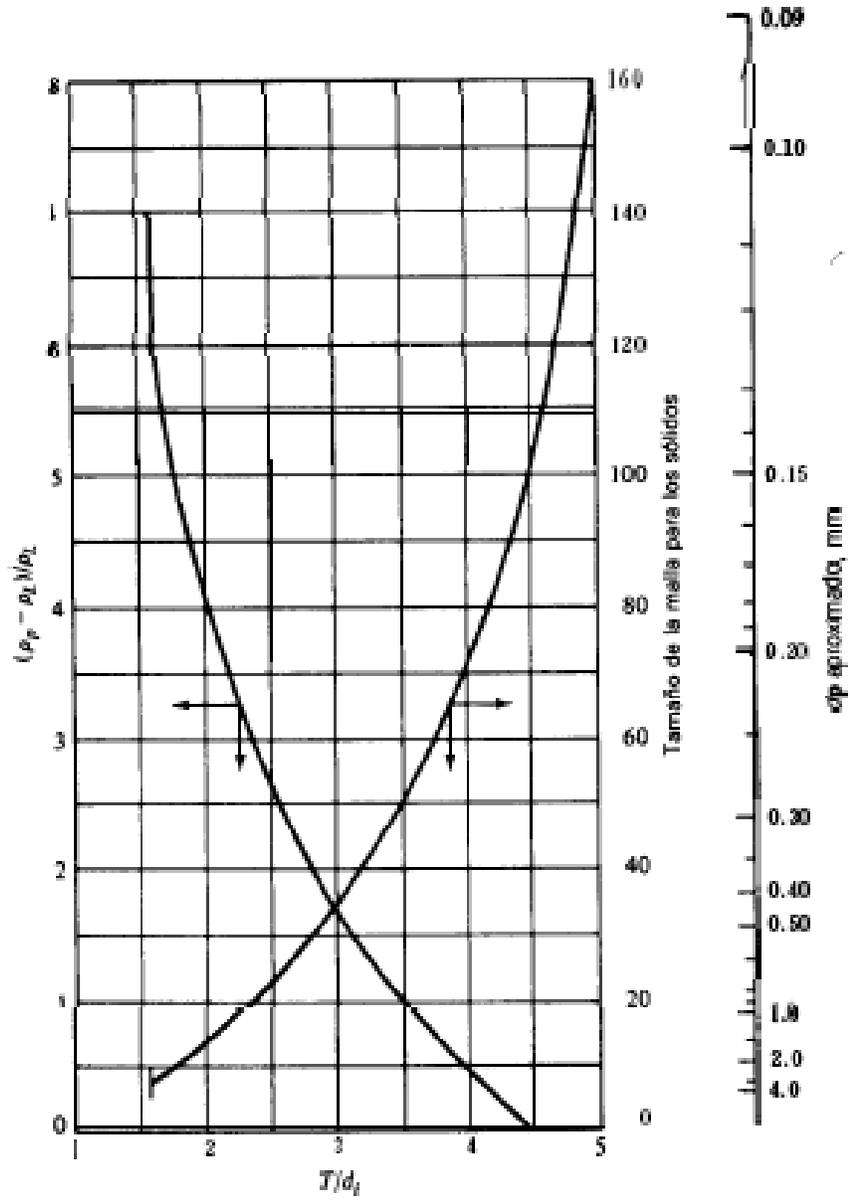
La velocidad terminal de sedimentación se determina por medio de ecuación 8

$$V_{ts} = \frac{9.8 * (2.38E - 4)^2 * (2500 - 997.08)}{18 * 0.001} = 4.634931 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Determinación de la relación diámetro tanque / diámetro del impulsor

Dicha relación se determina en gráfica siguiente

Figura 9. Gráfica T/di



Fuente: Robert Treybal, Operaciones de Transferencia de masa. Pág 662

$$\text{soluc } 0 \text{ M} \quad \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} = \frac{2500 - 997.08}{997.08} = 1.507321$$

$$\text{soluc } 0.05 \text{ M} \quad \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} = \frac{2500 - 1045.82}{1045.82} = 1.390469$$

$$\text{soluc } 0.5 \text{ M} \quad \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} = \frac{2500 - 1100.82}{1100.82} = 1.271034$$

Este valor se encuentra en eje Y de la gráfica, intersecándola con la curva dando una relación T/di de 3.05 , 3.1 y 3.2 (soluciones 0 M, 0.05 M y 0.5 M) respectivamente.

El tamaño de la partícula es de 0.2375 mm y 1.6891 este valor se busca en el eje Y de la gráfica, intersecándola con la curva dando una relación T/di de 2.3 y 1.75 respectivamente.

El valor del diámetro del tanque (T) es 0.0825 m.

• soluc 0 M, $d_p = 0.2375$ mm

$$d_{i1} = 0.02705$$

$$d_{i2} = 0.03587$$

$$d_{ipromedio} = \frac{0.02705 + 0.03587}{2} = 0.03146$$

• soluc 0 M, $d_p = 1.6891$ mm

$$d_{i1} = 0.02705$$

$$d_{i2} = 0.04714$$

$$d_{ipromedio} = \frac{0.02705 + 0.04714}{2} = 0.03709$$

• soluc 0.05 M, $d_p = 0.2375$ mm

$$d_{i1} = 0.02661$$

$$d_{i2} = 0.03587$$

$$d_{ipromedio} = \frac{0.02661 + 0.03587}{2} = 0.03124$$

• soluc 0.05 M, $d_p = 1.6931$ mm

$$d_{i1} = 0.02661$$

$$d_{i2} = 0.04714$$

$$d_{ipromedio} = \frac{0.02661 + 0.04714}{2} = 0.03688$$

• soluc 0.5 M, $d_p = 0.2375$ mm

$$d_{i1} = 0.02578$$

$$d_{i2} = 0.03587$$

$$d_{ipromedio} = \frac{0.02578 + 0.03587}{2} = 0.03083$$

• soluc 0.5 M, $d_p = 1.6931$ mm

$$d_{i1} = 0.02578$$

$$d_{i2} = 0.04714$$

$$d_{ipromedio} = \frac{0.02578 + 0.04714}{2} = 0.03646$$

Sustituyendo valores en ecuación No. 7

$$\frac{P * 1}{9.8 * 2 * 1030.8179 * 5.3456E - 4 * 0.04635} = 0.02245^{\frac{2}{3}} * \frac{0.0825}{0.03146}^{\frac{1}{2}} \exp 4.35 * \frac{0.1}{0.0825}^{-0.1}$$

$$P = 5.6869 \text{ Watt}$$

- Revoluciones por minuto del agitador

Calculándose por ecuación No. 11. El número de Potencia (Po) se asume de 5, las revoluciones por minuto sería:

$$N = \frac{5.6869}{5 * 11030.8179 * (0.03146)^5}^{\frac{1}{3}}$$

$$N = 32.9592 \text{ rps} = 1977.5521 \text{ rpm}$$

El valor de las revoluciones por minuto debe dar un número de Reynolds del impulsor mayor a 1000. Si este es menor se debe modificar las suposiciones.

El No. de Reynolds del impulsor se calcula por medio de:

$$Re = \frac{(d_i^2 * N * \rho_m)}{\mu_m} \text{ Ecuación 13}$$

La viscosidad de la solución se calcula por medio de ecuación 10

$$\mu_m = \frac{0.0010}{1 - \frac{0.02245}{0.6}}^{1.8} = 0.001071 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

La viscosidad del líquido a esa temperatura es de 0.001 Kg / (m*s)

$$\text{Re} = \frac{(0.03146)^2 * 32.9592 * 1030.8179}{0.001071} = 31395.50$$

Como el número de Reynolds es mayor a 25000 no debe hacerse ninguna corrección a la potencia obtenida anteriormente. Si fuese menor a 25000, debería multiplicarse la potencia por $4000 \text{ Re}^{-0.8}$.

Los cálculos para las soluciones con diferente concentración, tamaño de partícula y relación sólido líquido se muestran a continuación.

Tabla II. Datos de potencia y rpm para las distintas soluciones

Concentración (M)	ρ_L (kg/m ³)	Relación S/L (w/v)	Tamaño partícula (m)	ρ_m (kg/m ³)	V_{tS} (m/s)	ϕ_{Sm}	$d_{ipromec}$ (m)	P (watt)	N(rps)	N (rpm)	μ_L (N*s/m ²)	μ_m (N*s/m ²)	Re	P corregida (watt)
0	997.08	1/10	2.38E-4	1030.818	0.0463	0.0224	0.0315	5.6869	32.9592	1977.55	0.001	0.00107	31,395.50	5.6869
0	997.08	1/10	1.69E-3	1030.818	2.3370	0.0224	0.0371	264.1383	90.0461	5402.77	0.001	0.00107	119,220.8	264.138
0	997.08	1/5	2.38E-4	1064.556	0.0463	0.0449	0.0315	9.3251	38.4510	2307.06	0.001	0.00115	35,220.37	9.3251
0	997.08	1/5	1.69E-3	1064.556	2.3370	0.0449	0.0371	433.1187	105.049	6302.98	0.001	0.00115	133,745.0	433.119
0.05	1045.82	1/10	2.38E-4	1078.464	0.0359	0.0224	0.0312	4.624	30.6593	1839.56	0.00125	0.00134	24,103.01	5.7733
0.05	1045.82	1/10	1.69E-3	1078.464	1.8090	0.0224	0.0369	214.5675	83.5496	5012.98	0.00125	0.00134	91,540.52	214.567
0.05	1045.82	1/5	2.38E-4	1111.108	0.0359	0.0449	0.0312	7.5624	35.7651	2145.91	0.00125	0.00144	26,972.95	7.5624
0.05	1045.82	1/5	1.69E-3	1111.108	1.8090	0.0449	0.0369	350.9163	97.4633	5847.80	0.00125	0.00144	102,440.0	350.916
0.5	1110.82	1/10	2.38E-4	1132.229	0.0270	0.0224	0.0308	3.6735	28.5607	1713.64	0.0016	0.00171	17,935.86	5.8098
0.5	1110.82	1/10	1.69E-3	1132.229	1.3598	0.0224	0.0365	170.3155	77.5810	4654.86	0.0016	0.00171	68,138.81	170.315
0.5	1110.82	1/5	2.38E-4	1163.638	0.0270	0.0449	0.0308	5.993	33.3168	1999.01	0.0016	0.00184	20,022.06	8.6795
0.5	1110.82	1/5	1.69E-3	1163.638	1.3598	0.0449	0.0365	277.8557	90.5002	5430.01	0.0016	0.00184	76,064.42	277.856

Fuente: ecuaciones 7-13

1.6 Equilibrio de ionización para una solución de la sal de ácido dibásico Na₂A

Esta solución es la correspondiente a la sal doblemente sustituida Na₂A, del ácido dibásico H₂A. La hidrólisis del anión A²⁻ de esta sal produce una solución básica. Con sales de este tipo sólo es de interés la basicidad de la solución.

En el caso del sulfito de sodio, éste consiste en una sal de un ácido diprótico cuyas constantes de equilibrio k₁ y k₂ corresponden a un sistema débil (k₁=1.7E-2) y muy débil (k₂=6.2E-8)

Con la siguiente ecuación puede determinarse el pH inicial de soluciones de la sal, en este caso el sulfito de sodio, a diferentes concentraciones, la cual incluye el aporte de los iones OH_w⁻ o H_w⁺ del agua si $\text{pH}_{\text{osistema}} < \frac{\text{pk}_w}{2} + 1$

$$[\text{H}_3\text{O}^+]^4 + (2C_{s,2} + k_1)[\text{H}_3\text{O}^+]^3 + (k_1k_2 - k_w + k_1C_{s,2})[\text{H}_3\text{O}^+]^2 - k_wk_1[\text{H}_3\text{O}^+] - k_wk_1k_2 = 0$$

Ecuación 14

C_{s,2} representa la molaridad inicial de la sal Na₂A.

Si esta condición no se cumple, puede utilizarse la ecuación no.15 si ambas constantes de hidrólisis (k₁ y k₂) son significativas.

$$[\text{H}_3\text{O}^+]^3 + \frac{k_1C_{s,2} - k_w}{2C_{s,2}} [\text{H}_3\text{O}^+]^2 - \frac{k_wk_1}{2C_{s,2}} [\text{H}_3\text{O}^+] - \frac{k_wk_1k_2}{2C_{s,2}} = 0$$

Ecuación 15

Como en el caso del sulfito de sodio, solamente la k_2 de hidrólisis es significativa, se puede emplear la ecuación siguiente:

$$[\text{H}_3\text{O}^+]^2 - \frac{k_w}{C_{s,2}} [\text{H}_3\text{O}^+] - \frac{k_w k_2}{C_{s,2}} = 0 \quad \text{Ecuación 16}$$

1.6.1 Equilibrios de ionización para una solución de la sal ácida dibásica NaHA

Esta solución puede representar una solución amortiguadora, ya que las soluciones acuosas de las sales monosustituidas de ácidos dibásicos y bases fuertes pueden resistir, sin cambios significativos de pH, la adición de pequeñas cantidades de ácidos y bases fuertes.

Las soluciones de este tipo puede ser ácidas o básicas; esto dependerá de los valores k_1 y k_2 , así como en la concentración de la sal NaHA. El anión HA^- de la sal puede experimentar hidrólisis, generando una solución básica. Por otra parte, puede combinarse con H_2O , dando $[\text{H}_3\text{O}^+]$ y una solución ácida.

Como la solución de sulfito de sodio 0.005 M se vuelve ácida durante la lixiviación de taninos,

La solución NaHA es ácida:

Y por tanto, con esta ecuación puede determinarse el pH que tiene la solución al final de la lixiviación.

$$[\text{H}_3\text{O}^+]^3 + (\text{C}_{\text{s},1} + k_1)[\text{H}_3\text{O}^+]^2 - K_1k_2[\text{H}_3\text{O}^+] - K_1k_2\text{C}_{\text{s},1} = 0 \quad \text{Ecuación 17}$$

$\text{C}_{\text{s},1}$ representa la molaridad inicial de la sal NaHA.

1.6.2 Equilibrios de ionización para soluciones de las sales de ácido dibásico NaHA y Na₂A

Una solución de este tipo puede representar una solución amortiguadora preparada para establecer y mantener un valor específico de pH en la solución.

La $[\text{H}_3\text{O}^+]$ de una solución acuosa de dibásico NaHA y Na₂A dependerá de los valores de k_1 y k_2 para el ácido dibásico, así como de las concentraciones de ambas sales.

Como las soluciones de sulfito de sodio 0.05 y 0.5 M se vuelven alcalinas durante la lixiviación de taninos,

La solución de NaHA -Na₂A es básica:

De modo que con esta ecuación puede determinarse el pH que tiene la solución al final de la lixiviación.

$$[\text{H}_3\text{O}^+]^2 - \frac{k_2\text{C}_{\text{s},1} + k_w}{\text{C}_{\text{s},2}} [\text{H}_3\text{O}^+] - \frac{k_w k_2}{\text{C}_{\text{s},2}} = 0 \quad \text{Ecuación 18}$$

$\text{C}_{\text{s},1}$ y $\text{C}_{\text{s},2}$ representan las molaridades iniciales de las sales NaHA y Na₂A .

En este caso, puede considerarse que $C_{s,1}$ y $C_{s,2}$ se encuentran en una proporción 1/1 y por lo tanto cada una de ellas corresponde a la mitad de la concentración inicial del sulfito de sodio.

1.7 Capacidad amortiguadora

La capacidad amortiguadora de una solución (β) es la aptitud para resistir los cambios del pH debidos a la adición de sustancias ácidas o básicas a la solución. La capacidad amortiguadora suele definirse como el número de moles de base fuerte que se requieren para modificar el pH de un litro de solución en una unidad.

Se puede calcular por medio de las siguientes ecuaciones:

$$K_2 = 10^{-\text{pH}_{\text{exp}}} * \left(\frac{C_{\text{NaHA}}}{C_{\text{Na}_2\text{A}}} \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\frac{C_{\text{NaHA}}}{C_{\text{Na}_2\text{A}}} = \frac{C_x}{C_0 - C_x} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\beta = 2.303 \left[10^{-\text{pH}_{\text{exp}}} + 10^{-(\text{pkw}-\text{pH})} \right] + 2.303 * \frac{(C_0 - C_x)C_x}{C_0} \quad \text{Ecuación 21}$$

De modo que para la concentración 0.005 M de Na_2SO_3 se tiene:

Sustituyendo en la ecuación 19 y 20,

$$6.2E - 8 = 10^{-4.5} * \frac{C_{\text{HSO}_3^-}}{C_{\text{SO}_3}^{-2}}$$

$$\frac{C_{\text{HSO}_3^-}}{C_{\text{SO}_3}^{-2}} = 0.001961 = \frac{C_x}{0.005 - C_x}$$

$$C_x = 9.7858E - 6$$

Con estos valores encontrados, se utiliza la ecuación 21,

$$\beta = 2.303[10^{-4.5} + 10^{-(12.97-4.5)}] + 2.303 * \frac{(0.005 - 9.7858E - 6)9.7858E - 6}{0.005}$$

$$\beta = 9.53E - 5$$

Y así se determina el valor de β para 1 litro de solución, pero como en la presente investigación se trabajó con un volumen de 300 ml debe hacerse la corrección para dicho volumen, obteniendo así el valor de $\beta = 2.86E - 5$.

De la misma manera se pueden calcular los valores de β para las demás concentraciones de sulfito de sodio.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Localización

La parte experimental de la investigación se llevará a cabo en las siguientes instalaciones:

1. Laboratorio de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la USAC.
2. Laboratorio de la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la USAC.
3. Laboratorio de Investigación de Productos Naturales, LIPRONAT, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC.

2.2 Recursos humanos

Investigador: Br. Claudia Beatriz Montenegro Franco
Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

2.3 Obtención de las muestras

En este estudio se utilizará mangle rojo (*Rhizophora mangle*) debido a que la literatura reporta que posee alto contenido de taninos, y se enfocará en la corteza debido a que es aquí en donde se encuentra la mayor cantidad de los mismos.

Las muestras de *Rhizophora mangle* provendrán de los manglares de Chiquimulilla, Santa Rosa, proporcionadas por el Centro de Estudios del Mar y Acuicultura (CEMA), las cuales se solicitarán con un mes de anticipación al inicio del proyecto.

Se colectará toda la corteza del árbol en general y posteriormente se procederá al secado de la misma en el secador solar de la Facultad de Agronomía de la USAC para eliminar la mayor cantidad posible de humedad. Seguidamente se terminará de secar en el horno de la sección de Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Luego se trasladará hacia la carpintería del Centro de Investigaciones de Ingeniería para cortarla en pedazos más pequeños y más fáciles de moler. La molienda se realizará con un molino de cuchillas que se encuentra en la Facultad de Veterinaria, en el Laboratorio de Bromatología. Con esto, se llevará a cabo el proceso de extracción de taninos por medio de maceración dinámica con reflujo a nivel laboratorio.

2.4 Diseño experimental

2.4.1 Modelos matemáticos

Utilizando el arreglo combinatorio de lixiviación de la corteza de mangle, se procede a realizar un monitoreo en función del tiempo de cada arreglo combinatorio para elaborar los perfiles de evolución de la lixiviación y que se correlacionarán para establecer su reproducibilidad.

2.4.2 Análisis estadístico

Para la evaluación estadística se utilizará un diseño con un arreglo combinatorio, en el cual se aplicará un experimento factorial sobre la especie de estudio evaluando 1 corteza y utilizando la técnica de maceración dinámica a reflujo con 4 concentraciones de coadyuvante (C).

C1 = concentración 1 (0 M)

C2= concentración 2 (0.005 M)

C2= concentración 3 (0.05 M)

C3= concentración 4 (0.5 M)

Se utilizarán dos tamaños de partícula (P): El primero corresponde a un tamaño entre 0.1778 y 0.2972 mm; el segundo, a un tamaño entre 1.397 y 1.9812 mm

P1= tamaño de partícula 2 (0.1778-0.2972 mm)

P2= tamaño de partícula 1 (1.397-1.9812 mm)

También se trabajará con dos relaciones de masa de sólido/volumen de solución extractora (R).

R1= relación masa de sólido/volumen de solución (1/10)

R2= relación masa de sólido/volumen de solución (1/5)

Se realizarán 3 repeticiones para cada combinación, de modo que el total de tratamientos será igual a: $4C \times 2P \times 2R \times 3 \text{ réplicas} = 48$ tratamientos.

Se realizarán las extracciones por un ciclo de 8 horas, a una temperatura de 60°C y con una agitación de 1000 rpm.

Con los datos obtenidos se realizará un análisis de varianza factorial para cada variable de respuesta evaluada (pH, densidad y sólidos extractables).

Tabla III. Variables para el diseño factorial

Concentración coadyuvante	Relación masa/ sólido/volumen solución	Tamaño de partícula	PH, densidad y sólidos extractables			Total	Promedio
			Repeticiones				
			1	2	3		
C1	R1	P1	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	Y_1	y_1
		P2	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	Y_2	y_2
	R2	P1	$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	Y_3	y_3
		P2	$Y_{4,1}$	$Y_{4,2}$	$Y_{4,3}$	Y_4	y_4
C2	R1	P1	$Y_{5,1}$	$Y_{5,2}$	$Y_{5,3}$	Y_5	y_5
		P2	$Y_{6,1}$	$Y_{6,2}$	$Y_{6,3}$	Y_6	y_6
	R2	P1	$Y_{7,1}$	$Y_{7,2}$	$Y_{7,3}$	Y_7	y_7
		P2	$Y_{8,1}$	$Y_{8,2}$	$Y_{9,3}$	Y_8	y_8
C3	R1	P1	$Y_{9,1}$	$Y_{9,2}$	$Y_{9,3}$	Y_9	y_9
		P2	$Y_{10,1}$	$Y_{10,2}$	$Y_{10,3}$	Y_{10}	y_{10}
	R2	P1	$Y_{11,1}$	$Y_{11,2}$	$Y_{11,3}$	Y_{11}	y_{11}
		P2	$Y_{12,1}$	$Y_{12,2}$	$Y_{12,3}$	Y_{12}	y_{12}
						Y_1	y

Fuente: Referencia 9

Donde:

Y_a = es el total de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento

y = es el promedio de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento

Y_1 = es la suma de todas las observaciones

Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, siendo

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

H_1 : *Por lo menos dos tratamientos son distintos*

Las operaciones para el análisis de varianza se resumen en la siguiente tabla, así como las fórmulas de cálculo para la suma de cuadrados.

Se trabajará con un experimento de tres factores A, B y C (concentración de coadyuvante, tamaño de partícula, y relación sólido/líquido respectivamente).

El modelo será: $y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{ijk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$
 $i = 1, 2, \dots, a; \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 1, 2, \dots, c; \quad l = 1, 2, \dots, n$

El número total de réplicas (n) es 48. El número de concentraciones de coadyuvante utilizadas (a) es 4, la cantidad de tamaños de partículas utilizadas (b) es 2 y las relaciones sólido/líquido empleadas (c) también son 2.

Tabla IV Análisis de Varianza para un experimento de tres factores con n réplicas

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	f calculada
Efecto principal				
A	$bcn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i...} - \bar{y}_{...})^2$	$a - 1$	S_1^2	$f_1 = \frac{S_1^2}{S^2}$
B	$acn \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2$	$b - 1$	S_2^2	$f_2 = \frac{S_2^2}{S^2}$
C	$abn \sum_{k=1}^c (\bar{y}_{...k} - \bar{y}_{...})^2$	$c - 1$	S_3^2	$f_3 = \frac{S_3^2}{S^2}$
Interacción de 2 factores				
AB	$cn \sum_i \sum_j (\bar{y}_{ij...} - \bar{y}_{i...} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2$	$(a-1)(b-1)$	S_4^2	$f_4 = \frac{S_4^2}{S^2}$
AC	$bn \sum_i \sum_k (\bar{y}_{ik...} - \bar{y}_{i...} - \bar{y}_{...k} + \bar{y}_{...})^2$	$(a-1)(c-1)$	S_5^2	$f_5 = \frac{S_5^2}{S^2}$
BC	$an \sum_j \sum_k (\bar{y}_{jk...} - \bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...k} + \bar{y}_{...})^2$	$(b-1)(c-1)$	S_6^2	$f_6 = \frac{S_6^2}{S^2}$
Interacción de 3 factores				
ABC	$n \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{y}_{ijk...} - \bar{y}_{ij...} - \bar{y}_{.ik.} - \bar{y}_{.jk.} + \bar{y}_{i.} + \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...k} - \bar{y}_{...})^2$	$(a-1)(b-1)(c-1)$	S_7^2	$f_7 = \frac{S_7^2}{S^2}$
Error	$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (y_{ijkl...} - \bar{y}_{ijk.})^2$	$abc(n-1)$	S^2	
Total	$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (y_{ijkl...} - \bar{y}_{...})^2$	$abcn-1$		

Fuente: Referencia 9

Donde:

\bar{Y} = promedio de todas las abcn observaciones

$\bar{Y}_{i...}$ = promedio de las observaciones para el i-ésimo nivel del factor A

$\bar{Y}_{.j...}$ = promedio de las observaciones para el j-ésimo nivel del factor B

$\bar{Y}_{...k..}$ = promedio de las observaciones para el k-ésimo nivel del factor C

$\bar{Y}_{ij...}$ = promedio de las observaciones para el i-ésimo nivel de A y el j-ésimo nivel de B

$\bar{Y}_{ik...}$ = promedio de las observaciones para el i-ésimo nivel de A y el k-ésimo nivel de C

$\bar{Y}_{jk...}$ = promedio de las observaciones para el j-ésimo nivel de B y el k-ésimo nivel de C

$\bar{Y}_{...ijk}$ = promedio de las observaciones para la ijk-ésima combinación de tratamientos

2.5 Generación de Datos

Utilizando 30 g de corteza y un volumen de solución extractora de 300 ml para la relación 1/10 (w/v) y 60 g de corteza y 300 ml de solución extractora para la relación 1/5 (w/v) a una temperatura de 60 °C y una agitación de 1000 rpm.

Se llevará a cabo el monitoreo del proceso, realizando la extracción por un ciclo de 8 horas, el cual se subdividirá en 2 períodos (a y b) de la siguiente manera:

Tabla V. Períodos para el monitoreo de la lixiviación

Período	$\Delta\theta$ (min)	Duración período (h)	Parámetros de evaluación		
			pH	Densidad	Sólidos extractables
a	10	1			
b	60	7			

Fuente: Metodología experimental

Con base en esto, se utilizará una tabla con el formato siguiente

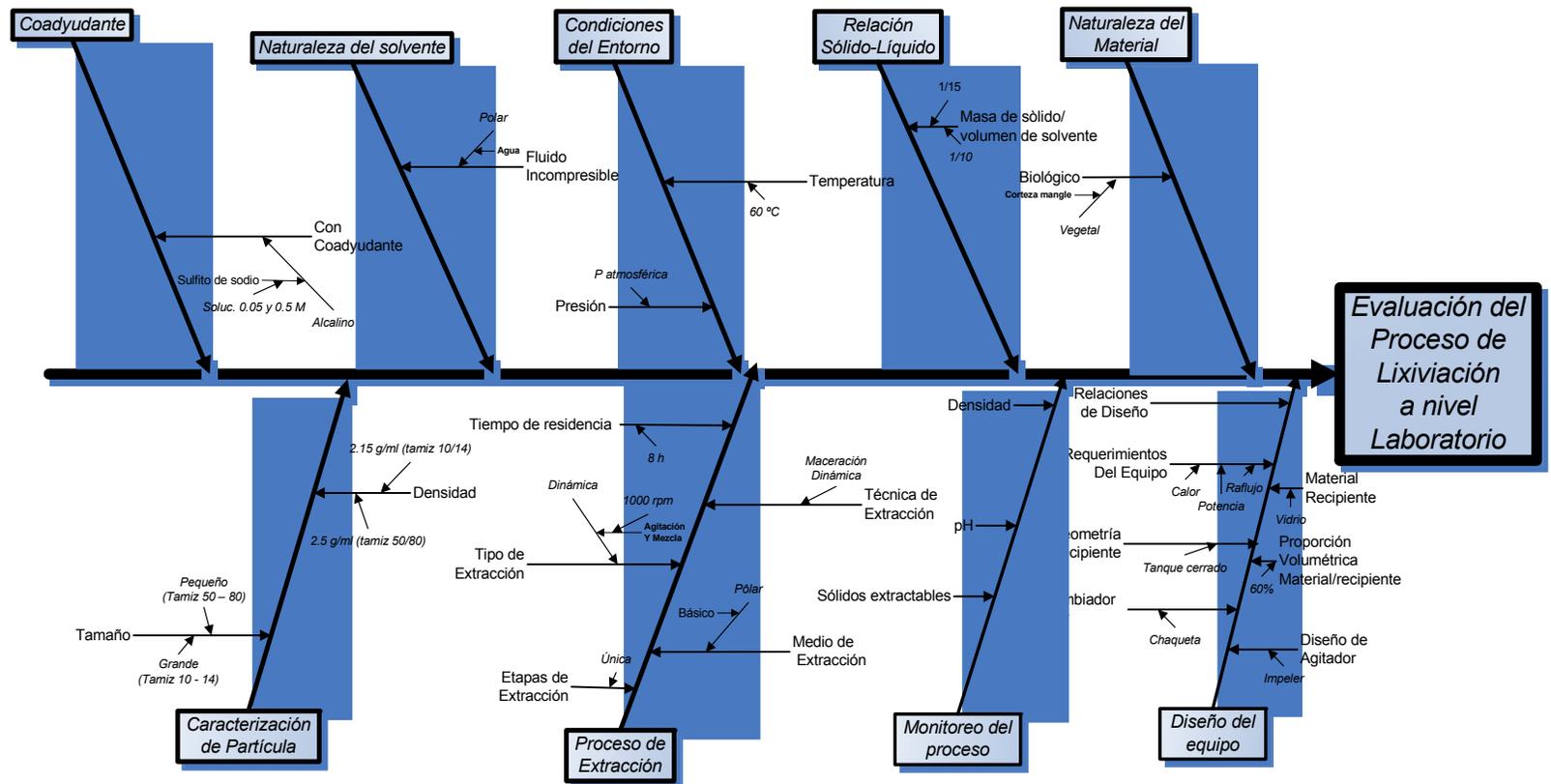
Tabla VI. Monitoreo para el curso de la lixiviación

tratamiento	pH, densidad, sólidos extractables												
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8h
C1, R1, P1													
C1, R1, P2													
C1, R2, P1													
C1, R2, P21													

Fuente: Tabla IV

2.6 Metodología experimental

Figura 10. Diagrama de Ishikawa únicamente con los parámetros considerados para la operación experimental a nivel laboratorio



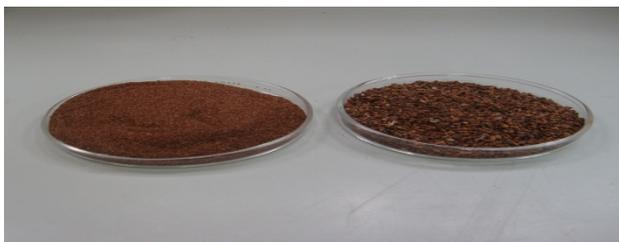
Fuente: Figura 1

2.6.1 Materiales y equipo a utilizar en la experimentación

2.6.1.1 Materia prima

Corteza de mangle rojo (*Rhizophora mangle*.) En la siguiente figura se muestran 30 g de corteza de mangle. En el lado izquierdo se observa dicha cantidad para el tamaño de partícula entre 0.1778 y 0.2972 mm; mientras que en el lado derecho se muestra la misma cantidad para la partícula correspondiente a un tamaño entre 1.397 y 1.9812 mm.

Figura 11. Cantidad de corteza de mangle para tamaños de partícula correspondientes a 0.1778- 0.2972 mm y 1.397-1.9812 mm



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

2.6.1.2 Cristalería

- Balones de 500 ml de 1 boca con esmeril 24/40
- Condensadores de 8 bolas con esmeril 24/40
- Beackers
- Probetas graduadas
- Agitadores
- Kitasato
- Picnómetro
- Embudo Buchner

2.6.1.3 Equipo

- Plancha de calentamiento
 - Marca: CORNING
 - No. Serie: 420504195081
 - Modelo: PC-420
 - Voltaje: 120 V
 - Frecuencia: 60 Hz.
 - Potencia: 698 W.
 - Hecha en Estados Unidos

Figura 12 Plancha de calentamiento



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

- Bomba de vacío
 - Marca: Gast
 - Modelo: O523-VAFG588DX
 - Voltaje: 100 -115 V
 - Frecuencia: 50 Hz.
 - Potencia: ¼ Hp.
 - Revoluciones: 1725/1425 rpm
 - Hecha en Michigan, USA

Figura. 13 Bomba de vacío



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

- Balanza
 - Marca: BOECO
 - Modelo: BBL31
 - Voltaje: 10-20 V
 - Frecuencia: 48-60 Hz.
 - Máxima Capacidad: 210 g.
 - Lectura Mínima: 0.0001 g
 - Hecha en Alemania

Figura 14 Balanza



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

- Potenciómetro
 - Marca: WTW
 - Modelo: pH 330i
 - No. serie: 02280026
 - Voltaje: 6 V
 - Rango de medición:
2,000 ... +19,999 unidades de pH;
-2,00 ... +19,99 unidades de pH.
 - Hecho en Alemania.

Figura 15 Potenciómetro



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

- Conductímetro
 - Marca: Hanna instruments
 - Modelo: HI8733
 - No. serie: 186180
 - Voltaje: 9 V
 - Rango de medición:
 - de 0.0 a 199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$
 - de 0 a 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$
 - de 0.00 a 19.99 mS/cm
 - de 0.0 a 199.9 mS/cm

Figura 16 Conductímetro



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

- Incubadora
 - Marca: Fischer Scientific isotemp 500 series
 - Modelo: 516D
 - No. serie: 00300016
 - Voltaje: 115 V
 - Frecuencia: 60 Hz.
 - Hecho en USA.

Figura 17 Incubadora



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

- Lámpara estroboscópica
 - Marca: AMETEK
 - Modelo: R-200
 - No. Serie: 011188043
 - Voltaje: 117 V
 - Frecuencia: 50-60 Hz.
 - Rango de medición:
200-6600 flash/min
 - Hecha en USA.

Figura 18 Lámpara Estroboscópica



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

2.6.1.4 Reactivos

- Sulfito de sodio Grado Industrial marca Merck

Figura 19. Volumen de 300 ml de solución de sulfito de sodio 0.5 M

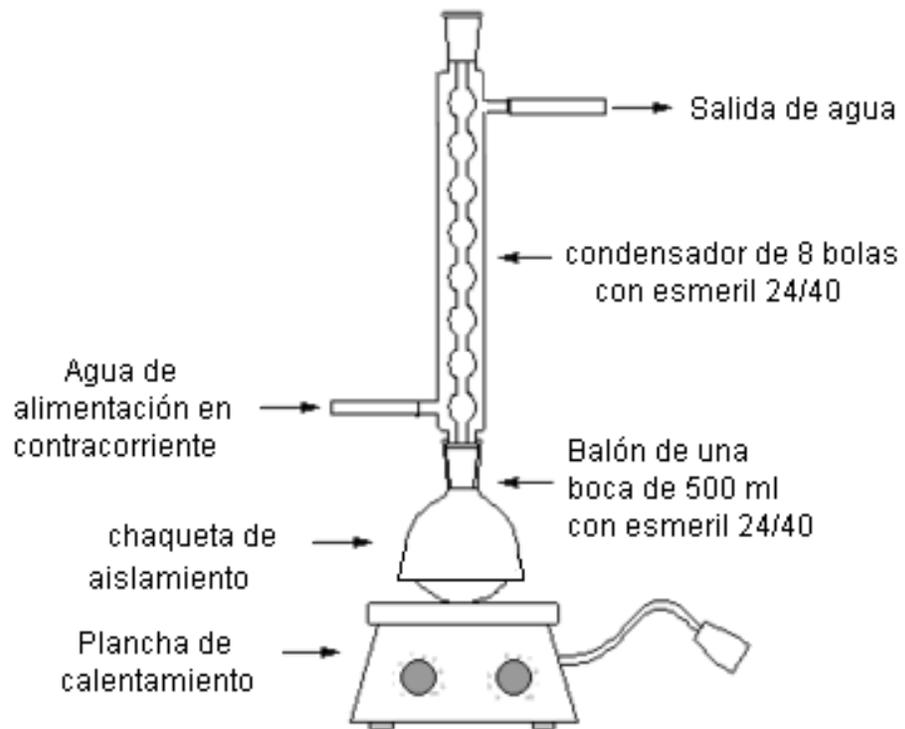


Fuente: : Laboratorio de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

- Agua desmineralizada marca Salvavidas
- Solución buffer pH 4
- Solución buffer pH 7

2.6.2 Equipo de lixiviación con reflujo

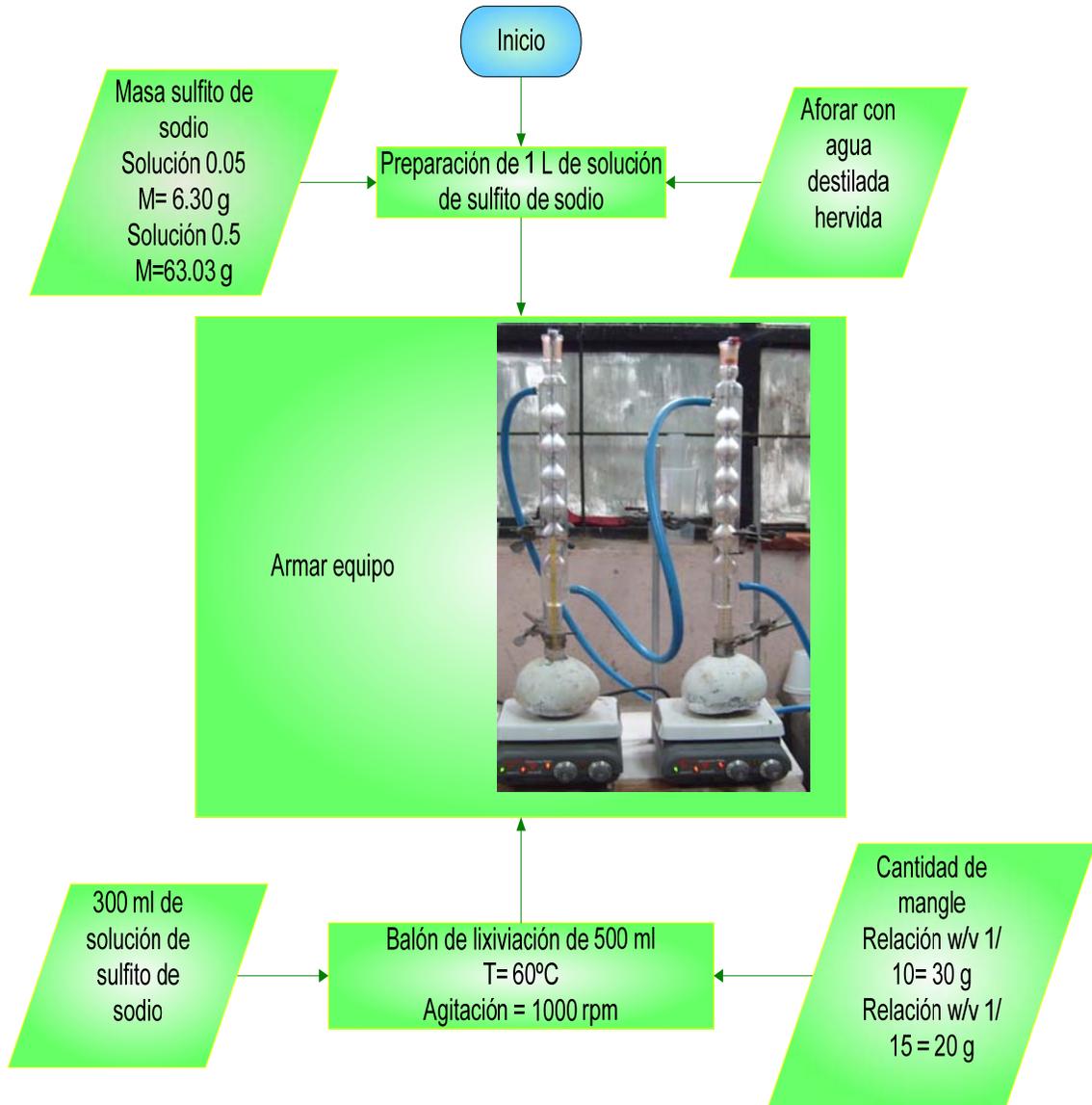
Figura No.20 Equipo de Lixiviación con Reflujo.

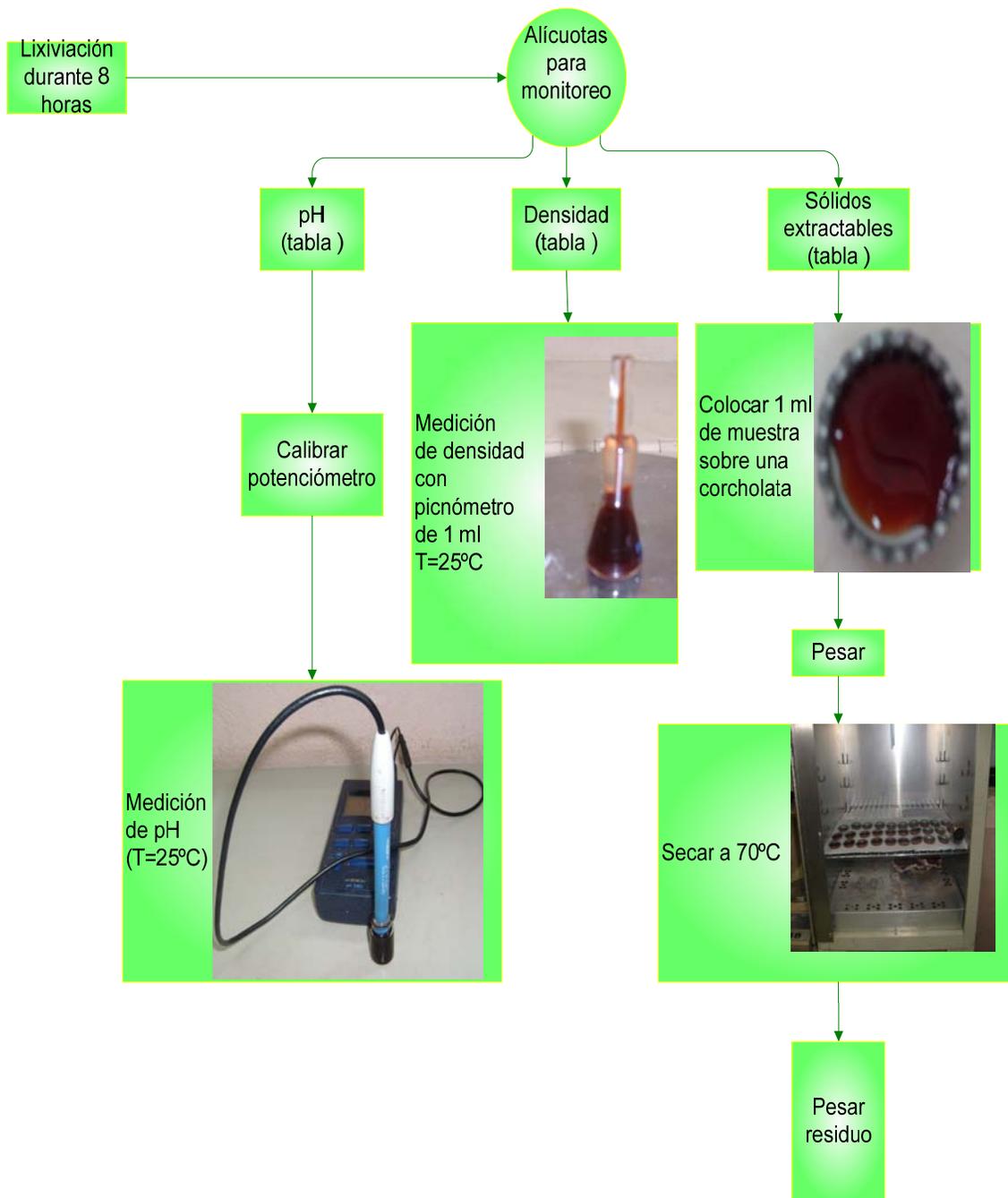


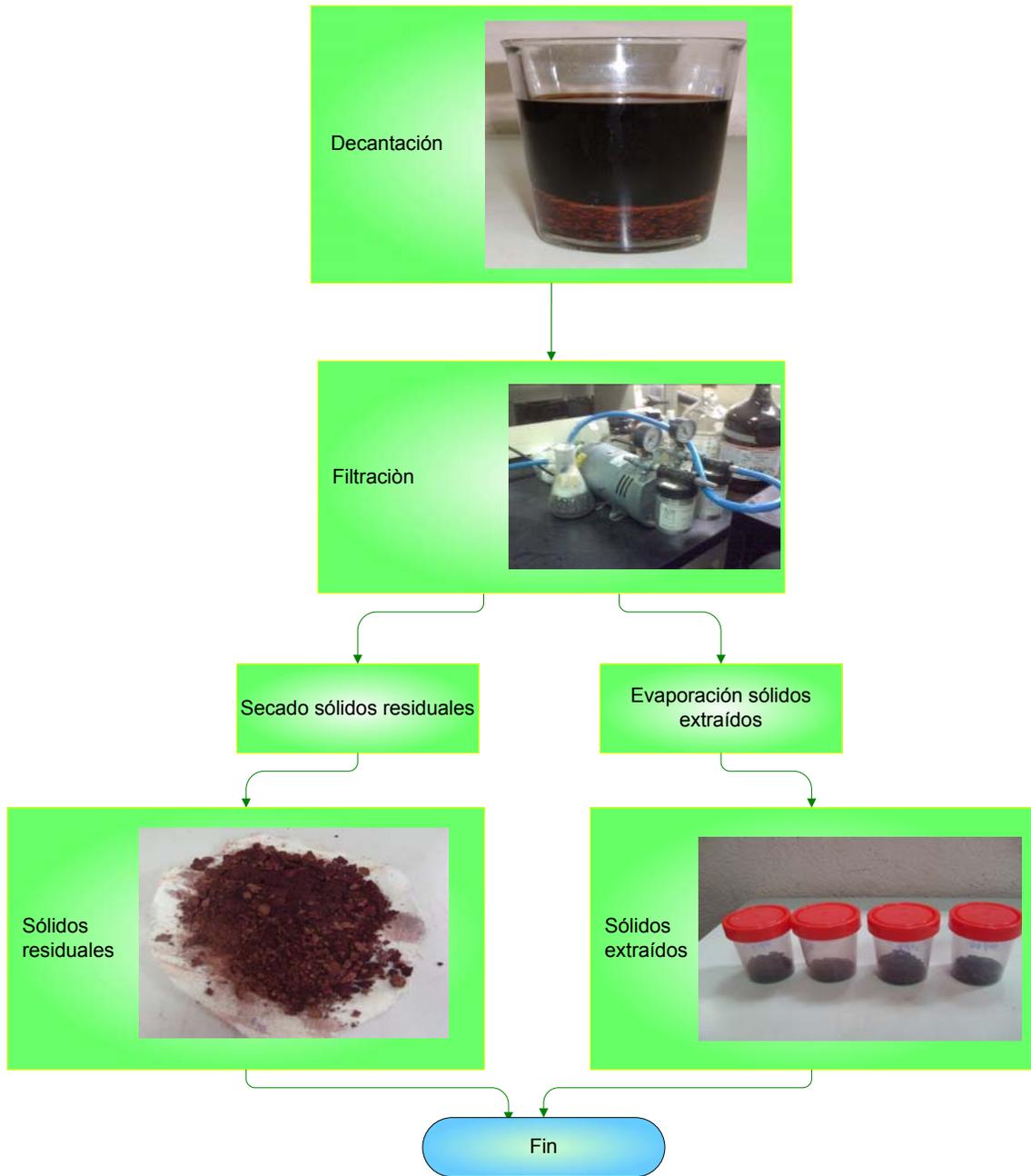
Fuente: Referencia 6

2.6.3 Técnica de extracción de sólidos solubles a nivel laboratorio

Figura 21. Diagrama de flujo para el proceso de extracción de sólidos solubles







Fuente: Referencias 1-9

2.6.4 Impacto ambiental

Los desechos obtenidos serán:

2.6.4.1 Soluciones de sulfito de sodio

De acuerdo a su ficha de seguridad, esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente y debería prestarse atención especial a los organismos acuáticos.

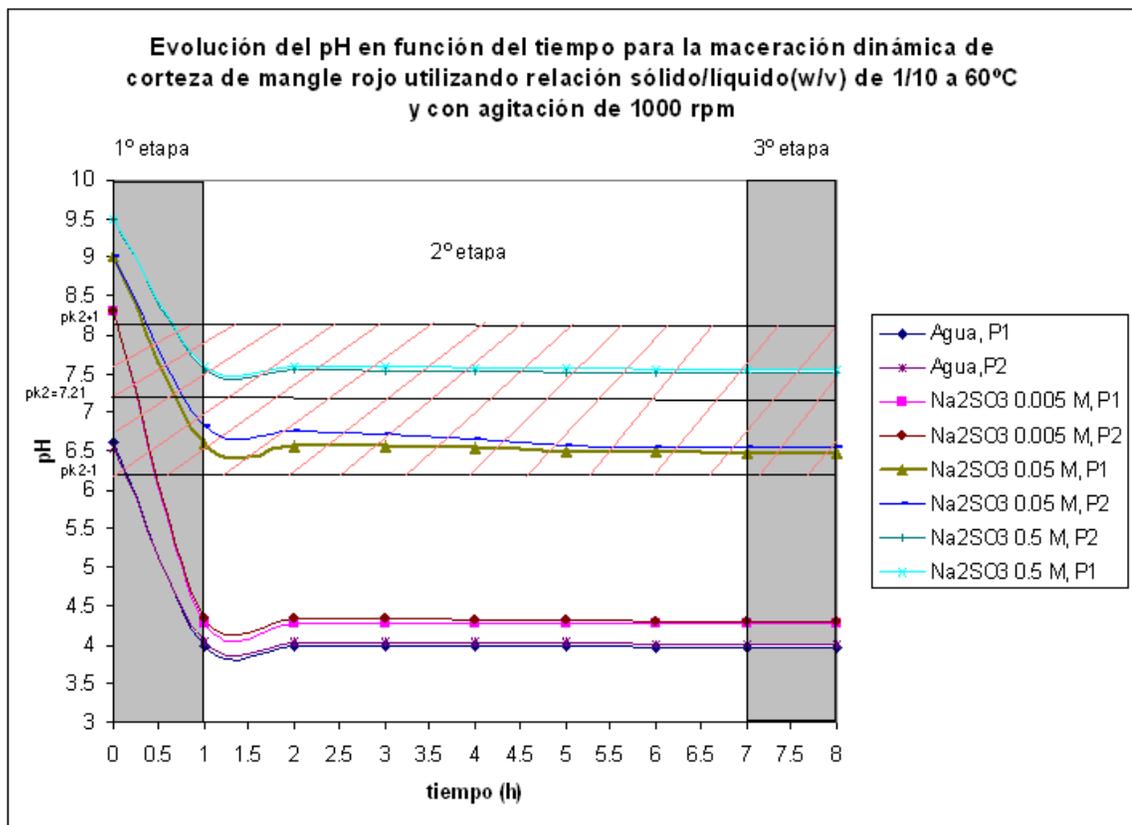
El tratamiento que se le dará a este tipo de desechos consistirá en la neutralización de las soluciones de sulfito de sodio hasta un pH de 7, luego de lo cual podrán desecharse por el desagüe.

2.6.4.2 Corteza de mangle rojo

No representan un peligro para el ambiente, debido a la capacidad de degradación de la materia orgánica. Por esta razón, los desechos de este tipo se enterrarán en jardines y áreas verdes.

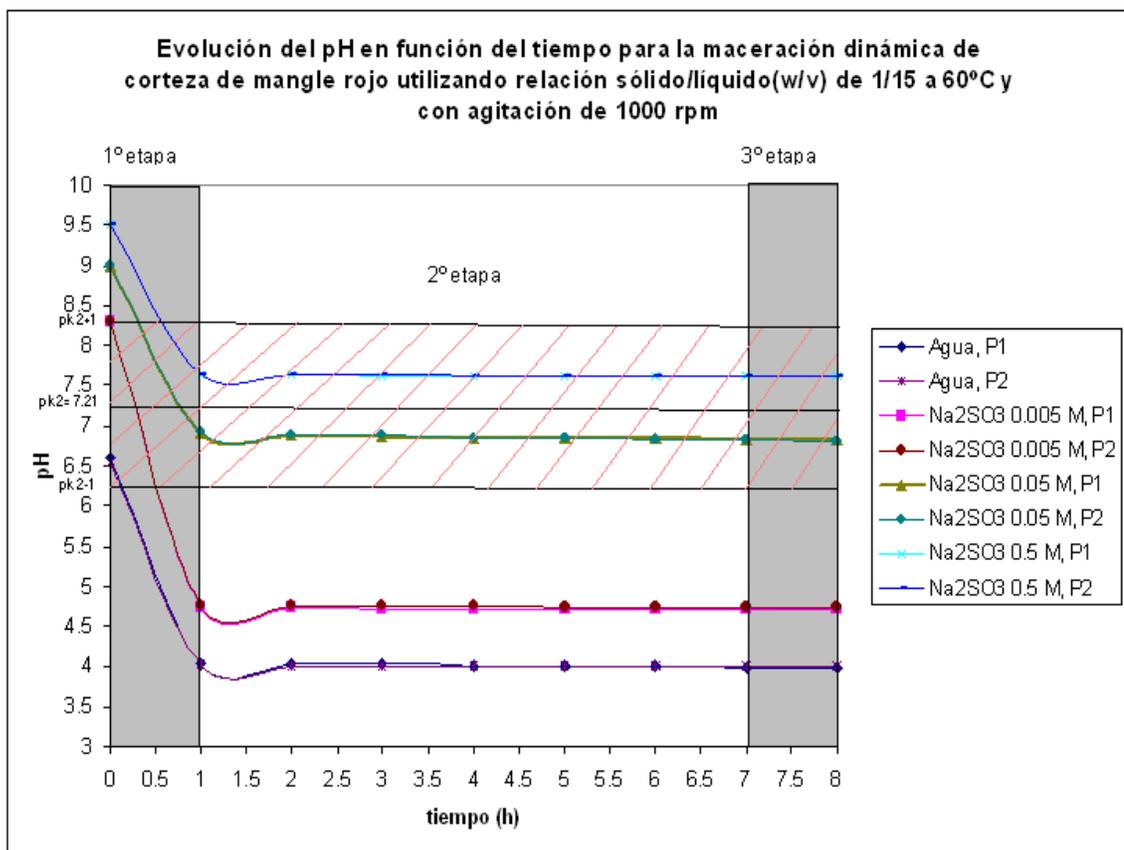
3. RESULTADOS

Figura 22. Gráfica de la evolución del pH en función del tiempo para la maceración dinámica de corteza de mangle rojo, utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/10 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.



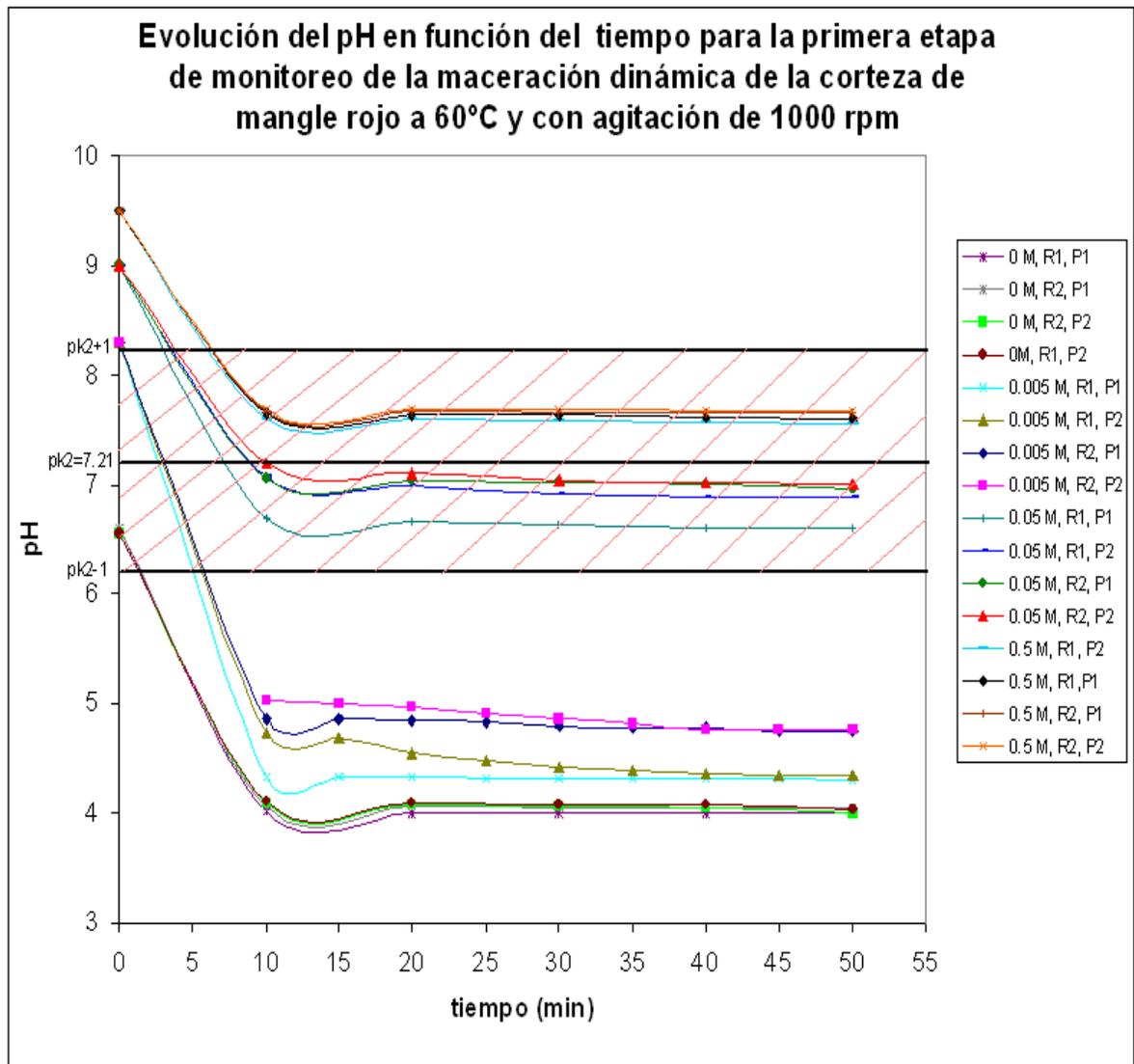
Fuente: Tablas XII, XV, XXIV, XXVII, XXXVI, XXXIX, XLVIII y LI

Figura 23. Gráfica de la evolución del pH en función del tiempo para la maceración dinámica de corteza de mangle rojo, utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/15 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.



Fuente: Tablas XIX, XXII, XXX, XXXIII, XLII, XLV, LIV y LVII

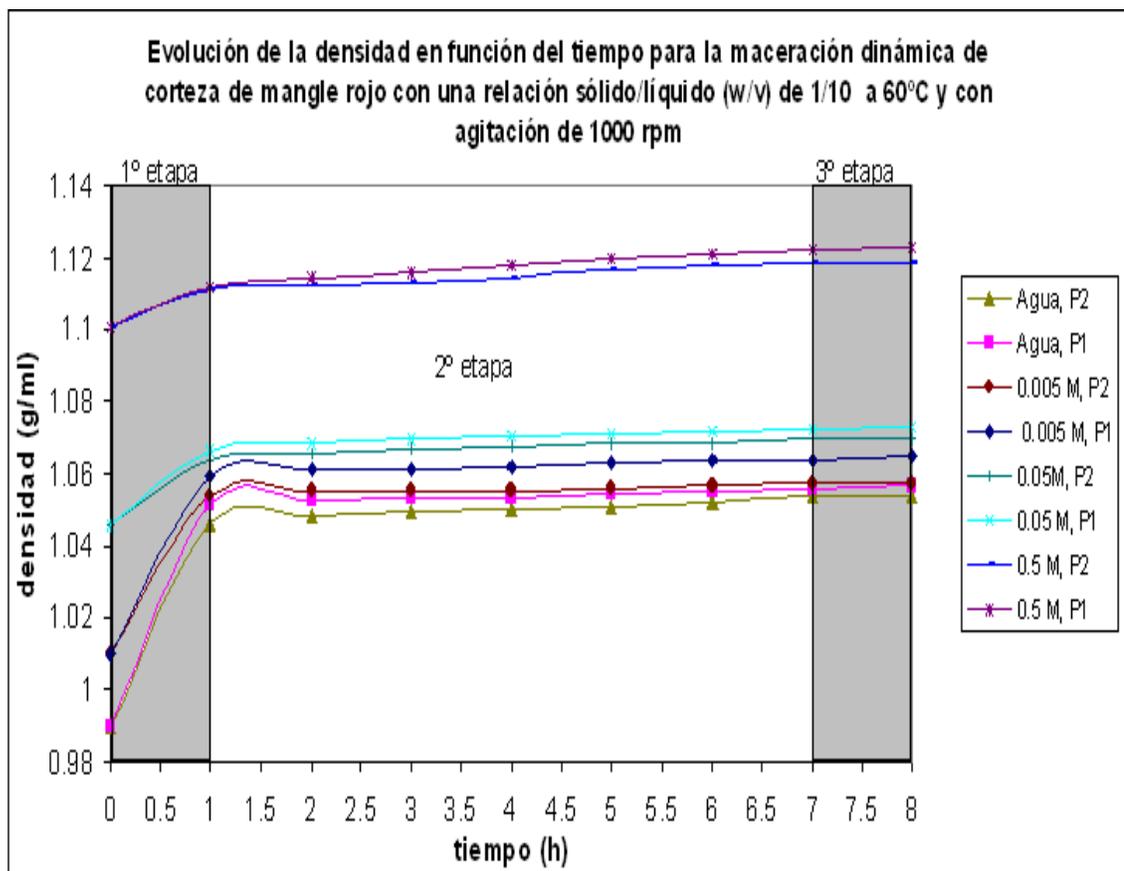
Figura 24. Gráfica de la evolución del pH en función del tiempo para la primera etapa de monitoreo de la maceración dinámica de corteza de mangle rojo para los dos tamaños de partícula, las dos relaciones sólido/líquido (w/v) y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.



Fuente: Tablas XII, XV, XIX, XXII, XXIV, XXVII, XXX, XXXIII, XXXVI, XXXIX, XLII, XLV, XLVIII, LI, LIV y LVII

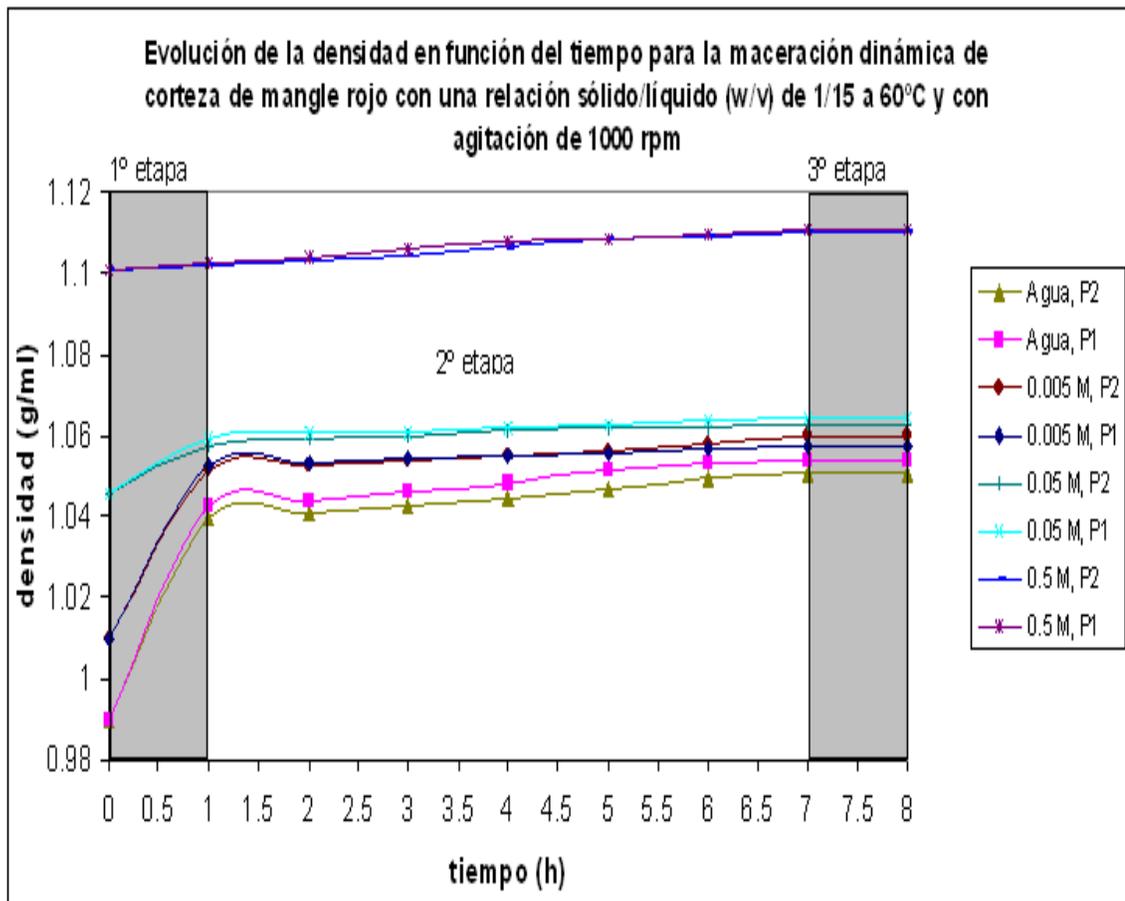
Zona tampón teórica

Figura 25. Gráfica de la evolución de la densidad en función del tiempo para el monitoreo de la maceración dinámica de corteza de mangle rojo, utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/10 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.



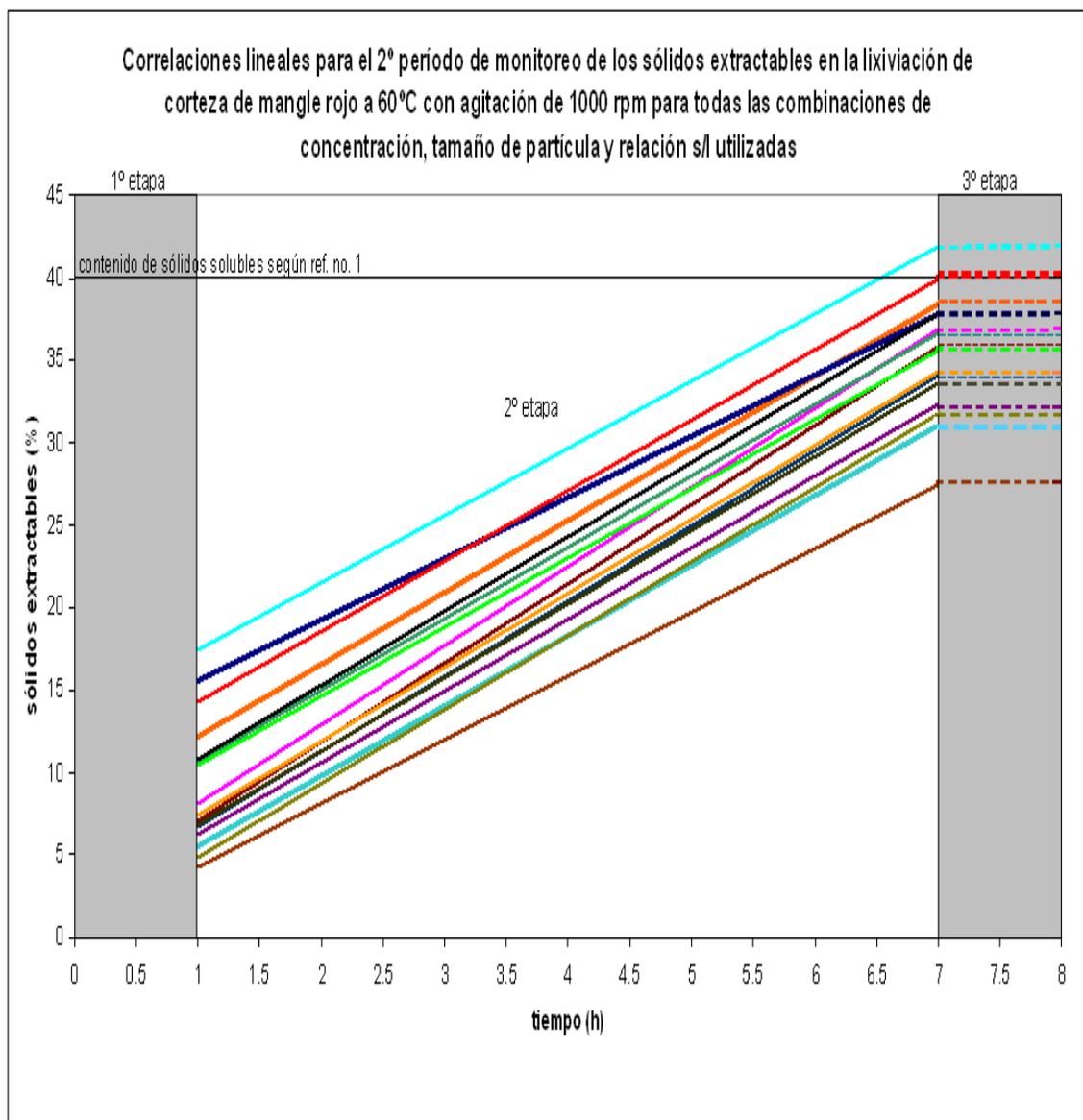
Fuente: Tablas XIII, XVI, XXV, XXVIII, XXXVII, XL, XLIX y LII

Figura 26. Gráfica de la evolución de la densidad en función del tiempo para la maceración dinámica de corteza de mangle rojo, utilizando una relación sólido/líquido (w/v) de 1/15 para los dos tamaños de partícula y las cuatro concentraciones de coadyuvante utilizadas.



Fuente: Tablas XX, XXIII, XXXI, XXXIV, XLIII, XLVI, LV y LVIII

Figura 27. Gráfica de correlaciones lineales para el segundo período de monitoreo de los sólidos extractables en función del tiempo para la lixiviación de corteza de mangle rojo para todas las combinaciones de concentración de coadyuvante, tamaño de partícula y relación sólido/líquido (w/v) utilizadas.



Fuente: Tablas XIV, XVII, XXI, XXIV, XXVI, XXIX, XXXII, XXXIV, XXXVIII, XLI, XLIV, XLVII, L, LIII, LVI y LIX

Tabla VII. **Correlaciones lineales para el segundo y tercer período de monitoreo de pH en función del tiempo a 60°C y 1000 rpm.**

Coeficientes de la ecuación lineal					
Concentración coadyuvante (M)	Relación masa sólido/volumen solución	Tamaño de partícula (mm)	m	b	R ²
0	1/10	0.1778-0.2972	-0.0033	3.9975	0.9655
		1.397-1.9812	-0.0031	4.0433	0.9571
	1/15	0.1778-0.2972	-0.0076	4.0476	0.9796
		1.397-1.9812	-0.0028	4.0225	0.9722
0.005	1/10	0.1778-0.2972	-0.0014	4.2875	0.9259
		1.397-1.9812	-0.0065	4.3507	0.954
	1/15	0.1778-0.2972	-0.0047	4.7458	0.9379
		1.397-1.9812	-0.0035	4.7676	0.9411
0.05	1/10	0.1778-0.2972	-0.0173	6.6048	0.9333
		1.397-1.9812	-0.0457	6.8549	0.9207
	1/15	0.1778-0.2972	-0.0108	6.9046	0.9244
		1.397-1.9812	-0.016	6.9265	0.9535
0.5	1/10	0.1778-0.2972	-0.0095	7.6156	0.9635
		1.397-1.9812	-0.0056	7.5548	0.9477
	1/15	0.1778-0.2972	-0.0041	7.6371	0.9586
		1.397-1.9812	-0.0042	7.6456	0.9835

Fuente: Figura 22 y 23

Tabla VIII. **Correlaciones lineales para el segundo y tercer período de monitoreo de la densidad en función del tiempo a 60°C y 1000 rpm**

Concentración coadyuvante (M)	Relación masa sólido/volumen solución	Tamaño de partícula (mm)	Coeficientes de la ecuación lineal		
			m	b	R ²
0	1/10	0.1778-0.2972	0.0007	1.0511	0.9858
		1.397-1.9812	0.0011	1.0458	0.9796
	1/15	0.1778-0.2972	0.0018	1.041	0.9653
		1.397-1.9812	0.0018	1.0373	0.9687
0.005	1/10	0.1778-0.2972	0.0007	1.0594	0.957
		1.397-1.9812	0.0004	1.0541	0.954
	1/15	0.1778-0.2972	0.0008	1.0517	0.9753
		1.397-1.9812	0.0014	1.0498	0.9829
0.05	1/10	0.1778-0.2972	0.0009	1.0665	0.9351
		1.397-1.9812	0.0008	1.064	0.9245
	1/15	0.1778-0.2972	0.0007	1.0586	0.9778
		1.397-1.9812	0.0007	1.0575	0.9071
0.5	1/10	0.1778-0.2972	0.0016	1.1113	0.9772
		1.397-1.9812	0.0011	1.1103	0.9791
	1/15	0.1778-0.2972	0.0013	1.1018	0.9649
		1.397-1.9812	0.0012	1.1012	0.958

Fuente: Figura 25 y 26

Tabla IX. **Correlaciones lineales para el segundo período de monitoreo de los sólidos extractables en función del tiempo a 60°C y 1000 rpm.**

Concentración coadyuvante (M)	Relación masa sólido/volumen solución	Tamaño de partícula (mm)	Coeficientes de la ecuación lineal		
			m	b	R ²
0	1/10	0.1778-0.2972	4.5536	2.2143	0.9972
		1.397-1.9812	4.2679	1.2143	0.9885
	1/15	0.1778-0.2972	4.3482	1.9283	0.9793
		1.397-1.9812	3.8482	0.4286	0.9859
0.005	1/10	0.1778-0.2972	4.7946	3.3286	0.9872
		1.397-1.9812	4.7832	2.2714	0.9754
	1/15	0.1778-0.2972	4.4357	2.4657	0.9765
		1.397-1.9812	4.5004	0.2514	0.9758
0.05	1/10	0.1778-0.2972	4.3571	7.8271	0.9891
		1.397-1.9812	4.3214	6.3486	0.9837
	1/15	0.1778-0.2972	4.2023	6.2414	0.9869
		1.397-1.9812	4.4809	2.8986	0.9901
0.5	1/10	0.1778-0.2972	4.0714	13.365	0.9722
		1.397-1.9812	3.7143	11.841	0.9972
	1/15	0.1778-0.2972	4.2857	9.9761	0.9792
		1.397-1.9812	4.5	6.3332	0.9888

Fuente: Figura 27

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El diseño de las unidades de maceración dinámica permitió extracciones efectivas y el monitoreo de las mismas. Las extracciones se mantuvieron estabilizadas con parámetros fijos de temperatura a 60°C, logrando mejor aprovechamiento del calor gracias a los aisladores construidos a partir de cáscara de coco; y de agitación a 1000 rpm, determinando la posición correcta de potencia del vibrador de la plancha de calentamiento a partir de una gráfica de calibración con el uso de una lámpara estroboscópica.

Se eligió un material sólido (corteza de mangle rojo o *Rhizophora mangle*) con un alto contenido de taninos, los responsables de la acidificación, que son ácidos tánicos y que se extraen en forma de iones tanatos en solución básica; y que además posee facilidad de humectabilidad, lo que hace que las resistencias internas del sólido a la difusión sean casi nulas.

Debido a estas condiciones, fue posible realizar el proyecto de evaluación experimental en cada uno de los tratamientos, así como la colección de muestras en medida y en número adecuado para llevar a cabo el monitoreo mediante el uso de equipo estable y calibrado.

Figura 28. **Diseño de las unidades de maceración dinámica**



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

4.1 Monitoreo del pH y el efecto tampón del coadyuvante

El monitoreo del pH se llevó a cabo por medio de la toma de muestras con el uso de una manguera que se introducía por la parte superior del condensador hasta llegar al balón de extracción y se succionaba por medio de una jeringa una alícuota de aproximadamente 5 ml, la cual posteriormente se colocaba en un dial y se esperaba a que llegara a temperatura ambiente para proceder a introducir el electrodo del potenciómetro y así realizar la medición del pH. Al terminar la medición, se regresó la cantidad de solución extraída del balón de lixiviación con la misma técnica de la jeringa. Esto, para no variar la proporción sólido/líquido durante el transcurso de la lixiviación.

Figura 29. Toma de muestras para el monitoreo de la lixiviación



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

Figura 30. Medición del pH durante el monitoreo



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

Durante el monitoreo del curso de la lixiviación de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) se pudo determinar que en el caso de la evaluación del pH, tal como se observa en las gráfica no. 1, ***ocurre una primera etapa en la que se da una disminución drástica en la lectura de dicho parámetro; la cual transcurre en menos de 10 minutos de iniciado el contacto sólido-líquido***, bajo las características de la operatoria experimental.

Esto puede observarse en los casos en los que se utilizó únicamente agua, ya que en menos de 30 minutos de iniciada la extracción, ocurre la acidificación total, es decir la disolución de las formas ácidas y la consiguiente generación de un pH de 4. Por lo tanto, ***luego de media hora, ya no ocurre acidificación en la solución de extracción y el pH se mantiene constante en este valor en el resto de la lixiviación.***

Debido a que existe la migración de un metabolito secundario presente en el mangle rojo que “genera acidez”, se ocasiona así una disminución de pH en la solución extractora de 2.5 unidades, lo cual es equivalente a un aumento en la concentración de iones H^+ de 316.22 veces en dicha solución. Esta disminución brusca del pH durante el primer período es el efecto de un 5% de los sólidos extractables. Es decir, que solamente un 5% de los sólidos extractables son ácidos, por lo que únicamente este porcentaje de la masa extractable es el encargado de cambiar el pH de la solución.

El coadyuvante empleado (sulfito de sodio) consiste en una sal de un ácido diprótico cuyas constantes de disociación 1 y 2 corresponden a un sistema débil ($k_1 = 1.7E-2$) y muy débil ($k_2 = 6.2E-8$).

Al preparar soluciones acuosas con dicha sal, se obtuvieron pH's iniciales alcalinos por hidrólisis según el equilibrio de la sal de un sistema diprótico, triplicándose la alcalinidad de las mismas por cada $\frac{1}{2}$ unidad de aumento del pH.

En el caso de dichas soluciones alcalinas, la salida de los sólidos solubles ácidos ocurre por medio de neutralización.

La respuesta dada por los ácidos tánicos a la alcalinidad de las soluciones de sulfito de sodio según la concentración con la que fueron preparadas y el pH de hidrólisis que sufre el ión sulfito, de acuerdo a la ecuación:



Se muestra en la tabla siguiente:

Tabla X. **Cambio de pH total en las soluciones extractoras de acuerdo a la concentración de coadyuvante con la que fueron preparadas**

Concentración de la sal (M)	pHo	$\Delta \text{PH} (*)$	$10^{\Delta \text{PH}}$
0.005	8.5	4	10000
0.05	9	2.4	251.19
0.5	9.5	1.9	79.43

Fuente: Tabla XII-LIX

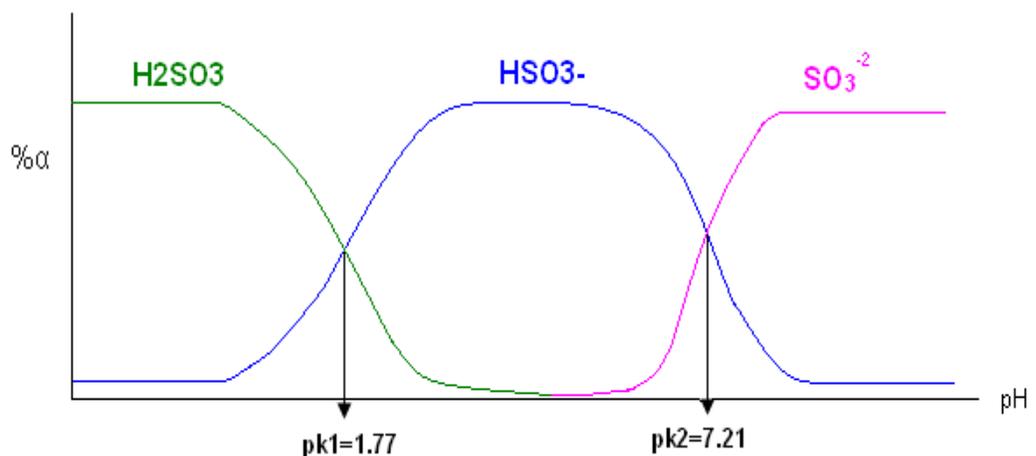
* A la adición de corteza molida de mangle rojo (tiempo de reducción del pH=10 min)

En estos casos, se observa el mismo fenómeno correspondiente a una reducción brusca del pH durante los primeros 10 minutos de lixiviación. De modo que la alcalinidad coadyuva solamente durante en esta primera etapa, por encontrarse presentes sólidos ácidos, el resto de sólidos se extraen sin dependencia del pH.

Sin embargo, la cantidad de sólidos ácidos extractables durante la primera hora aumenta con la concentración de sulfito de sodio de la solución extractora, ya que con la solución 0.05 M este valor corresponde a aproximadamente un 10% y con la solución 0.5 M, a 15% aproximadamente. No obstante, con la solución 0.005 M de sulfito de sodio se continúa extrayendo la misma cantidad de sólidos ácidos extractables que con agua, es decir 5%.

Entonces, **con las soluciones 0.05 y 0.5 M de sulfito de sodio, la distribución de las formas sulfito y bisulfito están en una proporción casi 1/1, observándose la formación de una solución tampón alrededor del valor de $pK_2= 7.21$ del ácido sulfuroso** gracias a la acidificación proporcionada por los taninos y a una cantidad de sal (6.3025 g y 63.025 g de sulfito de sodio respectivamente) que permiten que se lleve a cabo una hidrólisis forzada. Esto se observa en la gráfica siguiente.

Figura 31. **Curva de disociación del ácido sulfuroso**



Fuente: Referencia no. 3

Además, ***el efecto tampón se mantiene durante todo el curso de la extracción***, ya que el pH se mantiene alrededor del pK_2 y no baja hasta 4, como en el caso de la extracción con agua, indicando así que esta solución tampón posee suficiente capacidad amortiguadora.

Esto permite interpretar que ***se logra el efecto de tamponamiento tanto con la solución de sulfito de sodio 0.05 M como 0.5 M, proporcionando ambas similar capacidad amortiguadora.***

Ahora bien, ***con la solución de sulfito de sodio menos concentrada, con una concentración 0.005 M, el efecto tampón se pierde puesto que el pH de esta solución se reduce hasta 4 durante el transcurso de la lixiviación***, aunque esta reducción ocurre más lentamente a cómo ocurre con la extracción con agua únicamente.

En este caso, el sulfito de sodio queda presente casi completamente como bisulfito y ***no es posible la generación del tampón debido a que existe una cantidad superior de ácidos tánicos que genera demasiada acidez en relación a la alcalinidad por hidrólisis del sulfito de sodio.***

Esto puede corroborarse con los valores de la capacidad amortiguadora (β) calculados, ya que éstos corresponden a la cantidad de material acidificante (en este caso los taninos o ácidos tánicos equivalentes a iones H^+) que se requieren para modificar el pH de la solución (en este caso 300 ml) en una unidad. Estos valores se muestran en la tabla siguiente.

Tabla XI. **Capacidad amortiguadora para las soluciones de sulfito de sodio a diferentes concentraciones.**

Concentración de coadyuvante (M)	Capacidad amortiguadora (β)
0.005	2.86 E-5
0.05	5.87E-3
0.5	7.43E-3

Fuente: ecuación 19-21

Es decir que ***existe una concentración de sulfito de sodio intermedia entre 0.005 y 0.05 M con un valor de β entre 2.86 E-5 y 5.87 E-3 que representará el límite entre la existencia o no de un efecto tampón.***

Por otro lado, el tamaño de la partícula influye en la variación del pH de la solución conforme durante la lixiviación, ya que con la partícula gruesa, que es 7 veces más grande que la fina, se obtienen pH's mayores en aproximadamente 0.05 unidades al tiempo máximo.

Lo mismo ocurre con la relación sólido/líquido debido a que tanto con la relación 1/10 como con la relación (1/15), existe diferencia significativa en vista que con la relación 1/10 el pH al tiempo máximo disminuye aproximadamente 0.03 unidades más.

Es decir que con soluciones de sulfito de sodio hasta 100 veces más concentradas, el pH obtenido al final de la lixiviación depende del efecto tampón del coadyuvante, del tamaño de partícula y de la relación sólido/líquido.

4.2 Monitoreo de los sólidos extractables y rendimiento de taninos no acidificantes

Para la toma de muestras para el monitoreo de los sólidos extractables se llevó a cabo el mismo procedimiento mencionado con el pH; es decir, la introducción de la manguera con la jeringa para succionar alícuotas. Posteriormente, estas alícuotas de tan sólo 1 ml, para no variar la relación sólido/líquido en el balón de extracción durante todo el transcurso de la lixiviación, se colocaron en recipientes adecuados y previamente tarados; los cuales posteriormente se introdujeron en un horno a 70°C durante 12 horas para permitir el secado de las mismas y así lograr evaporar el agua y determinar la cantidad de sólidos extractables remanentes en el recipiente.

Figura 32. Monitoreo de los sólidos extractables



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

Al considerar las gráficas de sólidos extractables en función del tiempo, puede observarse que **las soluciones de sulfito de sodio extraen más solutos, no únicamente la cantidad correspondiente al intervalo de tiempo en el que el pH cambia, puesto que el resto de sólidos solubles ya no aportan efectos acidificantes.**

Esto se debe a que los típicos ácidos tánicos tales como los ácidos gálicos y sus derivados y los ácidos elíagicos y sus derivados se extraen en la primera etapa de la lixiviación, mientras que el resto de extracto corresponde a otros tipos de constituyentes de la corteza del mangle rojo.

De modo ***que el monitoreo del pH es útil principalmente durante la primera etapa de 10 minutos, pues esto permite conocer el porcentaje de metabolitos ácidos que equivalen a la cantidad total de masa extractable***, y que equivale en promedio aproximadamente a un 10 %.

En las gráficas de sólidos extractables se observa que éstos aumentan con el tiempo llegando a un punto en el que alcanza un máximo, más o menos a las 6 horas de extracción. Por lo que el hecho de que el pH disminuya drásticamente en los primeros 10 minutos y que no varíe a lo largo de la extracción, no es indicativo de que ya no haya sólidos extractables, lo que ocurre es que éstos ya no poseen cualidades ácidas, sino que solamente son solubles en el medio extractor tamponado o no.

Incluso puede observarse que la cantidad de sólidos solubles o extractables no acidificantes sí aumenta al utilizar una partícula más fina y también al emplear una relación sólido/líquido menor. Asimismo, es de observar que el aumento en la concentración de coadyuvante, hace que se extraigan cantidades mayores de sólidos. En comparación con la extracción al tiempo máximo utilizando únicamente agua, las soluciones de sulfito de sodio 0.005 M extraen aproximadamente un 1% más de sólidos solubles, las soluciones de sulfito de sodio 0.05 M extraen un 5 % más y las soluciones 0.5 M extraen aproximadamente 8% más de sólidos solubles.

Por lo que para mejorar la efectividad de la extracción con este tipo de coadyuvante es necesario mantener el tampón de la solución entre $pK_2 \pm 1$.

Los porcentajes de sólidos extractables varían entre 25 a 40 % de la masa total, lo cual concuerda con el dato bibliográfico que indica que la corteza de mangle rojo posee de 10-40% de taninos.

4.3 Monitoreo de la densidad

En este caso, para la toma de alícuotas también se utilizó la técnica de introducción de la jeringa y succión con la manguera a través del condensador. Posteriormente, se colocaron dichas alícuotas en un micropicnómetro de 1 ml para realizar la medición de la densidad de las mismas.

Figura 33. **Medición de la densidad para el monitoreo**



Fuente: Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería

En la evaluación de la densidad se observa, al igual que en el pH, que ***existe un primer período relativamente corto en el que la densidad aumenta bruscamente, durante la primera hora, pero transcurrido este tiempo varía muy poco***, permaneciendo casi constante durante el resto de la lixiviación.

Sin embargo, **al aumentar la concentración del coadyuvante disminuye la variación total de la densidad de la solución**, es decir la diferencia entre la densidad de la solución al inicio y al final de las 8 horas de extracción; pues al utilizar agua la variación en la densidad es mucho mayor que al utilizar soluciones con sulfito de sodio 0.005, 0.05 y 0.5 M respectivamente. Incluso, con la solución más concentrada (0.5 M) el cambio en la densidad es muy poco apreciable.

En la medición de la densidad, se determinó igual efecto que como ocurre con los sólidos extractables y el pH debido a que la cantidad extraída aumenta con una partícula más fina, con la alcalinidad de las soluciones de sulfito de sodio y con relaciones sólido/líquido menores.

De acuerdo a los resultados obtenidos durante el monitoreo **tanto el pH como la densidad solamente muestran un cambio notable durante un período inicial muy corto y posteriormente no reflejan cambios a lo largo de la lixiviación. Por ello, el mejor parámetro de monitoreo para la lixiviación son los sólidos extractables.**

4.4 Análisis estadístico

Resultado del procesamiento de los datos experimentales, se llevó a cabo un análisis de varianza factorial para cada parámetro de evaluación monitoreado (pH, densidad y sólidos extractables).

En dicho análisis se realizó una visualización particular, y es **que las diferencias entre los valores F experimentales y críticos de la distribución de Fisher (ΔF) correspondieron a diferencias variadas desde muy pequeñas hasta sumamente grandes, por lo que para poder mostrar estas diferencias significativas en una gráfica con una escala apreciable; se calculó en una forma arbitraria el logaritmo de cada una de ellas, y se les llamó entonces $p(\Delta F)$. Para las diferencias no significativas no se calcularon los valores $p(\Delta F)$, porque este tipo de diferencias son no significativas *per se*.**

Además, se les otorgó una categorización propia, en la que **se consideró que un rango de valor de $1 \leq p(\Delta F) < 0$ corresponde a una diferencia significativa “muy poco notable”, un rango de valor de $0 \leq p(\Delta F) < 1$ es equivalente a una diferencia significativa “poco notable” y por último un rango de valor de $p(\Delta F) \geq 1$ corresponde a una diferencia significativa “notable”.** De manera que con este criterio fue posible realizar proyecciones gráficas en las que dicho criterio propuesto se puede percibir.

Con base en esta categorización arbitraria, se determinó que **existe diferencia significativa “notable” en los tres parámetros de respuesta independientes (pH, densidad y sólidos extractables) al tomar cuenta los efectos simples de cada variable de estudio: la concentración de la solución, del tamaño de partícula y de la relación sólido/líquido.**

Sin embargo, al combinar dos o tres de ellos en algunos casos no hay diferencias significativas y en otros sí, éstas últimas varían desde “notables” hasta “muy poco notables”.

CONCLUSIONES

1. Se estableció la existencia de un primer período en el que varía el pH de las soluciones extractoras por efecto de hidrólisis forzada sobre el coadyuvante y de acidificación intensa en el caso del agua. Después de dicho período el pH de las soluciones transcurre sin variación; diferenciando así dos etapas de extracción.
2. Durante la segunda etapa de monitoreo de la lixiviación para las dos soluciones de concentraciones mayores de coadyuvante (Na_2SO_3 0.05 y 0.5 M) el valor de pH se mantuvo alrededor del pk_2 del equilibrio ácido-base del ácido sulfuroso observándose por tanto efecto tampón.
3. Durante la segunda etapa de monitoreo de la lixiviación para la solución de concentración menor de coadyuvante (Na_2SO_3 0.005 M) y para el agua, el pH se mantuvo ácido, pero no se observó efecto tampón.

4. El monitoreo de los sólidos extractables de la corteza de mangle rojo en función del tiempo durante la segunda etapa de lixiviación, para todas las soluciones extractoras utilizadas, se describe mediante modelos matemáticos lineales de similar tendencia (pendiente).
5. Al final del segundo período de monitoreo de la lixiviación se observó en todas las extracciones realizadas que ya no se extraía más fracción soluble.
6. Existe una relación incremental en la densidad en el primer período identificado en función del tiempo y que coincide con el de variación del pH en el mismo, resultando en el segundo período identificado en el que se mantuvo la densidad constante.
7. El análisis de varianza establece para las variables respuesta, en forma independiente, diferencia significativa “notable”. Mientras que para la combinación de dos o tres de ellas, resultan en diferencias significativas variadas en magnitud.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la lixiviación de la corteza de mangle rojo en tres etapas. La primera llevarla a cabo hasta el punto en el que el pH deje de variar; para propósito de identificar los componentes ácidos.
2. La segunda etapa debe durar hasta el momento en que el porcentaje de sólidos extractables permanezca constante, y la tercera para verificar que permanezca constante la cantidad extraída; esta condición tiene el fin de determinar si al utilizar solución extractora nueva se puede continuar extrayendo en mayor cantidad.
3. Caracterizar por medio de tamizaje fotoquímico los extractos correspondientes a la primera, segunda y tercera etapa con el fin de determinar el tipo de metabolitos extractables presentes.
4. Utilizar el diagrama de causa y efecto como guía para el diseño y ejecución de los proyectos de investigación.

5. Realizar el monitoreo de la lixiviación de materiales similares a los constitutivos de la corteza de mangle rojo (taninos) en otras especies vegetales.

6. Realizar estudios histológicos del material vegetal que se va a investigar para ubicar los sólidos extractables en el tejido mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1
Esther Álvarez Godoy. **Extractivos del árbol.**
[http://www.ecoportal.net/contenido/temas_especiales/educacion_ambiental/extractivos del arbol](http://www.ecoportal.net/contenido/temas_especiales/educacion_ambiental/extractivos_del_arbol). Marzo 2008.
- 2
Diccionario botánica. <http://www.diccionariobotanica-TDV.NET.html>. Noviembre 2007.
3.
Dick, J.G. **Química Analítica.** (México: El Manual Moderno, 1979) p. 75-135.
4.
Geankoplis, Christie J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias.** (3ª edición; México: Compañía Editorial Continental, 2004) p. 800-815.
5.
Lixiviación. <http://www.lixiviacion.rincondelvago.html> Noviembre 2007.
6.
Los taninos. <http://www.agro.unlpam.edu.ar/cerdos/tercera.html>. Diciembre 2007.

7.
Sulfito de sodio. <http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn1200.htm>
Junio 2008.

8.
Taninos. <http://www.tubilladellago.com/taninos.html>. Noviembre
2007.

9.
Treybal, Robert E. **Operaciones de transferencia de Masa**. (2ª
edición; México: Editorial Mc Graw-Hill, 1988) p. 600-635 y 792-840.

10.
Walpole, Ronald, **Probabilidad y estadística para ingenieros**.
(6ª edición; México: Editorial Pearson Educación, 1999) p. 463-468.

BIBLIOGRAFÍA

1. Akú Ramírez, Ingrid Liliana. Evaluación del contenido tánico en la corteza de dos especies forestales guatemaltecas, mangle colorado (*Rhizophora mangle*) y pino blanco (*pinus ayacahuite*), por medio de dos métodos de extracción. Trabajo de graduación Ingeniería Química. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2000.
2. Gómez Orozco, Edson Daniel. Comparación del porcentaje de extracto tánico de la corteza y de la madera de encino (*Quercus tristis* Liebm) proveniente de un bosque natural. Trabajo de graduación Ingeniería Química. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2004.
3. Recinos Mendoza, Gustavo Adolfo. Evaluación del rendimiento de concretos obtenidos en la secuencia extractiva por lixiviación mediante técnica soxhlet con tres solventes (hexano, etanol y agua) a partir de frutos de arrayán (*Myrica cerífera* L.) recolectados de los bosques naturales del área nor.central de Guatemala Trabajo de graduación Ingeniería Química. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2004.
4. Suchini Leytan, Manuel. Evaluación de los rendimientos de extracción del contenido de taninos (ácido pinutánico) de la corteza de *Pinus caribae* a nivel laboratorio. Trabajo de graduación Ingeniería Química. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2002.

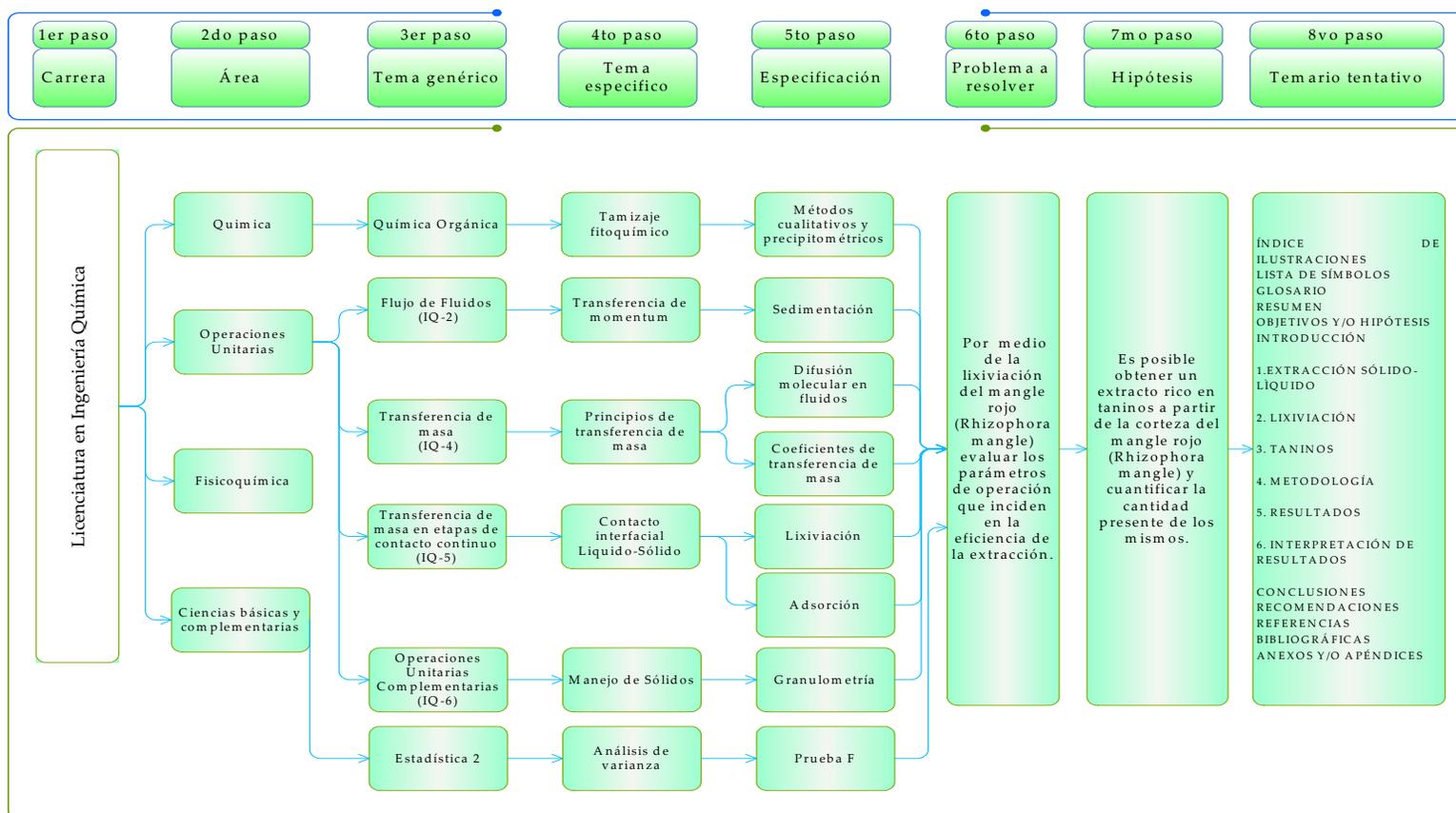
5. Zorilla A. Santiago y Torres X. Miguel. **Guía para elaborar la Tesis.** 2da Edición. México: Editorial McGraw Hill, 1992. Reimpresión 2005.

APÉNDICES

CRONOGRAMA

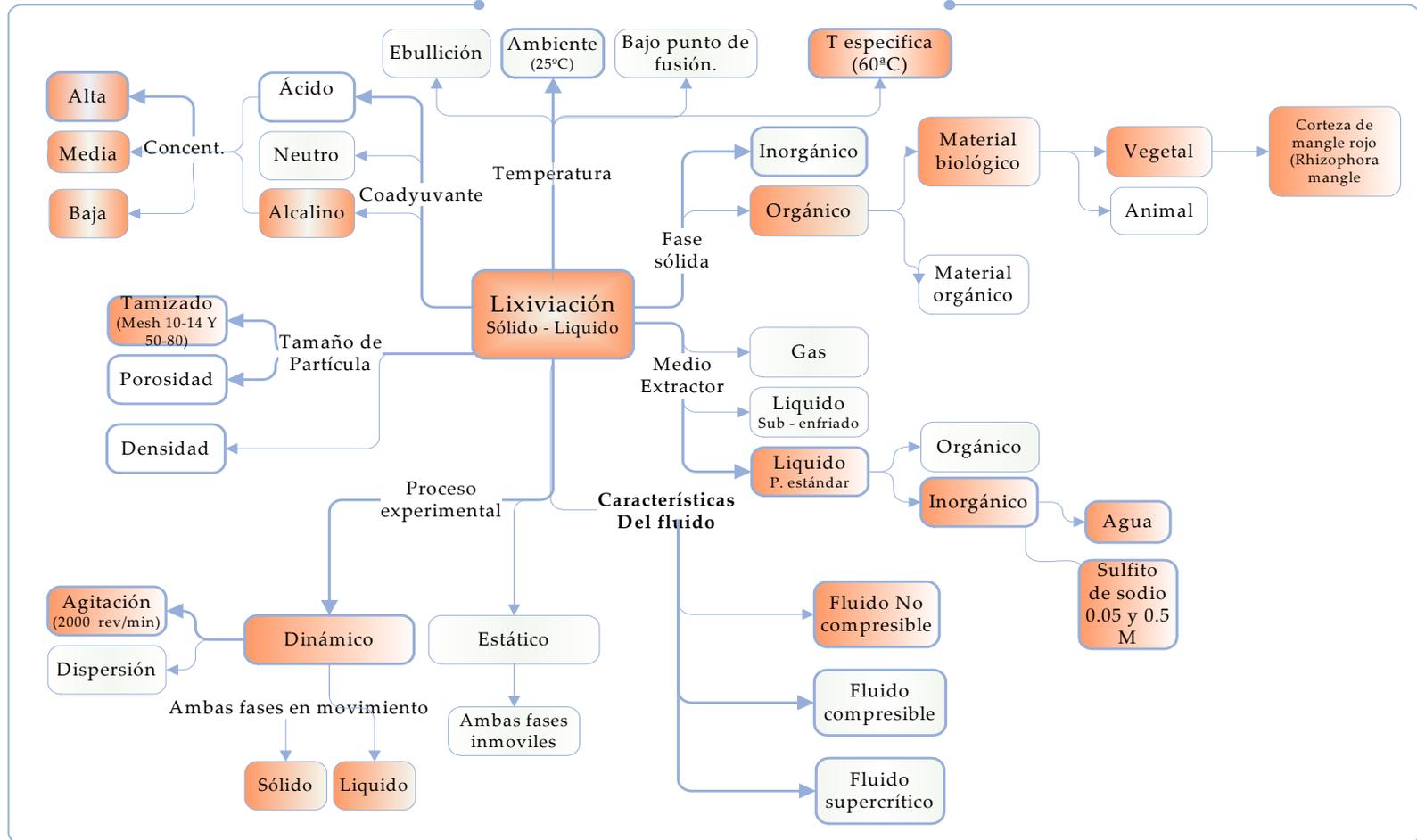
NO.	ACTIVIDAD	AGOS 08				SEPT 08				OCT 08				NOV 08				ENE 09				FEB 09					
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4		
I	Elaborar protocolo	■	■	■																							
II	Trámites para aprobar protocolo				■	■																					
III	Obtención del mangle						■																				
IV	Secado del mangle							■																			
V	Molido del mangle							■																			
VI	Análisis químicos del mangle								■																		
VII	Lixiviación para obtención de taninos									■	■	■	■	■	■												
VIII	Evaluación de resultados obtenidos															■	■										
																	■	■	■								

Figura 34 Procedimiento para la elaboración de Trabajo de graduación del monitoreo de lixiviación



Fuente: Referencia No. 12.

Figura 35 Diagrama de lixiviación para el proceso de extracción de taninos del mangle rojo



Fuente: Metodología experimental.

TABULACIONES DEL MONITOREO DE LA LIXIVIACIÓN

Tabla XII. **Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm**

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	6.55	6.55	6.55
10	4.11	4.09	4.1
20	4.09	4.09	4.1
30	4.08	4.08	4.08
40	4.08	4.07	4.07
50	4.04	4.05	4.05
60	4.04	4.04	4.04
120	4.04	4.04	4.03
180	4.04	4.03	4.03
240	4.04	4.03	4.03
300	4.03	4.03	4.03
360	4.03	4.02	4.02
420	4.02	4.02	4.02
480	4.02	4.02	4.02

Tabla XIII. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	0.9899	0.9899	0.9899
1	1.046	1.047	1.047
2	1.047	1.048	1.049
3	1.049	1.05	1.049
4	1.049	1.05	1.051
5	1.05	1.051	1.051
6	1.052	1.053	1.052
7	1.055	1.054	1.053
8	1.055	1.054	1.053

Tabla XIV. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	5.25	5.14	5.36
2	10	9.89	9.94
3	15	14.94	14.99
4	21.75	21.59	21.71
5	24.75	24.54	24.36
6	27.75	27.25	27.25
7	30.75	30.75	30.7
8	30.75	30.8	30.7

Tabla XV. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	6.6	6.6	6.6
10	4.02	4	4.02
20	4.01	4.01	4.02
30	4.01	4	4
40	4.01	3.98	3.99
50	4.01	3.98	3.98
60	4	3.98	3.98
120	4	3.98	3.98
180	4	3.98	3.98
240	4	3.98	3.98
300	4	3.98	3.97
360	3.99	3.97	3.97
420	3.99	3.97	3.96
480	3.98	3.97	3.96

Tabla XVI. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	0.9899	0.9899	0.9899
1	1.051	1.052	1.052
2	1.052	1.053	1.053
3	1.053	1.054	1.053
4	1.053	1.055	1.053
5	1.054	1.056	1.055
6	1.054	1.056	1.056
7	1.056	1.057	1.056
8	1.056	1.057	1.057

Tabla XVII. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	7	7.02	6.97
2	11	10.89	10.97
3	16	15.89	16.05
4	20	20.05	20.10
5	25	24.84	24.99
6	30.5	30.54	30.51
7	33.5	33.3	33.41
8	33.8	33.3	33.43

Tabla XVIII. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	6.55	6.55	6.55
10	4.09	4.1	4.1
20	4.08	4.1	4.1
30	4.07	4.04	4.08
40	4.05	4.01	4.07
50	4.01	4.01	4.05
60	4.01	4.01	4.04
120	4.01	4.01	4.03
180	4.01	4.01	4.02
240	4.01	4.01	4.02
300	4.01	4	4.01
360	4.01	4	4.01
420	4	4	4.01
480	4	4	4

Tabla XIX. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	0.9899	0.9899	0.9899
1	1.039	1.04	1.039
2	1.041	1.041	1.04
3	1.043	1.042	1.042
4	1.045	1.044	1.044
5	1.047	1.047	1.047
6	1.05	1.049	1.05
7	1.051	1.05	1.051
8	1.051	1.05	1.051

Tabla XX. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	3	2.87	2.98
2	8	8	7.98
3	12.75	12.7	12.65
4	17.25	17.05	17.09
5	20.25	20.15	20.16
6	23.25	23.25	23.21
7	26.25	26.22	26.2
8	26.25	26.22	26.2

Tabla XXI. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	6.6	6.6	6.6
10	4.06	4.06	4.05
20	4.06	4.06	4.05
30	4.05	4.05	4.05
40	4.05	4.05	4.04
50	4.05	4.05	4.04
60	4.04	4.04	4.03
120	4.03	4.04	4.03
180	4.03	4.04	4.01
240	4.02	4.03	4
300	4.02	4.02	4
360	4	4.02	3.99
420	3.99	4	3.98
480	3.99	3.99	3.98

Tabla XXII. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	0.9899	0.9899	0.9899
1	1.043	1.042	1.043
2	1.045	1.043	1.044
3	1.047	1.046	1.046
4	1.049	1.048	1.047
5	1.052	1.051	1.05
6	1.054	1.053	1.052
7	1.055	1.054	1.053
8	1.055	1.054	1.053

Tabla XXIII. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando agua, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	5	5	4.75
2	10	10	9.79
3	14	13.5	13.74
4	18	17.68	17.75
5	23	22.86	23.05
6	28.5	28.7	28.5
7	29.5	29.35	29.55
8	29.5	29.4	29.6

Tabla XXIV. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	8.3	8.3	8.3
10	4.74	4.75	4.74
15	4.69	4.7	4.68
20	4.55	4.64	4.63
25	4.48	4.56	4.58
30	4.42	4.44	4.5
35	4.39	4.4	4.45
40	4.37	4.37	4.4
45	4.35	4.36	4.4
50	4.35	4.35	4.37
55	4.34	4.35	4.36
60	4.33	4.35	4.36
120	4.33	4.33	4.35
180	4.32	4.33	4.35
240	4.3	4.31	4.35
300	4.3	4.31	4.35
360	4.29	4.3	4.33
420	4.28	4.3	4.33
480	4.28	4.3	4.33

Tabla XXV. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.01	1.01	1.01
1	1.05600815	1.05397149	1.05295316
2	1.05702648	1.05397149	1.05498982
3	1.05702648	1.05498982	1.05498982
4	1.05702648	1.05498982	1.05498982
5	1.05804481	1.05498982	1.05498982
6	1.05804481	1.05600815	1.05600815
7	1.05804481	1.05702648	1.05702648
8	1.05804481	1.05702648	1.05804481

Tabla XXVI. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	5.76	5.7	5.75
2	12	11.91	11.96
3	16	15.85	15.96
4	23	22.9	22.98
5	28	27.67	27.79
6	32	32	31.97
7	33.07	33.01	33.12
8	33.07	33.01	33.13

Tabla XXVII. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	8.3	8.3	8.3
10	4.33	4.34	4.32
15	4.33	4.33	4.32
20	4.33	4.32	4.32
25	4.32	4.32	4.32
30	4.32	4.31	4.31
35	4.32	4.31	4.31
40	4.31	4.31	4.3
45	4.31	4.3	4.3
50	4.3	4.3	4.28
55	4.3	4.3	4.28
60	4.28	4.3	4.28
120	4.28	4.29	4.28
180	4.28	4.29	4.28
240	4.28	4.29	4.28
300	4.27	4.29	4.28
360	4.27	4.29	4.28
420	4.27	4.29	4.27
480	4.27	4.29	4.27

Tabla XXVIII. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.01	1.01	1.01
1	1.059	1.06	1.06
2	1.062	1.061	1.061
3	1.062	1.061	1.061
4	1.063	1.062	1.061
5	1.063	1.063	1.063
6	1.064	1.064	1.063
7	1.064	1.064	1.063
8	1.065	1.065	1.065

Tabla XXIX. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	7.65	7.78	7.71
2	13	12.88	12.97
3	17	17.01	17.04
4	23	22.94	22.96
5	28.5	28.5	28.4
6	33.5	33.5	33.55
7	34.9	34.15	35.5
8	34.9	34.2	35.5

Tabla XXX. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	8.3	8.3	8.3
10	5.03	5.04	5.03
15	5	4.98	4.99
20	4.97	4.96	4.99
25	4.91	4.95	4.93
30	4.86	4.89	4.88
35	4.81	4.84	4.85
40	4.77	4.8	4.8
45	4.77	4.77	4.78
50	4.77	4.77	4.78
55	4.76	4.77	4.77
60	4.76	4.77	4.77
120	4.76	4.76	4.76
180	4.75	4.76	4.76
240	4.75	4.76	4.75
300	4.75	4.75	4.75
360	4.75	4.75	4.73
420	4.75	4.75	4.73
480	4.75	4.75	4.73

Tabla XXXI. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.01	1.01	1.01
1	1.05	1.052	1.052
2	1.052	1.053	1.0536
3	1.053	1.054	1.054
4	1.054	1.056	1.055
5	1.056	1.057	1.056
6	1.058	1.0585	1.0585
7	1.06	1.060	1.060
8	1.06	1.060	1.060

Tabla XXXII. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	3.05	3.04	3.08
2	9.4	9.5	9.35
3	14	14.5	14.45
4	20	19.55	20
5	24	24.12	24.11
6	28	28.11	28.05
7	29.32	29.49	29.2
8	29.32	29.5	29.2

Tabla XXXIII. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	8.3	8.3	8.3
10	4.86	4.86	4.84
15	4.86	4.85	4.82
20	4.85	4.85	4.81
25	4.83	4.84	4.78
30	4.8	4.79	4.77
35	4.78	4.78	4.76
40	4.78	4.78	4.76
45	4.76	4.76	4.75
50	4.76	4.75	4.73
55	4.75	4.75	4.73
60	4.75	4.75	4.73
120	4.74	4.75	4.73
180	4.74	4.73	4.71
240	4.73	4.73	4.71
300	4.73	4.73	4.71
360	4.72	4.73	4.7
420	4.72	4.72	4.7
480	4.72	4.71	4.7

Tabla XXXIV. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.01	1.01	1.01
1	1.052	1.052	1.053
2	1.053	1.053	1.054
3	1.055	1.054	1.054
4	1.055	1.054	1.055
5	1.056	1.055	1.056
6	1.057	1.056	1.058
7	1.058	1.057	1.058
8	1.058	1.057	1.058

Tabla XXXV. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.005 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	5.78	5.74	5.84
2	11.5	11.45	11.49
3	15	14.98	14.5
4	22	21.79	21.87
5	26	25.59	25.94
6	30	29.89	29.93
7	31.18	31.17	31.15
8	31.18	31.17	31.17

Tabla XXXVI. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9	9	9
10	7.07	7.05	7.1
20	6.99	6.98	7.02
30	6.91	6.93	6.93
40	6.89	6.9	6.89
50	6.89	6.88	6.87
60	6.85	6.82	6.85
120	6.8	6.75	6.77
180	6.75	6.7	6.7
240	6.67	6.64	6.66
300	6.6	6.55	6.58
360	6.55	6.54	6.55
420	6.55	6.54	6.54
480	6.55	6.54	6.53

Tabla XXXVII. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.04582	1.04582	1.04582
1	1.06415479	1.06415479	1.06313646
2	1.06619145	1.06619145	1.06517312
3	1.06619145	1.06720978	1.06720978
4	1.06822811	1.06720978	1.06720978
5	1.06822811	1.06822811	1.06822811
6	1.06924644	1.06822811	1.06822811
7	1.07026477	1.06924644	1.06924644
8	1.07026477	1.06924644	1.06924644

Tabla XXXVIII. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	8.97	9.10	8.95
2	16	15.87	16.06
3	20	19.98	20.04
4	24	24.15	24
5	28	28.01	28
6	33.5	33.5	33.55
7	34.97	34.9	34.97
8	34.97	34.9	34.98

Tabla XXXIX. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9	9	9
10	6.7	6.66	6.68
20	6.67	6.65	6.66
30	6.64	6.64	6.64
40	6.6	6.61	6.62
50	6.6	6.61	6.6
60	6.58	6.61	6.59
120	6.55	6.6	6.55
180	6.55	6.57	6.55
240	6.55	6.55	6.54
300	6.5	6.49	6.5
360	6.5	6.49	6.49
420	6.49	6.48	6.48
480	6.49	6.48	6.47

Tabla XL. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.04582	1.04582	1.04582
1	1.066	1.067	1.066
2	1.068	1.069	1.069
3	1.069	1.0695	1.07
4	1.07	1.0705	1.071
5	1.071	1.071	1.071
6	1.072	1.072	1.072
7	1.0725	1.073	1.072
8	1.0725	1.073	1.073

Tabla XLI. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	11.97	12.01	12.04
2	16.97	16.77	16.94
3	19.97	19.74	20.02
4	24.97	25	24.03
5	30.97	31.01	31.06
6	34.97	34.98	35
7	36.97	36.7	36.97
8	36.97	36.7	37

Tabla XLII. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9	9	9
10	7.2	7.13	7.13
20	7.1	7.03	7.03
30	7.04	7	7
40	7.03	6.98	6.98
50	7.01	6.96	6.96
60	6.93	6.92	6.92
120	6.9	6.89	6.89
180	6.88	6.87	6.88
240	6.86	6.85	6.85
300	6.83	6.83	6.84
360	6.83	6.83	6.83
420	6.83	6.82	6.81
480	6.8	6.81	6.81

Tabla XLIII. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.04582	1.04582	1.04582
1	1.05702648	1.0575	1.05702648
2	1.059	1.06	1.0588
3	1.06	1.06	1.06008147
4	1.0605	1.061	1.0610998
5	1.0610998	1.0622	1.0610998
6	1.0615	1.0624	1.0618
7	1.062	1.0625	1.0625
8	1.0623	1.0625	1.063

Tabla XLIV. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	6.8	6.88	6.79
2	11.5	11.65	11.52
3	16	16.12	16.07
4	22.5	22.55	22.55
5	26	26.01	26.02
6	30	30.06	30.05
7	32.955	32.85	33
8	32.955	32.85	33

Tabla XLV. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9	9	9
10	7.06	7.1	7.09
20	7.04	7.07	7.05
30	7.03	7.03	7.01
40	7.01	6.99	6.98
50	6.96	6.95	6.95
60	6.9	6.89	6.93
120	6.87	6.88	6.9
180	6.85	6.88	6.86
240	6.85	6.85	6.86
300	6.84	6.85	6.85
360	6.84	6.84	6.84
420	6.83	6.83	6.83
480	6.83	6.82	6.83

Tabla XLVI. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.04582	1.04582	1.04582
1	1.059	1.059	1.059
2	1.06	1.06	1.061
3	1.061	1.06008147	1.061
4	1.062	1.0610998	1.062
5	1.062	1.06211813	1.063
6	1.063	1.064	1.063
7	1.064	1.064	1.064
8	1.064	1.0643	1.064

Tabla XLVII. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.05 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	8.9	9	8.95
2	16	15.78	15.96
3	19	18.67	19
4	23	22.95	23
5	28	28.10	28.05
6	32	32.05	32.01
7	34.455	34.68	34.15
8	34.455	34.7	34.2

Tabla XLVIII. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9.5	9.5	9.5
10	7.6	7.59	7.62
20	7.6	7.58	7.6
30	7.59	7.58	7.58
40	7.57	7.56	7.57
50	7.55	7.55	7.56
60	7.55	7.55	7.55
120	7.55	7.54	7.55
180	7.54	7.54	7.54
240	7.53	7.52	7.53
300	7.53	7.52	7.52
360	7.53	7.51	7.52
420	7.53	7.51	7.51
480	7.52	7.51	7.51

Tabla XLIX. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.100815	1.100815	1.100815
1	1.11099796	1.11099796	1.11201629
2	1.11201629	1.11303462	1.11303462
3	1.11303462	1.11303462	1.11405295
4	1.11405295	1.11507128	1.11507128
5	1.11608961	1.11608961	1.11710794
6	1.11710794	1.11812627	1.11812627
7	1.11812627	1.11812627	1.1191446
8	1.11812627	1.1191446	1.1191446

Tabla L. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	15.065	15.05	15.06
2	20.065	20.045	20.06
3	23.065	23.51	23.11
4	26.5	26.5	26.41
5	30.065	30.05	30.09
6	34.065	34.048	34.10
7	38.065	37.98	38.15
8	38.065	38	38.2

Tabla LI. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9.5	9.5	9.5
10	7.65	7.66	7.65
20	7.64	7.65	7.64
30	7.64	7.65	7.64
40	7.62	7.64	7.61
50	7.6	7.63	7.61
60	7.6	7.62	7.6
120	7.59	7.6	7.6
180	7.58	7.6	7.59
240	7.58	7.58	7.57
300	7.57	7.57	7.57
360	7.55	7.55	7.55
420	7.55	7.55	7.54
480	7.55	7.55	7.54

Tabla LII. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.100815	1.100815	1.100815
1	1.11201629	1.11303462	1.11099796
2	1.11405295	1.11507128	1.11507128
3	1.11608961	1.11659878	1.11608961
4	1.11812627	1.11812627	1.11710794
5	1.12016293	1.11965377	1.1191446
6	1.12118126	1.12118126	1.12118126
7	1.12219959	1.12321792	1.12219959
8	1.12219959	1.12321792	1.12321792

Tabla LIII. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/10 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	15.365	15.54	15.4
2	21.365	21.39	21.40
3	27.365	27.41	27.39
4	31.365	31.57	31.42
5	34.365	34.41	34.4
6	37.365	37.51	37.34
7	40.365	40.00	40.5
8	40.365	40.00	40.5

Tabla LIV. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9.5	9.5	9.5
10	7.69	7.69	7.69
20	7.69	7.68	7.68
30	7.68	7.68	7.67
40	7.67	7.67	7.66
50	7.66	7.65	7.66
60	7.64	7.64	7.65
120	7.63	7.64	7.64
180	7.63	7.63	7.64
240	7.62	7.63	7.63
300	7.62	7.62	7.63
360	7.62	7.61	7.63
420	7.62	7.61	7.62
480	7.62	7.6	7.62

Tabla LV. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.100815	1.100815	1.100815
1	1.102	1.1018	1.102
2	1.1035	1.1033	1.1035
3	1.105	1.1046	1.1048
4	1.1067	1.1064	1.1065
5	1.1083	1.108	1.1081
6	1.1092	1.109	1.1091
7	1.1099	1.1098	1.1099
8	1.1099	1.1098	1.1099

Tabla LVI. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 1.397-1.9812 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	11.0475	11.17	11.1
2	15.5475	15.64	15.61
3	18.5475	18.63	18.67
4	24.5475	24.61	24.6
5	29.0475	29.10	29.08
6	35.0475	35.05	35.07
7	36.5475	36.4	36.65
8	36.5475	36.4	36.7

Tabla LVII. Monitoreo del pH en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (min)	pH	pH	pH
0	9.5	9.5	9.5
10	7.67	7.66	7.67
20	7.66	7.65	7.66
30	7.65	7.64	7.66
40	7.65	7.64	7.65
50	7.65	7.64	7.64
60	7.63	7.63	7.64
120	7.63	7.63	7.63
180	7.62	7.63	7.63
240	7.62	7.62	7.62
300	7.61	7.61	7.62
360	7.61	7.61	7.61
420	7.61	7.61	7.61
480	7.61	7.61	7.6

Tabla LVIII. Monitoreo de la densidad en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)	DENSIDAD(g/ml)
0	1.100815	1.100815	1.100815
1	1.1025	1.1025	1.1025
2	1.104	1.1037	1.1039
3	1.10590631	1.10539715	1.10573659
4	1.10794297	1.10743381	1.10777325
5	1.108	1.109	1.1085
6	1.1097	1.1095	1.10953333
7	1.11099796	1.11099796	1.11099796
8	1.11099796	1.11099796	1.11099796

Tabla LIX. Monitoreo de los sólidos extractables en la lixiviación de corteza de mangle rojo, utilizando Na₂SO₃ 0.5 M, relación sólido líquido (w/v) de 1/15 y tamaño de partícula de 0.1778-0.2972 mm

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
t (h)	% sólidos extractables	% sólidos extractables	% sólidos extractables
1	14.0475	14.08	14.10
2	18.5475	18.62	18.59
3	21.5475	21.74	21.59
4	27.5475	27.63	27.55
5	33.5475	33.94	33.58
6	36.5475	36.71	36.55
7	38.0475	37.99	38.1
8	38.0475	38	38.1

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A= concentración coadyuvante

B= tamaño de partícula

C= relación sólido/líquido

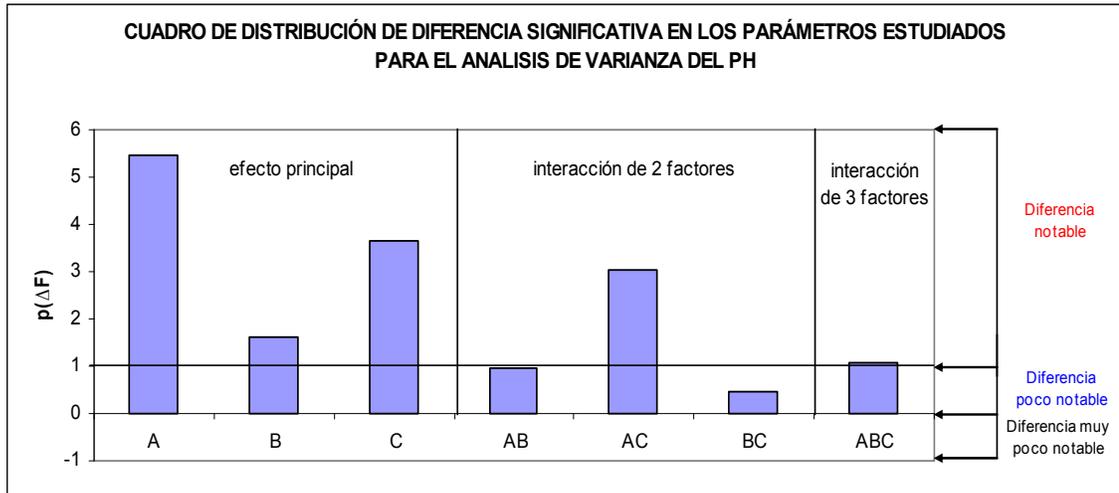
Tabla LX. Análisis de varianza unifactorial para el pH

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	F crítico
Modelo	15	06.116667	7.07444444	60638.0952	1.99198951
Error	32	0.00373333	0.00011667		
Total	47	106.1204			

Tabla LXI. Análisis de varianza de tres factores para el pH

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	F crítico	ΔF	LOG (ΔF)
A	3	105.2173	35.07243	300620.81	2.901	300617.9	5.478015
B	1	0.005208	0.005208	44.642857	4.149	40.49386	1.607389
C	1	0.508408	0.508408	4357.7857	4.149	4353.637	3.638852
AB	3	0.004242	0.001414	12.119047	2.901	9.218048	0.964639
AC	3	0.375575	0.125192	1073.0714	2.901	1070.170	3.029453
BC	1	0.000833	0.000833	7.1428571	4.149	2.993857	0.476231
ABC	3	0.005117	0.001706	14.619048	2.901	11.71805	1.068855

Figura 36. Cuadro de distribución de diferencia significativa en los parámetros estudiados para el análisis de varianza del pH



Fuente: Tabla LXI

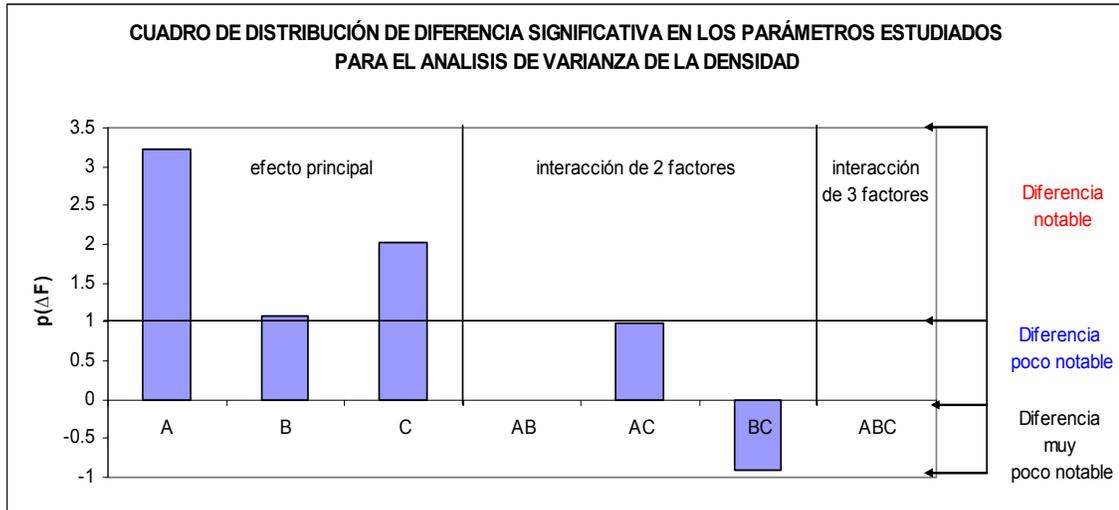
Tabla LXII. Análisis de varianza unifactorial para la densidad

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	F crítico
Modelo	15	0.028962971	0.001930865	338.428333	1.99198951
Error	32	0.000182572	5.70539E-06		
Total	47	0.029145543			

Tabla LXIII. Análisis de varianza de tres factores para la densidad

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	F crítico	ΔF	LOG (ΔF)
A	3	0.02796	0.00932102	1633.72	2.901	1630.823	3.21241
B	1	9.35E-05	9.35E-05	16.39	4.149	12.24697	1.08803
C	1	0.000612	0.000612	107.26	4.149	103.1142	2.01332
AB	3	1.89E-05	6.31E-06	1.11	2.901	-1.79574	
AC	3	0.000215	7.16E-05	12.54	2.901	9.641226	0.98413
BC	1	2.44E-05	2.44E-05	4.27	4.149	0.125159	-0.9025
ABC	3	3.64E-05	1.21E-05	2.13	2.901	-0.77514	

Figura 37. Cuadro de distribución de diferencia significativa en los parámetros estudiados para el análisis de varianza de la densidad



Fuente: Tabla LXIII

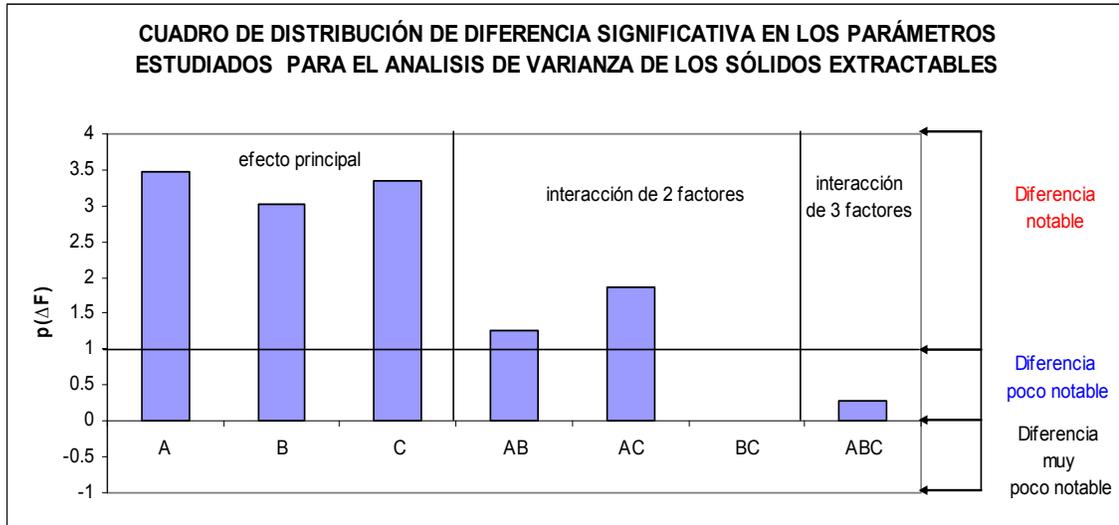
Tabla LXIV. Análisis de varianza unifactorial para los sólidos extractables

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	F crítico
Modelo	15	639.3005	42.6200333	833.847558	1.99198951
Error	32	1.6356	0.0511125		
Total	47	640.9361			

Tabla LXV. Análisis de varianza de tres factores para los sólidos extractables

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	F crítico	ΔF	LOG (ΔF)
A	3	458.4956	152.8319	2990.11	2.901	2987.21	3.4753
B	1	54.1450	54.1450	1059.33	4.149	1055.18	3.0233
C	1	111.1425	111.1425	2174.47	4.149	2170.32	3.3366
AB	3	3.1719	1.0573	20.69	2.901	17.79	1.2500
AC	3	11.4878	3.82926	74.92	2.901	72.02	1.8574
BC	1	0.11801	0.11801	2.31	4.149	-1.84	
ABC	3	0.739575	0.2465	4.82	2.901	1.92	0.2838

Figura 38. Cuadro de distribución de diferencia significativa en los parámetros estudiados para el análisis de varianza de los sólidos extractables



Fuente: Tabla LXV

* $p(\Delta F) = \log(\Delta F)$

Criterio asumido:

$1 \leq p(\Delta F) < 0$ diferencia significativa “muy poco notable”

$0 \leq p(\Delta F) < 1$ diferencia significativa “poco notable”

$p(\Delta F) \geq 1$ diferencia significativa “notable”.

ANEXOS

Figura 39 Ficha de seguridad del sulfito de sodio

SULFITO DE SODIO

ICSC: 1200

			
<p>SULFITO DE SODIO Sulfito sódico Sal disódica del ácido sulfuroso $\text{Na}_2\text{O}_3\text{S}/\text{Na}_2\text{SO}_3$ Masa molecular: 126.06</p>			
Nº	CAS	7757-83-7	
Nº	RTECS	WE2150000	
Nº ICSC 1200			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPLOSION			
EXPOSICION		¡EVITAR LA DISPERSION DEL POLVO! ¡HIGIENE ESTRICTA!	
• INHALACION	Dificultad respiratoria, sibilancia.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado
• PIEL		Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón.

• OJOS		Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• INGESTION	(Para mayor información, véase Inhalación). (Véanse Notas).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Proporcionar asistencia médica.

DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente; si fuera necesario, humedecer el polvo para evitar su dispersión. Eliminar el residuo con agua abundante. (Protección personal adicional: respirador de filtro P2 contra partículas nocivas).	Separado de oxidantes fuertes, ácidos. Mantener en lugar seco.	

VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 1200

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

D A T O S I M P O R T	<p>ESTADO FISICO; ASPECTO Cristales blancos o polvo.</p> <p>PELIGROS FISICOS</p> <p>PELIGROS QUIMICOS La sustancia se descompone al calentarla intensamente y al arder, produciendo humos tóxicos y corrosivos de óxidos de azufre. Reacciona con ácidos fuertes produciendo dióxido de azufre.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV no establecido.</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La inhalación de la sustancia puede originar reacciones asmáticas (véanse Notas).</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido puede producir sensibilización de la piel. La exposición a inhalación prolongada o repetida puede originar asma (véanse Notas).</p>
--	--	--

A N T E S	
PROPIEDADES FÍSICAS	Se descompone por debajo del punto Solubilidad en agua: Elevada. de fusión: at 600°C Densidad relativa (agua = 1): 2.63
DATOS AMBIENTALES	 Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; debería prestarse atención especial a los organismos acuáticos.
NOTAS	
<p>Debe considerarse la inmediata administración de un aerosol adecuado por un médico o persona por él autorizada. Los síntomas de asma no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles. Toda persona que haya mostrado síntomas de asma NO debe entrar en contacto con esta sustancia.</p> <p style="text-align: right;">Código NFPA: H 1; F 0; R 0;</p>	
INFORMACION ADICIONAL	
FISQ: 5-168 SULFITO DE SODIO	
ICSC: 1200	SULFITO DE SODIO
© CCE, IPCS, 1994	
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).

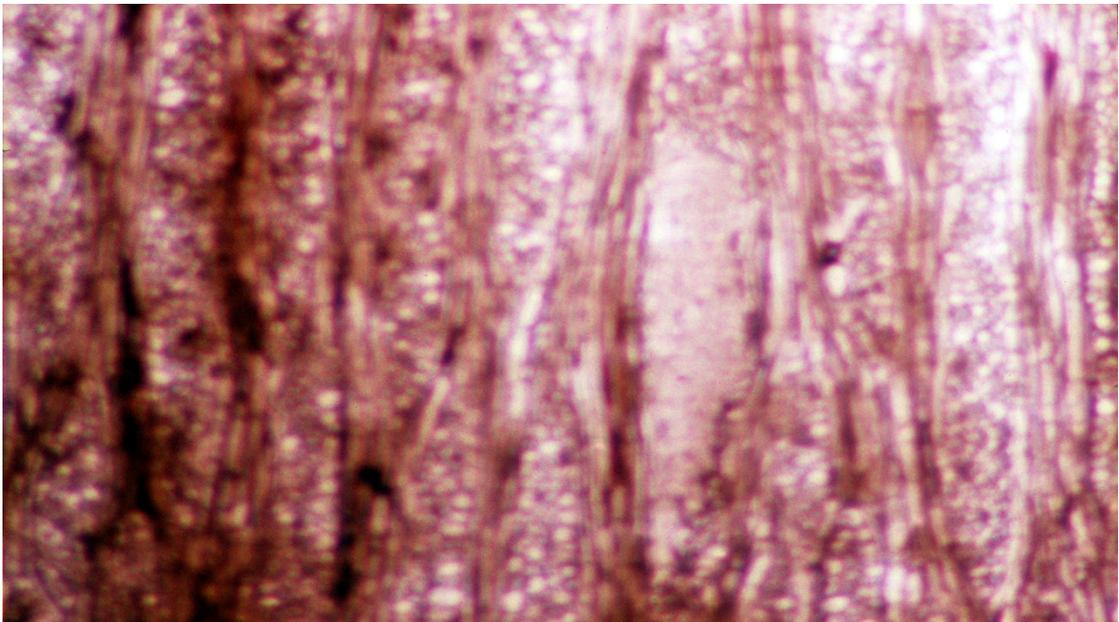
Fuente: Referencia 10

ESTUDIO HISTOLÓGICO PRELIMINAR DEL MATERIAL SÓLIDO RECURSO

La corteza y madera de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) se tiñó con sulfato férrico para teñir los taninos de un color rojizo y así observar su distribución en el material sólido.

Fig. 40: **Corte longitudinal tangencial de madera de mangle rojo. 40 aumentos.**

Muestra la presencia de taninos en la madera.. Como se observa en la fotografía, los taninos están presentes abundantemente.

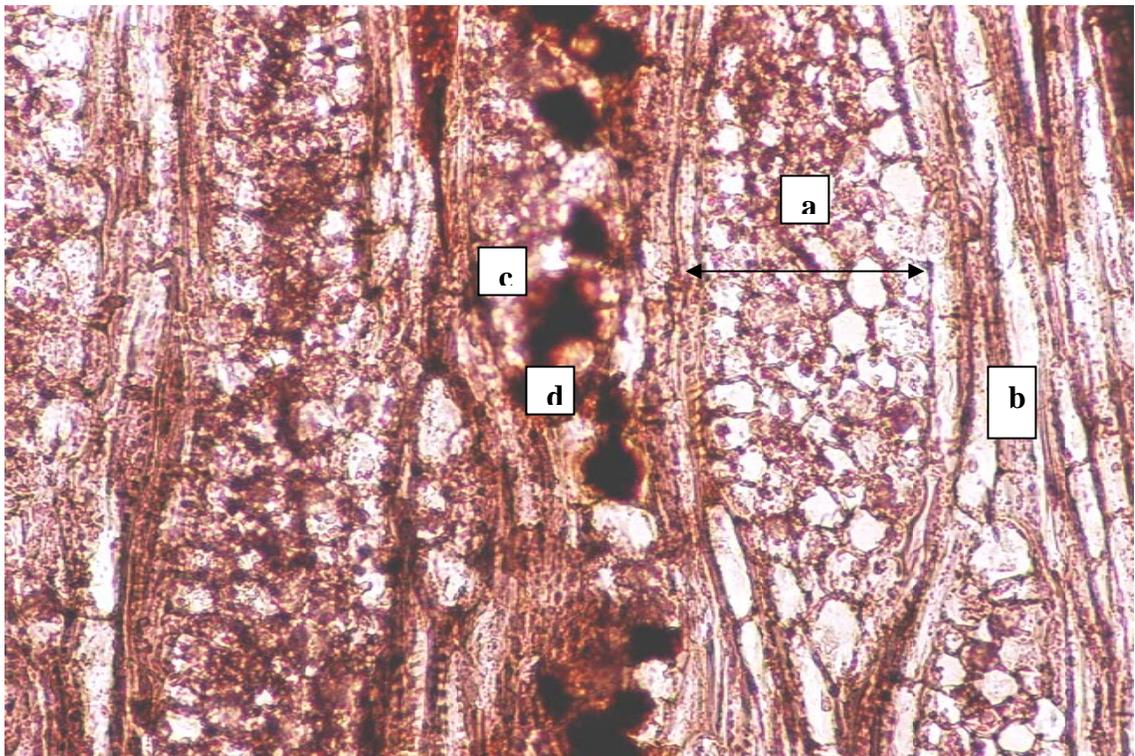


Fuente. Laboratorio de Histología de Facultad de Agronomía de USAC.

**Fig. 41: Corte Longitudinal Tangencial de Madera de Mangle Rojo.
Aumento: 100**

Esta fotografía muestra que los taninos están presentes, tanto sacos en el interior de la célula, como en la pared celular. En los vasos del xilema, localizados al centro de la fotografía, hay grandes sacos de taninos, mucho mayores que los presentes en los rayos de parénquima

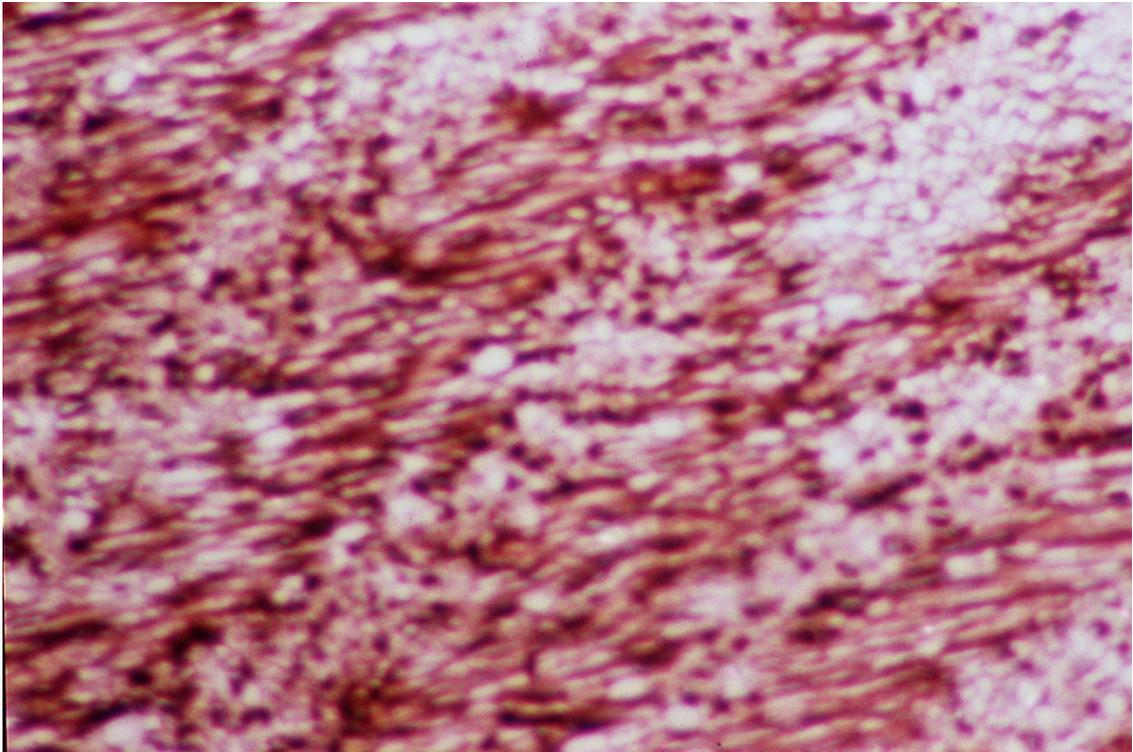
Notación: a-Rayos de parénquima o rayos de Xilema, b- Fibras; c- Vaso del xilema; d-Saco de taninos.



Fuente. Laboratorio de Histología de Facultad de Agronomía de USAC.

Fig. 42. Corteza de mangle rojo. 40 aumentos

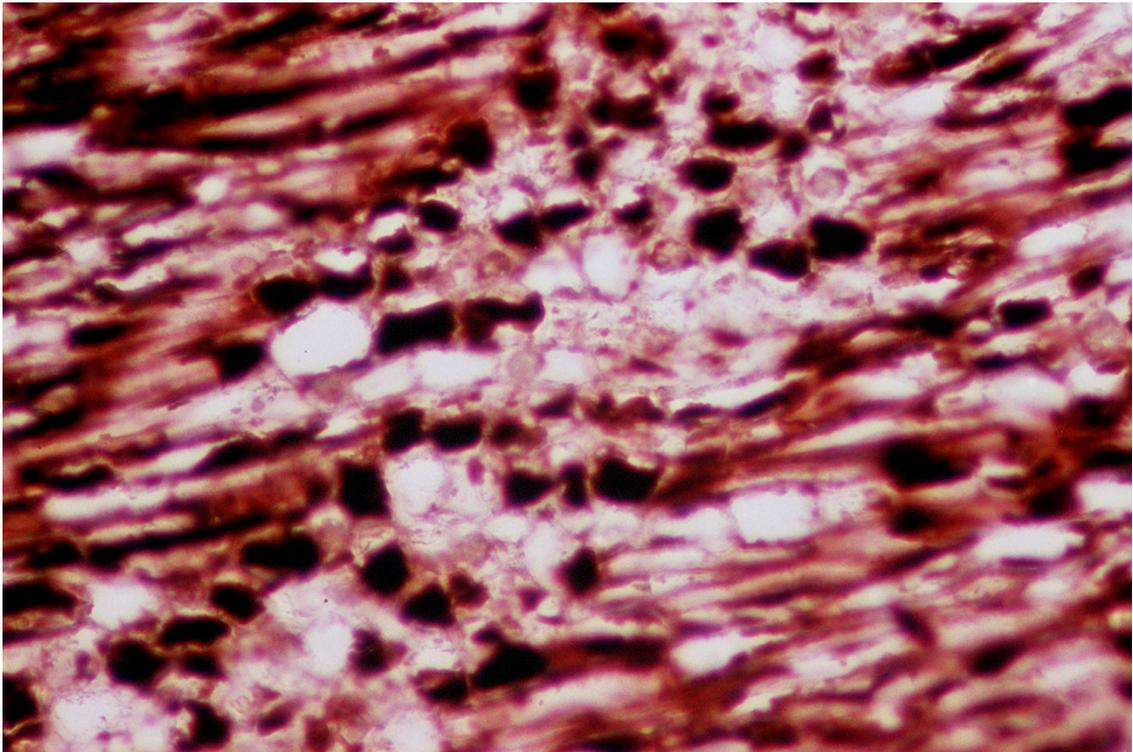
Puede notarse que hay abundancia de taninos.



Fuente. Laboratorio de Histología de Facultad de Agronomía de USAC.

Fig. 43. Corteza de mangle rojo teñido con sulfato férrico. 100 aumentos.

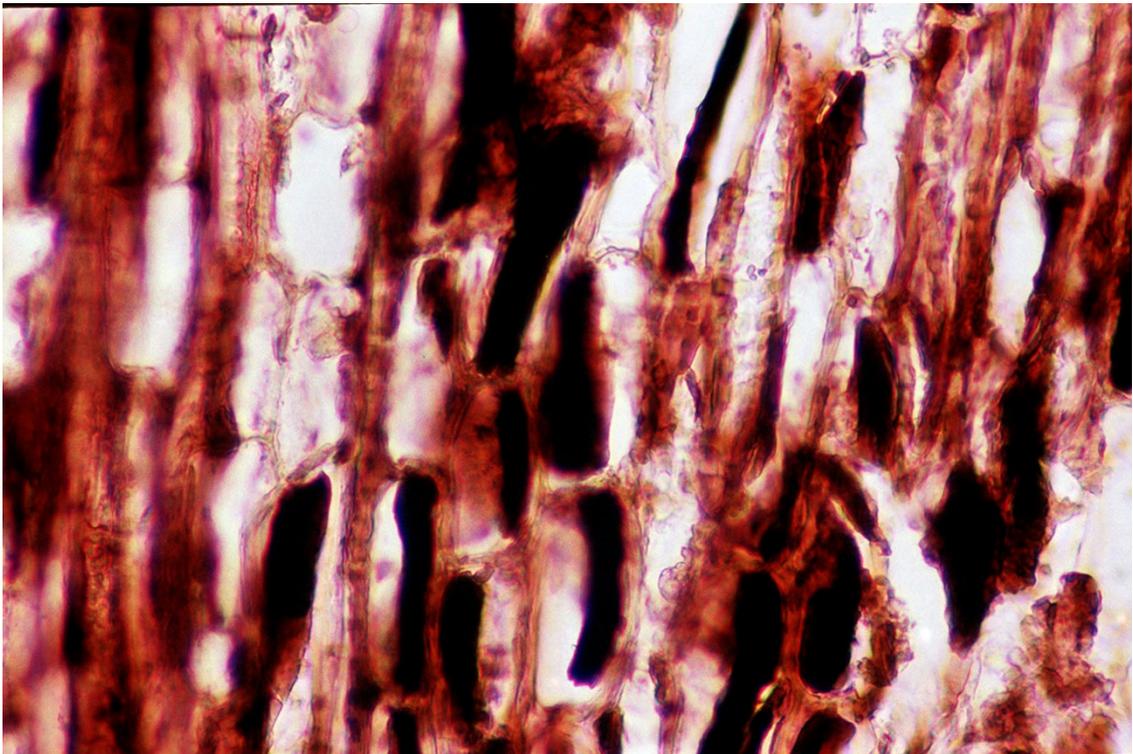
Se observa que los taninos ocupan la totalidad del lumen celular en la mayoría de células, así como, que las paredes celulares también están impregnadas con taninos. Los taninos se observan de color café-rojizo.



Fuente. Laboratorio de Histología de Facultad de Agronomía de USAC.

Fig. 44. Corteza de mangle rojo. 400 aumentos

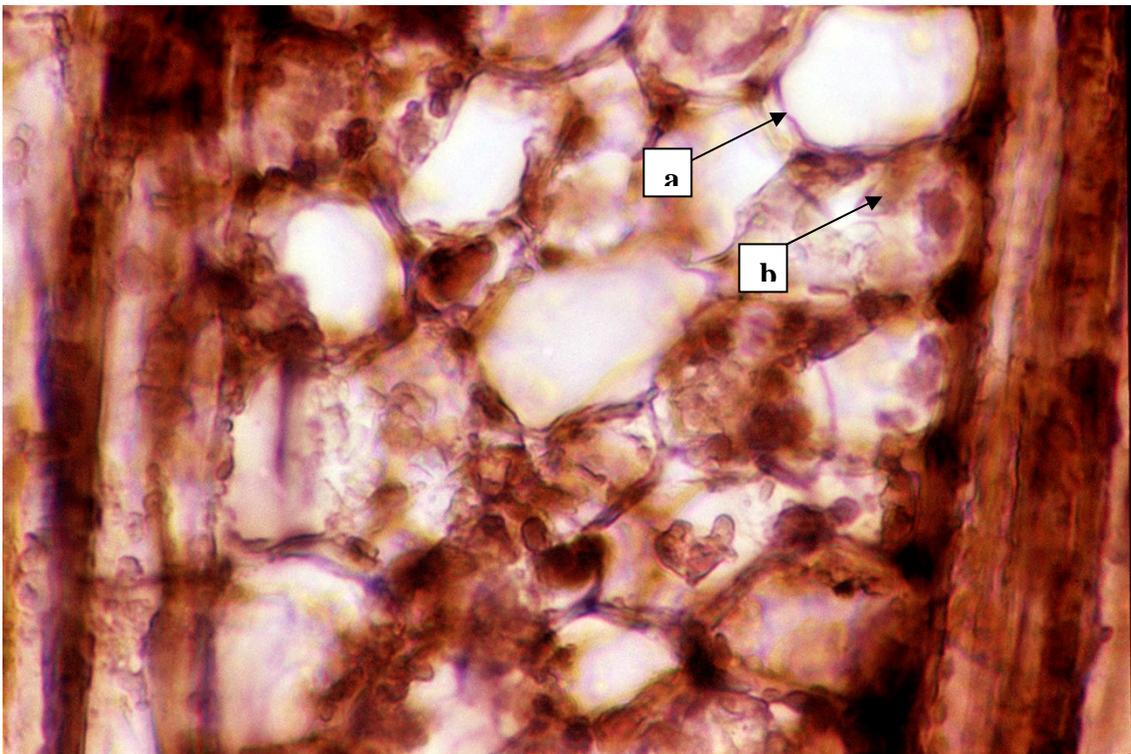
Como puede observarse en esta fotografía, los taninos están dentro de grandes sacos o vacuolas dentro del lumen celular. De hecho, en la mayoría de células solamente se observa un gran saco de taninos en el interior de las células. Las paredes celulares también están impregnadas de taninos. Los espacios blancos que se observan entre los sacos de taninos y las paredes celulares son artificios formados al momento del corte.



Fuente. Laboratorio de Histología de Facultad de Agronomía de USAC.

Fig. 45. Corte longitudinal tangencial de madera de mangle rojo. 400 aumentos.

Esta fotografía muestra con mayor detalle los sacos de taninos presentes en el interior de células de rayos de parénquima. Puede observarse también que dichos sacos están delimitados por membrana. Así mismo, se observa que las paredes celulares están impregnadas con taninos. Notación: a- Pared Celular con taninos; b- Saco de taninos



Fuente. Laboratorio de Histología de Facultad de Agronomía de USAC.