

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE COAGULANTE NATURAL A PARTIR DE
PENCA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) EN EL
TRATAMIENTO DE AGUAS TURBIAS PARA SU
POTABILIZACIÓN**

Por:

RUTH JOCELYN ESCALANTE CHURA

**Proyecto de grado, modalidad de graduación: Investigación Aplicada;
presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN
MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Química.**

Marzo de 2026

TARIJA-BOLIVIA

VºBº

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez
DECANO FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

M.Sc. Ing. Fernando Cortez Michel
VICEDECADO FACULTAD
DE CIENCIA Y TECNOLOGIA

M.Sc. Ing. Rene Emilio Michel Cortes
DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Hugo Franco Sánchez

Ing. María Luz Cáceres

Ing. Juan Carlos Vegas K.

Advertencia

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

Dedicatoria

A Dios por la sabiduría, la inteligencia, paciencia, fuerza que me dio y da para superar cada día y así poder lograr mis metas y objetivos.

A mis padres, quienes con su amor, paciencia, apoyo y esfuerzo me han permitido llegar a esta etapa tan importante en mi formación académica.

Agradecimiento

Agradezco primeramente e infinitamente a Dios por todo, quien fue un pilar en mi vida en todo momento.

A sí mismo agradezco a mi papá Félix Escalante y a mi mamá Rufina Chura, por la paciencia y el apoyo incondicional, para continuar mi camino.

A mis hermanos, que me han apoyado y alentado en todo momento.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Química, quienes me formaron y apoyaron durante mi formación profesional.

Pensamiento

“Todo tiene su tiempo, y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora.”

Eclesiastés 3:1

ÍNDICE

Advertencia.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Pensamiento.....	iv
Resumen	v

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.....	1
Objetivos.....	6
Objetivo general:.....	6
Objetivo específico:	6
Justificación	7
Justificación Tecnológica	7
Justificación Social.....	7
Justificación Económica.....	7
Justificación Ambiental.....	8

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

1.1 Agua.....	9
1.1.1 Estructura atómica del agua	9
1.1.2 Agua potable	11
1.1.3 Agua turbia.....	11
1.1.4 Partículas en suspensión	12
1.1.5 Contaminación del agua.....	16
1.1.6 Tratamiento de agua	17
1.1.6.1 Objetivo del tratamiento de agua.....	17

1.1.7	Potabilización de agua	18
1.1.7.1	Coagulación.....	20
1.1.7.2	Floculación.....	22
1.1.7.3	Sedimentación	23
1.1.7.4	Filtración rápida	23
1.1.7.5	Desinfección.....	24
1.1.7.6	Almacenamiento	24
1.1.8	Normativas y Leyes	24
1.1.8.1	Ley 1333 de medio ambiente	25
1.1.8.2	Norma Boliviana 512.....	25
1.1.9	Parámetro de calidad	27
1.1.9.1	Calidad del agua	27
1.1.9.2	Parámetros del agua potable	28
1.2	Coagulante-floculante	30
1.2.1	Tipo de coagulante-floculante.....	30
1.2.1.1	Coagulante y floculante inorgánico	31
1.2.1.2	Coagulante y floculante artificiales	32
1.2.1.3	Coagulante y floculante naturales.....	33
1.2.2	Mecanismo de coagulación/floculación.....	34
1.3	Métodos de obtención de coagulante de penca de tuna (Nopal).....	38
1.3.1	Método de Extracción Térmica y precipitación con solvente	39
1.3.2	Método de extracción sólido-líquido por Soxhlet.....	40
1.3.3	Método de maceración artesanal	41
1.3.4	Variables que afectan en el rendimiento del coagulante	42
1.3.5	Solventes para obtener el coagulante (mucílago).....	42
1.4	Factores que influyen en la coagulación.....	43
1.4.1	Fase de la coagulación.....	45
1.5	Nopal de Tuna	47
1.5.1	Origen y distribución	47
1.5.1.1	Plantación de nopal en Bolivia.....	48

1.5.2 Variedad de penca de tuna (Nopal)	49
1.5.3 Morfología	50
1.5.3.1 Raíz.....	50
1.5.3.2 Hojas.....	51
1.5.3.3 Flores	51
1.5.3.4 Frutos	51
1.5.3.5 Tallo (Cladodio)	53
1.5.4 El mucilago Opuntias ficus indica.....	55
1.5.4.1 Componente coagulante del Nopal.....	56
1.5.4.2 Composición química.....	56
1.5.5 Propiedades fisicoquímicas del nopal.....	58
1.5.5.1 Propiedad física.....	58
1.5.5.2 Propiedad química.....	58

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Descripción de Nopal.....	59
2.2 Selección del método de obtención del coagulante natural de penca de tuna	60
2.3 Variable que afecta en la obtención del coagulante	64
2.3.1 Selección de las variables del proceso experimental.....	64
2.4 Diseño experimental	65
2.4.1 Diseño factorial	66
2.5 Materiales y equipos.....	70
2.5.1 Materiales.....	70
2.5.2 Equipos Utilizados	72
2.5.3 Insumo para el proceso de obtención del coagulante del Nopal.	76
2.5.3.1 Etanol.....	76
2.5.3.2 Agua Destilada.....	76
2.6 Proceso de obtención del coagulante a partir de nopal de tuna.....	76

2.6.1 Recolección de la Materia Prima.....	79
2.6.2 Lavado de la M.P	80
2.6.3 Pelado	81
2.6.4 Troceado del Nopal	82
2.6.5 Triturado	83
2.6.6 Extracción térmica.....	83
2.6.7 Filtración 1.....	84
2.6.8 Centrifugado.....	85
2.6.9 Concentrado	86
2.6.10 Precipitado	86
2.6.11 Filtrado 2.....	87
2.6.12 Secado.....	88
2.6.13 Molienda	89
2.6.14 Envasado	89
2.7 Prueba de efectividad del coagulante	90

CAPÍTULO III

3.1 Resultado de la característica del Nopal de tuna.....	91
3.2 Datos obtenidos de la variación de la masa con respecto al tiempo en el proceso de secado del extracto del coagulante	91
3.3 Resultado del experimento de la obtención del coagulante	92
3.4 Resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos del coagulante natural de tuna	93
3.5 Balance de materia y energía del proceso tecnología experimental.....	94
3.5.1 Balance de materia	94
3.5.2 Balance de energía del proceso tecnología experimental	104
3.5.2.1 Balance de energía en la etapa de extracción térmica	104
3.5.2.2 Balance de energía en la etapa de centrifugado	104
3.5.2.3 Balance de energía en la etapa del concentrado	105

3.5.2.4 Balance de energía en la etapa de secado	105
3.6 Determinación del rendimiento del proceso tecnológico	106
3.7 Análisis estadístico	106
3.7.1 Análisis de Variancia Unitaria	106
3.8 Prueba de efectividad de coagulación y sedimentación del coagulante de Nopal para tratamiento de agua turbia.....	112
3.8.1 Dosis de la muestra 1 (M1).....	112

CAPÍTULO IV

COSTOS

4.1 Evaluación de costos	116
4.2 Costo de producción.....	120

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	122
5.2 Recomendaciones.....	123

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía.....	124
-------------------	-----

ANEXOS

ANEXO I: Resultado del CEANID de los análisis fisicoquímicos de la penca de tuna	105
ANEXO II: Resultado del CEANID de los análisis fisicoquímicos del producto (Coagulante).....	106
ANEXO III: Taxonomía del Nopal de Tuna	107
ANEXO IV: Especificaciones de los equipos	108
ANEXO V: Resultado de análisis de dosificación de coagulante de Nopal	110

ÍNDICE DE CUADROS Y/O TABLAS

Tabla I-1 Diámetro de partículas	12
Tabla I-2: Parámetro de control mínimo	26
Tabla I-3: Parámetro de control básico	27
Tabla I-4: Parámetros del agua potable	29
Tabla I-5: Característica del sulfato de aluminio	31
Tabla I-6: Ventaja y desventaja del sulfato de aluminio en tratamiento de agua	32
Tabla I-7 Ventaja y desventaja de solventes insolubles con el coagulante	43
Tabla I-8: Taxonomía de penca de tuna	50
Tabla I-9: Propiedades físicas del Nopal	58
Tabla I-10: Composición química del Nopal	58
Tabla II-1: Tabla de factores de evaluación	61
Tabla II-2: Escala de calificación	62
Tabla II-3: Matriz de selección por factores ponderados	63
Tabla II-4: Valores asignados para los niveles del Diseño Factorial	66
Tabla II-5: Diseño Factorial 2^3 para el proceso experimental	68
Tabla II-6: Plan de Diseño Factorial 2^3 para el proceso experimental	69
Tabla II-7: Materiales utilizados en el proyecto	70
Tabla II-8: Dosis de coagulante de Nopal	90
Tabla III-1: Características fisicoquímica del nopal	91
Tabla III-2: Dato de pérdida de peso del coagulante en función del tiempo de secado	91
Tabla III-3: Resultado del diseño experimental 2^3	93
Tabla III-4: Análisis fisicoquímico del coagulante seco	94
Tabla III-5: Corriente del proceso	96
Tabla III-6: Datos para el uso del programa IBM SPSS	107
Tabla III-7: Factores inter-sujetos	108
Tabla III-8: Pruebas de efectos Inter-Sujetos	108
Tabla III-9: Resumen del modelo matemático	109

Tabla III-10: Resultado del Análisis ANOVA.....	110
Tabla III-11: Coeficiente del Modelo Matemático	111
Tabla III-12: Coeficiente del Modelo Matemático	112
Tabla III-13: Resultado de la dosificación de la Muestra 1.....	113
Tabla III-14: Resultado de la dosificación de la Muestra 2.....	115
Tabla IV-1: Detalle de costo de reactivos y materia prima utilizados en la parte experimental en la obtención de coagulante de nopal de tuna.....	116
Tabla IV-2: Detalle de costo de materiales adquirido en la parte experimental del proceso de obtención de coagulante a partir del nopal de tuna	117
Tabla IV-3: Detalle de costo de análisis fisicoquímicos	118
Tabla IV-4: Detalle de costo de material de apoyo.....	118
Tabla IV-5: Detalle de costo de energía en los equipos utilizados	119
Tabla IV-6: Detalle de costos totales del estudio.....	119
Tabla IV-7: Detalle de costo del proceso de obtención.....	120
Tabla IV-8: Detalle de costo de energía en los equipos utilizados	120
Tabla IV-9: Precios del coagulante	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Productores de coagulante global de productos inorgánicos (alumbre, cloruro férrico y PAC), orgánicos (taninos y quitosanos) y sintéticos (PolyDADMAC, Poliaminas)	3
Figura 2: Exportadores de coagulante químico como el sulfato de aluminio, policloruro de aluminio el cloruro férrico, el policloruro de aluminio (PAC) a nivel mundial	3
Figura 3: Productores de coagulante químico de sales de aluminio y hierro en Latinoamérica	4
Figura I-1: Polaridad de enlace del agua	10
Figura I-2: Estructura molecular del agua	10
Figura I-3: Puente de Hidrógeno.....	10
Figura I-4: Doble capa de una partícula coloidal.....	13
Figura I-5: Potencial Zeta.....	15
Figura I-6: Planta de tratamiento de Agua Potable	19
Figura I-7: Diagrama de bloque de proceso de potabilización	20
Figura I-8: Coagulación.....	21
Figura I-9: Floculación.....	22
Figura I-10: Fuerza de atracción y repulsión	35
Figura I-11: Neutralización y adsorción de carga	36
Figura I-12: Atrapamiento de partícula.....	37
Figura I-13: Efecto de puente de las partículas en suspensión	37
Figura I-14: Adsorción y puente.....	38
Figura I-15: Extracción térmica.....	39
Figura I-16: Extracción por Soxhlet.....	41
Figura I-17: Proceso de coagulación.....	46
Figura I-18: Plantación de Nopal en Bolivia	49
Figura I-19: Planta de Nopal	52
Figura I-20: Cladodio.....	53
Figura I-21: Corte transversal del cladodio	53

Figura I-22: Anatomía del Cladodio Opuntias ficus-indica L.....	55
Figura I-23: Composición química del mucílago de nopal	57
Figura II-1 Materia Prima-Nopal de Tuna.....	59
Figura II-2: Balanza gramera.....	72
Figura II-3: Licuadora	73
Figura II-4: Agitador eléctrico.....	73
Figura II-5: Centrifugador	74
Figura II-6: Rota vapor.....	75
Figura II-7: Balanza analítica	75
Figura II-8 Diagrama del Proceso de obtención del coagulante de nopal de tuna a escala laboratorio.....	77
Figura II-9 Ubicación geográfica de la recolección de nopal de tuna.....	79
Figura II-10: Lugar de recolección de Nopal	80
Figura II-11: Lavado de Nopal de tuna	81
Figura II-12: Pelado del Nopal de Tuna.....	82
Figura II-13: Troceado del Nopal de tun.....	82
Figura II-14: Triturado del Nopal de tuna	83
Figura II-15: Calentamiento con agitación constante	84
Figura II-16: Filtración.....	85
Figura II-17: Antes del centrifugado.....	85
Figura II-18 Después del centrifugado.....	85
Figura II-19: Concentración.....	86
Figura II-20: Precipitación del sólido.....	87
Figura II-21: Filtración.....	87
Figura II-22: Secado.....	88
Figura II-23: Trituración.....	89
Figura II-24: Envasado.....	89
Figura III-1: Variación del peso con respecto al tiempo	92
Figura III-2: Diagrama de bloque para el proceso experimental de la obtención del coagulante de Nopal.....	95

Figura III-3: Diagrama de bloque para el proceso experimental de la obtención del coagulante de Nopal.....103

Figura III-4: Curva de Turbidez de M1.....113

Figura III-5: Curva de Turbidez de M2.....114

SIGLAS Y/O ABREVIACIONES

Bs= Bolivianos

CEANID=Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo

cm=centímetro

g=gramos

LOU=Laboratorio de Operaciones Unitarias.

mg/l=miligramos/litros

NTU= Unidad Nefelométrica de Turbidez

NB-512=Norma Boliviana-512

η =Rendimiento

pH=potencial de hidrógeno

Pza.=Pieza

UCV=Unidad de Color Verdadero

U.A.J.S.=Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

°C=Grado Celsius.

%=Porcentaje