

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química**

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL ALMIDÓN DE PAPA  
(*Solanum Tuberosum*) COMO AUXILIAR DE COAGULACIÓN  
DEL SULFATO DE ALUMINIO EN LA REMOCIÓN  
DE TURBIDEZ DEL AGUA DEL RÍO CAPLINA.**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Manuel Honorio Chalco Flores**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Tacna – Perú**

**2016**

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN TACNA

FACULTAD DE INGENIERÍA

JURADO CALIFICADOR Y CALIFICACION DE LA SUSTENTACION DE TESIS

"DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL ALMIDÓN DE PAPA  
(*Solanum Tuberosum*) COMO AUXILIAR DE COAGULACIÓN  
DEL SULFATO DE ALUMINIO EN LA REMOCIÓN  
DE TURBIDEZ DEL AGUA DEL RÍO CAPLINA"

TESIS SUSTENTADA Y APROBADA EL 02 DE OCTUBRE DEL 2015, ESTANDO  
INTEGRADO EL JURADO CALIFICADOR POR:

PRESIDENTE



MSc. Manuel de Jesús Sánchez Rosales

SECRETARIO



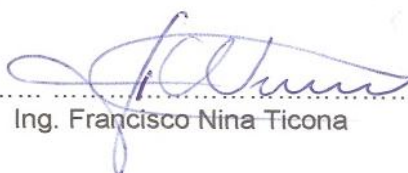
Mgr. Pedro Nolazco Cornejo del Carpio

VOCAL



Ing. Luis Fernando Cáceres Yáñez

ASESOR



Ing. Francisco Nina Ticona

## DEDICATORIA

A Dios, que es el mejor Ingeniero Químico de todos los tiempos. Sólo Él con su infinita sabiduría pudo diseñar y dar origen a la creación más grande del universo: el ser humano, la más compleja obra de ingeniería por alguien alguna vez inventada.

A la Virgen María, mi madre, que siempre estuvo a mi lado, mucho más aún cuando era oportuna su intervención y ella como madre nunca abandonaba a su hijo y hoy gracias a ella es que he llegado a dar este paso en la vida. Gracias Reina del Cielo.

A Manuel Chalco Flores, porque fue en el desarrollo de esta tesis, donde realmente conocí la fuerza inconmensurable que puede brotar de un ser humano cuando desea lograr un propósito a pesar de las dificultades que se pudieran presentar.

A mis muy amados padres, que son los dos pilares donde reposo mi cansancio y a mi querida hermana que con su presencia y compañía alegra mis días.

Al ingeniero Francisco Nina Ticona, mi asesor de tesis, que me dio los ánimos y los consejos para culminar este paso en mi vida profesional.

A mi querida Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química, donde me formé como Ingeniero Químico y como ser humano, es un honor ser profesional basadrino y compromiso mío es dejar siempre en alto el sagrado nombre de mi alma mater tanto en lo personal como en lo profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi querida Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química, donde me formé como Ingeniero Químico y como ser humano, es un honor ser profesional basadrino y compromiso mío es dejar siempre en alto el sagrado nombre de mi alma mater tanto en lo personal como en lo profesional.

Al ingeniero Francisco Nina Ticona, mi asesor de tesis, que me dio los ánimos y los consejos para culminar este paso en mi vida profesional.

## **CONTENIDO**

RESUMEN	xxiii
ABSTRACT	xxiv
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
1.1 Formulación del problema	3
1.2 Antecedentes de la investigación	4
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	12
1.4.1 Objetivo General	12
1.4.2 Objetivos Específicos	12
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 La papa	14
2.1.1 Definición de la papa	14

2.1.2	Clasificación de la papa	16
2.1.3	Importancia de la papa	17
2.1.4	El almidón de papa	17
2.2	El agua	18
2.2.1	Definición del agua	18
2.2.2	Propiedades del agua	19
2.2.3	Calidad del agua	20
2.2.4	Turbidez del agua	21
2.3	Coloides	22
2.4	Coagulación y floculación	22
2.4.1	Definición de coagulación	22
2.4.2	Clases de coagulantes	23
2.4.3	Mecanismos de coagulación	26
2.4.4	Floculación	35
2.4.5	Sedimentación	36
2.5	El almidón	37
2.5.1	Definición del almidón	37

2.5.2 Composición del almidón	37
2.5.3 Aplicaciones del almidón	39
2.5.4 Uso del almidón como auxiliar de coagulación	41
2.6 Prueba de jarras	42

### **CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de investigación	45
3.2 Hipótesis	45
3.3 Sistema de variables	45
3.4 Diseño experimental	47
3.5 Materiales, reactivos y equipos	47
3.6 Procedimiento experimental	49
3.6.1 Obtención experimental de almidón de papa	49
3.6.2 Diagrama de flujo de obtención de almidón	52
3.6.3 Preparación de la solución de almidón	52

3.6.4 Preparación de la solución de sulfato	53
3.6.5 Determinación de la dosis óptima de sulfato	54
3.6.6 Determinación de la dosis óptima de la mezcla coagulante	55

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS**

4.1 Balance de materia de la obtención de almidón de papa	57
4.2 Determinación de la dosis óptima	60
4.3 Resumen de resultados	92
4.4 Diseño experimental	92
4.5 Discusión de resultados	102
4.6 Escalamiento a planta piloto	107
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>114</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>116</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>117</b>

ANEXOS	121
Anexo I	122
Anexo II	129
Anexo III	134
Anexo IV	139
Anexo V	141

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Reporte del Análisis Fisicoquímico en la Captación de la Planta – Pachía	8
Tabla 2:	Reporte del Análisis Fisicoquímico en la Captación de la Planta – Calana	9
Tabla 3:	Reporte del Análisis Fisicoquímico en la Salida de la Planta – Pachía	9
Tabla 4:	Límites máximos permisibles de calidad del agua de consumo humano	10
Tabla 5:	Taxonomía de la papa	16
Tabla 6:	Operacionalización de variables	46
Tabla 7:	Índice de Willcomb	55
Tabla 8:	Determinación de la dosis óptima de sulfato para agua con turbidez inicial de 70 NTU	60
Tabla 9:	ANOVA para turbidez final	62

Tabla 10:	Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para el agua con turbidez inicial de 70 NTU	65
Tabla 11:	Determinación de la dosis óptima de almidón de papa para agua con turbidez de 70 NTU con dosis constante de sulfato de aluminio de 40 mg/L	67
Tabla 12:	ANOVA para turbidez final por dosis de almidón de papa	69
Tabla 13:	Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez para la mezcla sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 70 NTU.	70
Tabla 14:	Determinación de la dosis óptima de sulfato para agua con turbidez de 500 NTU	72
Tabla 15:	ANOVA para turbidez final por dosis de sulfato de aluminio	74
Tabla 16:	Remoción de turbidez a 500 NTU	75

Tabla 17:	Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez de 500 NTU con dosis de sulfato de aluminio de 120 mg/L	77
Tabla 18:	Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez de 500 NTU con dosis constante de sulfato de aluminio	79
Tabla 19:	Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez con sulfato y almidón a 500 NTU	80
Tabla 20:	Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para agua con turbidez inicial de 900 NTU	83
Tabla 21:	ANOVA para turbidez final por dosis de sulfato	85
Tabla 22:	Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio a 900 NTU	86

Tabla 23:	Determinación de la dosis óptima de sulfato y almidón para agua con turbidez inicial de 900 NTU con dosis de sulfato de 140 mg/l	87
Tabla 24:	ANOVA para turbidez final por dosis de almidón para turbidez de 900 NTU	89
Tabla 25:	Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez para la mezcla sulfato de aluminio y almidón de papa a 900 NTU	90
Tabla 26:	Cuadro Comparativo de Resultados	92
Tabla 27:	Matriz del diseño central compuesto	93
Tabla 28:	Eficiencia de remoción de turbidez	94
Tabla 29:	Valores necesarios para obtener los coeficientes del modelo cuadrático	97
Tabla 30:	Valores de turbidez final calculados	99
Tabla 31:	Análisis de Varianza para Turbidez Final	101
Tabla 32:	Cotización de precios	107

Tabla 33:	Costos para agua con turbidez de 70 NTU	108
Tabla 34:	Cuadro comparativo de costos para agua con turbidez de 70 NTU	109
Tabla 35:	Costos para agua con turbidez de 500 NTU	110
Tabla 36:	Cuadro comparativo de costos para agua con turbidez de 500 NTU	111
Tabla 37:	Costos para agua con turbidez de 900 NTU	112
Tabla 38:	Cuadro comparativo de costos para agua con turbidez de 900 NTU	113
Tabla 39:	Resultados de turbidez final y pH de la Tabla 8	123
Tabla 40:	Resultados de turbidez final y pH de la Tabla 11	124
Tabla 41:	Resultados de turbidez final y pH de la Tabla 14	125

Tabla 42:	Resultados de turbidez final y pH de la Tabla 17	126
Tabla 43:	Turbidez final y pH de la Tabla 20	127
Tabla 44:	Resultados de turbidez final y pH de la Tabla 23	128
Tabla 45:	Variables codificadas y naturales	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	La papa	15
Figura 2:	El almidón de papa	18
Figura 3:	Turbidez del agua	21
Figura 4:	Doble capa eléctrica	27
Figura 5:	Partes de la doble capa eléctrica	27
Figura 6:	Mecanismo de neutralización de cargas	29
Figura 7:	Mecanismo de barrido	31
Figura 8:	Etapas de la coagulación	34
Figura 9:	Floculación	36
Figura 10:	Estructura química de amilosa y amilopectina	38
Figura 11:	Estructura química del almidón	38
Figura 12:	Equipo de prueba de jarras	42

Figura 13:	Diagrama de flujo de obtención del almidón de papa	52
Figura 14:	Gráfico de medias para turbidez inicial de 70 NTU	61
Figura 15:	Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para turbidez inicial de 70 NTU	62
Figura 16:	Dosis óptima con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 70 NTU	66
Figura 17:	Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 70 NTU	68
Figura 18:	Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para turbidez inicial de 70 NTU	69

Figura 19:	Dosis óptima de remoción de turbidez con sulfato para turbidez inicial de 500 NTU	71
Figura 20:	Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato dealuminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 500 NTU	73
Figura 21:	Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para turbidez inicial de 500 NTU	74
Figura 22:	Dosis óptima con sulfato de aluminio y almidón de papa para turbidez inicial de 500 NTU	76
Figura 23:	Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 500 NTU	78
Figura 24:	Remoción de turbidez con sulfato y almidón para turbidez de 500 NTU	79

Figura 25:	Dosis óptima para turbidez de 900 NTU	81
Figura 26:	Remoción de turbidez para agua de 900 NTU	84
Figura 27:	Dosis de sulfato para agua de 900 NTU	85
Figura 28:	Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 900 NTU	88
Figura 29:	Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para turbidez inicial de 900 NTU	89
Figura 30:	Representación gráfica de la superficie de respuesta	91
Figura 31:	Gráfica de contornos	100
Figura 32:	Diagrama de efectos principales	100

Figura 33:	Diagrama de interacciones	101
Figura 34:	Papa cortada en trozos	102
Figura 35:	Papa licuada en proceso de filtración	130
Figura 36:	Almidón obtenido de la filtración	130
Figura 37:	Almidón luego de la centrifugación	131
Figura 38:	Centrífuga	131
Figura 39:	Filtración al vacío	132
Figura 40:	Matraz kitasato	132
Figura 41:	Almidón de papa	133

## ABREVIATURAS

Al <sup>3+</sup>	Catión aluminio
cm	Centímetro
°C	Grados Celsius
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
CIPA	Centro de Investigación en Protección Ambiental
f <sub>c</sub>	Factor de corrección
g	Gramo
GL	Grados de libertad
kg	Kilogramo
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mg/L	Miligramo sobre litro, unidad de concentración (masa/volumen)
N	Concentración normal
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
OH <sup>-</sup>	Ión hidroxilo
pH	Potencial de Hidrógeno, indicador de la acidez o basicidad

	de una sustancia.
rpm	Revoluciones por minuto
S/.	nuevos soles , moneda oficial del Perú
S.A.	Sociedad Anónima
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Anión sulfato
μm	Micrómetro
μS	Microsiemens
$\bar{x}$	Media aritmética

## RESUMEN

La turbidez se genera a partir de la presencia de partículas coloidales disueltas en el agua. La utilización de agentes químicos como el sulfato de aluminio permite remover una cantidad considerable de las partículas, clarificando el agua para su potabilización posterior. En el caso del Perú, es necesario el estudio de la capacidad coagulante del almidón de papa en la remoción de turbidez del agua, en este caso en el agua del río Caplina, teniendo en cuenta que la papa es un producto con denominación de origen y se le encuentra a lo largo de todo el territorio nacional.

En la presente investigación se expone los resultados del uso del almidón de papa (*Solanum Tuberosum*) como auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio tipo B para la remoción de tres niveles de turbidez en el agua del río Caplina, dichos niveles son 70 NTU, 500 NTU y 900 NTU.

Mediante prueba de jarras se determinó que la dosis óptima para 70 NTU es de 40 mg/L de sulfato de aluminio y 12 mg/L de almidón, para 500 NTU es de 120 mg/L de sulfato de aluminio y 8 mg/L de almidón y para 900 NTU es de 140 mg/l de sulfato de aluminio.

## ABSTRACT

Turbidity is generated from the presence of colloidal particles dissolved in the water. The use of chemical agents such as aluminum sulfate can remove a substantial amount of particles, clarifying the water for further purification. In the case of Peru, it's necessary the study of the coagulation ability of potato starch in water turbidity removal, considering that the potato is a product with designation of origin and it is found throughout the entire national territory.

In this research the results of using starch potato (*Solanum tuberosum*) is exposed as assistant coagulation of aluminum sulfate type B for the removal of three levels of turbidity in the water of Caplina river, these levels are 70 NTU, 500 NTU and 900 NTU.

By jar test it was determined that the optimal dose for 70 NTU is 40 mg/l of aluminum sulfate and 12 mg/l of starch, for 500 NTU is 120 mg/l of aluminum sulfate and 8 mg/l starch and 900 NTU is 140 mg/l of aluminum sulfate and 7 mg/l of potato starch.

## INTRODUCCIÓN

A inicio de la década de los setenta, en varios países latinoamericanos se adoptó nuevas tecnologías de tratamiento de agua potable para países en vía de desarrollo. Estos nuevos procedimientos indicaron la necesidad de utilizar coagulantes naturales locales que pudieran disminuir en parte o en su totalidad, el consumo de reactivos químicos importados.

El uso de materiales naturales de origen vegetal para clarificar las aguas superficiales turbias no es una idea reciente. Existen escrituras en sánscrito procedentes de la India y fechadas varios siglos antes de Cristo, donde hacen referencia al uso de semillas para la clarificación de aguas turbias pluviales. En el Perú, el agua se ha clarificado tradicionalmente con la savia mucilaginosa de las pencas de las cactáceas. Asimismo se sabe que en algunos países de África, los pobladores nativos agregan determinadas plantas al agua para poderla beber.

El propósito de la presente investigación es estudiar la eficiencia de remoción de turbidez usando una mezcla de almidón extraído de la papa (*Solanum Tuberosum*) con sulfato de aluminio en aguas superficiales turbias, En el primer capítulo presenta el planteamiento del problema, el

cual muestra la formulación del problema en estudio, los antecedentes, la justificación acerca de la utilización del almidón de papa como auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio en la remoción de turbidez, asimismo, los objetivos que se desean lograr en esta investigación. En el capítulo dos se presenta el desarrollo del marco teórico que sirve de sustento para el desarrollo de la investigación. En el capítulo tres se describe el marco metodológico que incluye la hipótesis, los materiales de laboratorio utilizados, los procedimientos seguidos durante el procedimiento experimental y las variables que intervienen en él. En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos. Por último se presentan las conclusiones de la investigación y las recomendaciones.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Formulación del problema:**

En las últimas décadas el tema ambiental llama ampliamente la atención de todos los sectores, no sólo en el aspecto industrial en lo que respecta a contaminación sino que se extiende a todos los ámbitos, es por ello que se viene realizando investigación de tecnologías que permitan obtener insumos a partir de la misma naturaleza, el tratamiento de aguas no es ajeno a ello, ya que se vienen buscando alternativas de tratamiento de agua usando como base coagulantes naturales para la remoción de turbidez. Es así que hay países donde se investiga la capacidad coagulante de sus plantas nativas, plantas tales como el nopal y la moringa.

En el caso del Perú, es necesario el estudio de la capacidad coagulante del almidón de papa en la remoción de turbidez del agua del río Caplina, teniendo en cuenta que la papa es un producto que se

encuentra a lo largo de todo el territorio nacional (Montoya, 2007). Se plantea la siguiente interrogante: ¿El almidón de papa (*Solanum Tuberosum*) será eficiente como auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio en la remoción de turbidez del agua del río Caplina?

## **1.2 Antecedentes de la investigación:**

Con el fin de conocer los antecedentes del presente trabajo de investigación, se realizó una revisión de información relacionada al uso de coagulantes naturales en la remoción de turbidez de agua. Entre los estudios que se encontró se puede mencionar el estudio efectuado por el CIPA (Centro de Investigación en Protección Ambiental) donde aborda la extracción y aplicación de productos naturales como hidrocoloides y almidones con potencial floculante en la remoción de turbidez (Vargas, 2010), también es considerable el estudio del CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) con polímeros naturales que se obtienen de una variedad de plantas nativas como tuna, algas y tubérculos, las cuales se utilizan como auxiliares de la coagulación (Kirchmer, 1975). Cabe mencionar que dichos centros sólo mencionan los coagulantes naturales, mas no han realizado estudios de los mismos. Entre los temas abordados en los estudios anteriormente mencionados resalta la aplicación del almidón de yuca, dándonos cuenta

de este modo que es posible complementar a un polímero sintético utilizado en coagulación, como el sulfato de aluminio, con productos elaborados en base a materia prima procedente de la naturaleza, en especial la papa que es un producto natural originario del Perú.

Un estudio bastante interesante al respecto se realizó en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (México), donde se estudió el potencial coagulante de mezclas compuestas por almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y sulfato de aluminio, que permitirían reducir la cantidad sulfato de aluminio usado como coagulante en plantas de tratamiento de agua. En lo que respecta a este estudio se obtuvo como conclusión que al aplicar al agua de 70 NTU, una dosis de 28 mg/L de sulfato de aluminio y 2 mg/L de almidón de yuca se obtiene una turbidez final de 1,47 NTU, representando esto un 97,9 % de remoción de turbidez (Solís, 2012).

Otro estudio fue hecho en la Universidad Nacional de Ingeniería "Campus Simón Bolívar", Managua (Nicaragua), donde se desarrolla la línea de investigación de Coagulantes Naturales Alternativos desde 1992, la cual se inició con la identificación y clasificación botánica de plantas nativas con propiedades aglutinantes. En este trabajo se presentan la obtención y aplicación del polímero natural denominado Cochifloc.

### **1.3 Justificación:**

El agua es el líquido más abundante de la corteza terrestre, asimismo es una sustancia esencial en los seres vivos. El agua es el componente que se encuentra en mayor proporción en los medios orgánicos, es así que los seres vivos contienen en promedio un 70 % de agua.

El agua no es un simple medio ni una fase inerte, es un líquido muy reaccionante. Interviene en muchas reacciones químicas, bien como reactivo o como producto de la reacción, y resulta imprescindible para la estabilidad de muchas sustancias biológicas como las proteínas.

A lo largo de la historia, el hombre ha utilizado el agua para elaborar sus alimentos como para saciar la sed, luego la ha utilizado para alimentar y dar de beber a sus animales y posteriormente en el riego de las tierras con objeto de desarrollar las plantas y lograr de esta forma sus frutos.

En lo que respecta a tratamiento de aguas superficiales, ésta es generalmente evaluada en términos de remoción de turbidez, ya que la misma tiene una gran importancia de aspecto sanitario, porque refleja una aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que implica indicio de contaminación.

El sulfato de aluminio es usado como coagulante en la clarificación de aguas en todo el mundo, pero su uso ha sido seriamente cuestionado por problemas a la salud que podría conllevar su almacenamiento a largo plazo en el cuerpo humano, de tal modo que se está investigando modos de disminuir su utilización. Asimismo paralelamente al menor uso que se quiere dar al sulfato de aluminio, se piensa complementar a este insumo con un coagulante natural como el almidón, ya que como se mencionó líneas arriba, se han realizado estudios donde se ha observado que los almidones usados en combinación con sulfato de aluminio en coagulación de aguas han mostrado notable eficiencia de remoción de turbidez que al utilizar solo sulfato de aluminio como coagulante (Kemmer, 1975).

El interés por la reducción del uso del sulfato de aluminio como coagulante se debe a que su uso genera grandes cantidades de lodos de desecho y los altos niveles de aluminio remanente en las aguas tratadas ponen en riesgo la salud mental del ser humano debido a que la elevada concentración de aluminio en el organismo puede ser causante del síndrome de Alzheimer, dicha aseveración es confirmada por un estudio de revisión bibliográfica de estudios epidemiológicos recopilados por la Escuela Valenciana de estudios para la Salud, afirmando este estudio que una concentración de aluminio en el agua de consumo humano por

encima de 0,1 mg/L es un factor de riesgo de demencia y más precisamente de la enfermedad de Alzheimer (Rondeau, 2000).

En el presente trabajo se va a tomar en consideración el agua del río Caplina que procede de la captación de la Planta Pachía, de donde se tiene los siguientes reportes de turbidez, sulfatos y aluminio:

Tabla 1: Reporte del Análisis Físicoquímico en la Captación de la Planta – Pachía, 2013

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Turbidez (NTU)	1282	3425	1105	2750	835	1475	960	1125
Sulfatos (mg/L)	522	285	372	435	495	508	519	485
Aluminio (mg/L)	7,9	4,9	8	5	8	10	8	7
pH	5,9	6	6	5	5	5	4	5

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de EPS Tacna S.A. (2013)

Tabla 2: Reporte del Análisis Físicoquímico en la Captación de la Planta – Calana, 2013

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Turbidez (NTU)	77,2	96,3	15,7	14	9,43	10,8	15,4	18,6
Sulfatos (mg/L)	202	156	163	180	182	198	175	190
Aluminio (mg/L)	0	0,04	0,1	0	0,05	0,1	0	0,1
pH	8,1	7,87	8	8	7,92	7,6	8	7,8

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de EPS Tacna S.A. (2013)

Tabla 3: Reporte del Análisis Físicoquímico en la Salida de la Planta – Pachía, 2013

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Turbidez (NTU)	1,30	4,86	1,16	2,32	2,64	1,24	1,12	1,28
Sulfatos (mg/L)	535	515	408	452	512	525	500	479
Aluminio (mg/L)	0,04	0,09	0,11	0,09	0,10	0,09	0,08	0,09
pH	7,26	7,06	6,84	7,85	6,88	7,02	6,78	6,96

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de EPS Tacna S.A. (2013)

Tabla 4: Límites máximos permisibles de calidad del agua

Parámetro	Límite máximo permisible (LMP)
pH	6,5 – 8,5
Turbidez	5 NTU
Conductividad	1500 $\mu$ S/cm
Color	20 UCV
Cloruros	250 mg/L
Sulfatos	250 mg/L
Dureza	500 mg/L
Nitratos	50 mg/L
Hierro	0,3 mg/L
Aluminio	0,2 mg/L
Manganeso	0,2 mg/L
Plomo	0,1 mg/L
Arsénico	0,1 mg/L
Mercurio	0,001 mg/L
Cromo	0,05 mg/L
Flúor	2 mg/L
Selenio	0,05 mg/L

Fuente: Organización Mundial de la Salud (2008)

Como se observa, los valores de turbidez, sulfatos y aluminio de la Captación Pachía son muy elevados a comparación de los valores que presenta la Captación Calana. La diferencia de estos valores reportados se debe a que la Planta de Pachía trata únicamente agua del río Caplina, mientras que la Planta Calana trata las aguas de los ríos Uchusuma y Caplina. Es válido añadir que al observar los valores de pH de ambas captaciones, se puede inferir que la Captación Pachía presenta acidez en el agua, mientras que la Captación Calana presenta agua alcalina. Asimismo, en la salida de la Planta Pachía, en donde se usa 26 mg de sulfato de aluminio por cada litro de agua que se trata (EPS Tacna, 2013), los valores de sulfatos sobrepasan notablemente el límite máximo permisible fijado por la Organización Mundial de la Salud en cuanto a sulfato presente en el agua potable que es 250 mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$ , hallándose en la tabla anterior valores que pasan del doble de este límite máximo permisible, en el caso del aluminio se observa que los valores están dentro del límite máximo permisible, pero sobrepasa el 0,1 mg/L de aluminio que establece la investigación de la Universidad de Johns Hopkins como factor de riesgo para contraer demencia y/o enfermedad de Alzheimer (Rondeau, 2000).

Un punto relevante de mencionar en lo que respecta a coagulación es

el pH, ya que el pH afecta la solubilidad de los precipitados formados por el aluminio, así como la adecuada formación de flóculos. El sulfato de aluminio es muy sensible al pH, siendo su rango de pH adecuado para la coagulación de 5,5 a 8. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la remoción de turbidez es pobre y se solubiliza el aluminio generando problemas en la salud al usuario del agua como ya se indicó anteriormente (Romero, 1996).

#### **1.4 Objetivos de la investigación:**

##### **1.4.1 Objetivo general:**

Determinar la eficiencia del almidón de papa (*Solanum Tuberosum*) como auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio en la remoción de turbidez del agua del río Caplina.

##### **1.4.2 Objetivos específicos:**

- Obtener el almidón de papa de la variedad Canchán de forma experimental en laboratorio.

- Determinar la dosis adecuada de almidón de papa de la variedad Canchán y sulfato de aluminio para remover la turbidez del agua del río Caplina utilizando la prueba de jarras.
- Determinar la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Caplina.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 La papa**

##### **2.1.1 Definición de la papa**

Los primeros vestigios de papa poseen más de 8 000 años de antigüedad y fueron encontrados durante unas excavaciones realizadas en las cercanías del pueblo de Chilca, al sur de Lima, en el año de 1976. Desde ese momento, y con el correr de los siglos, la historia de la papa ha estado relacionada con el desarrollo de variedades adaptables a diversas condiciones ambientales y la aceptación que ha tenido a nivel mundial tanto en el sector gastronómico como en lo relacionado a la industria en general.

Hoy en día, la papa representa una de las contribuciones más importantes de la región andina y en especial de nuestro país al mundo entero, por ser uno de los cultivos alimenticios más consumidos y

apreciados, y porque de esa manera colaboramos con el fortalecimiento de la seguridad alimentaria de toda la humanidad (Brack, 2008).

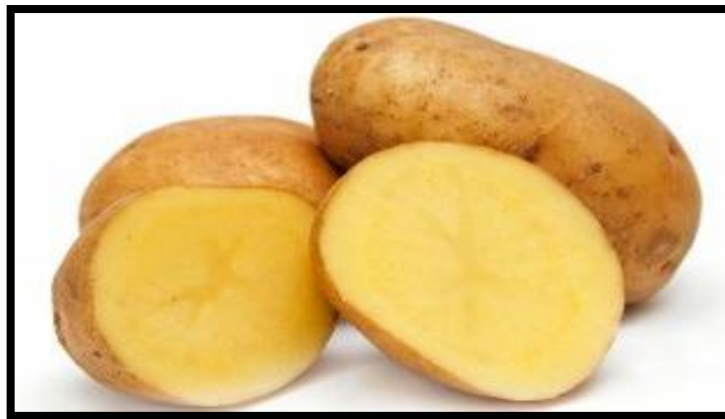


Figura 1: La papa  
Fuente: Ramírez (2012)

### 2.1.2 Clasificación taxonómica de la papa:

Tabla 5: Taxonomía de la papa

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Subclase:	Asteridae
Orden:	Solanales
Familia:	Solanaceae
Subfamilia:	Solanoideae
Tribu:	Solaneae
Género:	Solanum
Especie:	<i>Solanum tuberosum</i>

Fuente: Chávez (2008)

### **2.1.3 Importancia de la papa:**

Actualmente en el Perú, es el principal cultivo del país en superficie sembrada y representa el 25 % del PBI agropecuario. Es la base de la alimentación de la zona andina y es producido por seiscientas mil pequeñas unidades agrarias. La papa es un cultivo competitivo del trigo y arroz en la dieta alimentaria. El Perú es el país con mayor diversidad de papas en el mundo, al contar con 8 especies nativas domesticadas y 2 301 de las más de 4 000 variedades que existen en Latinoamérica. Además, nuestro país posee 91 de las 200 especies que crecen en forma silvestre en casi todo nuestro continente (Brack, 2008).

### **2.1.4 El almidón de papa:**

El almidón es parte fundamental de la dieta del ser humano, es el polisacárido digerible más importante y abundante. Se forma como polisacárido de reserva en las hojas, tallo, raíces, semillas, fruta y polen de muchas plantas superiores. El almidón se encuentra en todas las partes de una planta de papa, en tubérculos, estolones, hojas y frutos. Sin embargo, el almidón proveniente del tubérculo es el de principal interés por su naturaleza y propiedades para el uso en la industria. Además, es el principal componente del tubérculo, con las 3/4 partes de la materia seca.

Durante la estación de crecimiento, el almidón se acumula en las células del tubérculo formando gránulos simples y/o complejos. Químicamente el almidón es una mezcla de dos polisacáridos, uno lineal (amilosa) y otro ramificado (amilopectina) y se encuentran agrupados en la forma de gránulos parcialmente cristalinos (Montoya, 2007; Xing, 2010).



Figura 2: El almidón de papa

Fuente: Scagel (1987)

## **2.2 El agua**

### **2.2.1 Definición del agua**

El agua es una sustancia líquida compuesta de hidrógeno y oxígeno. Los antiguos filósofos consideraban el agua como un elemento básico que representaba a todas las sustancias líquidas. Los científicos no descartaron esta idea hasta la última mitad del siglo XVIII. En 1781, el

químico británico Henry Cavendish sintetizó agua detonando una mezcla de hidrógeno y aire. Sin embargo, los resultados de este experimento no fueron interpretados claramente hasta dos años más tarde, cuando el químico francés Antoine Laurent de Lavoisier propuso que el agua no era un elemento sino un compuesto de oxígeno e hidrógeno. En 1804, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac y el naturalista alemán Alexander von Humboldt demostraron conjuntamente que el agua consistía en dos volúmenes de hidrógeno y uno de oxígeno, tal como se expresa en la fórmula actual  $H_2O$  (Kemmer, 1995; Romero, 1996).

### **2.2.2 Propiedades del agua**

El agua pura es un líquido incoloro, inodoro e insípido. A la presión atmosférica, el punto de congelación del agua es de 0 °C y su punto de ebullición es de 100 °C a nivel del mar. El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4 °C y se expande al congelarse. Como muchos otros líquidos, el agua puede existir en estado sobreenfriado, es decir, que puede permanecer en estado líquido aunque su temperatura esté por debajo de su punto de congelación; se puede enfriar fácilmente a unos - 25 °C sin que se congele (Romero, 2000; Rodier, 1981).

### **2.2.3 Calidad del agua**

El término calidad del agua es relativo, referido a la composición del agua en la medida en que ésta es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas; entonces este es un término neutral que no puede ser clasificado como bueno o malo sin hacer referencia al uso para el cual el agua es destinada; por ejemplo uso agrícola, agropecuario, de consumo humano e industrial. La calidad del agua está determinada por la hidrología, la fisicoquímica y la biología de la masa de agua a que se refiera. Las características hidrológicas son importantes ya que indican el origen, cantidad del agua y el tiempo de permanencia, entre otros datos. Estas condiciones tienen relevancia ya que, según los tipos de substratos por los que viaje el agua, esta se cargará de unas sales u otras en función de la composición y la solubilidad de los materiales de dicho substrato. Los parámetros más comúnmente utilizados para establecer la calidad de las aguas son los siguientes: oxígeno disuelto, pH, sólidos en suspensión, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), fósforo, nitratos, nitritos, amonio, amoniaco, compuestos fenólicos, hidrocarburos derivados del petróleo, cloro residual, zinc total y cobre soluble (Spellman, 2000).

#### 2.2.4 Turbidez del agua

El término turbidez se refiere a la presencia de partículas en forma de coloides (materia de tamaño muy pequeño), y que causan que el agua se presente como agua nebulosa o no cristalina. Estas partículas se clasifican como sólidos suspendidos: son residuos de materia orgánica y también son de origen inorgánico como: partículas de arcillas, silicatos, feldespatos, etc. Los sólidos suspendidos pueden ser separados por diferentes medios mecánicos como son la sedimentación y la filtración. (Kemmer, 1995)



Figura 3. Turbidez del agua

Fuente: Sierra (2011)

### **2.3 Coloides:**

Son suspensiones estables, por lo que no es posible su sedimentación natural, son los responsables de la turbiedad presente en el agua. Las partículas coloidales se caracterizan por ser hidrofílicas (tienen afinidad con el agua) e hidrofóbicas (es decir que rechazan el agua), las primeras se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeadas de moléculas de agua que previenen todo contacto posterior entre estas partículas; las partículas hidrofóbicas no son rodeadas de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontánea, por lo que requiere de la ayuda de medios químicos y físicos (Snoeyink, 1990; Sierra, 2011).

### **2.4 Coagulación y floculación**

#### **2.4.1 Definición de coagulación**

La coagulación se basa en la desestabilización de la suspensión coloidal, por la eliminación de cargas que rodean a todas las partículas coloidales, con la consecuente formación de núcleos microscópicos. Ésta inicia en el instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente segundos.

Este proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacteria, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor.
- El uso de cualquier otro proceso para la remoción de partículas muy finas, como la sedimentación simple, resulta muy poco económico y en ocasiones imposible, debido al alto tiempo requerido (Kemmer, 1995).

#### **2.4.2 Clases de coagulantes:**

Los coagulantes más utilizados son los siguientes:

##### **Sulfato de Aluminio:**

El sulfato de aluminio es un coagulante ampliamente usado en tratamientos de aguas. El producto comercial tiene usualmente la fórmula

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ . Se obtiene del procesamiento de aluminio con ácido sulfúrico. El material es empacado en diversas formas: en polvo, molido, en terrones, en granos y en forma líquida.

#### **Sulfato de aluminio tipo A:**

Es utilizado en el tratamiento de aguas para la remoción de carga coloidal. Se emplea también en la industria textil como mordiente, como afirmante, como antitranspirante y como absorbente de humedad debido a su propiedad higroscópica. También se utiliza en la fabricación de papel en conjunto con unas resinas llamadas encolantes, proporcionándole al papel resistencia a la penetración por el agua y unas buenas condiciones para fijar los colores. Como coagulante en la manufactura de caucho sintético. Se utiliza también para la fabricación de sales dobles como: sulfato de amonio y aluminio, y sulfato de potasio y aluminio y para la purificación de la glicerina. La producción de esta sustancia química debe cumplir con las normas internacionales para productos químicos para el tratamiento del agua ANSI/ AWWA B 403-93 y Norma Técnica Peruana NTP 311.095-1999.

### **Sulfato de aluminio tipo B:**

Es ampliamente usado en el tratamiento de aguas como coagulante en la mayoría de los procesos hidrodinámicos de separación de sólidos, en especial de las partículas coloidales durante el proceso de coagulación. Debido a ello debe cumplir con las normas internacionales para productos químicos para el tratamiento del agua ANSI/ AWWA B 403-93 y Norma Técnica Peruana NTP 311.095-1999, siendo éste el caso de la empresa Aris Industrial S.A. que es la empresa de donde procede el insumo usado en el presente trabajo (Sierra, 2011).

### **Polielectrolitos:**

Son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como auxiliares de coagulación. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable (Sierra, 2011).

### **2.4.3 Mecanismos de coagulación**

- **Mecanismo de la doble capa eléctrica**

Las soluciones coloidales no tienen una carga eléctrica neta, como las partículas coloidales, por ello la carga en la partícula se debe equilibrar en la fase acuosa. Por esta razón en cada interfase entre un sólido y el agua, existe una doble capa eléctrica, la cual está formada por las partículas con carga negativa del coloide y la carga positiva del coagulante. En este mecanismo se encuentran la capa difusa, en la cual las cargas negativas y positivas están un poco alejadas entre sí y recién están estableciendo una afinidad entre ellas, por otro lado se tiene la capa comprimida en donde las cargas negativas y positivas, se encuentran más cercanas y el plano de cizallamiento, que es la barrera que separa la doble capa del resto de la dispersión (Spellman, 2000).

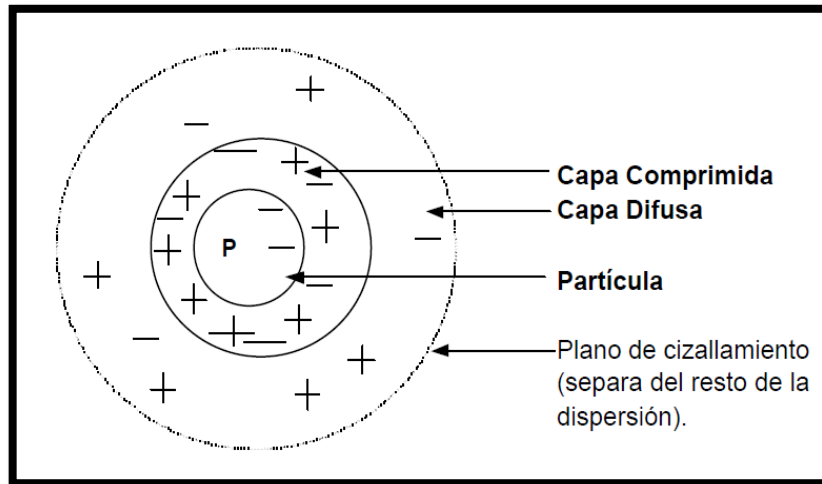


Figura 4. Doble capa eléctrica

Fuente: Spellman (2000)

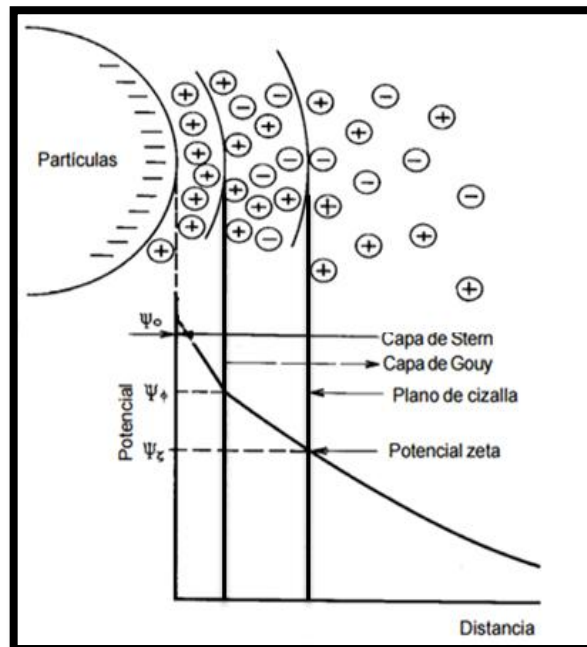


Figura 5. Doble capa eléctrica

Fuente: Spellman (2000)

En este mecanismo de la doble capa eléctrica hay tres potenciales de interés:

1) El potencial  $\psi_0$  en la superficie coloidal, el cual es un potencial eléctrico creado por la presencia del coloide en el agua, que disminuye con la distancia, a partir de la superficie del mismo, donde es máximo y se le denomina también potencial de Nernst.

2) El potencial  $\psi_\phi$  (Phi), en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.

3) El potencial  $\psi_\zeta$  (Zeta) es una medida de la estabilidad de una dispersión coloidal, debido a que este es un buen índice de la magnitud de la interacción repulsiva entre partículas coloidales.

Asimismo en este diagrama se puede apreciar la capa de Stern, la cual abarca la capa donde están ubicadas las cargas positivas y la combinación de las cargas positivas y negativas y también se tiene la capa de Gouy que abarca la combinación de las cargas positivas y negativas (Spellman, 2000).

- **Mecanismo de neutralización de cargas por adsorción**

Algunas especies químicas son capaces de ser adsorbidas en la superficie de las partículas coloidales. Este fenómeno permite la

reestabilización de la carga de la partícula cuando hay un exceso de coagulante. Sin embargo, si las especies químicas poseen carga contraria al de la superficie de los coloides, éstos se desestabilizarán. La adsorción causada por la interacción entre coagulante y coloide es común en el caso de especies hidrolizadas de aluminio y hierro (Romero, 2000).

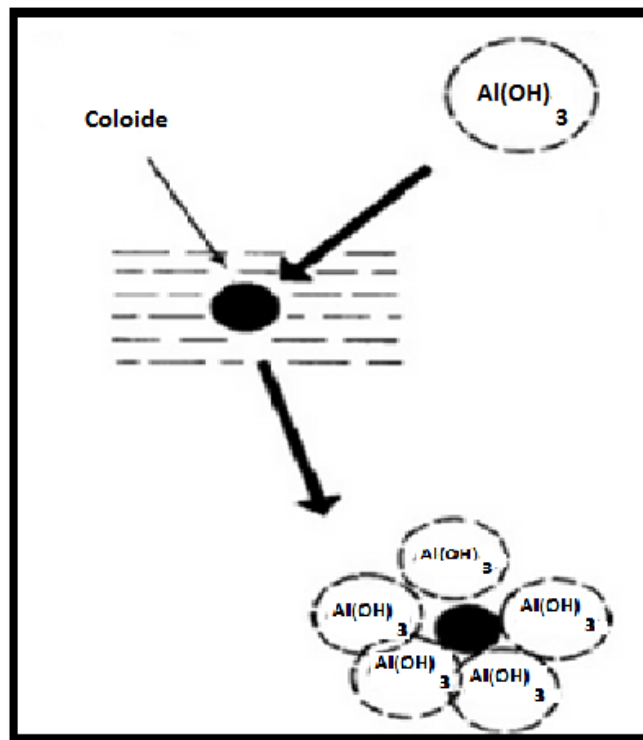


Figura 6. Mecanismo de neutralización de cargas

Fuente: Romero (2000)

- **Mecanismo de barrido**

Las partículas coloidales desestabilizadas se pueden atrapar dentro de un flóculo cuando se adiciona una cantidad determinada de coagulante, habitualmente sales de metales trivalentes como el sulfato de aluminio y cloruro férrico. De tal modo, el flóculo está formado por moléculas de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y partículas coloidales, básicamente el mecanismo de barrido es el mismo que el mecanismo de neutralización de cargas por adsorción, siendo la diferencia entre ambos, que el mecanismo de barrido funciona mejor cuando la turbidez es baja, lo cual a su vez implica que al haber menor carga coloidal, tome mayor tiempo en producirse la coagulación.(Wright, 2000).

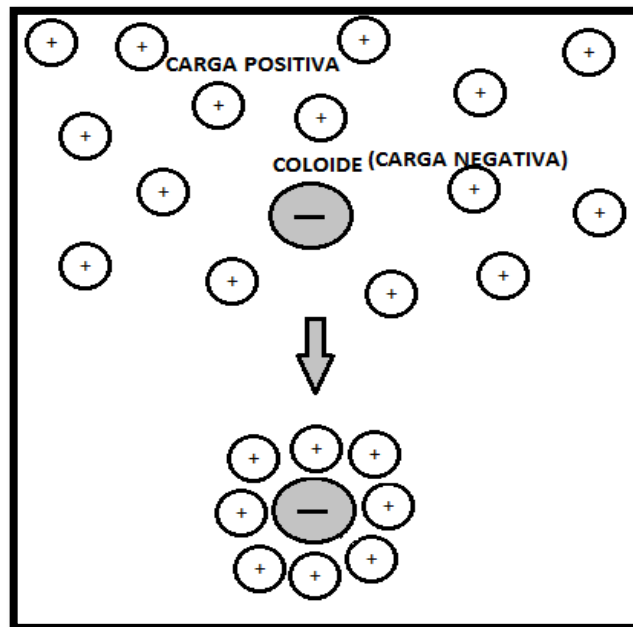


Figura 7. Mecanismo de barrido

Fuente: Elaboración Propia

- **Mecanismo de coagulación del sulfato de aluminio:**

Debido a que las partículas coloidales tienen cargas negativas, las cuales les proveen gran estabilidad, éstas deben ser neutralizadas para eliminar la estabilidad de la cual gozan y lo cual hace a su vez imposible su sedimentación natural, para tal efecto se utilizará las cargas positivas del ion  $Al^{3+}$  del complejo de aluminio hexahidratado que procede del sulfato de aluminio. Es así que las partículas coloidales son atrapadas mediante la adsorción que realiza este complejo de aluminio hexahidratado dado que este complejo aporta las cargas eléctricas

positivas que al juntarse con las cargas eléctricas negativas de las partículas coloidales eliminarán la estabilidad que poseen éstas, dando lugar a la formación de los flóculos, y es ahí cuando empieza la labor del almidón, ya que al haber sido previamente sometido a calentamiento a 70 °C, lo cual produjo la separación del almidón en sus dos constituyentes como son la amilopectina que es la parte insoluble y la amilosa que es la parte soluble del almidón, y es por tanto, esta última la que va a tomar parte del proceso de coagulación, fomentando la aglomeración y aumento de masa de los flóculos en formación, facilitando esto su posterior sedimentación por gravedad.

La afinidad de las micelas por el medio dispersante puede ser muy acentuada (liofilia) o bien pequeña o nula (liofobia). Cuando el medio de dispersión, es el agua, esta propiedad se denomina respectivamente hidrofilia e hidrofobia. La hidratación de los coloides se debe a, la atracción recíproca que tiene lugar entre las partículas coloidales, cargadas eléctricamente, y las moléculas de agua. En efecto, consideradas éstas como un dipolo con sus cargas positiva y negativa ubicadas una en cada extremidad, al enfrentarse con una micela, también cargada de electricidad, se atraen, mutuamente por sus cargas de signo contrario, hasta llegar a unirse.

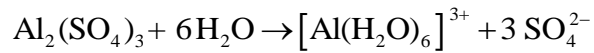
Este fenómeno de la fijación de agua por las micelas coloidales recibe el nombre de imbibición. Asimismo es importante mencionar que la estabilidad de los coloides difiere según se trate de coloides hidrófobos e hidrófilos, entendiéndose que los coloides hidrófobos son irreversibles, pues, una vez que sus micelas han sido precipitadas, no pueden ser dispersadas nuevamente. Por el contrario, los hidrófilos son reversibles, por lo cual, sus micelas, una vez que han sido precipitadas, pueden volver a mezclarse con el medio de dispersión que en este caso es el agua, para regenerar el sistema coloidal en solución. Por lo tanto para precipitar la carga coloidal lo primero que hay que hacer es neutralizar su carga eléctrica, en cuyo caso basta con agregar a la solución un electrolito de signo contrario a la carga de la micela. Este fenómeno está contemplado por la regla de Hardy-Schulze que dice: "La precipitación de los coloides hidrófobos se efectúa, por iones de signo opuesto al de la partícula coloidal, y es tanto más intensa cuanto mayor es la valencia de dicho ion" (Romero, 2000; Rodríguez, 2006).

- **Etapas de la coagulación del sulfato de aluminio:**

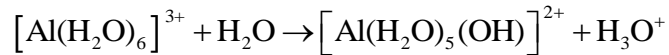
1) Disolución y disociación: Como toda sal fuerte al ser disuelta en agua, procede a disociarse en su respectivo catión ( $Al^{3+}$ ) y anión ( $SO_4^{2-}$ ).



2) Formación del complejo de aluminio hexahidratado:



3) Hidrólisis: La atracción del ion  $\text{Al}^{3+}$  sobre los electrones libres de los átomos de oxígeno es tan grande que se produce la pérdida de un protón hacia una molécula de agua formándose el ion hidronio.



#### 2.4.4 Diagrama de flujo de la coagulación:

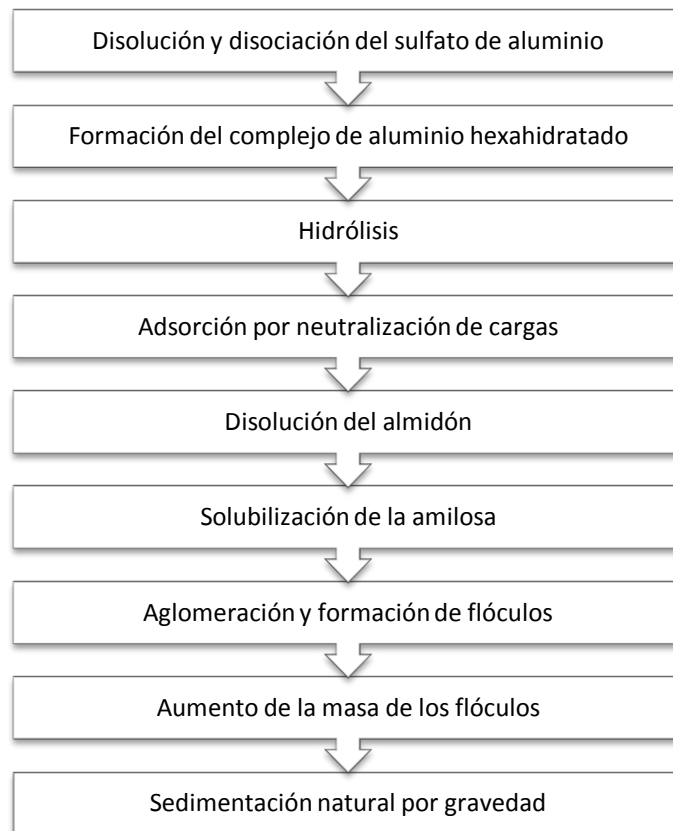


Figura 8. Etapas de la coagulación del sulfato y el almidón de papa

Fuente: Elaboración Propia

### **2.4.5 Floculación**

Es el proceso mediante el cual las partículas desestabilizadas durante la coagulación se unen para formar grandes partículas estables denominados flóculos, los cuales alcanzan un tamaño suficientemente grande como para sedimentar en el agua.

La floculación puede presentarse mediante dos mecanismos: floculación ortocinética y pericinética. La floculación ortocinética es aquella generada por la energía entregada al agua por fuerzas externas, como son las paletas giratorias del equipo de jarras y asimismo es aquella que predomina cuando las partículas en solución superan el tamaño de 1  $\mu\text{m}$  como es el caso de la presente investigación, mientras que la floculación pericinética es aquella promovida internamente dentro del agua, debido al movimiento de agitación que las partículas realizan dentro del agua, conocido como movimiento browniano, el cual a su vez es un movimiento aleatorio que se observa en las partículas microscópicas que se hallan en un medio fluido como por ejemplo el polen o humus disuelto en agua (Romero, 2000).

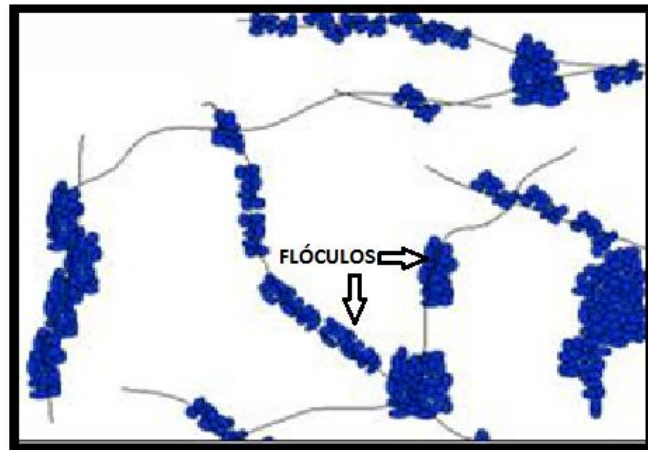


Figura 9. Floculación

Fuente: Elaboración Propia

#### 2.4.5 Sedimentación

Es la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión en un fluido y que tengan peso específico mayor que el fluido. En un determinado intervalo de tiempo no todas las partículas en suspensión sedimentan. La sedimentación como tal, es en esencia un fenómeno netamente físico. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado (Kemmer, 1995).

## **2.5 El almidón**

### **2.5.1 Definición del almidón**

Es un carbohidrato complejo,  $(C_6H_{10}O_5)_x$ , y es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales, y la fuente de calorías más importante consumida por el ser humano. Es inodoro e insípido, se encuentra abundante en las semillas de los cereales, en los bulbos y tubérculos. Las moléculas de almidón están compuestas de cientos o miles de moléculas de hexosas, que corresponden a los distintos valores de  $x$ , de la fórmula anterior, y que van desde unos cincuenta a varios miles (Montoya, 2007).

### **2.5.2 Composición del almidón**

Las moléculas del almidón son de dos tipos. En el primero, la amilosa, que constituye el 20 % del almidón ordinario, los grupos  $C_6H_{10}O_5$  están dispuestos en forma de cadena continua y no ramificada; en el segundo tipo, la amilopectina, presenta una estructura ramificada.

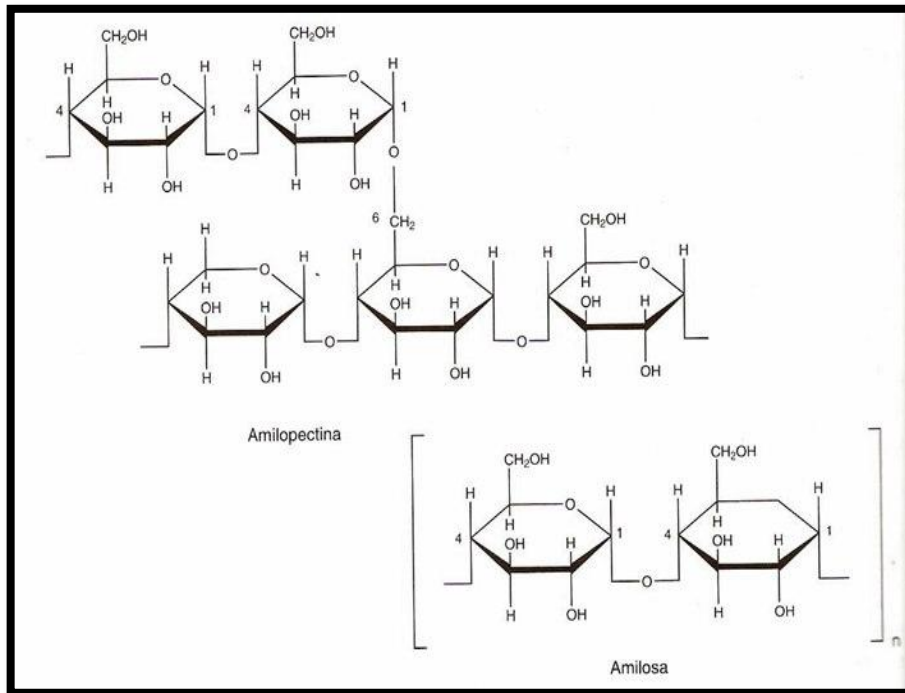


Figura 10: Estructura química de la amilosa y amilopectina

Fuente: Arias (2010)

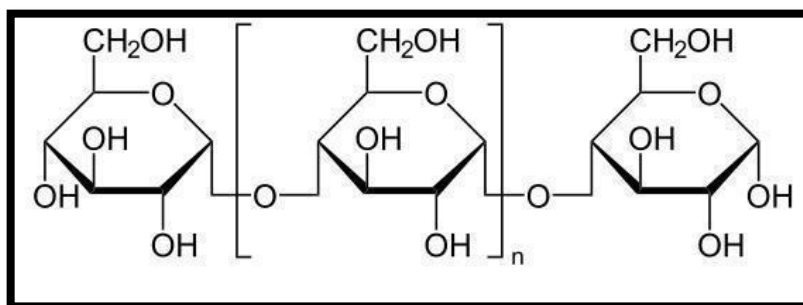


Figura 11: Estructura química del almidón

Fuente: Arias (2010)

### **2.5.3 Aplicaciones del almidón en la Industria:**

#### **Alimentaria:**

- Preparación de edulcorantes (glucosa, fructosa)
- Sustituto de la harina de trigo, en repostería, pastelería, etc.
- Espesante y estabilizante en helados, gelatinas, sopas, salsas, etc.
- El almidón es muy importante en los productos horneados: empresas que fabrican galletas, bizcochos, etc., debido a que el almidón mejora la esponjosidad y textura, y además imparte el color dorado a la corteza de los productos de panificación.
- Fuente de Alcohol para licores.
- Preparación postres como las mazamorras, flanes, etc.

#### **Farmacéutica:**

- Materia prima para la fabricación de dextrosa (suero)
- Excipiente o mezcla para los comprimidos y pastillas
- Como relleno en píldoras, tabletas y otros productos de la industria farmacéutica.

**Textil:**

- Engrudo o gel utilizado en las tintorerías para almidonar las ropas
- Material para dar apresto a los tejidos

**Papelera:**

- Engrudo presentado en forma de escamas de almidón hinchables o pregelatinizadas para la fabricación de pasta de papel, papel couché, papel kraft, cartón, etc.

**Minería y Petróleo:**

- Agente floculante en las minas de potasio y en las perforaciones petrolíferas
- Materia Prima para el tratamiento de aguas usadas para metales pesados (cobre, níquel, etc.)
- Floculante selectivo para recuperar vanadio, en la metalurgia del plomo y el cobre.

**Industria Química:**

- Fabricación de colas y pegamentos.
- La esterificación que produce poliéster para la fabricación de espumas de poliuretano.

#### **2.5.4 Uso del almidón de papa como auxiliar de coagulación:**

El almidón es la mezcla de dos polisacáridos: la amilosa y la amilopectina. Ambos están formados por unidades de glucosa, en el caso de la amilosa unidas entre ellas por enlaces  $\alpha$  1-4 lo que da lugar a una cadena lineal. En el caso de la amilopectina, aparecen ramificaciones debidas a enlaces  $\alpha$  1-6. El tratamiento del almidón con agua caliente (gelatinización) permite la extracción de una sustancia soluble, que es la amilosa y una parte insoluble que es la amilopectina. Es la amilosa quien se encarga de adherirse a las partículas coloidales y así generar flóculos más grandes, los cuales al incrementar su masa y sedimentarse mejor hacen posible una mayor remoción de turbidez. El almidón es sintetizado por las plantas verdes durante la fotosíntesis. Forma parte de las paredes celulares de las plantas y de las fibras de las plantas rígidas. A su vez sirve de almacén de energía en las plantas, liberando energía durante el proceso de oxidación en dióxido de carbono y agua. Los gránulos de almidón de las plantas presentan un tamaño, forma y características específicos del tipo de planta en que se ha formado el almidón (Melian, 2010).

## 2.6 Prueba de Jarras:

El aparato de prueba de jarras fue desarrollado entre 1918 y 1921 por Langelier y Bayles. Consta de un agitador en cada vaso que puede crear turbulencia simultáneamente en 6 vasos de precipitado. La prueba de jarras se ejecuta colocando en seis vasos de precipitado 1 litro de agua de la muestra, agregándole diversas dosis de coagulantes a cada uno mientras se agita la muestra. La prueba de jarras trabaja a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento. Una prueba de jarras simula los procesos de coagulación y floculación que fomentan la eliminación de los coloides en suspensión en el agua (Wright, 2004).

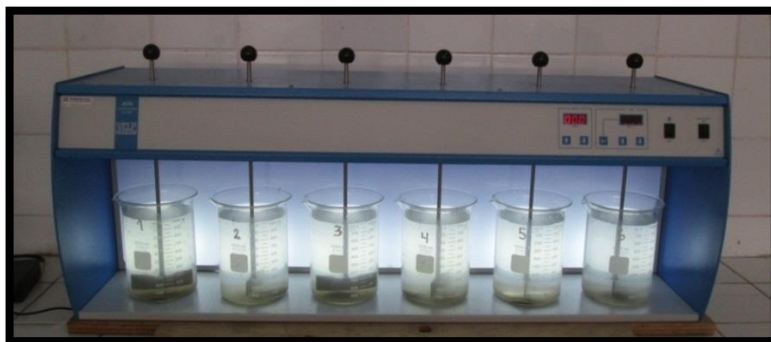


Figura 12: Equipo de prueba de jarras

Fuente: Equipo de jarras - Modelo Phipps & Bird

Una corrida de prueba de jarras implica tres etapas: mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, las mismas que se detallan a continuación:

### **Mezcla rápida**

El objetivo de la mezcla rápida es crear la turbulencia o movimiento necesario en el líquido contenido en la jarra para poner en contacto los reactivos químicos con las partículas coloidales del agua, con el fin de neutralizar sus cargas, desestabilizarlas y hacer que se aglomeren en un corto período de tiempo.

### **Mezcla lenta**

Generalmente, el tiempo de mezcla no excede de 15 minutos. Un tiempo excesivo puede crear calentamiento de la muestra originando una floculación más eficiente, pero a su vez una pobre sedimentación, ya que ocurre la liberación de los gases disueltos en el agua, formando burbujas que se adhieren a los flóculos y los hacen flotar.

## **Sedimentación**

Durante la sedimentación, los coloides precipitan por gravedad y se obtiene el agua clarificada y por lo tanto, se obtiene la remoción de turbidez (Romero, 1996).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Tipo de investigación**

Se trata de una investigación aplicada y de tipo experimental orientada a determinar la eficiencia del almidón de papa (*Solanum Tuberosum*) como auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio para la remoción de turbidez del agua del río Caplina.

#### **3.2 Hipótesis**

El almidón de papa (*Solanum Tuberosum*) es un eficiente auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio en la remoción de turbidez del agua del río Caplina.

#### **3.3 Sistema de variables**

Las variables independientes son la turbidez inicial, la dosis de almidón de papa y la dosis de sulfato de aluminio; la variable dependiente es la

turbidez final.

Tabla 6: Operacionalización de variables

<b>Variable independiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Indicador</b>	<b>Índice</b>
Turbidez inicial	Es una forma de medir la concentración de las partículas suspendidas en el agua.	Es el proceso mediante el cual se mide la turbidez de la muestra de agua del río Caplina.	turbidez	Unidades nefelométricas de turbidez (NTU)
Dosis de almidón	Coagulante natural empleado en remoción de turbidez de agua.	Es el proceso mediante el cual se prueba con diversas dosis de almidón para remover la turbidez del agua.	concentración	mg/L
Dosis de sulfato de aluminio	Coagulante químico usado ampliamente en remoción de turbidez de agua.	Proceso donde se prueba con diversas dosis de sulfato de aluminio para remover la turbidez.	concentración	mg/L
<b>Variable dependiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Indicador</b>	<b>Índice</b>
Turbidez final	Es la turbidez remanente después de aplicados los coagulantes al agua.	Es el proceso mediante el cual se mide la turbidez de la muestra de agua del río Caplina después de haber sido sometido a tratamiento en la prueba de jarras.	turbidez	Unidades nefelométricas de turbidez (NTU)

Fuente: Elaboración Propia

### **3.4 Diseño experimental**

El diseño experimental que se utiliza es el diseño central compuesto, realizándose un total de 17 ensayos experimentales, los mismos que se detallan más adelante en el punto 4.4.

### **3.5 Materiales, reactivos y equipos**

#### **Materiales de laboratorio**

- 1 piceta
- 1 pliego de papel filtro
- 5 vasos de precipitado de 1 litro
- 1 fiola de 100 mL
- 1 varilla de vidrio
- 1 malla Tyler de 250  $\mu\text{m}$
- 1 malla Tyler de 500  $\mu\text{m}$
- 1 embudo de vidrio
- 1 embudo Buchner
- 1 matraz kitasato
- 1 soporte universal
- 2 frascos de vidrio con tapa

- 1 cuchillo
- 6 jeringas
- 1 cocina eléctrica
- 1 termómetro
- 1 espátula

### **Reactivos**

- 2 litros de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,02 N
- 1,5 kg de sulfato de aluminio tipo B
- agua destilada
- fenolftaleína
- anaranjado de metilo

### **Equipo de laboratorio**

- Balanza analítica
- peachímetro digital
- turbidímetro
- equipo de prueba de jarras
- bomba de vacío
- licuadora
- estufa

### **Material de muestra**

- 18 litros de agua de río Caplina y arcilla del mismo río

### **Material biológico**

- 2 kg de papa de la variedad Canchán

## **3.6 Procedimiento experimental**

### **3.6.1 Obtención experimental de almidón de papa:**

**Selección de Materia Prima:** Se selecciona papas de la variedad Canchán, que según el Primer Congreso Nacional de la Papa, organizado por el Ministerio de Agricultura del Perú es una variedad recomendada para la extracción de almidón.

**Lavado y Corte:** Se lava la papa y se le corta en pequeños cubos para realizar su molienda.

**Molienda 1:** En una licuadora se mezclaron las papas y agua en una relación de 1:1.

**Filtrado 1:** La mezcla obtenida de la primera molienda se hizo pasar por una muselina adicionando además 250 mL de agua destilada para arrastrar la mayor cantidad de almidón presente.

**Molienda 2:** La muestra retenida en la muselina se mezcló con agua (1:1) en una licuadora.

**Filtrado 2:** La masa obtenida de la segunda molienda se pasó nuevamente por una muselina y se adicionó 250 mL de agua destilada. Posteriormente se mezcló con lo obtenido en el primer filtrado.

**Centrifugación:** Los filtrados obtenidos fueron centrifugados a una velocidad de 3000 rpm durante 15 minutos, descartándose el sobrenadante.

**Filtración:** La muestra fue filtrada en una bomba de vacío con el empleo de un embudo Büchner usando papel filtro.

**Secado:** La muestra de almidón depositada en el papel filtro fue dejada en el mismo papel filtro poniéndolas a secar en una estufa a 45 °C por 14 horas.

**Tamizado:** La muestra ya seca fue retirada del papel Whatman y se hizo pasar por un tamiz de 500  $\mu\text{m}$  y 250  $\mu\text{m}$  respectivamente. Se obtuvo 412 g de almidón de papa a partir de 2 000 g de papa, lo cual representa un 20,6 % de rendimiento.

**Envasado:** El almidón de papa obtenido fue envasado en un frasco de vidrio (Melian, 2010).

### 3.6.2 Diagrama de Flujo de la Obtención de almidón de papa:

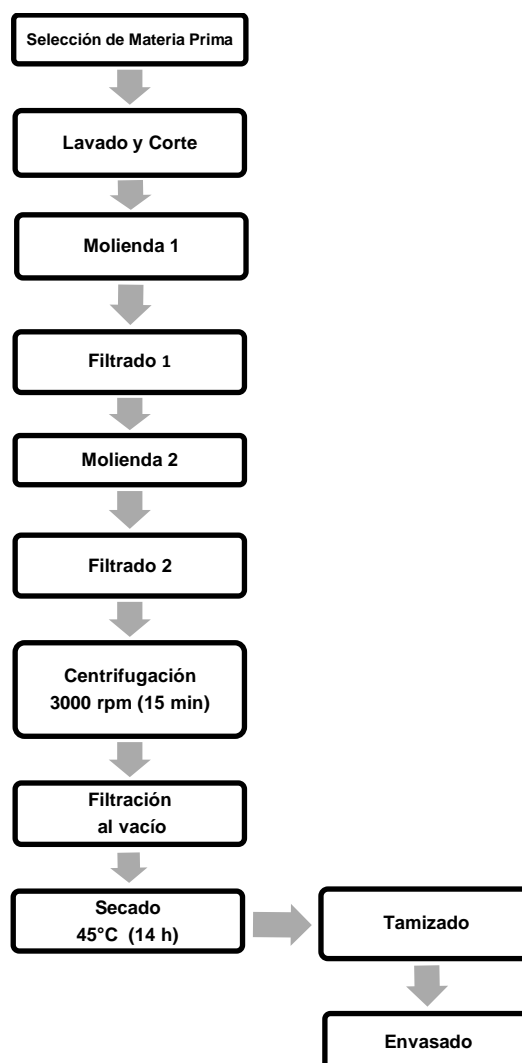


Figura 13: Obtención de almidón de papa

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.3 Preparación de la solución de almidón:

Se pesa 10 g de almidón seco de papa, se dispone en un vaso de precipitado con 100 mL de agua destilada; luego se agita la solución con una varilla de vidrio hasta lograr una solución homogénea que vendrá a ser la solución madre de almidón al 10 %. A continuación se vierte la

anterior solución en una fiola de 1000 mL agregando agua destilada hasta aforar. Luego se agita el contenido de la fiola hasta obtener una solución homogénea al 1 %. Luego de esto, sabiendo que los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a su estructura altamente organizada, deberá ser sometido a calentamiento hasta 70 °C, lo cual se conoce como gelatinización del almidón, donde las moléculas de almidón irán absorbiendo agua conforme se acerque a los 70 °C, y los gránulos de almidón empiezan a hincharse y a aumentar de volumen hasta que se llegará al punto en que los gránulos hinchados se romperán parcialmente dando lugar a que la amilosa y la amilopectina se dispersen en el seno de la disolución, obteniéndose de esta forma cadenas de amilosa altamente hidratadas que actuarán como eficientes auxiliares de coagulación (Sharia, 2012).

#### **3.6.4 Preparación de la solución de sulfato de aluminio:**

Se pesa 10 g de sulfato de aluminio tipo B, y se dispone en un vaso de precipitado con 100 mL de agua destilada; luego se agita la solución con una varilla de vidrio hasta lograr una solución homogénea que vendrá a ser la solución madre de sulfato de aluminio al 10 %. A continuación se vierte la anterior solución en una fiola de 1 000 mL agregando agua destilada hasta aforar. Luego se agita el contenido de la fiola hasta

obtener una solución homogénea al 1 % (Sharia, 2012).

### **3.6.5 Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio:**

Una vez tomada la muestra de agua y teniendo tres bloques de turbidez que son: 70 NTU, 500 NTU y 900 NTU, debido a que se trata de una turbidez baja, una turbidez intermedia y una turbidez alta, se lleva a cabo el proceso de coagulación-floculación mediante el equipo de prueba de jarras. Este equipo cuenta con 6 vasos de precipitado de 1 litro y en cada uno de estos vasos se agrega una muestra de agua de río Caplina y arcilla del mismo río para generar la turbidez. En cada vaso se procede a agregar sulfato de aluminio a determinadas concentraciones con el empleo de jeringas. Una vez agregado el coagulante se llevó a cabo una agitación rápida durante 1 minuto a 200 rpm, a fin de desestabilizar las cargas superficiales de las partículas de la materia orgánica contenida, seguida de una agitación lenta durante 15 minutos a 40 rpm para promover la formación de flóculos. Después se deja sedimentar por un tiempo de 30 minutos. Se miden los valores finales de los parámetros de turbidez y pH con el turbidímetro y el peachímetro respectivamente. La dosis óptima es la dosis de sulfato de aluminio que presenta la mayor remoción de turbidez. En este periodo de tiempo se debe observar el tipo de flóculo que se forma en cada vaso y se le debe asignar un valor

numérico de acuerdo al índice de Willcomb (Vega, 2002).

Tabla 7: Índice de Willcomb

Número de índice de Willcomb	Descripción
0	Flóculo coloidal, ningún tipo de aglutinamiento
2	Flóculo visible, muy pequeño e imperceptible
4	Flóculo disperso, bien formado, sedimenta lento
6	Flóculo claro, tamaño grande, sedimenta lento
8	Flóculo bueno, sedimenta fácil pero no completamente
10	Flóculo excelente, se deposita todo, dejando clara el agua

Fuente: Spellman (2000)

### **3.6.6 Determinación de la dosis óptima de la mezcla coagulante: almidón de papa y sulfato de aluminio:**

Se toma como base la dosis óptima de sulfato de aluminio y se combina con dosis crecientes de almidón de papa, dichos incrementos se hicieron de dos en dos para tener un amplio rango de datos, una vez hallado el valor que brinde la mayor remoción de turbidez, se procede a

probar con una dosis de una unidad mayor y una menor para identificar con mayor exactitud cuál es la dosis que brinde mayor remoción de turbidez (Vega, 2002).

### **3.6.7 Determinación del porcentaje de eficiencia de remoción de turbidez:**

Para determinar la eficiencia de remoción de turbidez se usará la ecuación siguiente (Almendárez, 2004):

$$\% \text{ Eficiencia de Remoción} = \left( 1 - \frac{\text{turbidez final}}{\text{turbidez inicial}} \right) \times 100 \quad [1]$$

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Balance de materia de la obtención de almidón de papa:

a) Lavado:

$$\text{Masa de entrada} = \text{Masa de salida} \quad [2]$$

$$2 \text{ kg de papa} + 2 \text{ kg de agua} = 1,962 \text{ kg de papa} + 0,038 \text{ kg de tierra} + 2 \text{ kg de agua}$$

$$4 \text{ kg} = 4 \text{ kg}$$

b) Pelado y cortado:

$$1,962 \text{ kg de papa} = 1,720 \text{ kg de papa} + 0,242 \text{ kg de cáscara de papa}$$

$$1,962 \text{ kg} = 1,962 \text{ kg}$$

c) Molienda 1:

$$1,720 \text{ kg de papa} + 1,720 \text{ kg de agua} = 3,44 \text{ kg de papa licuada}$$

$$3,44 \text{ kg} = 3,44 \text{ kg}$$

d) Filtrado 1:

3,44 kg de papa licuada + 0,25 kg de agua = 2,87 kg de solución de almidón

+ 0,82 kg de papa licuada filtrada

3,69 kg = 3,69 kg

e) Molienda 2:

0,82 kg de papa licuada filtrada + 0,82 kg de agua = 1,64 kg de papa licuada

1,64 kg = 1,64 kg

f) Filtrado 2:

1,64 kg de papa licuada + 0,25 kg de agua = 1,474 kg de solución de almidón

+ 0,416 kg de papa licuada

1,89 kg = 1,89 kg

g) Centrifugación:

1,474 kg de solución de almidón

+ 2,87 kg de solución de almidón = 0,872 kg de almidón + 3,472 kg de agua

4,344 kg = 4,344 kg

h) Filtración al vacío:

0,872 kg de almidón = 0,140 kg de agua + 0,732 kg de almidón

0,872 kg = 0,872 kg

i) Secado:

0,732 kg de almidón = 0,105 kg de vapor de agua + 0,627 kg de almidón de papa

$$0,732 \text{ kg} = 0,732 \text{ kg}$$

j) Tamizado:

0,627 kg de almidón de papa seco = 0,412 kg de almidón de papa tamizado

+ 0,215 kg de almidón retenido

$$0,627 \text{ kg} = 0,627 \text{ kg}$$

$$\text{Rendimiento de extracción de almidón de papa} = \left( \frac{\text{masa de producto obtenido}}{\text{masa de materia prima}} \right) \times 100 \quad [3]$$

$$\text{Rendimiento de extracción de almidón de papa} = \left( \frac{412 \text{ g}}{2\,000 \text{ g}} \right) \times 100 = 20,6 \%$$

**4.2 Cálculos de la determinación de dosis óptima de sulfato de aluminio y almidón de papa:**

Tabla 8: Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para agua con turbidez inicial de 70 NTU

AGUA SUPERFICIAL	DOSIS DE MEZCLA RÁPIDA	DOSIS DE MEZCLA LENTA	OBSERVACIÓN VISUAL		AGUA SEDIMENTADA	
Alcalinidad total: 72 mg/L CaCO <sub>3</sub> 21 °C pH= 5,97	1 min 200 rpm	15 min 40 rpm	Volumen de jarras: 1000 mL		Tiempo de sedimentación: 30 min	
Jarra	Sulfato de Aluminio (mg/L)		Tiempo de formación de flóculos (min)	Índice de Willcomb	Turbidez (NTU)	pH
1	10		5	2	28,3	5,92
2	20		5	4	13,2	5,86
3	30		5	8	7,2	5,79
4	40		4,5	10	5,4	5,45
5	50		4,5	10	6,5	5,42
6	60		4,5	10	6,7	5,36
7	70		4	10	7,9	5,34
8	80		4	8	13,2	5,26
9	90		3,5	8	17,9	5,17
10	100		3,5	8	20,9	5,06
11	110		3	6	23,9	4,94
12	120		3	6	27,7	4,81

Fuente: Elaboración Propia

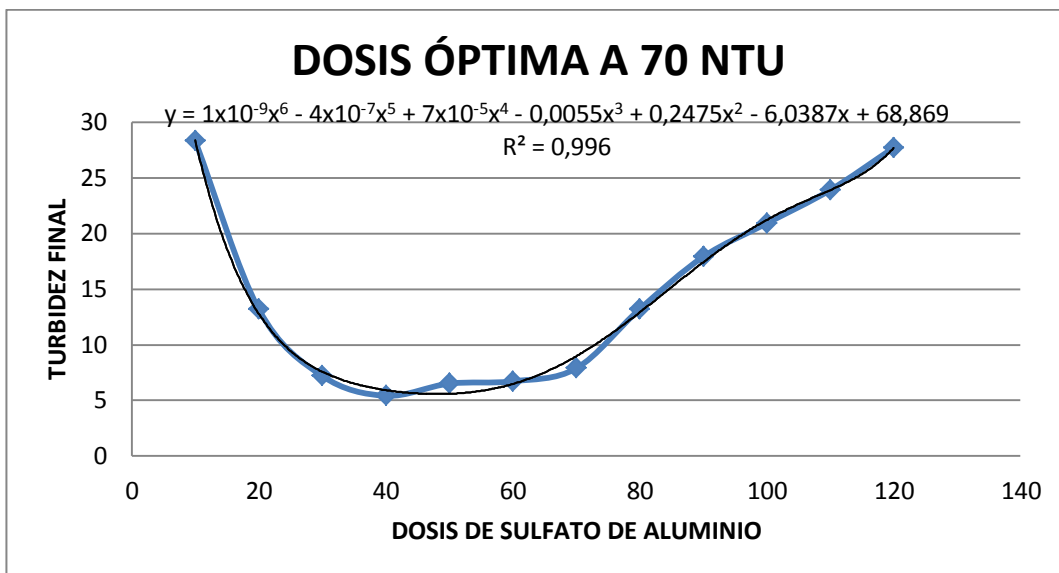


Figura 14: Dosis óptima del sulfato de aluminio para turbidez inicial de 70 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Turbidez Final} = 1 \times 10^{-9}Ds^6 - 4 \times 10^{-7}Ds^5 + 7 \times 10^{-5}Ds^4 -$$

$$0,0055Ds^3 + 0,2475Ds^2 - 6,0387Ds + 68,869$$

$$R^2 = 0,996$$

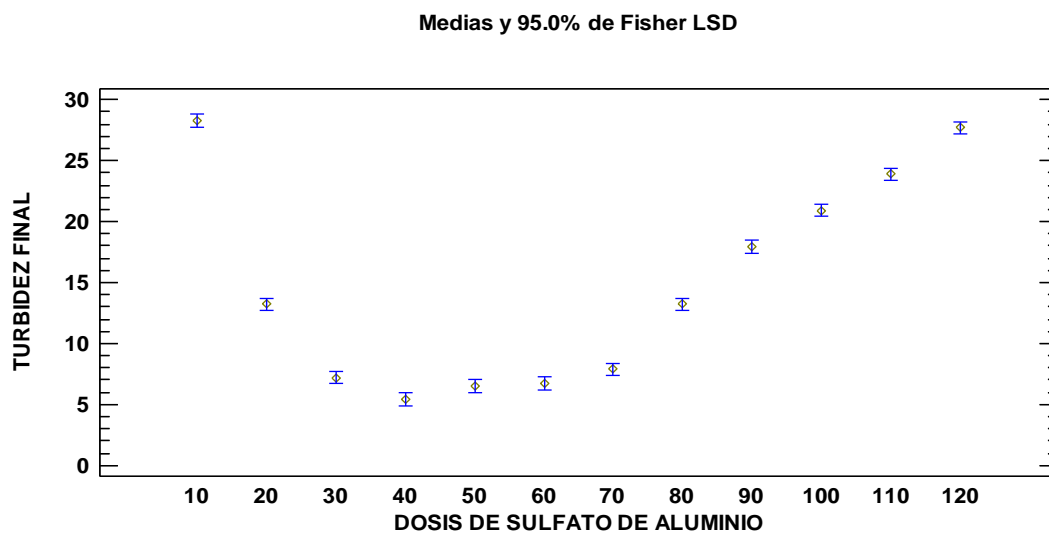


Figura 15: Gráfico de medias para turbidez inicial de 70 NTU

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9: ANOVA para turbidez final por dosis de sulfato de aluminio

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2432,36	11	221,12	602,58	0,00
Intra grupos	8,81	24	0,37		
Total	2441,16	35			

Fuente: Elaboración Propia

Dado que el valor-P es 0, se entiende que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de turbidez final entre un

nivel de dosis de sulfato de aluminio y otro, con un nivel del 95 % de confianza. En las demás tablas ANOVA de los siguientes ensayos se observará valor-P igual a 0, lo cual evidenciará igualmente que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de turbidez final entre un nivel de dosis de sulfato de aluminio y otro.

#### **Prueba de alcalinidad:**

Al agua superficial se agrega 3 gotas fenolftaleína, se observa que no colorea, lo que implica que la alcalinidad a la fenolftaleína es cero, por lo cual se agrega 3 gotas de anaranjado de metilo, procediéndose luego a valorar con ácido sulfúrico. La alcalinidad total se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad} = \frac{V_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times N_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times f_c \times \text{P.E.}_{\text{CaCO}_3} \times 1\,000}{\text{mL de muestra}} \quad [4]$$

Donde  $V_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  : volumen utilizado de ácido sulfúrico,

$N_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  : normalidad del ácido sulfúrico,  $f_c$  :factor de corrección,

$\text{P.E.}_{\text{CaCO}_3}$  :peso equivalente del  $\text{CaCO}_3$

A continuación, a modo de ejemplo se reemplazan los valores para el primer resultado de la siguiente tabla en la ecuación [4]:

$$\text{Alcalinidad} = \frac{3,4 \text{ mL} \times 0,02 \text{ N} \times 0,9578 \times 50 \times 1\,000}{100 \text{ mL}} = 32,6 \text{ mg/L CaCO}_3$$

### **Determinación de Eficiencia de Remoción de Turbidez**

A continuación, a modo de ejemplo se reemplazan los valores para el primer resultado de la siguiente tabla en la ecuación [1]:

$$\% \text{ Eficiencia de Remoción} = \left( 1 - \frac{28,3 \text{ NTU}}{70 \text{ NTU}} \right) \times 100 = 59,57 \%$$

Tabla 10: Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para el agua con turbidez inicial de 70 NTU.

Dosis de sulfato de aluminio (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Turbidez final (NTU)	% de Eficiencia de Remoción de Turbidez
10	32,6	28,3	59,57
20	29,9	13,2	81,14
30	28,7	7,2	89,71
40	27,2	5,4	92,26
50	25,7	6,5	90,70
60	24,9	6,7	90,40
70	24,1	7,8	88,74
80	22,2	13,2	81,14
90	21,1	17,9	74,43
100	20,3	20,9	70,14
110	18,4	23,9	65,86
120	17,2	27,7	60,42

Fuente: Elaboración Propia

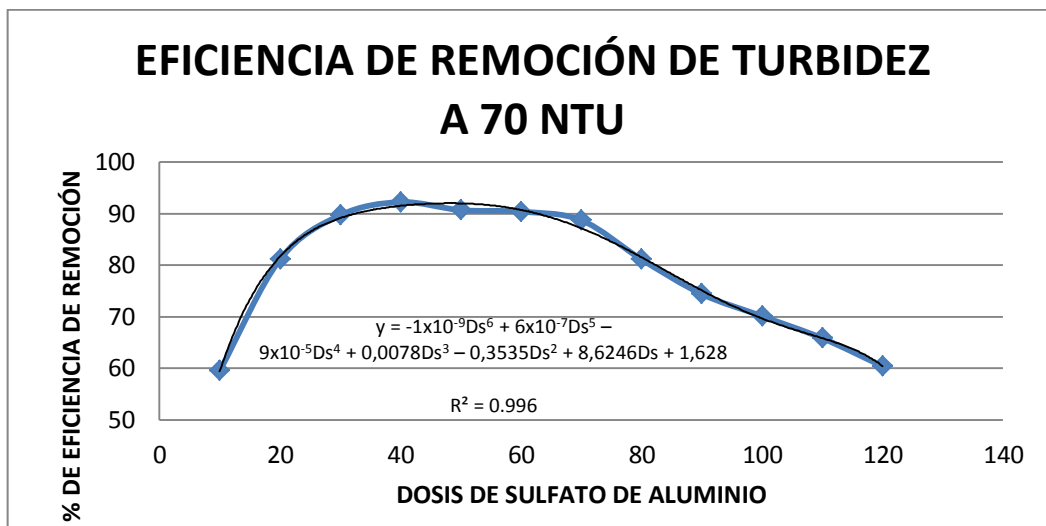


Figura 16: Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para turbidez inicial de 70 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\% \text{ de Eficiencia de Remoción de Turbidez} = -1 \times 10^{-9} D_s^6 + 6 \times 10^{-7} D_s^5 -$$

$$9 \times 10^{-5} D_s^4 + 0,0078 D_s^3 - 0,3535 D_s^2 + 8,6246 D_s + 1,6277$$

$$R^2 = 0,996$$

Tabla 11: Determinación de la dosis óptima de almidón de papa para agua con turbidez de 70 NTU con dosis constante de sulfato de aluminio de 40 mg/L.

AGUA SUPERFICIAL	DOSIS DE MEZCLA RÁPIDA	DOSIS DE MEZCLA LENTA		OBSERVACIÓN VISUAL	
Alcalinidad total: 72 mg/L CaCO <sub>3</sub> 21,5 °C pH= 5,97	1 min 200 rpm	15 min 40 rpm		Volumen de jarras: 1000 mL	
Jarra	Almidón de papa (mg/L)	Tiempo de formación de flóculos (min)	Indice de Willcomb	Turbidez (NTU)	pH
1	2	7	6	16,20	6,43
2	4	6,5	6	9,26	6,29
3	6	5,5	6	7,10	6,25
4	8	5	8	6,44	6,19
5	10	4	8	6,19	6,16
6	11	4,5	10	5,44	6,14
7	12	4	10	4,63	6,10
8	13	4	10	4,97	5,96
9	14	3,5	10	6,26	5,81
10	16	3,5	8	7,99	5,74
11	18	3,5	8	7,60	5,68
12	20	3	8	7,83	5,63

Fuente: Elaboración Propia

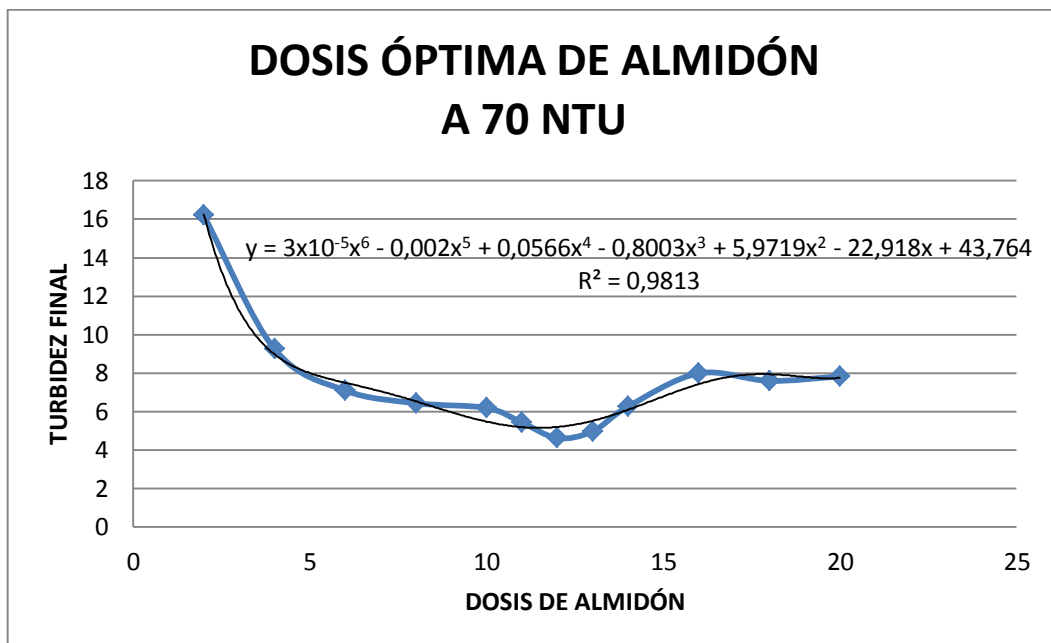


Figura 17: Dosis óptima con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 70 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Turbidez Final} = 3 \times 10^{-5} \text{Da}^6 - 0,002 \text{Da}^5 + 0,0566 \text{Da}^4 - 0,8003 \text{Da}^3 + 5,9719 \text{Da}^2 - 22,918 \text{Da} + 43,764$$

$$R^2 = 0,9813$$

Medias y 95.0% de Fisher LSD

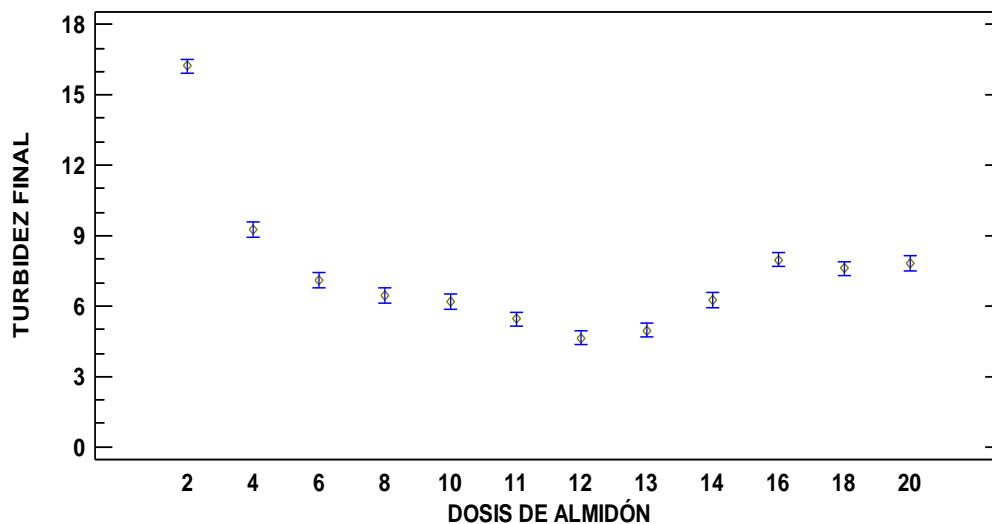


Figura 18: Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 70 NTU

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12: ANOVA para turbidez final por dosis de almidón de papa

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	309,392	11	28,13	216,47	0,00
Intra grupos	3,12	24	0,13		
Total	312,511	35			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 13: Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez para la mezcla sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 70 NTU.

Dosis de almidón de papa (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Turbidez final (NTU)	% de Eficiencia de remoción de turbidez
2	36,4	9,62	76,86
4	35,6	9,26	86,77
6	34,5	7,10	89,86
8	32,6	6,44	90,80
10	30,6	6,19	91,16
11	28,7	5,44	92,23
12	28,0	4,63	93,39
13	26,1	4,97	92,90
14	24,9	6,26	91,06
16	23,0	7,99	88,59
18	21,1	7,60	89,14
20	19,2	7,83	88,81

Fuente: Elaboración Propia

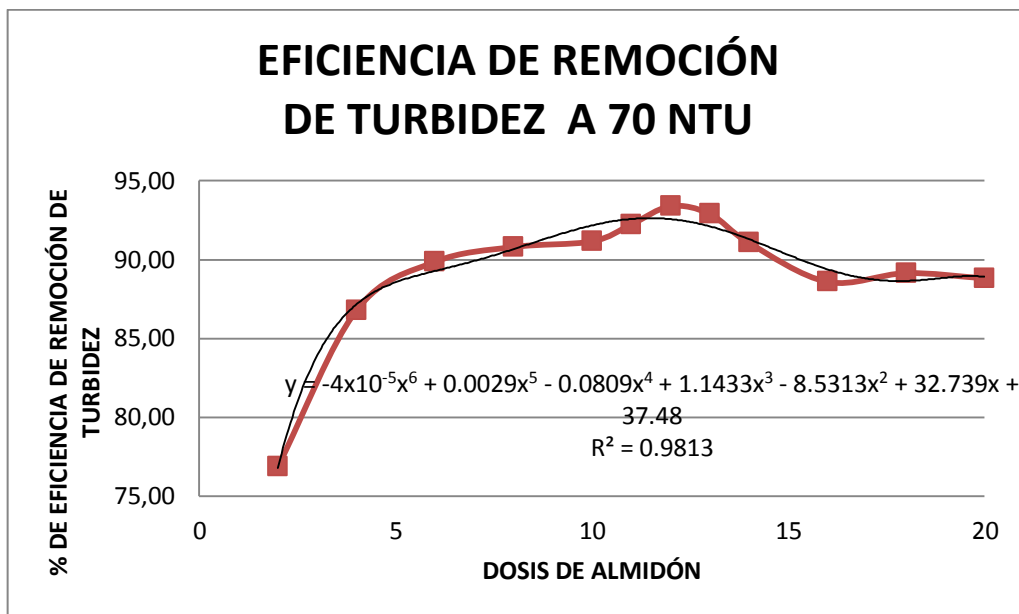


Figura 19: Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para turbidez inicial de 70 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{aligned} \text{\% de Eficiencia de Remoción de Turbidez} = & -4 \times 10^{-5} \text{ Da}^6 + 0,0029 \text{ Da}^5 - \\ & 0,0809 \text{ Da}^4 + 1,1433 \text{ Da}^3 - 8,5313 \text{ Da}^2 + 32,739 \text{ Da} + 37,48 \\ & R^2 = 0,9813 \end{aligned}$$

Para el agua con 70 NTU tratada con sulfato de aluminio se obtuvo una turbidez final de 5,42 NTU utilizando la dosis óptima de 40 mg/L de sulfato de aluminio, lo cual representa un 92,26 % de eficiencia de remoción de turbidez.

Tabla 14: Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para agua con turbidez de 500 NTU

AGUA SUPERFICIAL	DOSIS DE MEZCLA RÁPIDA	DOSIS DE MEZCLA LENTA	OBSERVACIÓN VISUAL		AGUA SEDIMENTADA	
Alcalinidad total: 83 mg/L CaCO <sub>3</sub> 21 °C pH= 7,23	1 min 200 rpm	15 min 40 rpm	Volumen de jarras: 1000 mL		Tiempo de sedimentación: 30 min	
Jarra	Sulfato de aluminio (mg/L)		Tiempo de formación de flóculos (min)	Índice de Willcomb	Turbidez (NTU)	pH
1	50		9,5	2	97,8	6,28
2	60		9,5	4	83,6	6,23
3	70		9	4	79,4	6,19
4	80		8	6	60,7	6,15
5	90		8	8	50,3	6,09
6	100		7	8	36,2	5,98
7	110		7	10	32,1	5,91
8	120		6	10	29,6	5,62
9	130		5	10	37,4	5,56
10	140		5	8	53,4	5,36
11	150		5,5	8	80,4	5,33
12	160		5,5	8	95,5	5,21

Fuente: Elaboración Propia

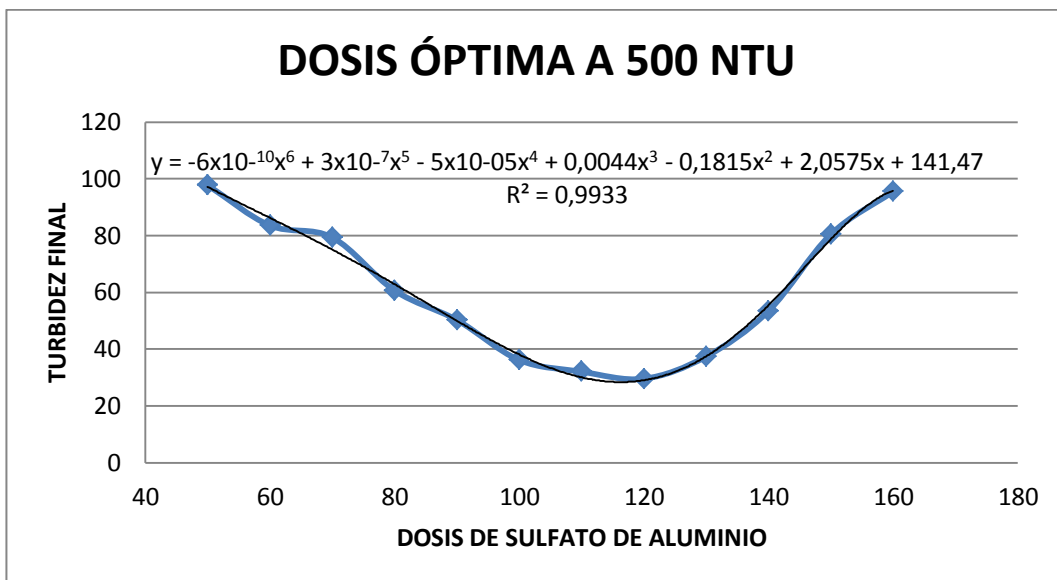


Figura 20: Dosis óptima de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para turbidez inicial de 500 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Turbidez Final} = -6 \times 10^{-10} D_s^6 + 3 \times 10^{-7} D_s^5 - 5 \times 10^{-5} D_s^4 + 0,0044 D_s^3 - 0,1815 D_s^2 + 2,0575 D_s + 141,47$$

$$R^2 = 0,9933$$

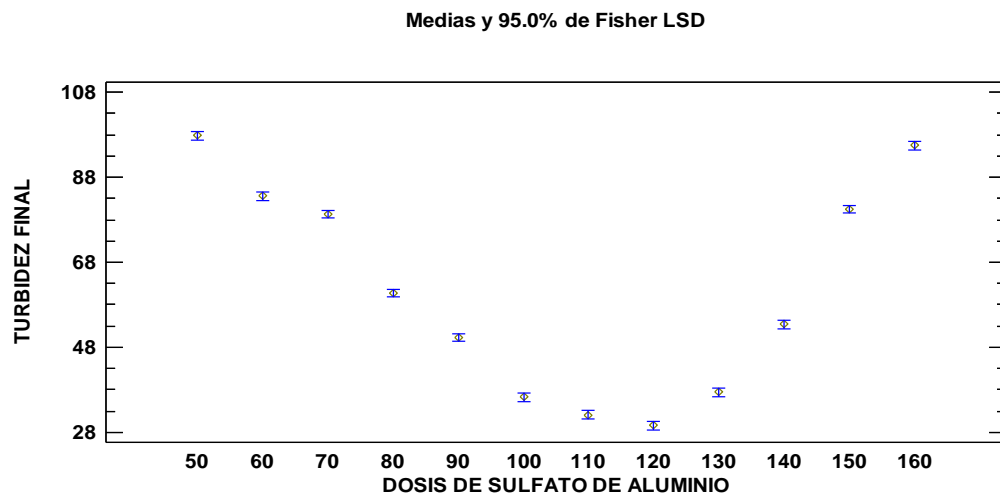


Figura 21: Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato dealuminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 500 NTU

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15: ANOVA para turbidez final por dosis de sulfato de aluminio

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	20788,3	11	1889,85	1522,03	0,00
Intra grupos	29,8	24	1,24		
Total	20818,1	35			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16: Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para el agua con turbidez de 500 NTU.

Dosis de sulfato (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Turbidez final (NTU)	% de Eficiencia de remoción de turbidez
50	51,7	97,8	80,44
60	50,3	83,6	83,28
70	49,6	79,4	84,12
80	48,1	60,7	87,86
90	45,3	50,3	89,94
100	44,5	36,2	92,76
110	42,4	32,1	93,58
120	39,5	29,6	94,08
130	38,1	37,4	92,52
140	32,3	53,4	89,32
150	30,9	80,4	83,92
160	29,5	95,5	80,90

Fuente: Elaboración Propia

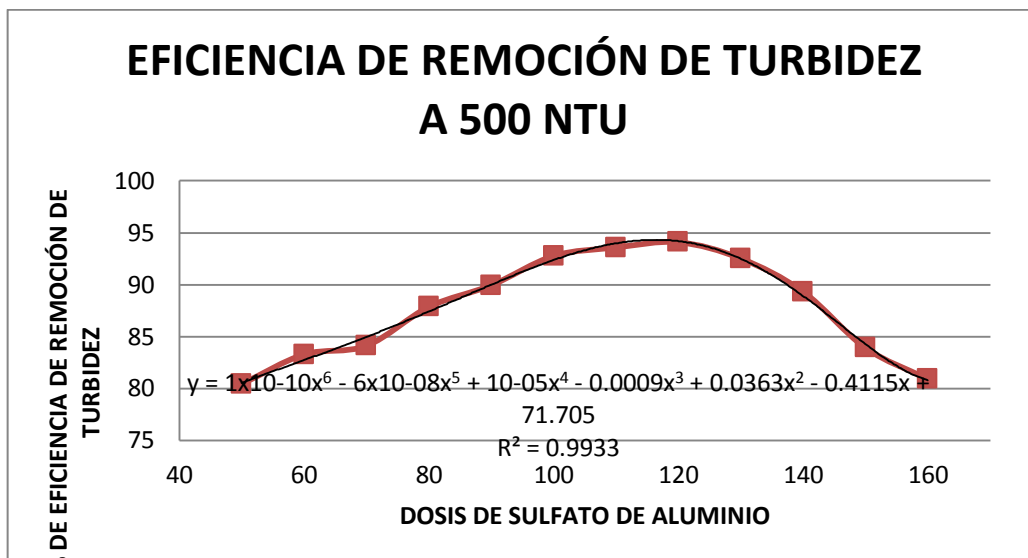


Figura 22: Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio para turbidez inicial de 500 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{aligned} \text{\% de Eficiencia de Remoción de Turbidez} &= 1 \times 10^{-10} D_s^6 - 6 \times 10^{-8} D_s^5 + \\ & 1 \times 10^{-5} D_s^4 - 0,0009 D_s^3 + 0,0363 D_s^2 - 0,4115 D_s + 71,705 \\ R^2 &= 0,9933 \end{aligned}$$

Tabla 17: Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez de 500 NTU con dosis constante de sulfato de aluminio de 120 mg/L

AGUA SUPERFICIAL	DOSIS DE MEZCLA RÁPIDA	DOSIS DE MEZCLA LENTA	OBSERVACIÓN VISUAL		AGUA SEDIMENTADA	
Alcalinidad total: 83 mg/L CaCO <sub>3</sub> 21,5 °C pH= 7,23	1 min 200 rpm	15 min 40 rpm	Volumen de jarras: 1000 mL		Tiempo de sedimentación: 30 min	
Jarra	Almidón de papa (mg/L)		Tiempo de formación de flóculos (min)	Índice de Willcomb	Turbidez (NTU)	pH
1	2		12	2	28,1	6,74
2	4		12	2	26,0	6,58
3	6		11,5	6	21,9	6,52
4	7		11,5	8	21,3	6,51
5	8		11	10	20,7	6,43
6	9		10	10	22,1	6,35
7	10		10,5	8	22,9	6,28
8	12		10	8	24,7	6,20
9	14		9	6	27,2	6,16
10	16		8,5	6	28,5	6,13
11	18		7	4	29,3	6,08
12	20		6,5	2	29,5	5,98

Fuente: Elaboración propia

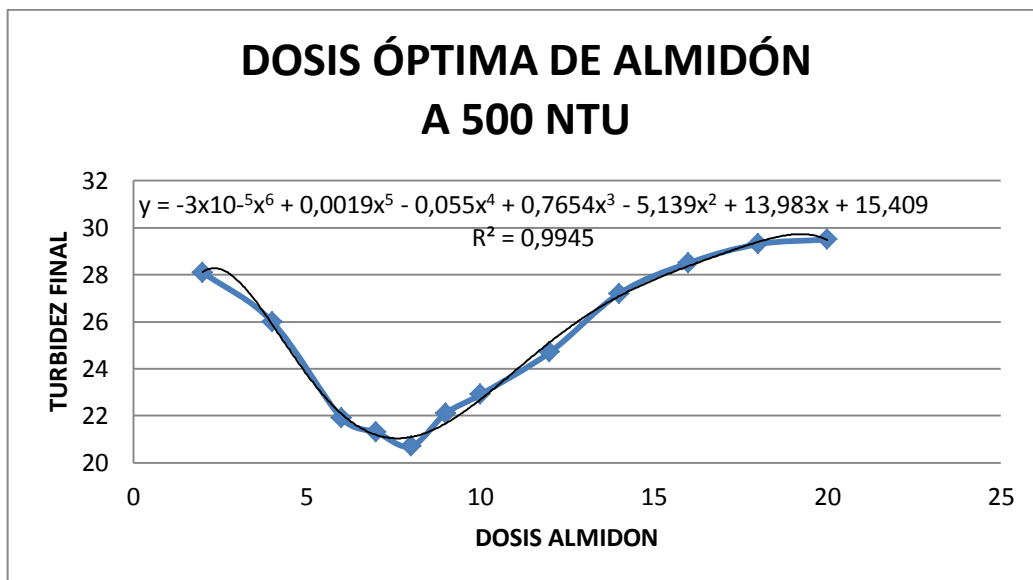


Figura 23: Dosis óptima con sulfato de aluminio y almidón de papa para turbidez inicial de 500 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Turbidez Final} = -3 \times 10^{-5} x^6 + 0,0019 x^5 - 0,055 x^4 + 0,7654 x^3 - 5,139 x^2 + 13,983 x + 15,409$$

$$R^2 = 0,9945$$

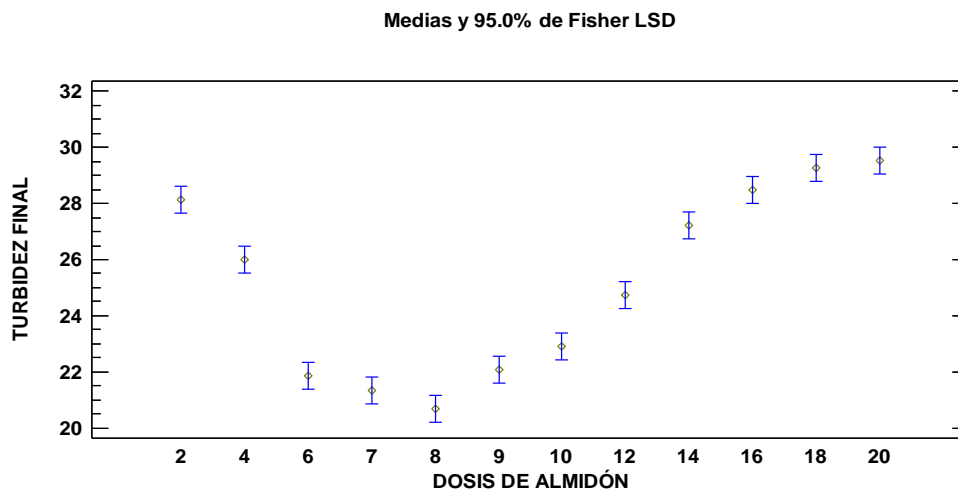


Figura 24: Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 500 NTU

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 18: ANOVA para turbidez final por dosis de almidón para agua con 500 NTU

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	362,64	11	32,97	102,22	0,00
Intra grupos	7,74	24	0,32		
Total	370,38	35			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19: Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez con sulfato

de aluminio y almidón de papa a 500 NTU:

Dosis de almidón (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Turbidez final (NTU)	% de Eficiencia de remoción de turbidez
2	63,3	28,1	94,4
4	61,7	26,0	94,8
6	58,3	21,9	95,6
7	56,7	21,3	95,7
8	54,2	20,7	95,9
9	52,5	22,1	95,6
10	51,7	22,9	95,4
12	48,3	24,7	95,1
14	47,5	27,2	94,6
16	44,2	28,5	94,3
18	40,0	29,3	94,1
20	35,8	29,5	94,1

Fuente: Elaboración Propia

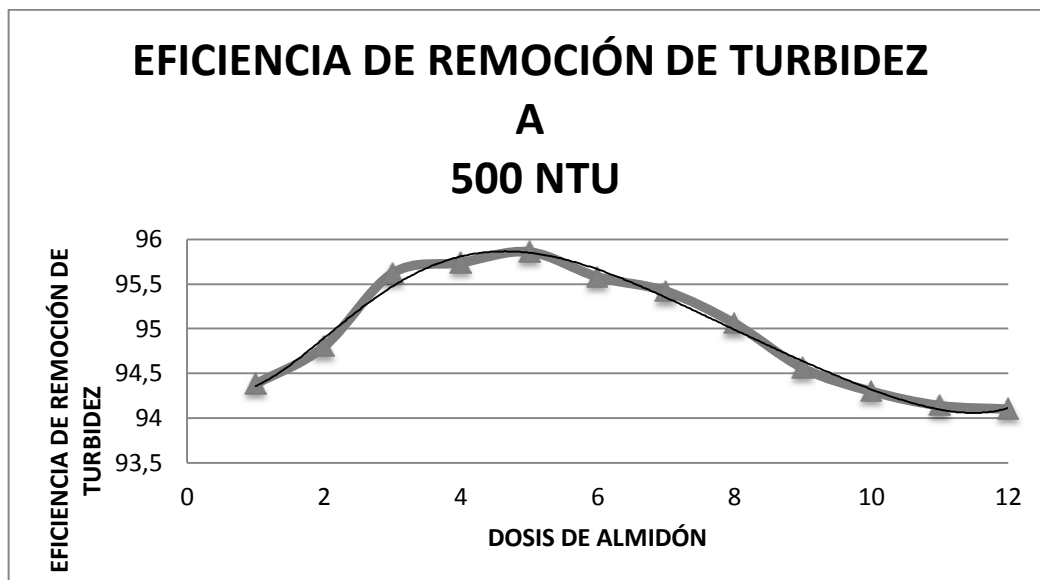


Figura 25: Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 500 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{aligned} \text{\% de Eficiencia de Remoción de Turbidez} = & 4 \times 10^{-5} x^6 - 0,0019 x^5 + \\ & 0,0314 x^4 - 0,2555 x^3 + 0,9223 x^2 - 0,8579 x + 94,521 \end{aligned}$$

$$R^2 = 0,9872$$

Las eficiencias de remoción de turbidez alcanzadas fueron de la siguiente forma:

Para el agua con 500 NTU tratada con sulfato de aluminio se obtuvo una turbidez final de 29,6 NTU utilizando la dosis óptima de 120 mg/L de sulfato de aluminio, lo cual representa un 94,08 % de eficiencia de remoción de turbidez.

Para el agua con 500 NTU tratada con sulfato de aluminio y almidón de papa se obtuvo una turbidez final de 20,7 NTU utilizando la dosis óptima de 120 mg/L de sulfato de aluminio y 8 mg/L de almidón de papa, lo cual representa un 95,86 % de eficiencia de remoción de turbidez.

Tabla 20: Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para agua con turbidez inicial de 900 NTU

AGUA SUPERFICIAL	DOSIS DE MEZCLA RÁPIDA	DOSIS DE MEZCLA LENTA	OBSERVACIÓN VISUAL		AGUA SEDIMENTADA	
Alcalinidad total: 110 mg/L CaCO <sub>3</sub> 21,5 °C pH= 7,98	1 min 200 rpm	15 min 40 rpm	Volumen de jarras: 1000 mL		Tiempo de sedimentación: 30 min	
Jarra	Sulfato de aluminio (mg/L)		Tiempo de formación de flóculos (min)	Índice de Willcomb	Turbidez (NTU)	pH
1	80		15,5	2	160	6,73
2	90		15	2	123	6,56
3	100		14,5	4	117	6,26
4	110		14	4	103	6,09
5	120		13	8	65,2	5,89
6	130		13	8	53,7	5,72
7	140		12,5	10	41,3	5,53
8	150		12,5	10	74,5	5,36
9	160		11	8	90,2	5,26
10	170		11,5	8	112	5,22
11	180		10	6	128	5,15
12	190		9	6	153	5,04

Fuente: Elaboración Propia

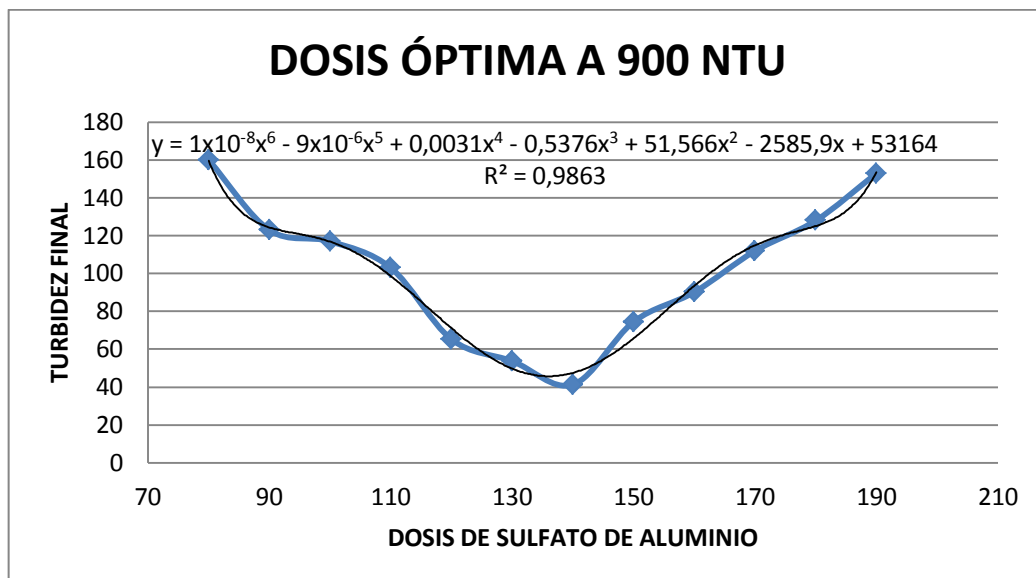


Figura 26: Dosis óptima con sulfato de aluminio para turbidez inicial de 900 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Turbidez Final} = 1 \times 10^{-8} D_s^6 - 9 \times 10^{-6} D_s^5 + 0,0031 D_s^4 - 0,5376 D_s^3 + 51,566 D_s^2 - 2585,9 D_s + 53164$$

$$R^2 = 0,9863$$

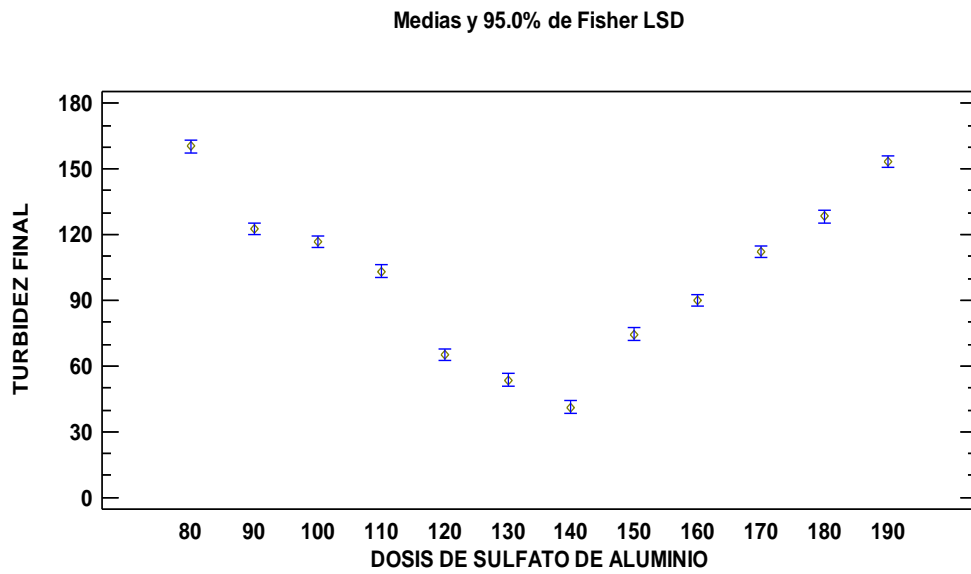


Figura 27: Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato de aluminio para agua con turbidez inicial de 900 NTU

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 21: ANOVA para turbidez final por dosis de sulfato de aluminio

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	47233,6	11	4293,9	400,81	0,0000
Intra grupos	257,1	24	10,7		
Total	47490,8	35			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 22: Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio a 900 NTU:

Dosis de sulfato de aluminio (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Turbidez final (NTU)	% de Eficiencia de remoción de turbidez
80	37,8	160	82,22
90	36,3	123	86,33
100	34,0	117	87,00
110	33,3	103	88,56
120	31,8	65,2	92,76
130	30,3	53,7	94,03
140	29,5	41,3	95,41
150	26,5	74,5	91,72
160	24,2	90,2	89,98
170	22,7	112	87,56
180	21,2	128	85,78
190	18,9	153	83,00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23: Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 900 NTU con dosis constante de sulfato de aluminio de 140 mg/L.

AGUA SUPERFICIAL	DOSIS DE MEZCLA RÁPIDA	DOSIS DE MEZCLA LENTA	OBSERVACIÓN VISUAL		AGUA SEDIMENTADA	
Alcalinidad total: 110 mg/L CaCO <sub>3</sub> 21,5 °C pH= 7,98	1 min 200 rpm	15 min 40 rpm	Volumen de jarras: 1000 mL		Tiempo de sedimentación: 30 min	
Jarra	Almidón de papa, mg/L	Tiempo de formación de flóculos, min	Índice de Willcomb	Turbidez (NTU)	pH	
1	2	17,5	6	37,2	7,36	
2	4	16	8	35,4	7,33	
3	6	15,5	10	24,3	7,26	
4	7	14	10	21,2	7,22	
5	8	14	10	21,7	7,12	
6	9	13	8	24,3	7,09	
7	10	13	8	27,8	7,07	
8	12	12,5	6	31,2	6,90	
9	14	13	6	36,5	6,73	
10	16	13	4	39,1	6,67	
11	18	12	4	40,3	6,62	
12	20	11	2	41,2	6,45	

Fuente: Elaboración Propia

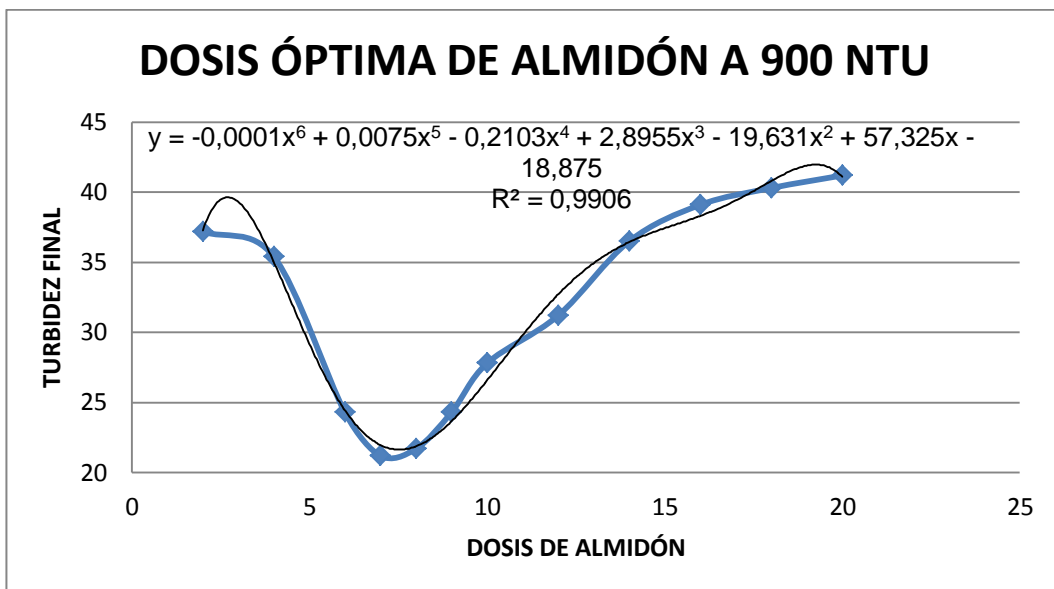


Figura 28: Dosis óptima con sulfato de aluminio y almidón de papa para turbidez inicial de 900 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Turbidez Final} = -0,0001\text{Da}^6 + 0,0075 \text{Da}^5 - 0,2103 \text{Da}^4 + 2,8955 \text{Da}^3 - 19,631 \text{Da}^2 + 57,325 \text{Da} - 18,875$$

$$R^2 = 0,9906$$

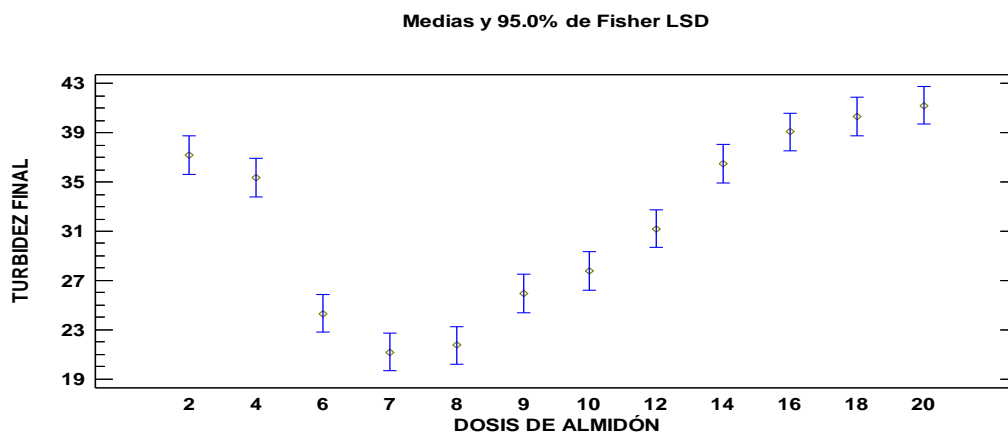


Figura 29: Gráfico de medias para remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para agua con turbidez inicial de 900 NTU

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24: ANOVA para turbidez final por dosis de almidón para turbidez de 900 NTU

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1792,7	11	162,9	48,22	0,0000
Intra grupos	81,1	24	3,4		
Total	1873,8	35			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25: Determinación de la eficiencia de remoción de turbidez para la mezcla sulfato de aluminio y almidón de papa a 900 NTU:

Dosis de almidón (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Turbidez final (NTU)	% de Eficiencia de remoción de turbidez
2	37,8	37,2	95,87
4	36,3	35,4	96,07
6	34,0	24,3	97,30
7	33,3	21,2	97,64
8	31,8	21,7	97,59
9	30,3	24,3	97,30
10	29,5	27,8	96,91
12	26,5	31,2	96,53
14	24,2	36,5	95,94
16	22,7	39,1	95,66
18	21,2	40,3	95,52
20	18,9	41,2	95,42

Fuente: Elaboración Propia

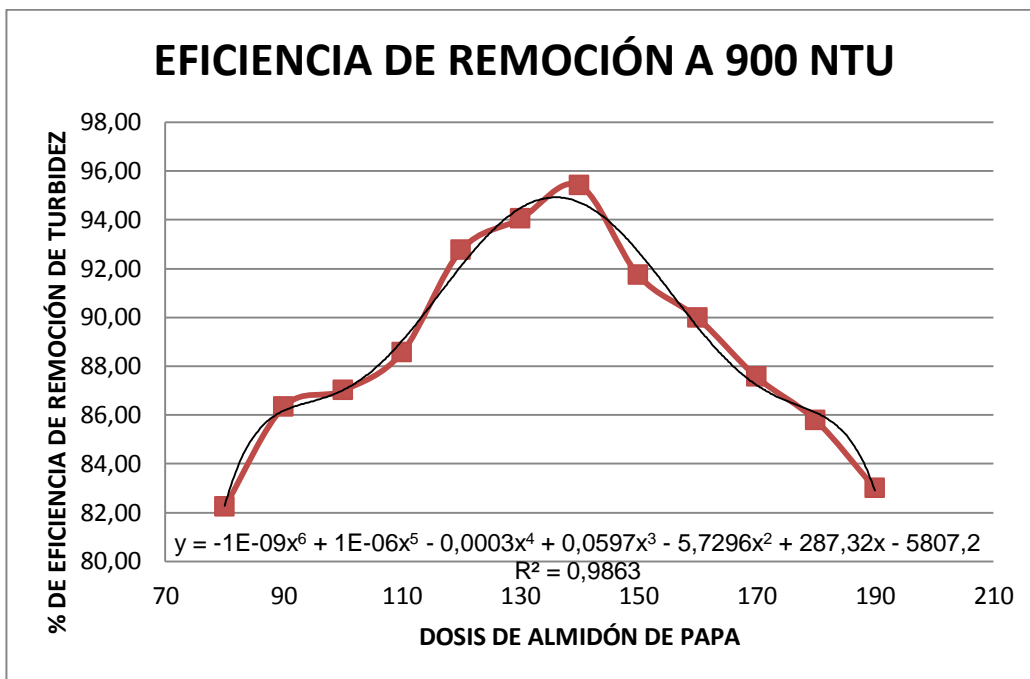


Figura 30: Eficiencia de remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa para turbidez inicial de 900 NTU

Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{aligned} \text{\% de Eficiencia de Remoción de Turbidez} = & -1 \times 10^{-9} \text{ Da}^6 + 1 \times 10^{-6} \text{ Da}^5 - \\ & 0,0003 \text{ Da}^4 + 0,0597 \text{ Da}^3 - 5,7296 \text{ Da}^2 + 287,32 \text{ Da} - 5807,2 \\ & R^2 = 0,9863 \end{aligned}$$

### 4.3 Resumen de Resultados:

Tabla 26: Cuadro Comparativo de Resultados

Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Dosis de sulfato de aluminio (mg/L)	Dosis de almidón de papa (mg/L)	Tiempo de formación de flóculos (min)	Índice de Willcomb	pH	% de Eficiencia de remoción de turbidez
70	4,63	40	12	4	10	6,10	93,39
500	20,7	120	8	11	10	6,43	95,86
900	21,2	140	7	14	10	7,22	97,64

Fuente: Elaboración Propia

### 4.4 Diseño Experimental:

El diseño experimental que se aplica es el diseño central compuesto. Como se tiene 3 variables independientes, por ese motivo se tiene que  $k = 3$  y se reemplaza en la siguiente ecuación para hallar el número de pruebas ( $N_p$ ):

$$N_p = 2^k + 2k + r_c \quad [5]$$

$$N_p = 2^{(3)} + 2(3) + 3$$

$$N_p = 17$$

Donde  $2^k$  es la parte factorial del diseño experimental,  $2k$  es la parte

correspondiente a los puntos estrella del diseño experimental, cuyo cálculo se detalla en el Anexo IV y  $r_c$  corresponde a las repeticiones en el centro.

Tabla 27: Matriz del diseño central compuesto

N	VARIABLES CODIFICADAS			VARIABLES NATURALES			VARIABLE RESPUESTA
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Turbidez inicial (NTU)	Dosis de sulfato (mg/L)	Dosis de almidón (mg/L)	Turbidez Final (NTU)
1	-1	-1	-1	70	120	7	9,42
2	1	-1	-1	700	120	7	6,84
3	-1	1	-1	70	140	7	9,53
4	1	1	-1	700	140	7	6,37
5	-1	-1	1	70	120	8	9,16
6	1	-1	1	700	120	8	6,39
7	-1	1	1	70	140	8	9,04
8	1	1	1	700	140	8	5,92
9	-1,7	0	0	144,77	130	7,5	23,8
10	1,7	0	0	914,77	130	7,5	14,2
11	0	-1,7	0	385	113,18	7,5	8,56
12	0	1,7	0	385	146,82	7,5	7,34
13	0	0	-1,7	385	130	6,7	9,41
14	0	0	1,7	385	130	8,3	9,76
15	0	0	0	385	130	7,5	9,52
16	0	0	0	385	130	7,5	9,63
17	0	0	0	385	130	7,5	9,47

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28: Eficiencia de remoción de turbidez

N	VARIABLES NATURALES			VARIABLE RESPUESTA	% de Eficiencia de remoción de turbidez
	Turbidez inicial (NTU)	Dosis de sulfato (mg/L)	Dosis de almidón (mg/L)	Turbidez final (NTU)	
1	70	120	7	9,42	86,54
2	700	120	7	6,84	99,02
3	70	140	7	9,53	86,38
4	700	140	7	6,37	99,09
5	70	120	8	9,16	86,91
6	700	120	8	6,39	99,08
7	70	140	8	9,04	87,08
8	700	140	8	5,92	99,15
9	144,77	130	7,5	23,8	83,56
10	914,77	130	7,5	14,2	98,45
11	385	113,18	7,5	8,56	97,78
12	385	146,82	7,5	7,34	98,09
13	385	130	6,7	9,41	97,56
14	385	130	8,3	9,76	97,46
15	385	130	7,5	9,52	97,53
16	385	130	7,5	9,63	97,49
17	385	130	7,5	9,47	97,54

Fuente: Elaboración Propia

En este caso se desea hallar un modelo cuadrático para los datos del diseño central compuesto, para lo cual se tiene los datos  $X_1$ : turbidez inicial,  $X_2$ : dosis de sulfato de aluminio,  $X_3$ : dosis de almidón de papa, asimismo se cuenta con la variable  $Y$ : turbidez final.

Se escoge el modelo de segundo orden porque toma en cuenta a las 3 variables independientes, así como también las interacciones que hay entre ellas, a diferencia del modelo de primer orden que no toma en cuenta estas últimas.

El modelo cuadrático tiene la siguiente forma:

$$Y = \beta_o + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad [6]$$

Donde  $\beta_o$  es la constante,  $\beta_i$  son los coeficientes de regresión para los términos de primer orden, los  $\beta_{ii}$  son los coeficientes para los términos cuadráticos puros, los  $\beta_{ij}$  son los coeficientes para las interacciones entre las variables.

Como puede verse de la ecuación general para el modelo cuadrático [6], los términos cuadráticos puros y los productos cruz de las interacciones son de segundo orden, mientras que los términos de primer orden corresponden a las variables puras como son  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ . El número de coeficientes para el modelo cuadrático está dado por la siguiente

ecuación :

$$p = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad [7]$$

En nuestro caso, el valor asignado a k es de 3, porque se tienen 3 variables independientes, por lo tanto, se reemplaza este valor en la ecuación [7]:

$$p = \frac{(3+1)(3+2)}{2}$$
$$p = \frac{(4)(5)}{2} = 10$$

Al haberse obtenido 10, se puede concluir que el modelo cuadrático tendrá 10 coeficientes.

Con el objetivo de hallar los coeficientes para el modelo cuadrático, se realiza el trabajo matricial. A continuación se describe paso a paso el desarrollo del procedimiento.

Los valores necesarios para obtener los coeficientes del modelo cuadrático son:

1	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1 \cdot x_2$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_3$	Y
1	70	120	7	4900	14400	49	8400	840	490	9,42
1	700	120	7	490000	14400	49	84000	840	4900	6,84
1	70	140	7	4900	19600	49	9800	980	490	9,53
1	700	140	7	490000	19600	49	98000	980	4900	6,37
1	70	120	8	4900	14400	64	8400	960	560	9,16
1	700	120	8	490000	14400	64	84000	960	5600	6,39
1	70	140	8	4900	19600	64	9800	1120	560	9,04
1	700	140	8	490000	19600	64	98000	1120	5600	5,92
1	144,8	130	7,5	20956,9	16900	56,3	18819,5	975	1085,7	23,8
1	914,8	130	7,5	836795	16900	56,3	118919,5	975	6860,7	14,2
1	385	113,2	7,5	148225	12810,1	56,3	43575,1	848,8	2887,5	8,56
1	385	146,8	7,5	148225	21555,5	56,3	56524,9	1101,1	2887,5	7,34
1	385	130	6,7	148225	16900	44,3	50050	865,7	2563,8	9,41
1	385	130	8,3	148225	16900	69,6	50050	1084,3	3211,3	9,76
1	385	130	7,5	148225	16900	56,3	50050	975	2887,5	9,52
1	385	130	7,5	148225	16900	56,3	50050	975	2887,5	9,63
1	385	130	7,5	148225	16900	56,3	50050	975	2887,5	9,47

Se tiene la matriz X e Y:

**Matriz X:**

1	70	120	7	4900	14400	49	8400	840	490
1	700	120	7	490000	14400	49	84000	840	4900
1	70	140	7	4900	19600	49	9800	980	490
1	700	140	7	490000	19600	49	98000	980	4900
1	70	120	8	4900	14400	64	8400	960	560
1	700	120	8	490000	14400	64	84000	960	5600
1	70	140	8	4900	19600	64	9800	1120	560
1	700	140	8	490000	19600	64	98000	1120	5600
1	144,8	130	7,5	20956,9	16900	56,3	18819,5	975	1085,7
1	914,8	130	7,5	836795	16900	56,3	118919,5	975	6860,7
1	385	113,2	7,5	148225	12810,1	56,3	43575,1	848,8	2887,5
1	385	146,8	7,5	148225	21555,5	56,3	56524,9	1101,1	2887,5
1	385	130	6,7	148225	16900	44,3	50050	865,7	2563,8
1	385	130	8,3	148225	16900	69,6	50050	1084,3	3211,3
1	385	130	7,5	148225	16900	56,3	50050	975	2887,5
1	385	130	7,5	148225	16900	56,3	50050	975	2887,5
1	385	130	7,5	148225	16900	56,3	50050	975	2887,5

**Matriz Y:**

9,42
6,84
9,53
6,37
9,16
6,39
9,04
5,92
23,8
14,2
8,56
7,34
9,41
9,76
9,52
9,63
9,47

La matriz X se multiplica por su transpuesta ( $X^T X$ ):

$$X^T X = \begin{bmatrix} 17 & 6834,5 & 2210 & 127,5 & 3874926,9 & 288665,7 & 959,7 & 888488,9 & 16575 \\ 6834,5 & 3874926,9 & 888488,9 & 51258,9 & 2541342984 & 116029347,7 & 385756,8 & 503740498,4 & 6663666,8 \\ 2210 & 888488,9 & 288665,7 & 16575 & 503740498,4 & 37881619,2 & 124756,4 & 116029347,7 & 2164992,7 \\ 127,5 & 51258,9 & 16575 & 959,7 & 29061951,8 & 2164992,7 & 7248,7 & 6663666,8 & 124756,4 \\ 3874926,9 & 2541342984 & 503740498,4 & 2906195 & 2 \times 10^{12} & 65768074224 & 218669162,3 & 3 \times 10^{11} & 3778053738 \\ 288665,7 & 116029347,7 & 37881619,2 & 2164992,7 & 65768074224 & 4994090994 & 16295345,5 & 15220520801 & 284112144 \\ 959,7 & 385756,8 & 124756,4 & 7248,7 & 218669162,3 & 16295345,5 & 54942,9 & 50148382,6 & 942330,4 \\ 888488,9 & 503740498,4 & 116029347,7 & 6663666,7 & 3 \times 10^{11} & 15220520801 & 50148382,6 & 65768074224 & 870220108,1 \\ 16575 & 6663666,8 & 2164992,7 & 124756,4 & 3778053738 & 284112144 & 942330,5 & 870220108,1 & 16295345,5 \\ 51258,9 & 29061951,8 & 6663666,8 & 385756,8 & 19060072383 & 870220108,1 & 2912893,1 & 3778053738 & 50148382,6 \end{bmatrix}$$

Se obtienen los coeficientes del modelo cuadrático:

$$(X^T X)^{-1} \cdot X^T Y = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_{11} \\ \beta_{12} \\ \beta_{13} \\ \beta_{22} \\ \beta_{23} \\ \beta_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -754,79 \\ -0,00807 \\ 5,9557 \\ 102,57 \\ 1 \times 10^{-5} \\ -0,0227 \\ -6,79612 \\ -3,6904 \times 10^{-5} \\ -0,00575 \\ -1,1904 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto la ecuación del modelo cuadrático viene a ser la siguiente:

$$\text{Turbidez final (Tf)} = -754,79 - 0,00807038 \cdot \text{Ti} + 5,9557 \cdot \text{Ds} + 102,579 \cdot \text{Da} + (1,00958 \times 10^{-5}) \cdot \text{Ti}^2 - (3,69048 \times 10^{-5}) \cdot \text{Ti} \cdot \text{Ds} - (1,19048 \times 10^{-4}) \cdot \text{Ti} \cdot \text{Da} - 0,0227708 \cdot \text{Ds}^2 - 0,00575 \cdot \text{Ds} \cdot \text{Da} - 6,7961 \cdot \text{Da}^2$$

Donde Ti= turbidez inicial, Ds = dosis de sulfato de aluminio, Da= dosis de almidón

Tabla 30: Valores de turbidez final obtenidos con la ecuación

<b>Turbidez final Experimental (NTU)</b>	<b>Turbidez final calculada con la ecuación (NTU)</b>
9,42	11,33
6,84	7,84
9,53	11,19
6,37	7,22
9,16	11,27
6,39	7,70
9,04	11,01
5,92	6,97
23,8	14,31
14,2	11,95
8,56	6,22
7,34	5,48
9,41	7,62
9,76	7,36
9,52	12,29
9,63	12,28
9,47	12,29

Fuente: Elaboración Propia

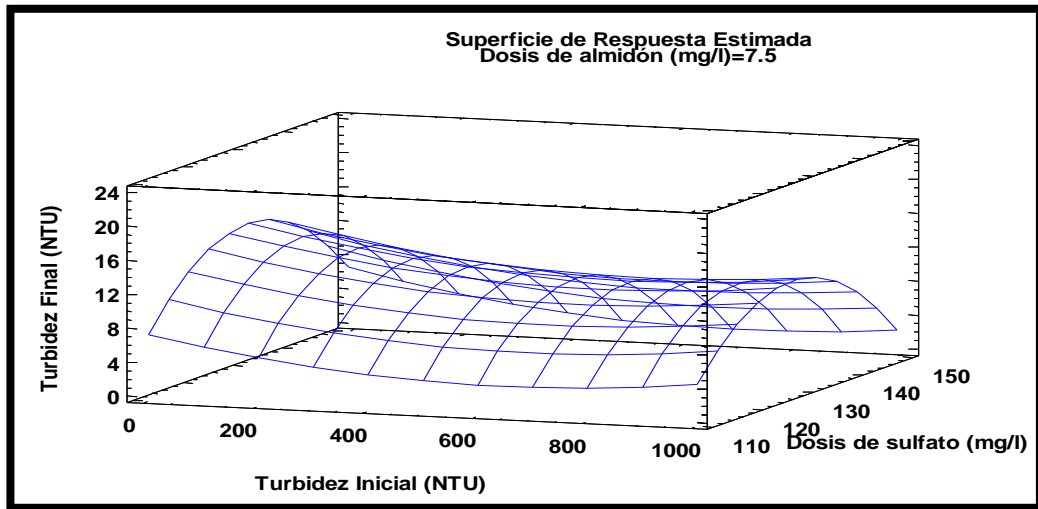


Figura 31: Representación gráfica de la superficie de respuesta

Fuente: Elaboración Propia

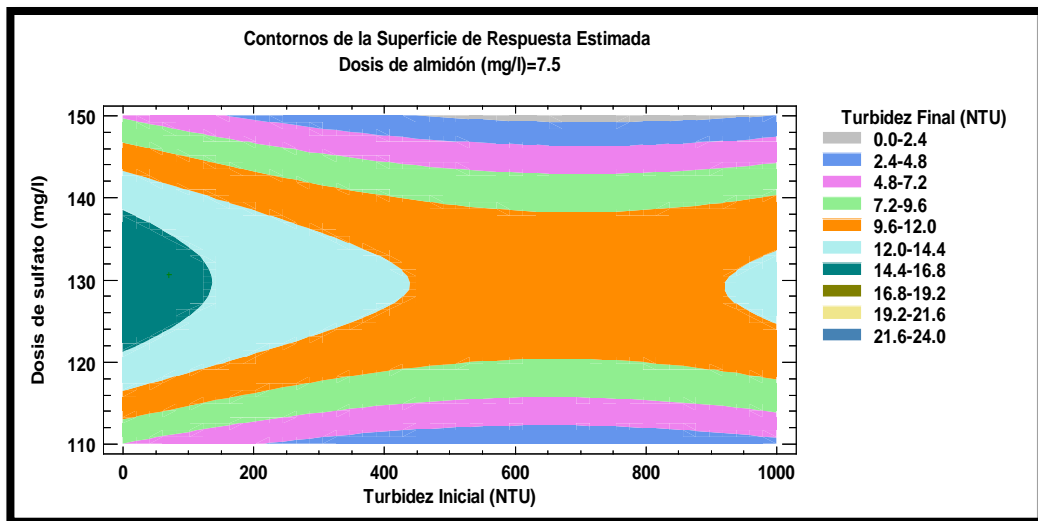


Figura 32: Diagrama de contornos

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 31: Análisis de Varianza para Turbidez Final (NTU)

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Turbidez Inicial (NTU)	34,76	1	34,77	1,57	0,25
B:Dosis de sulfato (mg/L)	0,66	1	0,66	0,03	0,87
C:Dosis de almidón (mg/L)	0,08	1	0,08	0,00	0,95
AA	7,33	1	7,33	0,33	0,58
AB	0,11	1	0,11	0,00	0,95
AC	0,00	1	0,00	0,00	0,99
BB	62,75	1	62,76	2,83	0,14
BC	0,01	1	0,01	0,00	0,99
CC	34,94	1	34,94	1,58	0,25
Error total	155,03	7	22,15		
Total	271,43	16			

$R^2 = 42,88 \%$

Fuente: Elaboración Propia

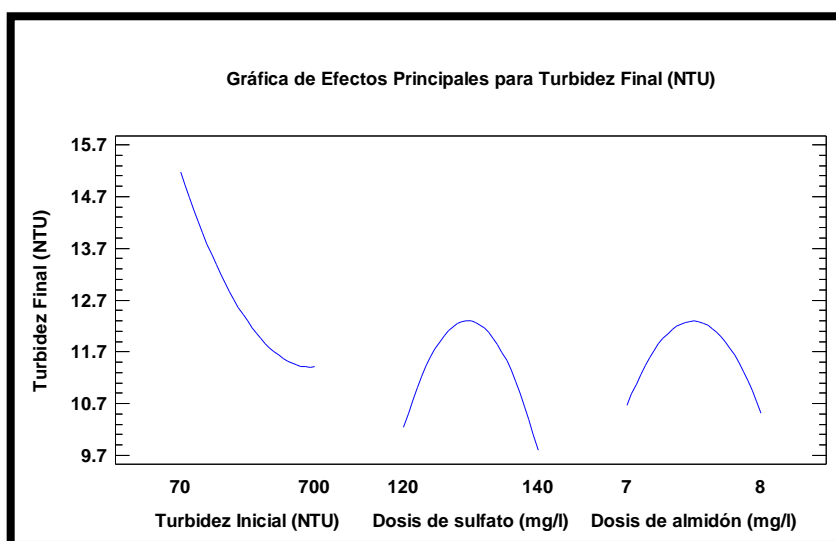


Figura 33: Diagrama de efectos principales

Fuente: Elaboración Propia

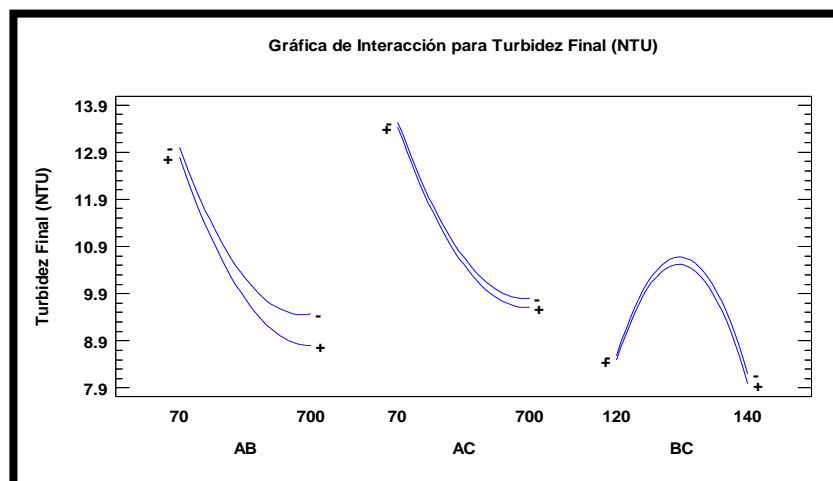


Figura 34: Diagrama de interacciones

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5 Discusión de Resultados:

A partir de la Tabla 26 se observa que conforme aumenta la turbidez del agua y por lo tanto la carga coloidal, también aumenta la dosis de sulfato de aluminio dado que es el coagulante, y recae sobre éste la responsabilidad de desestabilizar la carga coloidal y por otro lado, disminuye la dosis de almidón de papa. Asimismo, se observa que el tiempo de formación de flóculos aumenta a medida que la turbidez se incrementa, debido a que mientras mayor turbidez tenga el agua, mayor será la carga coloidal que deba sedimentar y por lo tanto, el tiempo de formación del flóculo será mayor. En lo que respecta al índice de Willcomb, se observa para los 3 niveles de turbidez una adecuada calidad

de flóculo, debido a la calificación 10 que se obtuvo según la tabla del índice de Willcomb, lo cual significa que la carga coloidal sedimentó bien, dejando el agua clarificada. En cuanto al pH se observa que las mayores eficiencias de remoción se obtuvieron en el rango comprendido entre 6,10 a 7,22. Por otro lado, se puede apreciar que el porcentaje de eficiencia de remoción de turbidez se incrementa conforme aumenta la turbidez del agua, lo cual evidencia que la mezcla de sulfato de aluminio y almidón de papa brinda mayor eficiencia de remoción cuando la turbiedad es mayor.

A partir de la Tabla 28 se puede apreciar que la mayor remoción de turbidez se produjo para el agua con 700 NTU, usando una dosis de 140 mg/L de sulfato de aluminio y 8 mg/L de almidón de papa, obteniéndose 5,92 NTU de turbidez final, representando esto 99,15 % de eficiencia de remoción de turbidez. Por otro lado, se aprecia que la menor remoción de turbidez se obtuvo para el agua con turbidez inicial de 144,76 NTU, a la cual se le agregó 130 mg/L de sulfato de aluminio y 7,5 mg/L de almidón de papa, dando como resultado una turbidez final de 23,8 NTU, lo cual representa 83,56 % de eficiencia de remoción de turbidez. Cabe mencionar, por lo tanto, que se obtuvo una notable eficiencia de remoción de turbidez para el agua con turbidez alta, mientras que para el agua con baja turbidez se obtuvo una menor eficiencia de

remoción de turbidez, lo cual se debe a que el agua que posee mayor carga coloidal, y por tanto, posee mayor materia en suspensión, presenta menos espacio entre las partículas y por lo tanto, mayor cercanía entre las partículas coloidales, lo cual facilita en que se unan los flóculos que recién se están formando, de tal modo que se compactan entre sí y aumentan su masa y por lo tanto procedan a sedimentar por gravedad. En general, al apreciar la Tabla 28, se aprecia que se obtuvo notables eficiencias de remoción de turbidez para aguas con alta turbidez. De la Tabla 30, se puede ver que los valores de turbidez final experimental son bastante cercanos a los valores de turbidez final calculada con la ecuación del modelo cuadrático.

La superficie de respuesta mostrada en la Figura 31 corresponde a una silla de montura hacia arriba, la cual es característica para todo modelo cuadrático, además es conveniente mencionar que los coeficientes  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$ ,  $\beta_{33}$  son valores con signos tanto negativos como positivos, lo cual confirma su condición de silla de montura y corresponde a un caso de minimax, donde no existe un único punto mínimo, sino una región con varios mínimos. Asimismo, en la Figura 31 se observa que conforme aumenta la turbidez inicial, se obtiene menor turbidez final. Por otro lado, analizando la dosis de sulfato de aluminio, se aprecia que los valores de

turbidez final más bajos y por tanto mejores, se obtienen en los extremos, tanto en 120 mg/L como en 140 mg/L, notándose una evidente disminución en la eficiencia de remoción cuando la dosis de sulfato de aluminio es de 130 mg/L, ya que es ahí donde la gráfica de silla de montura alcanza su punto más alto y por lo tanto, de mayor turbidez final.

En la Figura 32 que corresponde a la gráfica de contornos, se aprecia que los mejores valores de turbidez final se alcanzan en la región pintada de color plomo, ya que ahí se obtiene turbidez final en el rango de 0 a 2,4 NTU, así como también, destaca la región pintada de anaranjado, que por cierto es la que ocupa la mayor área de la gráfica, donde se alcanza turbidez final en el rango de 9,6 a 12 NTU. De la Tabla 33, que corresponde al análisis de varianza, se concluye a partir del valor-P de Pareto, el cual indica que el valor que tiende a cero tiene mayor significancia en el proceso, entonces el efecto de interacción BB, que corresponde al término cuadrático puro de la dosis de sulfato de aluminio es el efecto más significativo.

A partir de la Figura 33, que corresponde al gráfico de efectos principales, se observa que la turbidez final tiende a disminuir notoriamente conforme se aumenta la turbidez del agua. Por otro lado, en lo que respecta a la dosis de sulfato de aluminio, se aprecia que los valores de turbidez final se hacen menores cuando se trabaja con las

dosis de 120 y 140 mg/L, mientras que cuando se trabaja con la dosis de 130 mg/L, la remoción de turbidez disminuye, lo cual queda evidenciado con la gráfica que es una parábola, y el punto del vértice, donde la turbidez final es mayor corresponde a 130 mg/L. Por su parte, en lo que respecta al almidón, sucede lo mismo que con el sulfato de aluminio, ya que es en los valores de 7 mg/L y 8 mg/L donde se obtiene mayor remoción de turbidez y por tanto, menor turbidez final.

En la figura 34, que corresponde al diagrama de interacciones, se aprecia que existe estrecha relación entre las interacciones, especialmente entre la turbidez inicial y la dosis de almidón (interacción AC) y la interacción entre la dosis de sulfato de aluminio y la dosis de almidón (interacción BC) ya que en estas interacciones las variables trabajan de forma bastante conjunta, lo cual se refleja en la gráfica, ya que ambas líneas van en la misma dirección y muy pegada una de la otra. Cabe mencionar, que a partir de la figura 34, se deduce que las interacciones AB y AC remueven mayor turbidez conforme ésta sea mayor.

#### 4.6 Escalamiento a nivel de planta piloto:

Base de cálculo: 1 000 m<sup>3</sup> de agua del río Caplina.

Tabla 32: Cotización de precios

Producto	Empresa	Costo (S/.) de 1 kg de producto
Sulfato de aluminio tipo B	Aris Industrial	56,70
Almidón de papa	NGI Perú S.A.C.	5,00

Fuente: Elaboración Propia

- Para agua de 70 NTU

Tabla 33: Costos para agua con turbidez de 70 NTU

Insumos	Costo (S/.) de 1 kg	A escala de laboratorio		A escala de planta piloto		Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>
		Dosis para 1 litro	Costo (S/.) para 1 litro	Dosis para 1 000 m <sup>3</sup>	Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>	
Sulfato de aluminio	S/. 56,70	40 mg	$2,27 \times 10^{-3}$	40 kg	2 268,00	2 426,40
Almidón de papa	S/. 13,20	12 mg	$1,58 \times 10^{-4}$	12 kg	158,40	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 34: Cuadro comparativo de costos para agua con turbidez de 70 NTU

Coagulante	% de Eficiencia de Remoción de Turbidez	Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>
Sulfato de aluminio	92,26	2 268,00
Sulfato de aluminio y almidón de papa	93,39	2 426,40

Fuente: Elaboración Propia

De la anterior tabla se puede inferir que para obtener 92,26 % de eficiencia de remoción de turbidez para el agua con 70 NTU de turbidez inicial, usando sólo sulfato de aluminio, el costo es de S/. 2 268, por lo tanto, aplicando regla de tres simple, se calcula que para obtener 93,39 % de eficiencia de remoción de turbidez usando sólo sulfato de aluminio, el costo a asumir sería de S/. 2 295,80 mientras que para obtener la misma eficiencia de remoción (93,39 %) usando tanto el sulfato de aluminio como el almidón de papa, el costo a asumir sería de S/. 2 426,40, lo cual implicaría S/. 130,60 de más, restándole este aspecto rentabilidad a la remoción de turbidez.

- Para agua con 500 NTU:

Tabla 35: Costos para agua con turbidez de 500 NTU

Insumos	Costo (S/.) de 1 kg	A escala de laboratorio		A escala de planta piloto		Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>
		Dosis para 1 litro	Costo (S/.) para 1 litro	Dosis para 1 000 m <sup>3</sup>	Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>	
Sulfato de aluminio	S/. 56,70	120 mg	$6,8 \times 10^{-3}$	120 kg	6 804,00	6 909,60
Almidón de papa	S/. 13,20	8 mg	$1,1 \times 10^{-4}$	8 kg	105,60	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 36: Cuadro comparativo de costos para agua con turbidez de 500 NTU

Coagulante	% de Eficiencia de Remoción de Turbidez	Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>
Sulfato de aluminio	94,08	6 804,00
Sulfato de aluminio y almidón de papa	95,86	6 909,60

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 36 se puede inferir que para obtener 94,08 % de eficiencia de remoción de turbidez para el agua con 500 NTU de turbidez inicial, usando sólo sulfato de aluminio, el costo es de S/. 6 804, por lo tanto aplicando regla de tres simple, se calcula que para obtener 95,86 % de eficiencia de remoción de turbidez usando sólo sulfato de aluminio, el costo a asumir sería de S/. 6 932,73, mientras que para obtener la misma eficiencia de remoción (95,86 %) usando tanto el sulfato de aluminio como el almidón de papa, el costo a asumir sería de S/. 6 909,60 ,lo cual implicaría S/. 23,13 menos, resultando esto más rentable.

- Para agua con 900 NTU:

Tabla 37: Costos para agua con turbidez de 900 NTU

Insumos	Costo (S/.) de 1 kg	A escala de laboratorio		A escala de planta piloto		Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>
		Dosis para 1 litro	Costo (S/.) para 1 litro	Dosis para 1 000 m <sup>3</sup>	Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>	
Sulfato de aluminio	S/. 56,70	140 mg	$7,94 \times 10^{-3}$	140 kg	7 938,00	8 030,40
Almidón de papa	S/. 13,20	7 mg	$9,24 \times 10^{-5}$	7 kg	92,40	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 38: Cuadro comparativo de costos para agua con turbidez de 900 NTU

Coagulante	% de Eficiencia de Remoción de Turbidez	Costo (S/.) para 1 000 m <sup>3</sup>
Sulfato de aluminio	95,41	7 938,00
Sulfato de aluminio y almidón de papa	97,64	8 030,40

Fuente: Elaboración Propia

De la anterior tabla se puede inferir que para obtener 95,41 % de eficiencia de remoción de turbidez para el agua con 900 NTU de turbidez inicial, usando sólo sulfato de aluminio, el costo es de S/. 7 938, por lo tanto aplicando regla de tres simple, se calcula que para obtener 97,64 % de eficiencia de remoción de turbidez usando sólo sulfato de aluminio, el costo a asumir sería de S/. 8 123,53, mientras que para obtener la misma eficiencia de remoción (97,64%) usando tanto el sulfato de aluminio como el almidón de papa, el costo a asumir sería de S/. 8 030,40 , lo cual implicaría S/. 93,13 menos, resultando esto más rentable. Por lo tanto a partir de las anteriores tablas se puede concluir que aumenta la rentabilidad del proceso a medida que aumenta la turbidez del agua.

## CONCLUSIONES

1. De los resultados, puede desprenderse que el almidón de papa es un eficiente auxiliar de coagulación del sulfato de aluminio en la remoción de turbidez del agua del río Caplina, dado que presenta eficiencias de remoción de turbidez mayores a las alcanzadas al utilizar sólo sulfato de aluminio.
2. Los valores de aluminio residual obtenidos según los análisis proporcionados por el laboratorio químico de la Universidad Católica Santa María son de 0,007 mg/L, 0,014 mg/L, 0,025 mg/L para el agua de 70 NTU, 500 NTU y 900 NTU respectivamente, lo cual se encuentra dentro de la norma de la OMS que señala para el aluminio 0,2 mg/L como límite máximo permisible para el consumo humano.
3. Se obtuvo el almidón de papa de forma experimental con un rendimiento de 20,60 %, al haberse obtenido 412 g de almidón de papa a partir de 2 000 g de papa de la variedad Canchán.

4. Después de realizar las pruebas de jarras, se obtuvieron las dosis óptimas: a) Para el agua con turbidez de 70 NTU, la dosis óptima es 40 mg/L de sulfato de aluminio y 12 mg/L de almidón de papa; b) Para el agua con turbidez de 500 NTU, la dosis óptima es 120 mg/L de sulfato de aluminio y 8 mg/L de almidón de papa; c) Para el agua con turbidez de 900 NTU, la dosis óptima es 140 mg/L de sulfato de aluminio y 7 mg/L de almidón de papa.
  
5. A partir de la Tabla 28 se puede apreciar que la mayor remoción de turbidez se produjo para el agua con 700 NTU, usando una dosis de 140 mg/L de sulfato de aluminio y 8 mg/L de almidón de papa, obteniéndose 5,92 NTU de turbidez final.
  
6. El rango de pH donde se ha alcanzado las mayores eficiencias de remoción de turbidez está comprendido entre 6,10 a 7,22.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas de remoción de turbidez con sulfato de aluminio y almidón de papa, pero en aguas de otra procedencia que no sea superficial, por ejemplo aguas residuales domésticas e industriales.
2. El Perú presenta diversidad de tubérculos andinos y plantas en general, y cada una tiene diferentes propiedades, por lo que se recomienda investigarlos para determinar su eficiencia en la remoción de turbidez.
3. Estudiar la eficiencia del almidón de papa en la remoción de carga orgánica de efluentes industriales y aguas residuales domésticas.
4. Realizar estudios de eficiencia de remoción de turbidez usando almidón de papa como auxiliar de coagulación de coagulantes como sulfato de aluminio y cloruro férrico en aguas de otros ríos de Tacna y del Perú.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almendárez, N. (2004). *Efectividad del coagulante cochifloc*, Managua: Editorial de la Universidad Nacional de Ingeniería, pp. 46-54.
2. Arias, G. (2010). *Compendio de Bioquímica*, Bogotá: Editorial de la Universidad de Boyacá, pp. 22-25.
3. Belitz, G. (2011). *Química de los alimentos*, Madrid: Editorial Acribia, pp. 33-39.
4. Brack, A. (2008). *Todo sobre la papa*. Lima: Editorial Edelnor, pp. 90-97.
5. Biblioteca agropecuaria. (1979). *Papa peruana*, Lima: Editorial Mercurio, pp. 16-24.
6. Chávez, T. (2008). *Biología*, Lima: Editorial Cobra, pp. 32-39.
7. EPS Tacna. (2013). *Reportes de Laboratorio de control de calidad*, Tacna.
8. Gutiérrez, H. (2005). *Análisis y diseño de experimentos*, México DF: Editorial Mc Graw Hill, pp. 122-129.
9. Kemmer, F. (1995). *Manual del agua, su tratamiento y aplicaciones*, México DF: Editorial Mc Graw Hill, pp. 86-93.

10. Kirchmer, C. (1975). *Polímeros naturales*, Lima: Editorial Documentos Técnicos, pp. 27-30.
11. Melian, D. (2010). *Metodología de extracción de almidón*, Valdivia: Editorial de la Universidad Austral, pp. 33-35.
12. Montoya, S. (2007). *Obtención de almidón y sus aplicaciones*, Cali: Editorial de la Universidad del Valle, pp. 17-20.
13. Organización Mundial de la Salud. (2008). *Guía para la calidad del agua potable*, Washington: Editorial de la Organización Mundial de la Salud, pp. 127-131.
14. Powell, S. (1979). *Acondicionamiento de aguas*, México DF: Editorial Limusa, pp. 35-52.
15. Quintana, J. (2008). *I Congreso Nacional de la Papa*, Andahuaylas: Editorial Ministerio de Agricultura, pp. 6-10.
16. Ramírez, B. (2012). *Potencialidades de la flora andina*, Nariño: Editorial de la Universidad del Cauca, pp. 13-18.
17. Rodier, J. (1981). *Análisis de aguas*, Barcelona: Editorial Omega, pp. 21-27.
18. Romero, J. (1996). *Acuiquímica*, Bogotá: Editorial de la Escuela colombiana de ingeniería, pp. 145-166.
19. Romero, J. (2000). *Purificación del agua*, Bogotá: Editorial de la Escuela colombiana de ingeniería, pp. 273-280.

20. Rondeau, V. (2000). *Relación de aluminio en el agua con la enfermedad de Alzheimer*, Washington, American Journal of Epidemiology, pp. 59-66.
21. Scagel, G. (1987). *El Reino Vegetal*, Londres: Editorial Omega, pp. 64-69.
22. Sharia, T. (2012). *Eficiencia del almidón en remoción de turbidez del agua*, Terán: Editorial de la Universidad de Terán, pp. 34-37.
23. Sierra, C. (2011). *Calidad del agua*, Bogotá: Editorial Universitaria, pp. 52-56.
24. Snoeyink, V. (1990). *Química del agua*, México DF: Editorial Limusa, pp. 13-27.
25. Solís, R. (2012). *Mezclas con potencial coagulante*, México DF: Editorial Contaminación Ambiental, pp. 229-236.
26. Spellman, F. (2000). *Manual del agua*, Zaragoza: Editorial Acribia, pp. 217-226.
27. Suay, L.; Ballester, F. (2002). *Revisión de los Estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer*, Valencia: Editorial Salud Pública, pp. 645-648.
28. Vargas, M. (2010). *Extracción y análisis de polímeros*, San José: Editorial del Tecnológico de Costa Rica, pp. 32-41.

29. Vega, J. (2002). *Química del medio ambiente y recursos naturales*, Santiago de Chile: Editorial de la Universidad Católica de Chile, pp. 53-57.
30. Wright, R. (2004). *Ciencias Ambientales*, México: Editorial Pearson, pp. 63-72.
31. Xing, G. (2010). *Avances recientes sobre almidón como coagulante*, Dalian: Editorial de la Universidad de Dalian, pp. 1-7.

# **ANEXOS**

**ANEXO I**

**RESULTADOS DE**

**TURBIDEZ FINAL Y pH**

Tabla 39: Resultados de turbidez final y pH para la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para agua con turbidez inicial de 70 NTU de la Tabla 8.

Tratamiento	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Promedio de las 3 repeticiones	
	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez promedio	pH promedio
1	28,7	5,82	27,3	5,79	28,9	6,14	28,3	5,92
2	13,6	5,46	13,7	5,84	12,4	6,28	13,2	5,86
3	7,7	5,79	7,59	5,36	6,34	6,23	7,21	5,79
4	5,2	5,13	5,84	5,46	5,26	5,75	5,42	5,45
5	6,3	5,32	6,76	5,17	6,48	5,76	6,51	5,42
6	6,5	5,43	6,79	5,36	6,84	5,29	6,72	5,36
7	7,3	5,42	8,47	5,31	7,91	5,29	7,88	5,34
8	13,2	5,23	12,8	5,31	13,7	5,24	13,2	5,26
9	18,9	5,15	17,3	5,31	17,6	5,04	17,9	5,17
10	21,3	5,08	20,8	4,96	20,6	5,13	20,9	5,06
11	23,2	5,24	23,9	4,98	24,6	4,61	23,9	4,94
12	27,6	4,93	27,1	4,65	28,4	4,86	27,7	4,81

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40: Resultados de turbidez final y pH para la determinación de la dosis óptima de almidón de papa para agua con turbidez inicial de 70 NTU de la Tabla 11.

Tratamiento	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Promedio de las 3 repeticiones	
	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez promedio	pH promedio
1	16,5	6,57	15,4	6,42	16,8	6,31	16,2	6,43
2	9,56	6,32	8,92	6,45	9,31	6,11	9,26	6,29
3	6,94	6,23	7,32	6,12	7,04	6,37	7,10	6,25
4	6,38	6,26	6,49	6,13	6,46	6,17	6,44	6,19
5	6,19	6,12	6,25	6,15	6,12	6,20	6,19	6,16
6	5,78	6,15	5,91	6,08	4,63	6,19	5,44	6,14
7	4,73	6,11	4,21	6,08	4,96	6,12	4,63	6,10
8	4,69	6,03	5,35	6,11	4,87	5,74	4,97	5,96
9	6,49	5,93	5,95	5,86	6,34	5,64	6,26	5,81
10	7,93	5,69	8,03	5,81	7,98	5,73	7,99	5,74
11	7,64	5,69	7,49	5,72	7,67	5,63	7,60	5,68
12	7,71	5,61	7,96	5,72	7,82	5,57	7,83	5,63

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 41: Resultados de turbidez final y pH para la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para agua con turbidez inicial de 500 NTU de la Tabla 14.

Tratamiento	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Promedio de las 3 repeticiones	
	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez promedio	pH promedio
1	98,7	6,26	97,9	6,39	96,8	6,18	97,8	6,28
2	83,4	6,23	82,8	6,18	84,5	6,28	83,6	6,23
3	79,2	6,20	80,6	6,14	78,3	6,24	79,4	6,19
4	58,6	6,17	62,9	6,09	60,5	6,18	60,7	6,15
5	50,9	6,11	49,8	6,06	50,2	6,10	50,3	6,09
6	36,2	6,03	35,1	6,04	37,4	5,87	36,2	5,98
7	32,4	5,93	32,1	5,98	31,9	5,82	32,1	5,91
8	30,6	5,78	29,2	5,65	28,9	5,43	29,6	5,62
9	36,1	5,64	38,9	5,58	37,2	5,47	37,4	5,56
10	53,4	5,43	54,6	5,37	52,1	5,29	53,4	5,36
11	79,6	5,39	81,4	5,28	80,3	5,32	80,4	5,33
12	94,9	5,24	96,1	5,17	95,4	5,22	95,5	5,21

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 42: Resultados de turbidez final y pH para la determinación de la dosis óptima de almidón de papa para agua con turbidez inicial de 500 NTU de la Tabla 17.

Tratamiento	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Promedio de las 3 repeticiones	
	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez promedio	pH promedio
1	27,6	6,74	28,5	6,78	28,3	6,71	28,1	6,74
2	26,4	6,75	25,7	6,46	25,9	6,52	26,0	6,58
3	22,3	6,45	21,9	6,52	21,4	6,59	21,9	6,52
4	21,7	6,43	20,2	6,56	22,1	6,54	21,3	6,51
5	20,8	6,37	21,2	6,41	20,1	6,52	20,7	6,43
6	21,9	6,33	22,0	6,45	22,4	6,28	22,1	6,35
7	22,8	6,24	23,4	6,47	22,5	6,13	22,9	6,28
8	24,7	6,21	25,4	6,14	24,1	6,26	24,7	6,20
9	26,6	6,14	27,9	6,12	27,1	6,23	27,2	6,16
10	29,0	6,12	28,1	6,03	28,4	6,24	28,5	6,13
11	29,2	6,14	29,7	6,09	28,9	6,01	29,3	6,08
12	29,6	5,97	28,8	6,14	30,2	5,83	29,5	5,98

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 43: Resultados de turbidez final y pH para la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para agua con turbidez inicial de 900 NTU de la Tabla 20.

Tratamiento	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Promedio de las 3 repeticiones	
	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez promedio	pH promedio
1	162	6,71	154	6,73	165	6,76	160	6,73
2	126	6,55	118	6,59	124	6,55	123	6,56
3	117	6,34	115	6,25	118	6,19	117	6,26
4	108	6,18	98	6,11	104	5,98	103	6,09
5	67,3	6,01	66,4	5,89	62	5,76	65,2	5,89
6	54,6	5,85	52,9	5,75	53,5	5,54	53,7	5,72
7	41,7	5,43	39,8	5,76	42,5	5,41	41,3	5,53
8	75,6	5,27	76,8	5,62	71,2	5,20	74,5	5,36
9	89,5	5,32	91,2	5,28	89,8	5,19	90,2	5,26
10	112	5,16	110	5,23	115	5,27	112	5,22
11	128	5,13	125	5,21	132	5,11	128	5,15
12	153	4,98	150	5,06	157	5,09	153	5,04

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 44: Resultados de turbidez final y pH para la determinación de la dosis óptima de almidón de papa para agua con turbidez inicial de 900 NTU de la Tabla 23.

Tratamiento	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Promedio de las 3 repeticiones	
	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez final	pH	Turbidez promedio	pH promedio
1	39,1	7,34	36,8	7,45	35,6	7,29	37,2	7,36
2	36,2	7,27	35,8	7,32	34,1	7,41	35,4	7,33
3	25,2	7,18	23,7	7,36	24,1	7,25	24,3	7,26
4	21,0	7,21	20,2	7,28	22,4	7,18	21,2	7,22
5	21,1	7,19	20,5	7,13	23,6	7,05	21,7	7,12
6	24,8	7,04	25,3	7,16	27,7	7,08	24,3	7,09
7	29,3	7,01	27,8	7,13	26,3	7,06	27,8	7,07
8	30,1	6,85	33,9	6,92	29,6	6,91	31,2	6,90
9	38,3	6,69	36,2	6,71	34,9	6,78	36,5	6,73
10	41,7	6,71	39,8	6,73	35,7	6,58	39,1	6,67
11	38,2	6,59	42,1	6,75	40,6	6,53	40,3	6,62
12	43,7	6,37	40,8	6,45	39,2	6,53	41,2	6,45

Fuente: Elaboración Propia

## **ANEXO II**

### **FOTOGRAFÍAS**

#### **DE LA EXTRACCIÓN**

#### **DEL ALMIDÓN DE PAPA**



Figura 35: Papa cortada en trozos  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 36: Papa licuada en proceso de filtración  
Fuente: Elaboración Propia

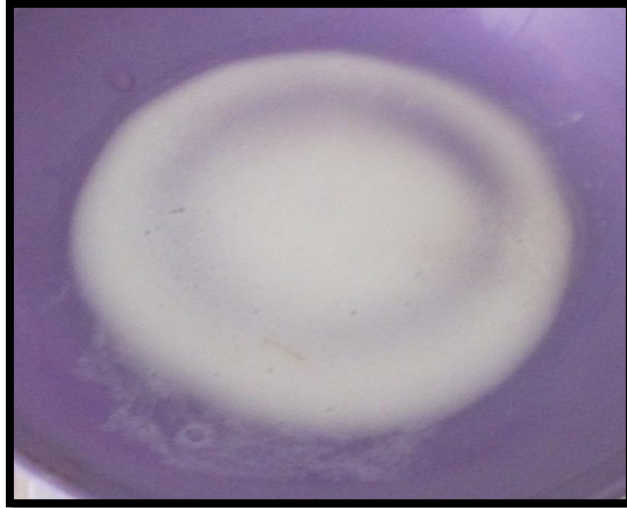


Figura 37: Almidón obtenido de la filtración  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 38: Tubos de ensayo con almidón luego de la centrifugación  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 39: Centrífuga  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 40: Filtración al vacío  
Fuente: Elaboración Propia

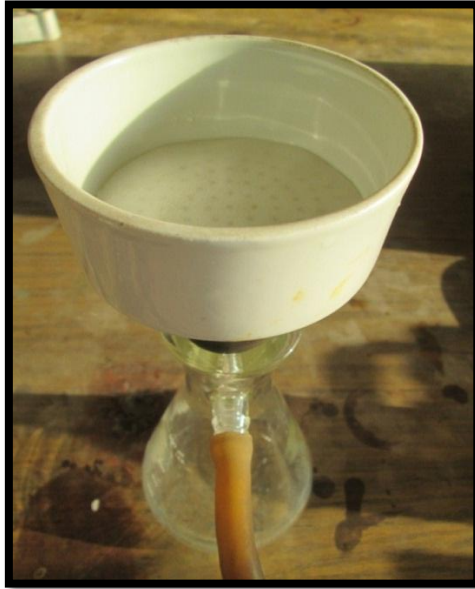


Figura 41: Matraz Kitasato  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 42: Almidón de papa  
Fuente: Elaboración Propia

## **ANEXO III**

### **ANÁLISIS DE LABORATORIO**

- **Muestra M1:** Determinación de aluminio para muestra de 70 NTU tratada con 40 mg/L de sulfato de aluminio y 12 mg/L de almidón.
- **Muestra M2:** Determinación de aluminio para muestra de 500 NTU tratada con 120 mg/L de sulfato de aluminio y 8 mg/L de almidón.
- **Muestra M3:** Determinación de aluminio para muestra de 900 NTU tratada con 140 mg/L de sulfato de aluminio y 7 mg/L de almidón.



**UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS**  
**LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD**



Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205 ☎ + 51 54 251210 ANEXO 1166  
 ✉ laboratoriodeensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Apto. 1350  
 AREQUIPA - PERU



**INFORME DE ENSAYO**  
**Nº DE INFORME: ANA05L14.001498A**

<b>Nombre del Cliente</b>	: MANUEL CHALCO FLORES
<b>Dirección del Cliente</b>	: AV. MIRAFLORES S/N
<b>RUC</b>	: NO DECLARA
<b>Condición del Muestreado</b>	: POR EL CLIENTE
<b>Descripción</b>	: MUESTRA - M1
<b>Tamaño de muestra</b>	: 500 mL
<b>Fecha de Recepción</b>	: 05/12/2014
<b>Fecha de Inicio del Ensayo</b>	: 05/12/2014
<b>Fecha de Emisión de Informe</b>	: 11/12/2014
<b>Página</b>	: 1 de 1

**I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:**

ANÁLISIS	RESULTADO
DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES (mg/L) Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry EPA METHOD 200.7	
Aluminio (Al)	0,007

**OBSERVACIONES:**

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez.  
 CQFDA 00624  
 JEFE DE LABORATORIO LECC





**UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS**  
**LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD**



Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205 ☎ + 51 54 251210 ANEXO 1166  
 ✉ laboratoriodeensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Apto. 1350  
 AREQUIPA - PERU



**INFORME DE ENSAYO**  
**Nº DE INFORME: ANA05L14.001498C**

---

<b>Nombre del Cliente</b>	: MANUEL CHALCO FLORES
<b>Dirección del Cliente</b>	: AV. MIRAFLORES S/N
<b>RUC</b>	: NO DECLARA
<b>Condición del Muestreo</b>	: POR EL CLIENTE
<b>Descripción</b>	: MUESTRA – M2
<b>Tamaño de muestra</b>	: 500 mL
<b>Fecha de Recepción</b>	: 05/12/2014
<b>Fecha de Inicio del Ensayo</b>	: 05/12/2014
<b>Fecha de Emisión de Informe</b>	: 11/12/2014
<b>Página</b>	: 1 de 1

---

**I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:**

ANÁLISIS	RESULTADO
DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES (mg/L) Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry EPA METHOD 200.7	
Aluminio (Al)	0,014

**OBSERVACIONES:**

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez  
 CQFDA 00624  
 JEFE DE LABORATORIO LECC





**UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS**



**LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD**

Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205 ☎ +51 54 251210 ANEXO 1166  
 ✉ laboratoriodeensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Aptdo. 1350  
 AREQUIPA - PERU



**INFORME DE ENSAYO**  
**Nº DE INFORME: ANA05L14.001498B**

Nombre del Cliente	: MANUEL CHALCO FLORES
Dirección del Cliente	: AV. MIRAFLORES S/N
RUC	: NO DECLARA
Condición del Muestreado	: POR EL CLIENTE
Descripción	: MUESTRA – M3
Tamaño de muestra	: 500 mL
Fecha de Recepción	: 05/12/2014
Fecha de Inicio del Ensayo	: 05/12/2014
Fecha de Emisión de Informe	: 11/12/2014
Página	: 1 de 1

**I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:**

ANÁLISIS	RESULTADO
DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES (mg/L) Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry EPA METHOD 200.7	
Aluminio (Al)	0,025

**OBSERVACIONES:**

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez  
 CQFDA 00624  
 JEFE DE LABORATORIO LECC



## **ANEXO IV**

### **CÁLCULO DE LOS PUNTOS ESTRELLA**

### **DEL DISEÑO EXPERIMENTAL**

El bloque estrella 2k del diseño central compuesto comprende 6 puntos estrella situados a una distancia axial  $\pm 2^{k/4}$ , en nuestro caso al haber 3 variables independientes, se ha utilizado k=3, por lo tanto, al reemplazar el valor de k se obtiene:

$$\text{distancia axial} = \pm 2^{k/4} = \pm 2^{3/4} = \pm 1,68$$

A modo de ejemplo se muestra como se halló los puntos estrella del diseño experimental.

Tabla 45: Variables codificadas y naturales

Variables codificadas	-1,68	-1	0	+1	+1,68
Variables naturales	x	120	130	140	X

Fuente: Elaboración Propia

$$\frac{1-0}{140-130} = \frac{1,68-1}{x-140}$$

$$x = 146,81$$

$$\frac{-1-0}{120-130} = \frac{-1,68-(-1)}{x-120}$$

$$x = 113,18$$

## **ANEXO V**

# **ARTÍCULO SOBRE LA RELACIÓN ENTRE EL ALUMINIO Y LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER**

## REVISIÓN DE LOS ESTUDIOS SOBRE EXPOSICIÓN AL ALUMINIO Y ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

Loreto Suay Llopis y Ferran Ballester Díez

Escola Valenciana d'Estudis per a la Salut (EVES). Unidad de Epidemiología y Estadística. Conselleria de Sanidad. Generalitat Valenciana

### RESUMEN

Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de los estudios epidemiológicos que han evaluado el papel del aluminio como factor de riesgo para el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer. Se realizó una búsqueda bibliográfica en la base de datos MedLine combinando los términos del Thesaurus «Aluminum» y «Alzheimer's disease». En la mayor parte de los estudios revisados se ha examinado la exposición al metal a través del agua de bebida. Los estudios que sugieren que existe una asociación entre el aluminio y la enfermedad presentan riesgos relativos de alrededor de 2 para poblaciones con exposiciones a concentraciones de Al en el agua mayores de 0,1 mg/l. Las exposiciones al metal a través de otras vías (alimentación, medicamentos y exposición laboral) han sido poco estudiadas. Estos estudios epidemiológicos presentan limitaciones metodológicas y sus resultados no son consistentes por lo que los resultados disponibles hasta el momento no permiten establecer, de manera clara, que exista una asociación entre la exposición al metal y la etiología de la enfermedad de Alzheimer. No obstante, tampoco es posible descartar un papel tóxico del aluminio sobre la salud, por lo que su exposición debería ser controlada y reducida en lo posible.

**Palabras clave:** Enfermedad de Alzheimer. Aluminio. Agua de consumo

### ABSTRACT

#### Review of the Studies on Exposure to Aluminum and Alzheimer's Disease

A review has been made of the epidemiological studies published evaluating the role of aluminum as a risk factor for developing Alzheimer's disease. A search for published studies was conducted in the Medline database by combining the terms «Aluminum» and «Alzheimer's disease». In most of the studies reviewed, exposure to aluminum in drinking water was examined. These studies suggest that a relationship exists between aluminum (Al) and Alzheimer's disease involving relative risks of around 2 for populations exposed to Al concentrations in drinking water higher than 0.1 mg/l. Types of exposure to this metal by other means (food, medications and occupational exposure) have received little attention. These epidemiological studies entail certain methodological limitations, and their results are not consistent, so the results available to date therefore not making it possible to clearly determine that any relationship exists between exposure to aluminum and the etiology of Alzheimer's disease. Nevertheless, the toxic effect of aluminum on human health cannot be ruled out either, and thus exposure to aluminum should be monitored and limited as far as possible.

**Keywords:** Alzheimer's disease. Aluminum. Drinking water.

### INTRODUCCIÓN

La enfermedad de Alzheimer se caracteriza clínicamente por pérdida de la memoria reciente y de las facultades intelectuales, presen-

cia de ansiedad y depresión. No existe tratamiento curativo de esta enfermedad, que va empeorando hasta que conduce en una fase final a la muerte.

La enfermedad de Alzheimer es probablemente el resultado de un proceso de envejecimiento multifactorial en el que están implicados componentes genéticos y ambientales y donde, en un porcentaje importante de los casos, se piensa que las características genéticas de los individuos modulan distin-

Correspondencia:  
Ferran Ballester Díez.  
Escola Valenciana d'Estudis per a la Salut (EVES)  
C/ Juan de Garay 21  
46017 Valencia. Tel 963869361, Fax: 963869370  
Correo electrónico: ballester\_fer@gva.es

tas exposiciones ambientales. Entre los factores de riesgo ambientales que se han relacionado con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer se encuentra la exposición a aluminio. Hace más de 25 años se describió la toxicidad del aluminio (Al) sobre el sistema nervioso en ratas. Tras las primeras evidencias en animales de experimentación, una serie de estudios han valorado el posible papel del aluminio en relación con la enfermedad de Alzheimer, sin que exista un consenso claro en la comunidad científica<sup>1,2</sup>.

El objetivo principal de este trabajo es revisar los estudios epidemiológicos que evalúan la hipótesis del aluminio como factor implicado en el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer. Al mismo tiempo se valoran las fuentes de exposición al metal y se presenta una síntesis de los factores que han sido relacionados con la etiología de la enfermedad de Alzheimer.

#### LA ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

Se trata de una neurodegeneración que se visualiza a nivel microscópico como placas seniles, depósitos extracelulares de un péptido amiloide rodeado de terminaciones nerviosas degeneradas y alteraciones neurofibrilares intracelulares debidas a una forma fosforilada de la proteína citoesquelética tau. El diagnóstico de esta patología se considera probable cuando se han excluido otras causas alternativas de demencia, pero sólo la autopsia permite establecer un diagnóstico definitivo de enfermedad de Alzheimer<sup>3</sup>.

Entre los distintos factores que se han asociado al desarrollo de la enfermedad de Alzheimer destacan las características genéticas. Se han descrito tres mutaciones genéticas en los genes de las presenilinas 1 y 2 (cromosomas 14 y 1 respectivamente) y de la proteína precursora  $\beta$ -amiloide (cromosoma 21) que serían causa suficiente para el desarrollo de la forma presenil familiar con alta penetrancia y que representa el 10% de

los casos. Además se ha observado que existe un gen de susceptibilidad, el de la Apolipoproteína E (APOE), localizado en el cromosoma 19, cuyo alelo APOE $\epsilon$ 4 se correlaciona con la enfermedad de Alzheimer esporádica presenil y senil. Se ha observado que la frecuencia de este alelo es mayor en los casos que presentan la enfermedad (40% de los casos) que en el resto de la población (15% en caucásianos) y que existe un efecto de mayor penetrancia por la presencia del alelo en homocigosis<sup>2,3</sup>.

La edad y la historia familiar de demencia en primer grado de parentesco aparecen como los factores implicados más importantes en la etiología de la enfermedad<sup>4,6</sup>. Los antecedentes de casos de historia familiar de síndrome de Down y de enfermedad de Parkinson también se asocian con la enfermedad, aunque en menor grado<sup>4,5</sup>. Algunos estudios indican que una edad temprana<sup>4</sup> o una edad avanzada<sup>5</sup> de la madre en el momento de la concepción podrían estar implicadas en el desarrollo de la enfermedad de la persona concebida. Sin embargo, otros estudios no han confirmado dicha asociación<sup>6,7</sup>.

Otro factor de riesgo que ha sido relacionado con la enfermedad de Alzheimer, como con otros desórdenes neurológicos, es la historia de pérdidas de conciencia asociada a traumatismos craneoencefálicos<sup>4,5,7</sup>. También las historias clínicas de dolores de cabeza y de migrañas presentan un mayor riesgo para el desarrollo de esta enfermedad<sup>7</sup>, aunque en otros estudios<sup>5</sup> no se ha encontrado esta asociación. Otras condiciones médicas, como el hipotiroidismo, la arterioesclerosis, la osteoartritis o la depresión también se han relacionado con la enfermedad de Alzheimer<sup>4,6</sup>.