



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

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA,  
CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN;  
PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE  
NITRATO DE AMONIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA  
REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.**

**Carlos Francisco Antonio Gramajo**

Asesorado por el Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Guatemala, noviembre 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA,  
CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN;  
PARA LA OBTENCIÓN DE ACIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE  
NITRATO DE AMONIO Y ACIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA  
REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CARLOS FRANCISCO ANTONIO GRAMAJO**  
ASESORADO POR EL DR. ADOLFO NARCISO GRAMAJO ANTONIO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Victor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA,  
CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN;  
PARA LA OBTENCIÓN DE ACIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE  
NITRATO DE AMONIO Y ACIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA  
REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de septiembre de 2014.



**Carlos Francisco Antonio Gramajo**

Guatemala, 22 de Julio de 2015

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
Director de la Escuela de Ingeniería Química  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por medio de la presente me permito presentar a la escuela de ingeniería química, la propuesta de informe final titulado "EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA, CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN; PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE NITRATO DE AMONIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A." del estudiante Carlos Francisco Antonio Gramajo, quien se identifica con número de carné 1999-10681 con la finalidad de obtener la correspondiente aprobación.

Asimismo, hago de su conocimiento que la propuesta cuenta con las correspondientes revisiones y aprobación de mi persona.

F 

Dr. Adolfo Gramajo Antonio  
Asesora de trabajo de graduación  
agramajo@cempro.com

**Adolfo Gramajo**  
Ingeniero Químico  
Colegiado 264



Guatemala, 14 de julio de 2015.  
Ref.EPS.DOC.458.07.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Usac.

Ing. Rodríguez Serrano:

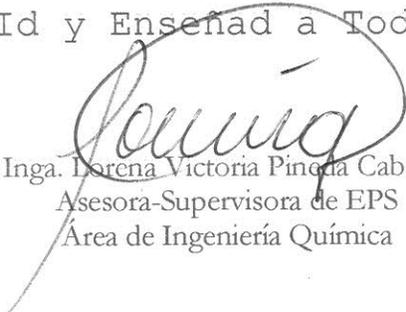
Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Carlos Francisco Antonio Gramajo** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **199910681**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA, CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN; PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE NITRATO DE AMONIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

  
Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera  
Asesora-Supervisora de EPS  
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo  
LVPC/ra



Guatemala, 14 de julio de 2015.  
Ref.EPS.D.332.07.15.

Ing. Victor Manuel Monzón Valdéz  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Monzón Valdéz.

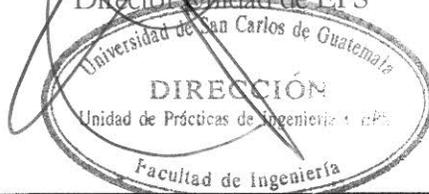
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA, CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN; PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE NITRATO DE AMONIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A."** que fue desarrollado por el estudiante universitario Carlos Francisco Antonio Gramajo, quien fue debidamente asesorado y supervisado por la Ingeniera Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora-Supervisora de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS



SJRS/ra

Guatemala, 23 de septiembre de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.064.2015.

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **059-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**  
**-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos Francisco Antonio Gramajo**.  
Identificado con número de carné: **1999-10681**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA, CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN; PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE NITRATO DE AMONIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A.**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adolfo Narciso Gramajo Antonio**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. William Eduardo Fajiani Cruz  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.156.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) del estudiante **CARLOS FRANCISCO ANTONIO GRAMAJO** titulado: **“EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA, CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN; PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE NITRATO DE AMONIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A.”** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*“Id y Enseñad a Todos”*

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre de 2015

Cc: Archivo  
VMMV/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LAS VARIABLES: TEMPERATURA, CONCENTRACIÓN INICIAL Y CONCENTRACIÓN FINAL EN EL MEDIO DE REACCIÓN; PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO Y BISULFATO DE AMONIO, A PARTIR DE NITRATO DE AMONIO Y ÁCIDO SULFÚRICO EN MEDIO ACUOSO, PARA LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Francisco Antonio Gramajo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, noviembre de 2015

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Gracias a su misericordia e incontables bendiciones he podido alcanzar este objetivo profesional.
- Mis padres** Cesar Augusto Antonio R. y Emérita Gramajo de Antonio, por haberme apoyado incondicionalmente durante toda la trayectoria de mi vida.
- Mis hermanos** Ana Patricia, Lilian Elizabeth (q. e. p. d.), Alma Yesenia, Claudia Dinora y Cesar Augusto Antonio G. (q. e. p. d.), por su continuo apoyo y confianza.
- Mi esposa e hijos** Rosario de Antonio, Valeria Patricia, Alondra Marian y Carlos Francisco Antonio C., por ser una parte muy importante en mi vida, su paciencia y comprensión.
- Mis sobrinos** Jorge Augusto, Emérita Cristina, Luis Ángel, Dulce María, Yoselyn Ivone, Cesar Augusto, Roger Emanuel, Carlos Eduardo, Lilian Andrea, Félix Alberto, Diego Fernando, Ángel Rodrigo, Lily, Ada Mery Gramajo, por su cariño.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por darme la vida, guiarme y fortalecerme durante estos años de estudio.
<b>Mis padres</b>	Cesar Augusto Antonio R. y Emérita Gramajo de Antonio, gracias a su amor y esfuerzos he podido alcanzar este objetivo.
<b>Mis hermanos</b>	Ana Patricia, Lilian Elizabeth (q. e. p. d.), Alma Yesenia, Claudia Dinora y Cesar Augusto Antonio G. (q. e. p. d.), por el apoyo en los momentos importantes.
<b>Edgar Antonio Becerra</b>	Mi tío, quien me inició en el estudio de la ingeniería y proporcionó su apoyo en mis estudios universitarios e inicio de mi vida profesional.
<b>Mis cuñadas</b>	Beatriz Adriana de León y Rita Evelyn Lacayo, por el apoyo proporcionado en muchas ocasiones.
<b>Ing. Jorge Luis Avalos</b>	Por su asesoría, colaboración y apoyo en la realización de este proyecto.
<b>Dr. Adolfo Gramajo</b>	Por su asesoría y apoyo en la realización de este proyecto.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIX
GLOSARIO .....	XXI
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. ANTECEDENTES GENERALES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Reacciones de doble desplazamiento .....	3
2.1.1. Tipos de reacciones de doble desplazamiento o intercambio.....	3
2.2. Termodinámica de las reacciones de doble desplazamiento.....	4
2.2.1. Calor estándar de reacción .....	4
2.2.2. Dependencia del calor estándar de reacción de la temperatura .....	5
2.2.3. Evaporación y condensación.....	7
2.2.4. Ebullición .....	8
2.2.5. Diagrama de fases .....	9
2.3. Condensadores de superficie .....	10
2.4. Los indicadores.....	10
2.4.1. Fenolftaleína.....	12
2.5. Conversión de una reacción química.....	12

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
3.1.	Variables .....	15
3.1.1.	Factores constantes.....	16
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	16
3.3.	Recursos .....	16
3.3.1.	Recurso humano.....	17
3.3.2.	Recursos materiales disponibles .....	17
3.3.3.	Materia prima .....	17
3.3.4.	Cristalería, reactivos y equipo .....	18
3.4.	Técnica cuantitativa.....	19
3.4.1.	Reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso .....	20
3.4.2.	Determinación de la concentración de nitrógeno total en el nitrato de amonio utilizado y en el bisulfato de amonio producido .....	22
3.4.3.	Determinación de la concentración de nitrógeno amoniacal en el nitrato de amonio utilizado y en el bisulfato de amonio producido .....	23
3.4.4.	Determinación de concentración de ácido nítrico .....	25
3.5.	Recolección y ordenamiento de la información .....	26
3.5.1.	Datos originales de tiempos de reacción, concentraciones iniciales de agua, temperaturas finales de reacción, masas de ácido nítrico y cristales de bisulfato de amonio recuperadas .....	26
3.5.1.1.	Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado .....	29

3.5.2.	Datos originales para determinar la concentración del bisulfato de amonio recuperado .....	34
3.5.3.	Datos originales para determinar la concentración del nitrato de amonio utilizado en la experimentación .....	45
3.5.4.	Datos originales de los insumos utilizados en la experimentación .....	46
3.6.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información ....	48
3.6.1.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico .....	48
3.6.2.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio.....	54
3.6.3.	Porcentaje de conversión de la reacción con base en el contenido de nitrato de amonio.....	59
3.6.4.	Productos teóricos de reacción .....	65
3.6.5.	Comprobación de hipótesis .....	67
3.7.	Análisis estadístico .....	75
3.7.1.	Promedio o media de la muestra.....	75
3.7.2.	Varianza y desviación estándar.....	75
3.7.3.	Número de repeticiones .....	76
3.7.4.	Prueba de hipótesis para la comparación de medias.....	76
3.7.4.1.	Prueba de F de Snedecor-Fisher.....	77
3.7.4.2.	Prueba <i>t</i> de Student.....	77
4.	RESULTADOS .....	81
4.1.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción.....	81

4.2.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción.....	87
4.3.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción.....	93
4.4.	Concentración final de los productos en medio acuoso después de extraídos los productos .....	99
4.5.	Calor requerido para el proceso .....	102
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	103
6.	LOGROS OBTENIDOS.....	107
	CONCLUSIONES.....	109
	RECOMENDACIONES .....	111
	BIBLIOGRAFÍA.....	113
	APÉNDICES.....	115

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de fases .....	9
2.	Diagrama general del proceso de obtención de ácido nítrico condensado y bisulfato de amonio en cristales.....	21
3.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	82
4.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	83
5.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de reacción de 140 °C.....	84
6.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de 145 °C .....	85
7.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de 150 °C .....	86
8.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	88

9.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C.....	89
10.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C.....	90
11.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C.....	91
12.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C.....	92
13.	Porcentaje de conversión de reacción a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	94
14.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	95
15.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140°C .....	96
16.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C .....	97
17.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150°C .....	98

## TABLAS

I.	Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	27
II.	Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	27
III.	Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C .....	28
IV.	Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C .....	28
V.	Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C .....	29
VI.	Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	30
VII.	Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	31

VIII.	Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C.....	32
IX.	Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C.....	33
X.	Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C.....	34
XI.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	35
XII.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	36
XIII.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	37
XIV.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	38
XV.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	39

XVI.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	40
XVII.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	41
XVIII.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	42
XIX.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	43
XX.	Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	44
XXI.	Datos originales para determinar la concentración del nitrato de amonio usado en la experimentación con base en el contenido de nitrógeno amoniacal.....	45
XXII.	Datos originales para determinar la concentración del nitrato de amonio usado en la experimentación con base al contenido de nitrógeno total.....	45
XXIII.	Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	46

XXIV.	Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 135°C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	46
XXV.	Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	47
XXVI.	Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	47
XXVII.	Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	48
XXVIII.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	49
XXIX.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción.....	49
XXX.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	50
XXXI.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	50
XXXII.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	51

XXXIII.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	51
XXXIV.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	52
XXXV.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	52
XXXVI.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	53
XXXVII.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	53
XXXVIII.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	54
XXXIX.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	55
XL.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	55
XLI.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	56

XLII.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	56
XLIII.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	57
XLIV.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	57
XLV.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	58
XLVI.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	58
XLVII.	Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	59
XLVIII.	Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	60
XLIX.	Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción.....	60
L.	Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	61

LI.	Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	61
LII.	Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	62
LIII.	Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 140°C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	62
LIV.	Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	63
LV.	Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	63
LVI.	Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	64
LVII.	Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	64
LVIII.	Productos teóricos de reacción a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción.....	65
LIX.	Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua.....	65

LX.	Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	66
LXI.	Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	66
LXII.	Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua .....	67
LXIII.	Temperaturas y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a concentración inicial de agua de 45,87 % para comprobación de hipótesis.....	67
LXIV.	Prueba de F de Snedecor-Fisher a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción.....	68
LXV.	Prueba de <i>t</i> de Student a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción.....	68
LXVI.	Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 135 °C para comprobación de hipótesis .....	69
LXVII.	Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis .....	69
LXVIII.	Prueba de <i>t</i> de Student a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis .....	70
LXIX.	Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 140 °C para comprobación de hipótesis .....	70

LXX.	Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis.....	71
LXXI.	Prueba de <i>t</i> de Student a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis.....	71
LXXII.	Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 145 °C para comprobación de hipótesis.....	72
LXXIII.	Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis.....	72
LXXIV.	Prueba de <i>t</i> de Student a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis.....	73
LXXV.	Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 150 °C para comprobación de hipótesis.....	73
LXXVI.	Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis.....	74
LXXVII.	Prueba de <i>t</i> de Student a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis.....	74
LXXVIII.	Dados dos conjuntos de datos.....	77
LXXIX.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción.....	81

LXXX.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 3.....	82
LXXXI.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	83
LXXXII.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 4.....	84
LXXXIII.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C .....	84
LXXXIV.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 5 .....	85
LXXXV.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C .....	85
LXXXVI.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 6.....	86
LXXXVII.	Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C.....	86
LXXXVIII.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 7.....	87
LXXXIX.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	87
XC.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 8.....	88

XC I.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	89
XCII.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 9 .....	90
XCIII.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C .....	90
XCIV.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 10 .....	91
XCV.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C .....	91
XCVI.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 11 .....	92
XCVII.	Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C .....	92
XCVIII.	Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 12 .....	93
XCIX.	Porcentaje de conversión de reacción a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	93
C.	Modelo matemático del porcentaje de conversión de reacción de la figura 13 .....	94
CI.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	95
CII.	Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 14 .....	96
CIII.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C .....	96

CIV.	Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 15 .....	97
CV.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145°C .....	97
CVI.	Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 16 .....	98
CVII.	Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C .....	98
CVIII.	Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 17 .....	99
CIX.	Concentración final de productos en medio acuoso a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción .....	99
CX.	Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C .....	100
CXI.	Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140°C .....	100
CXII.	Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C .....	101
CXIII.	Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150°C .....	101

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\Delta H^{\circ}_{\text{vap}}$	Calor estándar de evaporación o cambio de entalpia de evaporación.
$\Delta H^{\circ}_{\text{f}}$	Calor estándar de formación o cambio de entalpia de formación.
$\Delta H^{\circ}_{\text{reacción}}$	Calor estándar de reacción o cambio de entalpia de reacción.
$\Delta S^{\circ}_{\text{vap}}$	Cambio de entropía de evaporación.
$\Delta C^{\circ}_{\text{p}}$	Cambio en la capacidad calorífica estándar de reacción.
% HNO <sub>3</sub> (p/p)	Concentración de ácido nítrico en peso/peso.
%NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (p/p)	Concentración de nitrato de amonio en peso / peso.
%N amoniacal (p/p)	Concentración de nitrógeno amoniacal en peso/peso.
%N Nítrico (p/p)	Concentración de nitrógeno nítrico en peso/peso.
%N Total (p/p)	Concentración de nitrógeno total en peso / peso.
%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Concentración inicial de agua en peso/peso.
S	Desviación estándar.
g	Gramos de la muestra.
ml	Mililitros.
N	Normalidad
kPa	Presión en el sistema de reaccionante en kilo pascales.

$\bar{x}$	Promedio o media.
$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	Temperatura final en grados Celsius.
$S^2$	Varianza.
<b>F</b>	Valor F de Prueba de F de Snedecor-Fisher.
<b>t</b>	Valor t de Prueba de t de Student.

## GLOSARIO

<b>Calor estándar de reacción</b>	Cantidad de calor que se desprende o se absorbe durante una reacción química a condiciones estándar.
<b>Calor latente de vaporización</b>	Es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase.
<b>Capacidad calorífica</b>	Es el cociente entre la cantidad de energía transferida a un cuerpo o sistema en un proceso cualquiera y el cambio de temperatura que experimenta.
<b>Conversión</b>	Es la fracción de reactante que se transforma a producto.
<b>Porcentaje de conversión</b>	Es la conversión multiplicada por 100.
<b>Condensación</b>	Cambio de estado de la materia que se encuentra en forma gaseosa a forma líquida.
<b>Ebullición</b>	Movimiento violento del agua u otro líquido, con producción de burbujas, como consecuencia del aumento de su temperatura o por estar sometido a fermentación o efervescencia

**Evaporación**

Proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

**Factor**

Es el elemento o circunstancia que contribuye, junto con otras cosas a producir un resultado.

## RESUMEN

Se evaluó a nivel laboratorio la reacción de doble sustitución entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso. Se varió la concentración inicial de agua y temperatura final de reacción, para obtener como productos ácido nítrico condensado, bisulfato de amonio en cristales y una solución que contiene bisulfato de amonio, agua y ácido nítrico.

Se determinó, mediante análisis químico de los productos, el porcentaje de recuperación de ácido nítrico y bisulfato de amonio. Esto en cristales, respecto a lo estequiométrico, y el porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción.

Se comprobó que a mayor concentración inicial de agua y mayor temperatura final de reacción se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de ácido nítrico. A mayor temperatura final de reacción y menor concentración inicial de agua se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales. A menor temperatura final de reacción y menor concentración inicial de agua de reacción se obtiene el mayor porcentaje de conversión de reacción.

Para determinar la concentración del bisulfato de amonio en cristales se analizó la concentración de nitrato de amonio contenido en este. Para ello se usó análisis químico cuantitativo que aplica los procesos fisicoquímicos de evaporación y condensación del nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico como hidróxido de amonio, y por diferencia con respecto al nitrato de amonio, se

estima la concentración como bisulfato de amonio. Para determinar la concentración del ácido nítrico se utilizó el método de determinación de acidez libre usando como indicador colorimétrico fenolftaleína y como base hidróxido de sodio.

Con fines ilustrativos se calculó la cantidad de calor requerida para una de las condiciones de concentración inicial de agua y temperatura final de reacción.

# OBJETIVOS

## General

Evaluar a nivel laboratorio las variables: temperatura, concentración inicial de agua y concentración final en el medio de reacción; para la obtención de ácido nítrico y bisulfato de amonio, a partir de nitrato de amonio y ácido sulfúrico en medio acuoso, para la empresa Representaciones Químicas, S. A.

## Específicos

1. Determinar el porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado a condiciones de reacción de alta concentración inicial de agua, bajas concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales.
2. Determinar el porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales a condiciones de reacción de alta concentración inicial de agua, bajas concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales.
3. Determinar el porcentaje de conversión de reacción a condiciones de reacción de alta concentración inicial de agua, bajas concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales.
4. Determinar la concentración final de los productos en medio acuoso después de recuperado el ácido nítrico condensado y el bisulfato de

amonio en cristales a condiciones de reacción de alta concentración inicial de agua, bajas concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales.

5. Estimar la cantidad de calor necesario para la obtención de ácido nítrico concentrado y bisulfato de amonio en cristales con base en una de las condiciones de reacción determinadas para obtener ácido nítrico condensado, bisulfato de amonio en cristales y una solución acuosa que contiene ácido nítrico y bisulfato de amonio.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis científica**

A mayor concentración inicial de agua y mayor temperatura final en el medio de reacción, se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado, mediante la reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso.

### **Hipótesis nula**

1. A menor concentración inicial de agua en el medio de reacción, se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado, mediante la reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso.
2. A menor temperatura final en el medio de reacción se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado, mediante la reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso.

### **Hipótesis alterna**

1. A mayor concentración inicial de agua en el medio de reacción, se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado, mediante la reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso.
2. A mayor temperatura final en el medio de reacción, se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado, mediante la reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso.



## INTRODUCCIÓN

El ácido nítrico es utilizado para la fabricación de fertilizantes de calcio, zinc y magnesio, siendo estos una fuente importante de nitrógeno en la agricultura. La empresa Representaciones Químicas, S. A. implementó los procesos de fabricación de nitrato de zinc y nitrato de calcio, a partir de ácido nítrico y minerales nacionales. Estos procesos fueron suspendidos debido al alto costo del ácido nítrico importado.

Se evaluó el proceso de fabricación de ácido nítrico condensado y bisulfato de amonio en forma de cristales, mediante la reacción de doble sustitución entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso. Las variables que se evaluaron fueron la concentración inicial de agua y la temperatura final de reacción. Se determinó el efecto que tienen en el porcentaje de recuperación de los productos y el porcentaje de conversión de reacción.

Se realizó una serie de corridas agregando una concentración alta de agua inicial de reacción para determinar el porcentaje mayor de recuperación de ácido nítrico a baja concentración. Esto para descartar que el agua agregada fuera insuficiente y pudiera interferir en el porcentaje de recuperación. Se evaporó a temperaturas de 135, 140, 145 y 150 °C en un tiempo superior a 120 minutos. Se determinó el porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado, bisulfato de amonio en cristales, el porcentaje de conversión de la reacción y las concentraciones finales en el medio acuoso después de recuperado el ácido nítrico y el bisulfato de amonio.

Para obtener ácido nítrico condensado a mayor concentración, se agregó agua en diferentes cantidades. Esto para obtener ácido nítrico concentrado a concentraciones superiores al 50 % y se procedió a evaporar a las temperaturas definidas.

## 1. ANTECEDENTES GENERALES

Existen varias patentes acerca de la fabricación de bisulfato de potasio y ácido clorhídrico utilizando como reactivos: el cloruro de potasio y ácido sulfúrico en medio acuoso. Donde posteriormente el bisulfato de potasio producido es convertido a varios compuestos derivados de este. Sin embargo, no se encontró literatura científica para el proceso de obtención de ácido nítrico utilizando como reactivos nitrato de amonio y ácido sulfúrico en medio acuoso.

En la patente norteamericana No. 4,588,573, cuyo título es *Method for the production of potassium sulfate using sulfuric acid and potassium chloride* describe la producción de ácido clorhídrico y bisulfato de potasio. Esto mediante la reacción entre cloruro de potasio y ácido sulfúrico en una solución recirculada de aguas madres producto del proceso. El ácido clorhídrico es recuperado mediante evaporación y el bisulfato de amonio es recuperado en forma de cristales. Posteriormente el bisulfato de potasio en cristales es convertido a sulfato de potasio y aguas madres ricas en ácido sulfúrico, estas son concentradas y recirculadas a la etapa de reacción.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Reacciones de doble desplazamiento

Estas reacciones son aquellas en las cuales el ión positivo (catión) de un compuesto se combina con el ión negativo (anión) del otro y viceversa, habiendo así un intercambio de átomos entre los reactantes. En general, estas reacciones ocurren en solución, es decir, que al menos uno de los reactantes debe estar en solución acuosa.

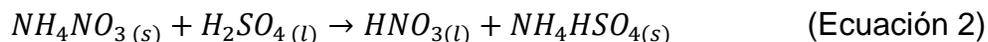


#### 2.1.1. Tipos de reacciones de doble desplazamiento o intercambio

Hay dos tipos de reacciones de doble desplazamiento o intercambio. Estas son las solubles y las insolubles.

- Solubles: compuestos de los metales del grupo IA; compuesto de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ); nitratos, la mayoría de los cloruros excepto  $\text{AgCl}$ ,  $\text{PbCl}_2$  y  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  y la mayoría de los sulfatos excepto los sulfatos de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Sr}^{+2}$ ,  $\text{Ba}^{+2}$  y  $\text{Pb}^{+2}$ .

Dentro de estas reacciones se encuentra la reacción entre nitrato de amonio y ácido sulfúrico para formar ácido nítrico y sulfato de amonio.



- Insolubles: óxidos, hidróxidos, carbonatos y fosfatos, excepto para aquellos metales del grupo IA y el amonio; sulfuros excepto aquellos del IA y los elementos del IIA y el amonio.<sup>1</sup>

## 2.2. Termodinámica de las reacciones de doble desplazamiento

Para las reacciones de doble desplazamiento se aplican los mismos conceptos químicos con respecto a calor estándar de formación, calor estándar de reacción y otros conceptos termodinámicos.

### 2.2.1. Calor estándar de reacción

Las reacciones químicas también se acompañan, ya sea por una transferencia de calor o por variaciones de temperatura, durante el transcurso de una reacción, y en algunos casos por ambos. Estos efectos son manifestaciones de las diferencias en la estructura molecular y, por tanto en la energía de los productos y de los reactivos. Por ejemplo, los reactivos en una reacción de combustión poseen una energía mayor al considerar su estructura más que los productos. Y esta energía debe ser transferida a los alrededores como calor o productos obtenidos a una temperatura elevada.

Cada una de las muchas posibles reacciones químicas se puede llevar a cabo de diferentes maneras, y cada reacción se realiza en un procedimiento particular que se acompaña por un efecto térmico propio. La tabulación de todos los posibles efectos térmicos para todas las reacciones posibles es impracticable. Por tanto, se calculan los efectos térmicos para las relaciones

---

<sup>1</sup> CAMACHO, José. *Reacciones de doble sustitución*. <http://es.slideshare.net/JoseCamacho17/reacciones-de-doble-sustitucion>. Consulta: 6 de febrero de 2014.

que se realizan de diversas maneras. Esto a partir de datos para reacciones que se realizan de modo estándar.

Con objeto de tabular datos con respecto a una reacción,



El calor estándar de reacción se define como el cambio de la entalpía cuando  $a$  moles de  $A$  y  $b$  moles de  $B$  en su estado estándar a temperatura  $T$  reaccionan para formar  $l$  moles de  $L$  y  $m$  moles de  $M$  en sus estados estándar a la misma temperatura  $T$ .

$$\Delta H_{reacción}^0 = \sum n \Delta H_f^0(\text{productos}) - \sum m \Delta H_f^0(\text{reactivos}) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$m$  y  $n$ : representan los coeficientes estequiométricos de reactivos y productos respectivamente.

$\Delta H_{reacción}^0$ : representa el calor estándar de reacción

$\Delta H_f^0$ : representa el calor estándar de formación

### 2.2.2. Dependencia del calor estándar de reacción de la temperatura

Para las reacciones estándar, los productos y reactivos siempre están a la presión del estado estándar de 1 bar. Las entalpías del estado estándar son, por tanto, funciones solo de la temperatura y por la ecuación.

$$dH_i^0 = C_{p_i}^0 dT \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde el subíndice  $i$  identifica un producto o reactivo particular. Multiplicando por  $v_i$  ( $v_i$  representa los coeficientes estequiométricos) y sumando sobre todos los productos y reactivos se obtiene:

$$\sum v_i dH_i^0 = \sum v_i C_{P_i}^0 dT \quad (\text{Ecuación 6})$$

Puesto que  $v_i$  es una constante se puede colocar dentro de la diferencial:

$$\sum d(v_i H_i^0) = d\sum v_i H_i^0 = \sum v_i C_{P_i}^0 dT \quad (\text{Ecuación 7})$$

El cambio en la capacidad calorífica estándar de reacción se define como

$$\Delta C_p^0 = \sum v_i C_{P_i}^0 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Como resultado de estas definiciones, la ecuación será:

$$d\Delta H^0 = \Delta C_p^0 dT \quad (\text{Ecuación 9})$$

Esta es la ecuación fundamental que relaciona a los calores de reacción con la temperatura. Al integrar se obtiene:

$$\Delta H^0 = \Delta H_{T_0}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p}{R} dT \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde  $\Delta H^0$  y  $\Delta H_{T_0}^0$  son los calores de reacción a temperatura  $T$  y a una temperatura de referencia  $T_0$ , respectivamente. Si la dependencia de la temperatura de la capacidad calorífica de cada producto y reactivo está dada por la ecuación<sup>2</sup>:

---

<sup>2</sup> SMITH, J.M; VAN NESS, H.C; ABBOTT, M.M. *Termodinámica en Ingeniería Química*. p. 155.

$$\frac{c_p}{R} = A + BT + CT^2 + DT^2 \quad (\text{Ecuación 11})$$

En este caso la integral está dada como:

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT = \Delta AT_0(\tau - 1) + \left(\frac{\Delta B}{2}\right) T_0^2(\tau^2 - 1) + \left(\frac{\Delta C}{3}\right) T_0^3(\tau^3 - 1) + \left(\frac{\Delta D}{T_0}\right) \left(\frac{\tau - 1}{\tau}\right) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

$$\tau = T/T_0 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde por definición

$$\Delta A = \sum v_i A_i \quad (\text{Ecuación 14})$$

Con las definiciones análogas para  $\Delta B$ ,  $\Delta C$  y  $\Delta D$

### 2.2.3. Evaporación y condensación

En un líquido, algunas moléculas tienen una energía cinética suficiente para vencer las fuerzas atractivas y pasar a estado gaseoso. Este proceso se llama evaporación y su velocidad crece si aumenta la temperatura y si disminuye la energía cinética mínima para ese líquido.

Una molécula gaseosa puede chocar con la superficie del líquido y ser capturada por ella. Este proceso se llama condensación y su velocidad crece con la presión parcial del gas. El líquido y el gas correspondiente establecen un

equilibrio cuando la velocidad de evaporación iguala a la de condensación. Para una sustancia y temperatura dadas, la presión parcial del gas en el equilibrio es una constante llamada presión de vapor del líquido ( $p_v$ ). Si la presión parcial del gas es mayor que vapor del líquido, parte del vapor condensa; si es menor parte del líquido se evapora, alcanzándose el equilibrio cuando se igualan ambas presiones.

Los líquidos que se evaporan con facilidad se llaman volátiles y tienen presiones de vapor relativamente altas. La cantidad de calor que debe añadirse a un mol de líquido para evaporarlo a temperatura constante y a la presión de equilibrio, se llama entalpia molar de vaporización ( $\Delta H_{vap}$ ). En condiciones termodinámicas normales ( $p = 1 \text{ atm}$ ), se llama entalpia molar normal de vaporización ( $\Delta H^\circ_{vap}$ ). La vaporización es siempre un proceso endotérmico, por lo que sus entalpías son siempre positivas.

#### 2.2.4. Ebullición

La ebullición es una forma violenta de evaporación que se produce cuando, al elevar la temperatura, la presión de vapor iguala a la presión total. La temperatura de ebullición de un líquido disminuye al disminuir la presión. El agua ebulle a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $1 \text{ atm}$  de presión, a menos de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  a presiones inferiores a  $1 \text{ atm}$ . De la ecuación de Clausius-Clapeyron, se deduce la expresión

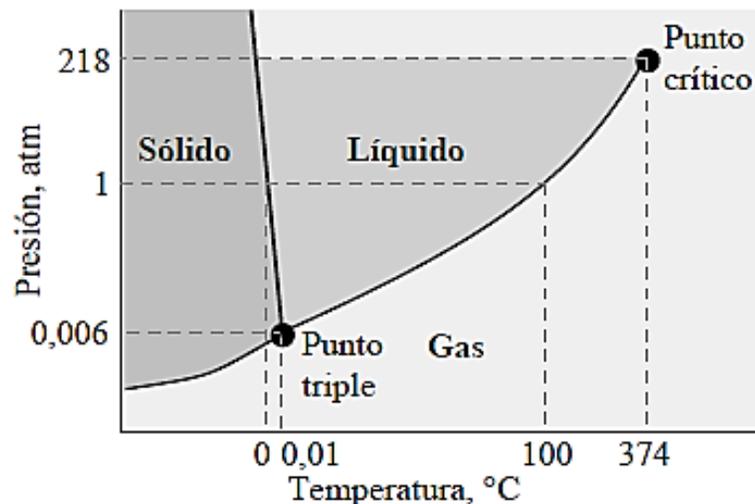
$$T_e = \frac{\Delta H_{vap}^\circ}{(\Delta S_{vap}^\circ - R \ln p)} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde  $p$  es la presión total.

### 2.2.5. Diagrama de fases

Permite determinar el estado más estable para una sustancia a una presión y temperatura dadas. El punto triple de un diagrama de fases da las condiciones en las que se tienen los tres estados en equilibrio.

Figura 1. Diagrama de fases



Fuente: elaboración propia, empleando Adobe Illustrator.

En la figura 1 se muestra el diagrama de fases para el agua. La anomalía de la curva de fusión del agua se debe a que su volumen aumenta al congelar, y se puede explicar mediante el principio de Le Chatelier.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> ALCANIZ, Hernesto de Jesús. *Equilibrio entre Sólido, Líquido y Gas*. <http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QG.htm>. Consulta: 14 de enero de 2015.

### **2.3. Condensadores de superficie**

Los condensadores de superficie se emplean cuando no se desea que se mezclen el condensado y el agua de enfriamiento. En general, son condensadores de tubos y coraza con vapor en la coraza y agua de enfriamiento en los tubos con flujo de pasos múltiples. La corriente de vapor casi siempre contiene gases no condensables. Estos pueden ser aire, dióxido de carbono, dinitrógeno y otros gases, incorporados como gases disueltos en la corriente de alimentación, o bien que provienen de descomposiciones en la solución.

Estos gases no condensables se desfogan en un tubo de ventilación en cualquier punto bien frío del condensador. Si el vapor que se condensa está por debajo de la presión atmosférica, el líquido condensado que sale del condensador de superficie puede extraerse bombeando y los gases no condensables con una bomba de vacío. Los condensadores de superficie son mucho más costosos y utilizan mayor cantidad de agua de enfriamiento, por lo que no se emplean cuando un condensador de contacto directo resulto adecuado.<sup>4</sup>

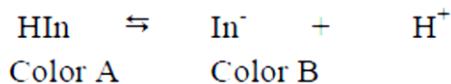
### **2.4. Los indicadores**

En la práctica, para conocer la acidez de una solución sin hacer cálculos, se usan a menudo los indicadores. Estos son sustancias orgánicas, bases o más comúnmente ácidos muy débiles que tienen colores variables según el pH de la solución.

Un indicador genérico ácido, que se indica con HIn, se disocia según la ecuación:

---

<sup>4</sup> GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. p. 88.



(Ecuación 16)

Que corresponde a una constante de equilibrio:

$$K_a = \frac{[\text{In}^-][\text{H}^+]}{[\text{HIn}]}$$

(Ecuación 17)

La molécula HIn tiene color diferente respecto al ion In<sup>-</sup>.

En exceso de iones en medio ácido (H<sup>+</sup>), el equilibrio de disociación se desplaza hacia la izquierda y por ello prevalece el color de la molécula no disociada (HIn); viceversa, en presencia de pocos iones medio ácidos (H<sup>+</sup>), es decir en exceso de iones (OH<sup>-</sup>). El equilibrio se desplaza hacia la derecha y prevalece el color del ion (In<sup>-</sup>). Cuando en la solución hay el 50 % de la constante de la acidez del ácido (HIn) y el 50 % del color del ion (In<sup>-</sup>), se tiene un color intermedio, denominado “color de viraje”.

En este punto, siendo  $[\text{In}^-]/[\text{HIn}] = 1$ , se concluye que  $K_a = [\text{H}^+]$ , pasando a logaritmos y colocando  $\text{p}K_a = \log K_a$ , se tiene  $\text{p}K_a = \text{pH}$ . Esto significa que el indicador asume el color de viraje cuando su reacción química ( $\text{p}K$ ) es numéricamente igual a la acidez ( $\text{pH}$ ) de la solución.

Naturalmente, el cambio de color del indicador no es repentino, sino que acontece gradualmente entre un cierto rango de ( $\text{pH}$ ), generalmente de 2 unidades, denominada zona de viraje<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> ARANEO, Antonio. *Química analítica cualitativa*. p. 115.

### 2.4.1. Fenolftaleína

La fenolftaleína de fórmula ( $C_{20}H_{14}O_4$ ) es un indicador de acidez (pH) que en disoluciones ácidas permanece incoloro, pero en presencia de bases toma un color rosado con un punto de viraje entre pH=8,0 (incoloro) a pH=9,8 (magenta o rosado).

Es un compuesto químico orgánico que se obtiene por reacción del fenol ( $C_6H_5OH$ ) y el anhídrido ftálico ( $C_8H_4O_3$ ) en presencia de ácido sulfúrico.<sup>6</sup>

### 2.5. Conversión de una reacción química

Para definir conversión, se escoge uno de los reactivos como base de cálculo y luego se relaciona con esta base las demás especies que intervienen en la reacción. En general lo mejor es seleccionar el reactivo limitante como base de cálculo. Se desarrollan las relaciones estequiométricas considerando la reacción general siguiente:



Si se toma la especie A como base de cálculo, se divide la expresión de la reacción entre el coeficiente estequiométrico de la especie A y se expresan todas las cantidades por moles de A, de la siguiente manera:



---

<sup>6</sup> Wikipedia, la enciclopedia libre. Fenolftaleína.  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Fenolftale%C3%ADna>. Consulta: 7 de abril de 2014

La conversión  $X_A$  es el número de moles de A que han reaccionado por mol de A alimentado al sistema:<sup>7</sup>

$$X_A = \frac{\text{moles de A que reaccionaron}}{\text{moles de A alimentados}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

---

<sup>7</sup> FOGHLER, Scott H. *Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas*. p. 78.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Propiedad, característica o atributo que es susceptible a asumir diferentes valores, es decir, puede variar. Dentro de ellas se encuentran las variables independientes consideradas como las causas. Las variables dependientes consideradas como el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente.

Para determinar el porcentaje de recuperación ácido nítrico condensado y bisulfato de amonio en cristales mediante la reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso, se establecerán las variables concentración inicial de los reactivos, temperatura final y concentración final de bisulfato de amonio en el medio de reacción.

- Variables independientes
  - Concentración inicial de agua en el medio de reacción (%p/p)
  - Temperatura final en el medio de reacción (°C)
  
- Variables dependientes
  - Concentración final de los productos en el medio de reacción
  - Porcentaje de recuperación de ácido nítrico concentrado
  - Concentración del ácido nítrico obtenido
  - Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales
  - Concentración del bisulfato de amonio en cristales obtenido
  - Porcentaje de conversión de la reacción

### **3.1.1. Factores constantes**

Son todos aquellos que mantienen su constancia y no varían sin importar el cambio en las demás propiedades o variables del sistema a las que se les exponga. Estas siempre se mantendrán en su forma original.

- Presión en el sistema reaccionante (kPa)

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

La evaluación a nivel laboratorio de las variables: temperatura, concentración inicial y concentración final en el medio de reacción. Esto para la obtención de ácido nítrico y bisulfato de amonio, a partir de nitrato de amonio y ácido sulfúrico en medio acuoso. Para ello se realizó en el laboratorio de investigación y desarrollo de la empresa Representaciones Químicas, S. A. ubicado en el municipio de Palín, Escuintla en Guatemala.

El estudio trata los principios de termodinámica de reacciones químicas, los temas de transferencia de calor, propiedades fisicoquímicas de compuestos químicos. El estudio se llevó a cabo en 2015, teniendo como investigadores a un estudiante de ingeniería química y a un ingeniero que labora en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **3.3. Recursos**

Para llevar a cabo la investigación del proceso de obtención de ácido nítrico y bisulfato de amonio en medio acuoso fue necesaria la utilización de recursos humanos, materiales, equipos y reactivos químicos.

### **3.3.1. Recurso humano**

Las personas involucradas en esta investigación fueron: el investigador principal con la asesoría de profesionales con experiencia en la industria y docencia universitaria.

Personas involucradas en el desarrollo de la investigación.

Investigador: P.C. Carlos Francisco Antonio Gramajo

Asesores: Dr. Adolfo Gramajo Antonio  
Bachiller. Estuardo Morfín

### **3.3.2. Recursos materiales disponibles**

Para la evaluación a nivel laboratorio de las variables: temperatura, concentración inicial y concentración final en el medio de reacción. Para la obtención de ácido nítrico y bisulfato de amonio, a partir de nitrato de amonio y ácido sulfúrico en medio acuoso, para la empresa representaciones químicas, S. A., se utilizó el equipo del Laboratorio de Análisis Químico Cuantitativo del Departamento de Control de Calidad de la empresa.

### **3.3.3. Materia prima**

Se compraron los reactivos para llevar a cabo esta investigación. Recolectar, procesar, presentar los resultados y se llegó a la conclusión de cómo se obtiene el ácido nítrico y el bisulfato de amonio en medio acuoso bajo las condiciones del proceso evaluado.

Los compuestos químicos utilizados en la experimentación fueron grado analítico.

### 3.3.4. Cristalería, reactivos y equipo

Para realizar la investigación del proceso de obtención de ácido nítrico y bisulfato de amonio en medio acuoso, se utilizó una variedad de equipo y cristalería para desarrollar de la mejor manera la investigación.

Incluye toda la cristalería, reactivos y equipo a ser utilizados para desarrollar la investigación.

- Materia prima
  - Ácido sulfúrico al 97 % p/p grado analítico Merck
  - Nitrato de amonio al 97 % p/p grado analítico Meyer
  - Agua desmineralizada
- Cristalería
  - *Beackers* de 1 000, 250, 500 y 100 mililitros, de vidrio marca Pyrex
  - Balón aforado de 1 000 mililitros, de vidrio Pyrex
  - Kitasato de 500 mililitros, de vidrio Pyrex
  - *Earlenmeyers* de 250 y 500 mililitros, de vidrio Pyrex
  - Corcho de polipropileno
  - Manguera de polipropileno
  - Papel filtro
  - Termómetro de -15-150 °C
  - Picetas de polietileno
  - Goteros de polietileno
  - Varillas de agitación de vidrio
  - Buretas de 10 mililitros, de vidrio Pyrex

- Pipetas serológica de 5 y 10 mililitros, de vidrio Pyrex
- Pipetas volumétrica 1, 5, 10, 25 mililitros, de vidrio Pyrex
- Probetas 10, 25, 50 y 100 mililitros, plásticas y de vidrio
- Espátulas, mango de madera, 15 centímetros de largo
  
- Reactivos para análisis
  - Ácido clorhídrico al 50 % p/p grado analítico Merck
  - Ácido sulfúrico al 97 % p/p grado analítico Merck
  - Ácido sulfúrico 0,5 N grado analítico Merck
  - Nitrato de amonio al 95 % p/p grado analítico Meyer
  - Agua desmineralizada
  - Fenolftaleína
  - Hidróxido de sodio 0,5N
  - Polvo de hierro reducido en nitrógeno
  - Indicador Tsiro-Tashiro
  
- Equipos
  - Perillas de succión.
  - Soportes universales y pinzas.
  - Condensador de tubo recto concéntrico.
  - Plancha de calentamiento Coming, voltaje 120 V.
  - Potenciómetro.
  - Balanzas analíticas Adventure, voltaje: 8-15 v, máxima capacidad: 150 g lectura mínima 0,001 g.
  -

### **3.4. Técnica cuantitativa**

Se utilizó la técnica cuantitativa, con base en mediciones exactas que se realizaron de diversos parámetros, así como análisis químicos cuantitativos. Se

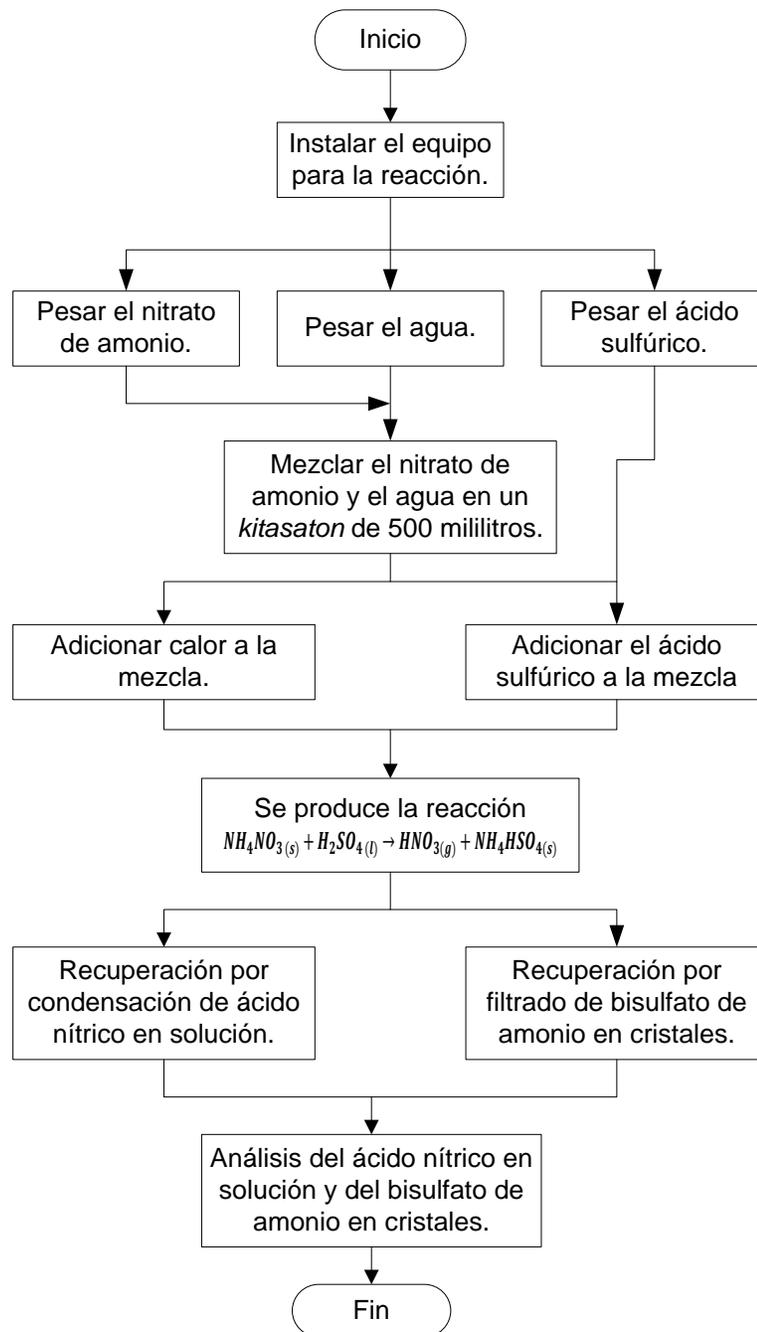
muestra el diagrama de flujo del proceso que describe la técnica cuantitativa a utilizar:

### **3.4.1. Reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso**

La obtención de ácido nítrico y bisulfato de amonio, en cristales mediante la reacción entre ácido sulfúrico y nitrato de amonio en medio acuoso, requiere de varias operaciones. Algunas se describen a continuación.

- Instalar el equipo para reacción, el cual consiste en *kitasato*, manguera para transportar el ácido nítrico gaseoso, condensador de tubo recto y *earlenmeyer* para coleccionar el ácido nítrico condensado.
- Pesar el nitrato de amonio y agregarlo al *kitasato* donde se realizará la reacción.
- Pesar el agua que se utilizará como medio de reacción y agregarla al *kitasato*.
- Agitar la mezcla de reacción utilizando un agitador magnético.
- Pesar el ácido sulfúrico y agregarlo al *kitasato*.
- Aplicar calor.
- Recuperar por condensación el ácido nítrico.
- Recuperar los cristales de bisulfato de amonio mediante filtración.
- Pesar la masa de ácido nítrico condensado, los cristales de bisulfato y analizarlos cada uno por separado.

Figura 2. Diagrama general del proceso de obtención de ácido nítrico condensado y bisulfato de amonio en cristales



Fuente: elaboración propia, empleando Visio.

### **3.4.2. Determinación de la concentración de nitrógeno total en el nitrato de amonio utilizado y en el bisulfato de amonio producido**

El método de análisis utilizado cuantifica el contenido de nitrógeno total. La determinación de nitratos se efectuó restando el contenido de nitrógeno amoniacal al contenido de nitrógeno total. Esto para su posterior conversión matemática a nitrato de amonio.

El procedimiento de análisis para nitrógeno total es el siguiente:

- Pesar la muestra a analizar.
- Agregar 50 ml de agua.
- Con una pipeta agregar 20 ml de solución de HCl 1:1 (v/v).
- Agitar durante 15 minutos sin aplicar calor.
- Dejar en reposo durante 30 minutos (o hasta que cese la liberación de CO<sub>2</sub>).
- Agregar 200 ml de agua y agitar por medio hora.
- Si la muestra contiene insolubles filtrar con papel filtro y aforar a 500 ml.
- Colocar en el matraz colector de condensado 25 ml de ácido sulfúrico 0.5N, 5 gotas de indicador colorimétrico y 25 ml. de agua desmineralizada. La extensión del condensador debe tener su extremo por debajo de la superficie de la solución a evaporar.
- Con una pipeta colocar cierta cantidad de solución en el matraz de destilación, 260 ml de agua (o hasta volumen total 290 ml), con una pipeta agregar 20 de ácido sulfúrico al 30 % y 5 g de polvo de hierro reducido en nitrógeno (lavar el cuello del matraz si es necesario).
- Calentar en baño maría durante 60 minutos.
- Esperar a que se enfríe a temperatura ambiente.

- Agregar con una bureta 60 ml de hidróxido de sodio al 30 % p/p.
- Agregar perlas de ebullición previamente lavadas con solución de ácido clorhídrico (HCl).
- Calentar gradualmente evitando ebullición intensa (se destila 100 ml en 10 o 15 min).
- El total de destilado debe ser aproximadamente de 250 ml completándose este proceso en mínimo 30 a 40 minutos.
- Al completar el volumen de destilado, lavar el condensador con agua desmineralizada de forma que el agua de lavado quede dentro del matraz receptor.
- Valorar el exceso de ácido sulfúrico contenido en el matraz receptor con hidróxido de sodio 0,5 N.
- Realizar una prueba en blanco bajo las mismas condiciones.

Fórmula para determinar el porcentaje de nitrógeno total

$$\%N = \frac{(V_{NaOH \text{ usado en el blanco}} - V_{NaOH \text{ usado en la muestra}})}{\left(\frac{\text{masa determinada}}{\text{volumen de aforo}}\right) \times \text{Alicuota usada}} \times 1.4007 \times \text{Normalidad NaOH}$$

(Ecuación 21)

### **3.4.3. Determinación de la concentración de nitrógeno amoniacal en el nitrato de amonio utilizado y en el bisulfato de amonio producido**

La determinación del amonio en el nitrato de amonio reactivo en la reacción, y en el bisulfato de amonio producto de la reacción se efectuó de forma directa, utilizándose el procedimiento que a continuación se describe.

- Pesar la muestra a analizar.
- Agregar 50 ml de agua.
- Agregar con una bureta 20 ml. de solución de ácido clorhídrico HCl 1:1 (v/v).
- Agitar durante 15 minutos sin aplicar calor.
- Dejar en reposo durante 30 minutos (o hasta que cese la liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)).
- Agregar 200 ml. de agua y agitar por medio hora.
- Si la muestra contiene insolubles filtrar con papel filtro y aforar a 500 ml.
- Colocar en el matraz colector de condensado 25 ml de ácido sulfúrico 0,5 N, 3 gotas de indicador y 25 ml de agua desmineralizada. La extensión del condensador debe tener su extremo por debajo de la superficie de la solución a evaporar.
- Colocar cierta cantidad de solución en el matraz de destilación, añadir agua hasta un volumen de 320 ml.
- Agregar perlas de ebullición previamente lavadas con solución de ácido clorhídrico (HCl).
- Con una bureta agregar 30 ml de solución de hidróxido de sodio (30 %p/p).
- Calentar gradualmente evitando ebullición intensa (se destila 100 ml en 10 o 15 min).
- El total de destilado debe ser aproximadamente de 250 ml completándose este proceso en mínimo 30 a 40 minutos.
- Al completar el volumen de destilado, lavar el condensador con agua desmineralizada de forma que el agua de lavado quede dentro del matraz receptor.
- Valorar el exceso de ácido sulfúrico contenido en el matraz receptor con hidróxido de sodio 0,5 N.
- Realizar una prueba en blanco bajo las mismas condiciones.

Fórmula para determinar el porcentaje de nitrógeno amoniacal

$$\%N = \frac{(V_{NaOH \text{ usado en el blanco}} - V_{NaOH \text{ usado en la muestra}})}{\left(\frac{\text{masa determinada}}{\text{volumen de aforo}}\right) \times \text{Alicuota usada}} \times 1.4007 \times \text{Normalidad NaOH}$$

(Ecuación 22)

#### 3.4.4. Determinación de concentración de ácido nítrico

La concentración del ácido nítrico en solución recuperado del medio de por evaporación y posterior condensación se realizó por análisis directo de acidez libre. Se utilizó como indicador fenolftaleína y como titulante hidróxido de sodio.

El procedimiento del método de análisis es el siguiente:

- En un earlenmeyer de 250ml pesar una muestra de 0,15-0,4gr de la muestra a analizar.
- Agregar 50 ml de agua desmineralizada.
- Agregar 3 gotas del indicador fenolftaleína.
- En una bureta de 10 ml agregar solución de hidróxido de sodio estandarizada y titular la muestra hasta que se observe un viraje de color fucsia a incolora.
- Anotar el volumen gastado, repetir el procedimiento anterior 3 veces y sacar un promedio del volumen gastado.
- Calcular la concentración de ácido nítrico según la ecuación siguiente:

$$\%HNO_3 = \frac{\text{Volumen NaOH}}{\text{Peso de la muestra}} \times \text{Normalidad NaOH} \times 6.30119$$

(Ecuación 23)

### **3.5. Recolección y ordenamiento de la información**

Se recolectaron y ordenaron los datos de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico recuperado, masas de cristales de bisulfato de amonio recuperado, volumen de hidróxido de sodio utilizado para determinar la concentración del ácido nítrico. El volumen de hidróxido de sodio usado para determinar la concentración de los cristales recuperados de bisulfato de amonio, volumen de hidróxido de sodio usado para determinar la concentración del nitrato de amonio empleando en la experimentación, masas de insumos utilizados en la experimentación; también llamados datos originales.

#### **3.5.1. Datos originales de tiempos de reacción, concentraciones iniciales de agua, temperaturas finales de reacción, masas de ácido nítrico y cristales de bisulfato de amonio recuperadas**

Se presentan los datos ordenados de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico recuperadas por evaporación y condensación y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperadas. Estas últimas fueron secadas con papel absorbente durante un tiempo de 10 minutos. Los datos tienen las condiciones de concentración inicial fija de agua y diferentes temperaturas finales de reacción, diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción. Estos datos son procedentes de la experimentación pura y se presentan todas las corridas que se realizaron.

Tabla I. **Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	Corrida	Tiempo de reacción (min)	Ácido trioxonítrico ( $\text{HNO}_3$ ) solución (g)	Cristales obtenidos (g)
135	1	134	264,53	84,3
	2	141	265,18	86,1
	3	138	264,83	87,15
140	1	151	283,63	119,86
	2	149	286,83	122,11
	3	150	285,25	121,89
145	1	140	300,83	131,46
	2	142	295,52	128,69
	3	143	298,14	130,46
150	1	160	306,68	151,99
	2	149	299,92	147,82
	3	152	301,08	148,99

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla II. **Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**

$\%\text{H}_2\text{O}_0$ (p/p)	Corrida	Tiempo de reacción (min)	Ácido trioxonítrico ( $\text{HNO}_3$ ) solución (g)	Cristales obtenidos (g)
22,23	1	136	102,88	98,85
	2	136	108,9	103,64
	3	139	106,55	100,89
20,24	1	119	92,81	99,58
	2	136	98,97	107,4
	3	121	97,25	106,22
18,63	1	129	84,78	103,28
	2	133	90,85	109,67
	3	134	88,52	106,99

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla III. **Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Tiempo de reacción (min)	Ácido trioxonítrico (HNO <sub>3</sub> ) solución (g)	Cristales obtenidos (g)
22,23	1	121	125,63	130,25
	2	131	128,31	132,92
	3	126	127,36	131,55
19,56	1	123	113,75	132,15
	2	129	114,35	129,76
	3	125	114,22	133,18
17,19	1	129	103,84	136,25
	2	172	108,35	143,29
	3	135	105,25	141,87

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla IV. **Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Tiempo de reacción (min)	Ácido trioxonítrico (HNO <sub>3</sub> ) solución (g)	Cristales obtenidos (g)
22,44	1	138	142,63	153,12
	2	127	141,65	150,56
	3	129	142,21	150,98
19,79	1	121	129,88	160,15
	2	144	130,03	159,78
	3	132	128,01	160,36
17,43	1	133	118,9	163,01
	2	134	120,74	165,98
	3	136	119,15	166,15

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla V. **Datos originales de tiempos de reacción, masas de ácido nítrico y masas de cristales de bisulfato de amonio recuperados a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**

<b>%H<sub>2</sub>O<sub>0</sub> (p/p)</b>	<b>Corrida</b>	<b>Tiempo de reacción (min)</b>	<b>Ácido trioxonítrico (HNO<sub>3</sub>) solución (g)</b>	<b>Cristales obtenidos (g)</b>
22,23	1	122	149,82	164,15
	2	136	149,13	164,93
	3	129	149,88	165,88
19,56	1	126	137,72	165,21
	2	139	136,12	166,55
	3	137	136,85	166,79
17,19	1	134	126,94	166,36
	2	134	127,12	165,98
	3	137	127,27	165,25

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

### **3.5.1.1. Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado**

Se presentan los datos ordenados de volumen de hidróxido de sodio utilizado para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado.

Tabla VI. **Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

T <sub>final</sub> (°C)	Corrida	Corrida de análisis	Masa (g)	Volumen NaOH (ml)	Factor	Concentración NaOH (N)	% Ácido Trioxonítrico (HNO <sub>3</sub> ) (p/p)
135	1	1	1,0852	6,86	6,30109	0,557	22,19
		2	1,0891	7,00			22,56
		3	1,0471	6,60			22,12
	2	1	1,11	7,55		0,5211	22,33
		2	1,1561	7,85			22,30
		3	1,0449	7,15			22,47
	3	1	1,7814	12,05		0,5211	22,21
		2	1,5896	10,80			22,31
		3	1,6503	11,20			22,28
140	1	1	1,0585	7,58	6,30109	0,5376	24,26
		2	1,1056	7,90			24,20
		3	1,0004	7,15			24,21
	2	1	1,0282	7,68		0,5211	24,53
		2	1,0162	7,60			24,56
		3	1,0056	7,50			24,49
	3	1	1,0253	7,60		0,5211	24,34
		2	1,1578	8,60			24,39
		3	1,2514	9,22			24,19
145	1	1	1,034	8,05	6,30109	0,5376	26,37
		2	1,0074	7,84			26,36
		3	1,0438	8,09			26,25
	2	1	1,0398	8,18		0,5211	25,83
		2	1,0482	8,25			25,84
		3	1,098	8,58			25,66
	3	1	1,4782	11,72		0,5211	26,03
		2	1,6384	13,10			26,25
		3	1,4289	11,31			25,99
150	1	1	1,0177	8,05	6,30109	0,5376	26,79
		2	1,1558	9,10			26,67
		3	1,0004	7,89			26,72
	2	1	1,1427	9,19		0,5211	26,41
		2	1,148	9,28			26,54
		3	1,1997	9,69			26,52
	3	1	1,4563	11,75		0,5211	26,49
		2	1,3547	10,97			26,59
		3	1,4102	11,40			26,54

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla VII. **Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Corrida de análisis	Masa (g)	Volumen de NaOH (ml).	Factor	Concentración de NaOH (N)	% Ácido Trioxonítrico (HNO <sub>3</sub> ) ( (p/p)
22,23	1	1	1,0528	15,78	6,30109	0,5246	49,55
		2	1,0119	15,15			49,49
		3	1,0617	15,93			49,60
	2	1	1,0029	15,8		0,5188	51,50
		2	1,0141	16			51,58
		3	1,016	16			51,48
	3	1	1,1525	17,77		0,5211	50,63
		2	1,4136	21,82			50,68
		3	1,7129	26,43			50,66
20,24	1	1	1,0589	17,45	6,30109	0,5246	54,47
		2	1,0588	17,44			54,45
		3	1,0293	16,95			54,43
	2	1	1,0817	18,44		0,5188	55,73
		2	1,0725	18,3			55,78
		3	1,091	18,6			55,73
	3	1	1,1472	19,1		0,5211	54,67
		2	1,2519	20,86			54,71
		3	1,3254	22,08			54,70
18,63	1	1	1,0586	18,8	6,30109	0,5246	58,70
		2	1,0221	18,17			58,76
		3	1,0387	18,45			58,72
	2	1	1,0426	18,89		0,5188	59,23
		2	1,0118	18,38			59,38
		3	1,0218	18,55			59,35
	3	1	1,112	20,02		0,5211	59,11
		2	1,213	21,8			59,01
		3	1,4151	25,44			59,03

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla VIII. **Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Corrida de análisis	Masa (g)	Volumen de NaOH (ml)	Factor	Concentración de NaOH (N)	% Ácido Trioxonítrico (HNO <sub>3</sub> ) (p/p)
22,23	1	1	1,0273	15,88	6,30109	0,5376	52,36
		2	1,0535	16,26			52,28
		3	1,0146	15,66			52,28
	2	1	1,0666	17,2		0,5188	52,72
		2	1,0979	17,7			52,70
		3	0,2175	3,51			52,75
	3	1	1,4172	22,65		0,5211	52,48
		2	1,5263	24,35			52,38
		3	1,4082	22,46			52,37
19,56	1	1	1,5344	26,54	6,30109	0,5246	57,18
		2	1,1869	20,52			57,15
		3	1,0478	18,1			57,10
	2	1	1,0465	18,78		0,5188	58,66
		2	1,0738	19,19			58,42
		3	0,2812	5,05			58,71
	3	1	1,2014	21,45		0,5211	58,62
		2	1,2036	21,42			58,44
		3	1,3052	23,29			58,59
17,19	1	1	1,1388	20,78	6,30109	0,5376	61,81
		2	1,0633	19,39			61,77
		3	0,235	4,3			61,98
	2	1	1,0047	19,45		0,5188	63,28
		2	1,0371	20,15			63,51
		3	1,0168	19,75			63,50
	3	1	1,4725	27,78		0,5211	61,95
		2	1,5241	28,76			61,96
		3	1,6322	30,76			61,88

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla IX. **Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Corrida de análisis	Masa (g)	Volumen de NaOH (ml)	Factor	Concentración de NaOH (N)	% Ácido Trioxonítrico (HNO <sub>3</sub> ) (p/p)
22,44	1	1	1,1314	17,9	6,30109	0,5246	52,30
		2	1,0605	16,74			52,18
		3	1,0242	16,2			52,28
	2	1	1,0583	17,29		0,5188	53,41
		2	1,017	16,65			53,52
		3	1,0102	16,44			53,20
	3	1	1,4125	23,08		0,5211	53,65
		2	1,3212	21,55			53,56
		3	1,3412	21,93			53,69
19,79	1	1	1,0728	18,6	6,30109	0,5246	57,31
		2	1,0389	18			57,27
		3	1,0869	18,85			57,33
	2	1	1,0366	18,38		0,5188	57,96
		2	1,0584	18,72			57,82
		3	1,067	18,9			57,90
	3	1	1,0869	18,9		0,5211	57,10
		2	1,102	19,14			57,03
		3	1,302	22,58			56,94
17,43	1	1	1,014	18,85	6,30109	0,5246	61,45
		2	1,0094	18,74			61,37
		3	1,0159	18,9			61,50
	2	1	1,0402	19,9		0,5188	62,54
		2	1,0242	19,62			62,62
		3	1,0202	19,53			62,58
	3	1	1,0705	20,11		0,5211	61,68
		2	1,201	22,6			61,79
		3	1,303	24,54			61,84

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S.A.

Tabla X. **Datos originales para determinar la concentración del ácido nítrico recuperado a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Corrida de análisis	Masa (g)	Volumen de NaOH (ml)	Factor	Concentración de NaOH (N)	% Ácido Trioxonítrico (HNO <sub>3</sub> ) (p/p)
22,23	1	1	1,1293	18,3	6,30109	0,5246	53,57
		2	1,1073	17,9			53,44
		3	1,0971	17,74			53,45
	2	1	1,0206	16,9		0,5188	54,13
		2	1,0577	17,55			54,24
		3	1,0536	17,5			54,30
	3	1	1,2152	20,15		0,5211	54,45
		2	1,2336	20,42			54,35
		3	1,3103	21,7			54,38
19,56	1	1	1,0535	18,4	6,30109	0,5246	57,73
		2	1,0562	18,4			57,59
		3	1,0329	18			57,60
	2	1	1,0809	19,5		0,5188	58,97
		2	1,0461	18,85			58,91
		3	1,0561	19,04			58,94
	3	1	1,1112	20,02		0,5211	59,16
		2	1,2031	21,62			59,01
		3	1,3021	23,39			58,98
17,19	1	1	1,0142	19,06	6,30109	0,5246	62,12
		2	1,1735	22,05			62,11
		3	1,0065	18,88			62,01
	2	1	1,1238	21,58		0,5188	62,77
		2	1,0689	20,5			62,69
		3	1,1518	22,1			62,72
	3	1	1,4021	26,75		0,5211	62,64
		2	1,302	24,82			62,59
		3	1,208	23,03			62,60

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

### 3.5.2. Datos originales para determinar la concentración del bisulfato de amonio recuperado

Se presentan los datos ordenados de volumen de hidróxido de sodio utilizados para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal y nitrógeno total. Esto para calcular la concentración de nitrato de amonio y por diferencia estimar la concentración del bisulfato de amonio recuperado.

Tabla XI. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

T <sub>final</sub> (°C)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N amoniacal (p/p).
135	1	9,2493	1	18,39	10,65
			2	18,37	10,69
			3	18,39	10,65
	2	9,4826	1	18,19	10,70
			2	18,21	10,67
			3	18,2	10,68
	3	9,3257	1	18,35	10,63
			2	18,33	10,66
			3	18,29	10,72
140	1	9,5289	1	18,17	10,68
			2	18,16	10,69
			3	18,19	10,65
	2	9,4323	1	18,25	10,66
			2	18,24	10,68
			3	18,22	10,71
	3	9,3985	1	18,26	10,69
			2	18,29	10,64
			3	18,23	10,73
145	1	9,6208	1	18,01	10,82
			2	17,99	10,85
			3	17,98	10,86
	2	9,5429	1	18,06	10,83
			2	18,04	10,86
			3	18,03	10,88
	3	9,3718	1	18,18	10,84
			2	18,16	10,87
			3	18,15	10,89
150	1	9,5814	1	18,13	10,68
			2	18,12	10,70
			3	18,14	10,67
	2	9,4769	1	18,19	10,71
			2	18,2	10,69
			3	18,22	10,66
	3	9,2785	1	18,36	10,67
			2	18,34	10,70
			3	18,32	10,73
<b>DATOS CONSTANTES</b>					
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)			25,14		
Volumen de aforo (ml)			1 000		
Concentración NaOH (N)			0,5211		
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>			1,4007		
Volumen de alícuota (ml)			50		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XII. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N amoniacal (p/p)
22,23	1	9,0125	1	18,74	10,37
			2	18,72	10,40
			3	18,71	10,42
	2	9,6622	1	18,29	10,35
			2	18,27	10,38
			3	18,27	10,38
	3	9,3507	1	18,5	10,37
			2	18,48	10,40
			3	18,49	10,38
20,24	1	9,2412	1	18,64	10,27
			2	18,65	10,25
			3	18,68	10,20
	2	9,6908	1	18,32	10,27
			2	18,33	10,26
			3	18,32	10,27
	3	9,8017	1	18,22	10,31
			2	18,24	10,28
			3	18,23	10,29
18,63	1	9,9158	1	18,02	10,48
			2	18,03	10,47
			3	18,03	10,47
	2	9,6222	1	18,27	10,42
			2	18,25	10,45
			3	18,24	10,47
	3	9,765	1	18,13	10,48
			2	18,15	10,45
			3	18,12	10,49
<b>DATOS CONSTANTES</b>					
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)				25,14	
Volumen de aforo (ml)				1 000	
Concentración NaOH (N)				0,5211	
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>				1,4007	
Volumen de alícuota (ml)				50	

Fuente: datos experimentales recabados en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XIII. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	No. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N amoniacal (p/p)
22,23	1	9,2137	1	18,44	10,62
			2	18,45	10,60
			3	18,44	10,62
	2	9,4161	1	18,34	10,54
			2	18,31	10,59
			3	18,29	10,62
	3	9,109	1	18,53	10,59
			2	18,56	10,55
			3	18,54	10,58
19,56	1	9,8412	1	18	10,59
			2	17,98	10,62
			3	17,98	10,62
	2	9,4403	1	18,3	10,58
			2	18,28	10,61
			3	18,3	10,58
	3	9,3615	1	18,34	10,60
			2	18,35	10,59
			3	18,33	10,62
17,19	1	9,6363	1	18,22	10,48
			2	18,24	10,45
			3	18,2	10,51
	2	9,7696	1	18,16	10,43
			2	18,11	10,50
			3	18,1	10,52
	3	9,1483	1	18,57	10,48
			2	18,54	10,53
			3	18,55	10,52
<b>DATOS CONSTANTES</b>					
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)				25,14	
Volumen de aforo (ml)				1 000	
Concentración NaOH (N)				0,5211	
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>				1,4007	
Volumen de alícuota (ml)				50	

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XIV. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N amoniacal (p/p)
22,44	1	9,9527	1	17,88	10,65
			2	17,88	10,65
			3	17,9	10,62
	2	9,4309	1	18,26	10,65
			2	18,27	10,63
			3	18,27	10,63
	3	9,2128	1	18,41	10,66
			2	18,44	10,62
			3	18,38	10,71
19,79	1	9,3625	1	18,38	10,54
			2	18,38	10,54
			3	18,39	10,52
	2	9,4007	1	18,36	10,53
			2	18,35	10,54
			3	18,33	10,58
	3	9,9642	1	17,95	10,53
			2	17,95	10,53
			3	17,93	10,56
17,43	1	9,5557	1	18,35	10,37
			2	18,36	10,36
			3	18,37	10,34
	2	9,4584	1	18,4	10,40
			2	18,42	10,37
			3	18,4	10,40
	3	9,1479	1	18,67	10,32
			2	18,65	10,36
			3	18,65	10,36
<b>DATOS CONSTANTES</b>					
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)			25,14		
Volumen de aforo (ml)			1 000		
Concentración NaOH (N)			0,5211		
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>			1,4007		
Volumen de alícuota (ml)			50		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XV. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N amoniacal (p/p)
22,23	1	9,8989	1	18,03	10,49
			2	18	10,53
			3	18,02	10,50
	2	9,5117	1	18,26	10,56
			2	18,28	10,53
			3	18,26	10,56
	3	9,5776	1	18,22	10,55
			2	18,22	10,55
			3	18,23	10,53
19,56	1	9,2507	1	18,48	10,51
			2	18,47	10,53
			3	18,46	10,54
	2	9,4157	1	18,38	10,48
			2	18,37	10,50
			3	18,38	10,48
	3	9,7784	1	18,08	10,54
			2	18,1	10,51
			3	18,1	10,51
17,19	1	9,3059	1	18,43	10,53
			2	18,44	10,51
			3	18,45	10,49
	2	9,4887	1	18,31	10,51
			2	18,31	10,51
			3	18,32	10,49
	3	9,8045	1	18,1	10,48
			2	18,08	10,51
			3	18,06	10,54
<b>DATOS CONSTANTES</b>					
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)				25,14	
Volumen de aforo (ml)				1 000	
Concentración NaOH (N)				0,5211	
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>				1,4007	
Volumen de alícuota (ml)				50	

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XVI. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

T <sub>final</sub> (°C)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N Total (p/p)	% N Nítrico (p/p)	% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (p/p)
135	1	9,2493	1	17,65	11,90	1,25	7,13
			2	17,64	11,92	1,23	7,03
			3	17,62	11,95	1,29	7,40
	2	9,4826	1	17,43	11,95	1,25	7,13
			2	17,45	11,92	1,25	7,13
			3	17,44	11,93	1,25	7,13
	3	9,3257	1	17,61	11,87	1,24	7,07
			2	17,58	11,91	1,25	7,16
			3	17,52	12,01	1,28	7,34
140	1	9,5289	1	17,29	12,10	1,42	8,14
			2	17,31	12,07	1,38	7,88
			3	17,28	12,12	1,47	8,40
	2	9,4323	1	17,39	12,07	1,41	8,05
			2	17,37	12,10	1,42	8,14
			3	17,37	12,10	1,39	7,96
	3	9,3985	1	17,4	12,10	1,41	8,08
			2	17,41	12,08	1,44	8,25
			3	17,39	12,12	1,38	7,90
145	1	9,6208	1	17,28	12,00	1,18	6,76
			2	17,26	12,03	1,18	6,76
			3	17,24	12,06	1,20	6,85
	2	9,5429	1	17,34	12,01	1,18	6,73
			2	17,32	12,04	1,18	6,73
			3	17,31	12,05	1,18	6,73
	3	9,3718	1	17,46	12,04	1,20	6,85
			2	17,45	12,06	1,18	6,76
			3	17,44	12,07	1,18	6,76
150	1	9,5814	1	17,21	12,16	1,48	8,45
			2	17,18	12,20	1,51	8,62
			3	17,23	12,13	1,46	8,36
	2	9,4769	1	17,26	12,22	1,51	8,63
			2	17,27	12,20	1,51	8,63
			3	17,29	12,17	1,51	8,63
	3	9,2785	1	17,4	12,26	1,59	9,08
			2	17,42	12,22	1,53	8,72
			3	17,41	12,24	1,51	8,63
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)				25,19			
Volumen de aforo (ml)				1 000			
Concentración NaOH (N)				0,5211			
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>				1,4007			
Volumen de alícuota (ml)				50			

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XVII. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N Total (p/p)	% N Nítrico (p/p)	% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (p/p)
22,23	1	9,0125	1	17,75	12,05	1,68	9,63
			2	17,73	12,08	1,68	9,63
			3	17,74	12,07	1,65	9,44
	2	9,6622	1	17,22	12,04	1,69	9,67
			2	17,2	12,07	1,69	9,67
			3	17,2	12,07	1,69	9,67
	3	9,3507	1	17,48	12,04	1,67	9,55
			2	17,46	12,07	1,67	9,55
			3	17,45	12,08	1,70	9,72
20,24	1	9,2412	1	17,51	12,13	1,86	10,65
			2	17,53	12,10	1,85	10,56
			3	17,57	12,04	1,83	10,47
	2	9,6908	1	17,15	12,11	1,84	10,50
			2	17,16	12,10	1,84	10,50
			3	17,14	12,13	1,85	10,59
	3	9,8017	1	17,04	12,14	1,83	10,47
			2	17,06	12,11	1,83	10,47
			3	17,04	12,14	1,85	10,55
18,63	1	9,9158	1	16,85	12,28	1,80	10,26
			2	16,85	12,28	1,81	10,35
			3	16,88	12,23	1,77	10,10
	2	9,6222	1	17,12	12,24	1,82	10,40
			2	17,1	12,27	1,82	10,40
			3	17,06	12,33	1,87	10,66
	3	9,765	1	16,95	12,32	1,84	10,51
			2	16,97	12,29	1,84	10,51
			3	16,94	12,33	1,84	10,51
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)					25,19		
Volumen de aforo (ml)					1 000		
Concentración NaOH (N)					0,5211		
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>					1,4007		
Volumen de alícuota (ml)					50		

Fuente: datos experimentales recabados en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XVIII. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N Total (p/p)	% N Nitrato (p/p)	% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>
22,23	1	9,2137	1	17,54	12,12	1,51	8,60
			2	17,56	12,09	1,49	8,51
			3	17,54	12,12	1,51	8,60
	2	9,4161	1	17,43	12,03	1,49	8,50
			2	17,4	12,08	1,49	8,50
			3	17,38	12,11	1,49	8,50
	3	9,109	1	17,62	12,13	1,54	8,79
			2	17,66	12,07	1,52	8,70
			3	17,64	12,10	1,52	8,70
19,56	1	9,8412	1	16,82	12,42	1,82	10,43
			2	16,8	12,45	1,82	10,43
			3	16,81	12,43	1,81	10,34
	2	9,4403	1	17,18	12,39	1,81	10,34
			2	17,16	12,42	1,81	10,34
			3	17,17	12,40	1,82	10,43
	3	9,3615	1	17,25	12,38	1,78	10,16
			2	17,23	12,41	1,82	10,43
			3	17,22	12,43	1,81	10,34
17,19	1	9,6363	1	17,06	12,32	1,83	10,47
			2	17,08	12,29	1,83	10,47
			3	17,11	12,24	1,73	9,87
	2	9,7696	1	17,01	12,22	1,79	10,25
			2	16,97	12,28	1,78	10,16
			3	16,96	12,30	1,78	10,16
	3	9,1483	1	17,49	12,29	1,80	10,30
			2	17,47	12,32	1,79	10,21
			3	17,5	12,27	1,76	10,03
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)						25,19	
Volumen de aforo (ml)						1 000	
Concentración NaOH (N)						0,5211	
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>						1,4007	
Volumen de alícuota (ml)						50	

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XIX. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

% H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N Total (p/p)	% N Nítrico (p/p)	% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (p/p)
22,44	1	9,9527	1	17,04	11,95	1,31	7,46
			2	17,05	11,94	1,29	7,38
			3	17,08	11,90	1,28	7,29
	2	9,4309	1	17,45	11,98	1,33	7,61
			2	17,47	11,95	1,32	7,52
			3	17,47	11,95	1,32	7,52
	3	9,2128	1	17,61	12,01	1,35	7,70
			2	17,64	11,96	1,35	7,70
			3	17,6	12,03	1,32	7,52
19,79	1	9,3625	1	17,33	12,26	1,72	9,80
			2	17,34	12,24	1,70	9,71
			3	17,36	12,21	1,68	9,62
	2	9,4007	1	17,31	12,24	1,71	9,76
			2	17,31	12,24	1,69	9,67
			3	17,29	12,27	1,69	9,67
	3	9,9642	1	16,83	12,25	1,71	9,80
			2	16,84	12,23	1,70	9,71
			3	16,83	12,25	1,68	9,63
17,43	1	9,5557	1	17,15	12,28	1,91	10,91
			2	17,16	12,27	1,91	10,91
			3	17,18	12,24	1,89	10,83
	2	9,4584	1	17,22	12,30	1,90	10,85
			2	17,24	12,27	1,90	10,85
			3	17,22	12,30	1,90	10,85
	3	9,1479	1	17,53	12,22	1,90	10,85
			2	17,51	12,26	1,90	10,85
			3	17,51	12,26	1,90	10,85
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)					25,19		
Volumen de aforo (ml)					1 000		
Concentración NaOH (N)					0,5211		
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>					1,4007		
Volumen de alícuota (ml)					50		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XX. **Datos originales para determinar la concentración de nitrógeno total y nitrato de amonio en el bisulfato de amonio recuperado a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

% H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Núm. Corrida	Masa muestra (g)	Corrida de titulación	Volumen de NaOH (ml)	% N Total (p/p)	% N Nítrico (p/p)	% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (p/p)
22,23	1	9,8989	1	16,91	12,21	1,73	9,86
			2	16,88	12,25	1,73	9,86
			3	16,9	12,23	1,73	9,86
	2	9,5117	1	17,19	12,28	1,72	9,82
			2	17,21	12,25	1,72	9,82
			3	17,19	12,28	1,72	9,82
	3	9,5776	1	17,15	12,25	1,71	9,76
			2	17,14	12,27	1,72	9,84
			3	17,16	12,24	1,71	9,76
19,56	1	9,2507	1	17,44	12,23	1,72	9,83
			2	17,42	12,26	1,74	9,92
			3	17,41	12,28	1,74	9,92
	2	9,4157	1	17,32	12,20	1,72	9,83
			2	17,3	12,23	1,74	9,92
			3	17,31	12,22	1,74	9,92
	3	9,7784	1	16,98	12,26	1,72	9,81
			2	16,99	12,24	1,73	9,90
			3	17	12,23	1,72	9,81
17,19	1	9,3059	1	17,38	12,25	1,73	9,86
			2	17,39	12,24	1,73	9,86
			3	17,41	12,20	1,71	9,77
	2	9,4887	1	17,26	12,20	1,69	9,67
			2	17,25	12,22	1,71	9,76
			3	17,25	12,22	1,72	9,85
	3	9,8045	1	17	12,19	1,71	9,78
			2	16,98	12,22	1,71	9,78
			3	16,96	12,25	1,71	9,78
DATOS CONSTANTES							
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)				25,19			
Volumen de aforo (ml)				1 000			
Concentración NaOH (N)				0,5211			
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>				1,4007			
Volumen de alícuota (ml)				50			

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

### 3.5.3. Datos originales para determinar la concentración del nitrato de amonio utilizado en la experimentación

Se presentan los datos ordenados de volumen de hidróxido de sodio utilizado para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal y nitrógeno total. Esto para calcular individualmente la concentración de nitrato de amonio.

Tabla XXI. **Datos originales para determinar la concentración del nitrato de amonio usado en la experimentación con base en el contenido de nitrógeno amoniacal**

Núm. Corrida	Masa muestra (g)	V NaOH (ml)	%N Amoniacal (p/p)	% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (p/p)
1	10,1349	13,42	16,88	96,47
2		13,43	16,87	96,39
3		13,38	16,94	96,80
<b>DATOS CONSTANTES</b>				
Volumen de NaOH gastado en blanco (ml)			25,14	
Volumen de aforo (ml)			500	
Concentración NaOH (N)			0,5211	
Factor de conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>			1,4007	
Volumen de alícuota (ml)			25	

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXII. **Datos originales para determinar la concentración del nitrato de amonio usado en la experimentación con base al contenido de nitrógeno total**

Núm. Análisis	Masa muestra (g)	Volumen de NaOH (ml)	%N total (p/p)	% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (p/p)
1	10,1349	15,8	33,81	96,61
2		15,79	33,85	96,71
3		15,76	33,96	97,02
<b>DATOS CONSTANTES</b>				
Volumen de NaOH gastado en Blanco (ml)		25,19		
Volumen de aforo (ml)		500		
Concentración NaOH (N)		0,5211		
Factor de Conversión de N a NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		1,4007		
Volumen de alícuota (ml)		10		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

### 3.5.4. Datos originales de los insumos utilizados en la experimentación

Se presentan los datos ordenados de las masas y concentraciones de los insumos utilizados en la experimentación.

Tabla XXIII. **Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

Insumos agregados (g)	T <sub>final</sub> Reacción (°C)			
	135	140	145	150
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	130	130	130	130
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	154,73	154,73	154,73	154,73
H <sub>2</sub> O	235	235	235	235
DATOS CONSTANTES				
Concentración H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%p/p)	97,8			
Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (%p/p)	96,67			
Concentración inicial H <sub>2</sub> O (%p/p)	45,87			

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXIV. **Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Insumos agregados (g)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
	18,63	20,24	22,23
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	130	130	130
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	154,73	154,73	154,73
H <sub>2</sub> O	61	68	77
DATOS CONSTANTES			
Concentración H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%p/p)	97,8		
Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (%p/p)	96,67		
Temperatura final de reacción (°C)	135		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXV. **Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Insumos agregados (g)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
		17,19	19,56
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	130	130	130
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	154,73	154,73	154,73
H <sub>2</sub> O	55	65	77
DATOS CONSTANTES			
Concentración H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%p/p)	97,8		
Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (%p/p)	96,67		
Temperatura final de reacción (°C)	140		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXVI. **Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Insumos agregados (g)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
		17,43	19,79
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	130	130	130
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	154,73	154,73	154,73
H <sub>2</sub> O	56	66	78
DATOS CONSTANTES			
Concentración H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%p/p)	97,8		
Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (%p/p)	96,67		
Temperatura final de reacción (°C)	145		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

Tabla XXVII. **Datos originales de los insumos utilizados para condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Insumos agregados (g)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
	17,19	19,56	22,23
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	130	130	130
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	154,73	154,73	154,73
H <sub>2</sub> O	55	65	77
<b>DATOS CONSTANTES</b>			
Concentración H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%p/p)	97,8		
Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (%p/p)	96,67		
Temperatura final de reacción (°C)	150		

Fuente: elaboración propia, empleando el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S. A.

### 3.6. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se tabularon, ordenaron y procesaron los datos de masa, concentración y porcentaje de recuperación del ácido nítrico recuperado por evaporación y condensación y del bisulfato de amonio recuperado en forma de cristales. El porcentaje de conversión de la reacción a diferentes condiciones de temperatura final de reacción y concentración inicial de agua, masas de los productos teóricos esperados y temperaturas finales de reacción, concentraciones iniciales de agua y el porcentaje de recuperación de ácido nítrico para comprobación de las hipótesis.

#### 3.6.1. Porcentaje de recuperación de ácido nítrico

Se procesaron los datos de masa y concentración del ácido nítrico recuperado por evaporación y condensación para determinar el porcentaje de recuperación.

Tabla XXVIII. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	Corrida	HNO <sub>3</sub> solución (g)	Concentración promedio de titulaciones HNO <sub>3</sub> (% p/p)	HNO <sub>3</sub> al 100% recuperado (g)	Promedio HNO <sub>3</sub> al 100% (g)	Porcentaje de recuperación (p/p)
135	1	264,53	22,29	58,96	59,08	60,77
	2	265,18	22,37	59,31		
	3	264,83	22,27	58,97		
140	1	283,63	24,22	68,71	69,46	71,45
	2	286,83	24,52	70,34		
	3	285,25	24,31	69,33		
145	1	300,83	26,33	79,21	77,73	79,95
	2	295,52	25,78	76,18		
	3	298,14	26,09	77,79		
150	1	306,68	26,73	81,97	80,44	82,74
	2	299,92	26,49	79,45		
	3	301,08	26,54	79,91		
DATOS CONSTANTES						
HNO <sub>3</sub> 100 % teórico(g)				97,22		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla I, VI y LVIII.

Tabla XXIX. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
135	60,77	0,0277	0,17	3
140	71,45	0,4791	0,69	3
145	79,95	1,6223	1,27	3
150	82,74	1,2672	1,13	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla I, VI y LVIII.

Tabla XXX. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	HNO <sub>3</sub> solución (g)	Concentración promedio de titulaciones HNO <sub>3</sub> (% p/p)	HNO <sub>3</sub> al 100% recuperado (g)	Promedio HNO <sub>3</sub> al 100% recuperado (g)	Porcentaje de recuperación
22,23	1	102,88	49,54	50,97	53,68	55,22
	2	108,9	51,52	56,10		
	3	106,55	50,66	53,98		
20,24	1	92,81	54,45	50,54	52,97	54,48
	2	98,97	55,75	55,17		
	3	97,25	54,69	53,19		
18,63	1	84,78	58,73	49,79	51,98	53,47
	2	90,85	59,32	53,89		
	3	88,52	59,05	52,27		
DATOS CONSTANTES						
HNO <sub>3</sub> 100 % teórico(g)				97,22		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla II, VII y LIX.

Tabla XXXI. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	55,22	4,6919	2,17	3
20,24	54,48	3,8152	1,95	3
18,63	53,47	3,0117	1,74	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla II, VII y LIX.

Tabla XXXII. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	HNO <sub>3</sub> solución (g)	Concentración promedio de titulaciones HNO <sub>3</sub> (% p/p)	HNO <sub>3</sub> al 100% recuperado (g)	Promedio HNO <sub>3</sub> al 100% recuperado (g)	Porcentaje de recuperación
22,23	1	125,63	52,31	65,72	66,71	68,61
	2	128,31	52,72	67,65		
	3	127,36	52,41	66,75		
19,56	1	113,75	57,14	65,00	66,29	68,19
	2	114,35	58,60	67,01		
	3	114,22	58,55	66,88		
17,19	1	103,84	61,86	64,23	66,05	67,94
	2	108,35	63,43	68,73		
	3	105,25	61,93	65,18		
DATOS CONSTANTES						
HNO <sub>3</sub> 100 % teórico(g)				97,22		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla III, VIII y LX.

Tabla XXXIII. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	68,61	0,6600	0,81	3
19,56	68,19	0,8900	0,94	3
17,19	67,94	3,9630	1,99	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla III, VIII, LX.

Tabla XXXIV. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	HNO <sub>3</sub> solución (g)	Concentración promedio de titulaciones HNO <sub>3</sub> (% p/p)	HNO <sub>3</sub> al 100 % recuperado (g)	Promedio HNO <sub>3</sub> al 100 % recuperado (g)	Porcentaje de recuperación
22,44	1	142,63	52,25	74,53	75,47	77,63
	2	141,65	53,38	75,61		
	3	142,21	53,63	76,27		
19,79	1	129,88	57,30	74,43	74,23	76,36
	2	130,03	57,90	75,28		
	3	128,01	57,02	73,00		
17,43	1	118,9	61,44	73,05	74,07	76,19
	2	120,74	62,58	75,56		
	3	119,15	61,77	73,60		
<b>DATOS CONSTANTES</b>						
HNO <sub>3</sub> 100 % teórico(g)				97,22		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla IV, IX y LXI.

Tabla XXXV. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,44	77,63	0,5449	0,74	3
19,79	76,36	0,9410	0,97	3
17,43	76,19	1,2274	1,11	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla IV, IX y LXI.

Tabla XXXVI. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	HNO <sub>3</sub> solución (g)	Concentración promedio de corridas HNO <sub>3</sub> (% p/p)	HNO <sub>3</sub> al 100 % recuperado (g)	Promedio HNO <sub>3</sub> al 100 % recuperado (g)	Porcentaje de recuperación
22,23	1	149,82	53,48	80,13	80,84	83,15
	2	149,13	54,22	80,86		
	3	149,88	54,39	81,52		
19,56	1	137,72	57,64	79,38	80,14	82,43
	2	136,12	58,94	80,23		
	3	136,85	59,05	80,81		
17,19	1	126,94	62,08	78,80	79,41	81,68
	2	127,12	62,73	79,74		
	3	127,27	62,61	79,69		
<b>DATOS CONSTANTES</b>						
HNO <sub>3</sub> 100 % teórico(g)				97,22		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla V, X y LXII.

Tabla XXXVII. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	83,15	0,3426	0,59	3
19,56	82,43	0,3616	0,60	3
17,19	81,68	0,1957	0,44	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla V, X y LXII.

### 3.6.2. Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio

Se procesaron los datos de masa y concentración del bisulfato de amonio recuperado en forma de cristales para determinar el porcentaje de recuperación.

Tabla XXXVIII. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

T <sub>final</sub> (°C)	Corrida	Cristales Obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	Concentración NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Promedio NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>
135	1	84,3	7,19	92,81	78,24	79,70	44,88
	2	86,1	7,13	92,87	79,96		
	3	87,15	7,19	92,81	80,89		
140	1	119,86	8,14	91,86	110,10	111,48	62,77
	2	122,11	8,05	91,95	112,28		
	3	121,89	8,08	91,92	112,04		
145	1	131,46	6,79	93,21	122,53	121,38	68,35
	2	128,69	6,73	93,27	120,03		
	3	130,46	6,79	93,21	121,60		
150	1	151,99	8,47	91,53	139,11	136,68	76,96
	2	147,82	8,63	91,37	135,07		
	3	148,99	8,81	91,19	135,86		
DATOS CONSTANTES							
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % teórico (g)					177,6		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla I, XVI y LVIII.

Tabla XXXIX. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

T <sub>final</sub> (°C)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
135	44,88	0,3808	0,6171	3
140	62,77	0,3026	0,5501	3
145	68,35	0,3382	0,5815	3
150	76,96	0,9691	0,9844	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla I, XVI y LVIII.

Tabla XL. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales Obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	Concentración NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Promedio NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> (p/p)
22,23	1	98,85	9,56	90,44	89,40	91,40	51,47
	2	103,64	9,67	90,33	93,62		
	3	100,89	9,61	90,39	91,20		
20,24	1	99,58	10,56	89,44	89,06	93,41	52,59
	2	107,4	10,53	89,47	96,09		
	3	106,22	10,50	89,50	95,07		
18,63	1	103,28	10,24	89,76	92,71	95,54	53,80
	2	109,67	10,49	89,51	98,17		
	3	106,99	10,51	89,49	95,75		
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % teórico (g)					177,6		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla II, XVII y LIX.

Tabla XLI. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	51,47	0,9490	0,9741	3
20,24	52,59	3,0476	1,7457	3
18,63	53,80	1,5802	1,2571	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla II, XVII y LIX.

Tabla XLII. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales Obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	Concentración NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Promedio NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>
22,23	1	130,25	8,57	91,43	119,09	120,26	67,71
	2	132,92	8,50	91,50	121,62		
	3	131,55	8,73	91,27	120,06		
19,56	1	132,15	10,40	89,60	118,41	118,06	66,47
	2	129,76	10,37	89,63	116,31		
	3	133,18	10,31	89,69	119,45		
17,19	1	136,25	10,27	89,73	122,25	126,12	71,01
	2	143,29	10,19	89,81	128,69		
	3	141,87	10,18	89,82	127,42		
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % teórico					177,6		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla III, XVIII y LX.

Tabla XLIII. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	67,71	0,3437	0,5863	3
19,56	66,47	0,5430	0,7369	3
17,19	71,01	2,4575	1,5676	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla III, XVIII y LX.

Tabla XLIV. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales Obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	Concentración NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Promedio NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>
22,44	1	153,12	7,38	92,62	141,83	140,16	78,92
	2	150,56	7,55	92,45	139,20		
	3	150,98	7,64	92,36	139,45		
19,79	1	160,15	9,71	90,29	144,60	144,55	81,39
	2	159,78	9,70	90,30	144,28		
	3	160,36	9,71	90,29	144,79		
17,43	1	163,01	10,88	89,12	145,27	147,12	82,84
	2	165,98	10,85	89,15	147,97		
	3	166,15	10,85	89,15	148,12		
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % teórico				177,6			

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla IV, XIX y LXI.

Tabla XLV. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,44	78,92	0,4448	0,6669	3
19,79	81,39	0,0140	0,1181	3
17,43	82,84	0,5448	0,7381	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla IV, XIX y LXI.

Tabla XLVI. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales Obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	Concentración NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Promedio NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % recuperado (g)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>
22,23	1	164,15	9,86	90,14	147,97	148,78	83,77
	2	164,93	9,82	90,18	148,73		
	3	165,88	9,78	90,22	149,65		
19,56	1	165,21	9,89	90,11	148,87	149,77	84,33
	2	166,55	9,89	90,11	150,07		
	3	166,79	9,84	90,16	150,38		
17,19	1	166,36	9,83	90,17	150,01	149,62	84,25
	2	165,98	9,76	90,24	149,78		
	3	165,25	9,78	90,22	149,08		
<b>DATOS CONSTANTES</b>							
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> al 100 % teórico				177,6			

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla V, XX, y LXII.

Tabla XLVII. **Análisis estadístico del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	83,77	0,1505	0,3879	3
19,56	84,33	0,1342	0,3663	3
17,19	84,25	0,0492	0,2218	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla V, XX y LXII.

### **3.6.3. Porcentaje de conversión de la reacción con base en el contenido de nitrato de amonio**

Se tabularon, ordenaron y procesaron los datos de los cristales de bisulfato de amonio recuperado, concentración de nitrato de amonio en el bisulfato de amonio y se determinó el porcentaje de conversión de la reacción.

Tabla XLVIII. **Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	Corrida	Cristales obtenidos (g)	Concentración $\text{NH}_4\text{NO}_3$ promedio de cada corrida (% p/p)	$\text{NH}_4\text{NO}_3$ en cristales (g)	$\text{NH}_4\text{NO}_3$ promedio (g)	Porcentaje de conversión
135	1	84,3	7,19	6,06	6,15	96,83
	2	86,1	7,13	6,14		
	3	87,15	7,19	6,26		
140	1	119,86	8,14	9,76	9,81	93,92
	2	122,11	8,05	9,83		
	3	121,89	8,08	9,85		
145	1	131,46	6,79	8,93	8,82	94,71
	2	128,69	6,73	8,66		
	3	130,46	6,79	8,86		
150	1	151,99	8,47	12,88	12,92	91,45
	2	147,82	8,63	12,75		
	3	148,99	8,81	13,13		
<b>DATOS CONSTANTES</b>						
$\text{NH}_4\text{NO}_3$ al 100 % estequiométrico (g)				125,67		
$\text{NH}_4\text{NO}_3$ al 100 % en exceso (g)				2,17		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla I, XVI, LVIII

Tabla XLIX. **Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
135	96,83	0,0045	0,0674	3
140	93,92	0,0009	0,0297	3
145	94,71	0,0082	0,0904	3
150	91,45	0,0154	0,1241	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla I, XVI y LVIII

Tabla L. **Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> en cristales (g)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio (g)	Porcentaje de conversión
22,23	1	98,85	9,56	9,45	9,72	93,99
	2	103,64	9,67	10,02		
	3	100,89	9,61	9,69		
20,24	1	99,58	10,56	10,52	10,99	92,98
	2	107,4	10,53	11,31		
	3	106,22	10,50	11,15		
18,63	1	103,28	10,24	10,57	11,11	92,89
	2	109,67	10,49	11,50		
	3	106,99	10,51	11,24		
<b>DATOS CONSTANTES</b>						
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100 % estequiometrico (g)				125,67		
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100 % en exceso (g)				2,17		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla II, XVII y LIX.

Tabla LI. **Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	93,99	0,0343	0,1851	3
20,24	92,98	0,0742	0,2723	3
18,63	92,89	0,0978	0,3127	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla II, XVII y LIX.

Tabla LII. **Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> en cristales (g)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio (g)	Porcentaje de conversión
22,23	1	130,25	8,57	11,16	11,32	92,72
	2	132,92	8,50	11,30		
	3	131,55	8,73	11,49		
19,56	1	132,15	10,40	13,74	13,64	90,87
	2	129,76	10,37	13,45		
	3	133,18	10,31	13,73		
17,19	1	136,25	10,27	14,00	14,35	90,31
	2	143,29	10,19	14,60		
	3	141,87	10,18	14,45		
<b>DATOS CONSTANTES</b>						
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100 % estequiométrico (g)				125,67		
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100 % en exceso (g)				2,17		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla III, XVIII y LX

Tabla LIII. **Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	92,72	0,0110	0,1046	3
19,56	90,87	0,0111	0,1051	3
17,19	90,31	0,0415	0,2038	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla III, XVIII y LX.

Tabla LIV. **Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> en cristales (g)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio (g)	Porcentaje de conversión
22,44	1	153,12	7,38	11,29	11,40	92,66
	2	150,56	7,55	11,36		
	3	150,98	7,64	11,53		
19,79	1	160,15	9,71	15,55	15,54	89,36
	2	159,78	9,70	15,50		
	3	160,36	9,71	15,57		
17,43	1	163,01	10,88	17,74	17,93	87,46
	2	165,98	10,85	18,01		
	3	166,15	10,85	18,03		
<b>DATOS CONSTANTES</b>						
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100 % estequiometrico (g)				125,67		
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100 % en exceso (g)				2,17		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla IV, XIX y LXI.

Tabla LV. **Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,44	92,66	0,0062	0,0784	3
19,79	89,36	0,0006	0,0240	3
17,43	87,46	0,0109	0,1043	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla IV, XIX y LIX

Tabla LVI. **Porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Corrida	Cristales obtenidos (g)	Concentración NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio de cada corrida (% p/p)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> en cristales (g)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> promedio (g)	Porcentaje de conversión
22,23	1	164,15	9,86	16,18	16,21	88,83
	2	164,93	9,82	16,20		
	3	165,88	9,78	16,23		
19,56	1	165,21	9,89	16,34	16,41	88,67
	2	166,55	9,89	16,48		
	3	166,79	9,84	16,41		
17,19	1	166,36	9,83	16,35	16,24	88,80
	2	165,98	9,76	16,20		
	3	165,25	9,78	16,17		
<b>DATOS CONSTANTES</b>						
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100% estequiométrico (g)				125,67		
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> al 100% en exceso (g)				2,17		

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla V, XX y LXII.

Tabla LVII. **Análisis estadístico del porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Media	Varianza	Desviación estándar	Número de medias
22,23	88,83	0,0002	0,0148	3
19,56	88,67	0,0020	0,0452	3
17,19	88,80	0,0042	0,0649	3

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección, tabulación y ordenamiento de la información, tabla V, XX y LXII.

### 3.6.4. Productos teóricos de reacción

Se tabularon, ordenaron y procesaron los datos de las masas de los productos teóricos de reacción con base a los insumos agregados, estos abarcan lo recuperado y lo que permanece dentro del medio de reacción.

Tabla LVIII. **Productos teóricos de reacción a condiciones de concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

Producto teóricos esperados (g)	T <sub>final</sub> Reacción (°C)			
	135	140	145	150
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	177,6	177,6	177,6	177,6
HNO <sub>3</sub>	97,22	97,22	97,22	97,22
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2,17	2,17	2,17	2,17
H <sub>2</sub> O	238,41	238,41	238,41	238,41
Inertes	4,32	4,32	4,32	4,32
Insolubles	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXIII.

Tabla LIX. **Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Producto teóricos esperados (g)	%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)		
	18,63	20,24	22,23
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	177,6	177,6	177,6
HNO <sub>3</sub>	97,22	97,22	97,22
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2,17	2,17	2,17
H <sub>2</sub> O	64,4	71,4	80,4
Inertes	4,32	4,32	4,32
Insolubles	0,0065	0,0065	0,0065

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXIV.

Tabla LX. **Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Producto teóricos esperados (g)	%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)		
	17,19	19,56	22,23
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	177,6	177,6	177,6
HNO <sub>3</sub>	97,22	97,22	97,22
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2,17	2,17	2,17
H <sub>2</sub> O	58,4	68,4	80,4
Inertes	4,32	4,32	4,32
Insolubles	0,0065	0,0065	0,0065

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXV.

Tabla LXI. **Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Producto teóricos esperados (g)	%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)		
	17,43	19,79	22,44
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	177,6	177,6	177,6
HNO <sub>3</sub>	97,22	97,22	97,22
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2,17	2,17	2,17
H <sub>2</sub> O	59,40	69,40	81,40
Inertes	4,32	4,32	4,32
Insolubles	0,0065	0,0065	0,0065

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXVI.

**Tabla LXII. Productos teóricos de reacción a condiciones de temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua**

Producto teóricos esperados (g)	%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)		
	17,19	19,56	22,23
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	177,6	177,6	177,6
HNO <sub>3</sub>	97,22	97,22	97,22
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2,17	2,17	2,17
H <sub>2</sub> O	58,40	68,40	80,40
Inertes	4,32	4,32	4,32
Insolubles	0,0065	0,0065	0,0065

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXVII.

### 3.6.5. Comprobación de hipótesis

Se tabularon, ordenaron y procesaron los datos de temperatura, concentración inicial de agua y porcentaje de recuperación de ácido nítrico para comprobación de las hipótesis mediante la prueba de F de Snedecor-Fisher y prueba de t de student.

**Tabla LXIII. Temperaturas y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a concentración inicial de agua de 45,87 % para comprobación de hipótesis**

Temperatura (°C)	Porcentaje de recuperación HNO <sub>3</sub> (p/p)
135	60,77
140	71,45
145	79,95
150	82,74

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXVIII.

Tabla LXIV. **Prueba de F de Snedecor-Fisher a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

Prueba F para varianzas de dos muestras		
	Variable 1	Variable 2
Media	142,5	73,7275
Varianza	41,6666667	97,6761583
Observaciones	4	4
Grados de libertad	3	3
F	0,4265797	
P(F<=f) una cola	0,25117586	
Valor crítico para F (una cola)	0,10779779	
Referencia:	F<F <sub>c</sub> Iguales	
	F>F <sub>c</sub> Desiguales	
Conclusión:	Desiguales	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXIII.

Tabla LXV. **Prueba de t de Student a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	Variable 1	Variable 2
Media	142,5	73,7275
Varianza	41,6666667	97,67615833
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	11,65205436	
P(T<=t) una cola	4,0887E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2,015048373	
P(T<=t) dos colas	8,17741E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2,570581836	
Referencia:	T<T <sub>c</sub> No difieren significativamente	
	T>T <sub>c</sub> Si difieren significativamente	
Conclusión:	Si difieren significativamente	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXIII

Tabla LXVI. **Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 135 °C para comprobación de hipótesis**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	% Recuperación HNO <sub>3</sub> (p/p)
45,87	60,77
22,23	55,22
20,24	54,48
18,63	53,47

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXVIII y XXX.

Tabla LXVII. **Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba F para varianzas de dos muestras		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,7425	55,985
Varianza	164,773025	10,6905667
Observaciones	4	4
Grados de libertad	3	3
F	15,4129365	
P(F<=f) una cola	0,02505923	
Valor crítico para F (una cola)	9,27662815	
Referencia:	F<F <sub>c</sub> Iguales	
	F>F <sub>c</sub> Desiguales	
Conclusión:	Iguales	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXVI

Tabla LXVIII. **Prueba de *t* de Student a temperatura final de reacción de 135 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,7425	55,985
Varianza	164,773025	10,69056667
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-4,41520616	
P(T<=t) una cola	0,0107816	
Valor crítico de t (una cola)	2,35336343	
P(T<=t) dos colas	0,02156319	
Valor crítico de t (dos colas)	3,18244631	
Referencia:	T<Tc No difieren significativamente	
	T>Tc Si difieren significativamente	
Conclusión:	Si difieren significativamente	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXVI.

Tabla LXIX. **Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 140 °C para comprobación de hipótesis**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	% Recuperación HNO <sub>3</sub> (p/p)
45,87	71,45
22,23	68,61
19,56	68,19
17,19	67,94

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXVIII, XXXII.

Tabla LXX. **Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba F para varianzas de dos muestras		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,2125	69,0475
Varianza	175,979625	2,64175833
Observaciones	4	4
Grados de libertad	3	3
F	66,6145812	
P(F<=f) una cola	0,00303985	
Valor crítico para F (una cola)	9,27662815	
Referencia:	F<F <sub>c</sub> Iguales	
	F>F <sub>c</sub> Desiguales	
Conclusión:	Desiguales	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXIX.

Tabla LXXI. **Prueba de t de Student a temperatura final de reacción de 140 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,2125	69,0475
Varianza	175,979625	2,641758333
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-6,41005923	
P(T<=t) una cola	0,0038464	
Valor crítico de t (una cola)	2,35336343	
P(T<=t) dos colas	0,00769281	
Valor crítico de t (dos colas)	3,18244631	
Referencia:	T<T <sub>c</sub> No difieren significativamente	
	T>T <sub>c</sub> Si difieren significativamente	
Conclusión:	Si difieren significativamente	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXIX

Tabla LXXII. **Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 145 °C para comprobación de hipótesis**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	% Recuperación HNO <sub>3</sub> (p/p)
45,87	79,95
22,44	77,63
19,79	76,36
17,43	76,19

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXVIII, XXXIV.

Tabla LXXIII. **Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba F para varianzas de dos muestras		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,3825	77,5325
Varianza	172,971425	3,01029167
Observaciones	4	4
Grados de libertad	3	3
F	57,4600219	
P(F<=f) una cola	0,0037785	
Valor crítico para F (una cola)	9,27662815	
Referencia:	F<F <sub>c</sub> Iguales	
	F>F <sub>c</sub> Desiguales	
Conclusión:	Desiguales	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXII.

Tabla LXXIV. **Prueba de  $t$  de Student a temperatura final de reacción de 145 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,3825	77,5325
Varianza	172,971425	3,010291667
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-7,7115532	
P(T<=t) una cola	0,00226637	
Valor crítico de t (una cola)	2,35336343	
P(T<=t) dos colas	0,00453273	
Valor crítico de t (dos colas)	3,18244631	
Referencia:	T<Tc No difieren significativamente	
	T>Tc Si difieren significativamente	
Conclusión:	Si difieren significativamente	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXXII.

Tabla LXXV. **Concentraciones iniciales de agua y porcentajes de recuperación de ácido nítrico a temperatura final de 150 °C para comprobación de hipótesis**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	% Recuperación HNO <sub>3</sub> (p/p)
45,87	82,74
22,23	83,15
19,79	82,43
17,43	81,68

Fuente: elaboración propia, con base en la recolección y ordenamiento de la información, tabla XXVIII, XXXVI

Tabla LXXVI. **Prueba de F de Snedecor-Fisher a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba F para varianzas de dos muestras		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,33	82,5
Varianza	173,5344	0,3858
Observaciones	4	4
Grados de libertad	3	3
F	449,804044	
P(F<=f) una cola	0,00017725	
Valor crítico para F (una cola)	9,27662815	
Referencia:	F<F <sub>c</sub> Iguales	
	F>F <sub>c</sub> Desiguales	
Conclusión:	Desiguales	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico, tabla LXXV.

Tabla LXXVII. **Prueba de t de Student a temperatura final de reacción de 150 °C y diferentes concentraciones iniciales de agua para comprobación de hipótesis**

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	Variable 1	Variable 2
Media	26,33	82,5
Varianza	173,5344	0,3858
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-8,51842701	
P(T<=t) una cola	0,00169913	
Valor crítico de t (una cola)	2,35336343	
P(T<=t) dos colas	0,00339825	
Valor crítico de t (dos colas)	3,18244631	
Referencia:	T<T <sub>c</sub> No difieren significativamente	
	T>T <sub>c</sub> Si difieren significativamente	
Conclusión:	Si difieren significativamente	

Fuente: elaboración propia, con base en el análisis estadístico tabla LXXV.

### 3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico consistió en determinar la media, varianza y desviación estándar del porcentaje de recuperación de ácido nítrico, bisulfato de amonio. Así como el porcentaje de conversión de la reacción a condiciones de reacción de diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción.

#### 3.7.1. Promedio o media de la muestra

Dadas las observaciones de una muestra  $x_1, x_2, \dots, x_n$  la media de la muestra denotada con  $\bar{x}$  es:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (\text{Ecuación 22})$$

#### 3.7.2. Varianza y desviación estándar

Dadas las observaciones de una muestra  $x_1, x_2, \dots, x_n$  y media  $\bar{x}$ , la varianza de la muestra denotada con  $S^2$  esta dada por:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{Ecuación 23})$$

La desviación estándar de la muestra denotada con  $S$ , es la raíz cuadrada positiva de  $S^2$ ,

$$S = \sqrt{S^2} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Los grados de libertad asociados con la varianza estimada es  $n - 1$ .

### 3.7.3. Número de repeticiones

Para determinar el número de repeticiones se utilizará un nivel de confianza del 95 %, un nivel de significancia de 5 %, una probabilidad de éxito del 95 %, y una probabilidad de fracaso del 5 % y con un error estimado de 25.

$$n = \frac{pqz_{\alpha/2}^2}{e^2} \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

$n$  = número de corridas

$p$  = probabilidad de éxito

$q$  = probabilidad de fracaso

$z_{\alpha/2}$  = variable aleatoria en función del nivel de significancia

$e$  = error estimado

$\alpha$  = nivel de significancia

$$n = \frac{(1,96)^2(0,95)(0,05)}{(0,25)^2} = 2,91 \approx 3 \quad (\text{Ecuación 26})$$

### 3.7.4. Prueba de hipótesis para la comparación de medias

Para la comprobación de hipótesis, de que la concentración inicial de agua y la temperatura final de reacción influyen en el porcentaje de recuperación de ácido nítrico, se utilizó la prueba de F de Snedecor-Fisher. Esto para establecer si las varianzas son iguales o desiguales y ya con este criterio se utilizó la

prueba de t de Student. Esto según la igualdad o desigualdad de varianzas y se determina si las medias muestrales difieren o no significativamente

### 3.7.4.1. Prueba de F de Snedecor-Fisher

En una prueba estadística empleada para la comparación de varianzas sean dos conjuntos de datos:

$\{x_1\}$  con varianza  $S_1^2$  y tamaño  $n_1$

$\{x_2\}$  con varianza  $S_2^2$  y tamaño  $n_2$

Se considera las hipótesis nula que dice que las varianzas no presentan diferencia significativa entre si.  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ . Si  $S_2^2 \geq S_1^2$ ,  $F = S_2^2 / S_1^2 \geq 1$ . Se compara con  $F_{tab}(0.05, n_2-1, n_1-1)$ .

### 3.7.4.2. Prueba t de Student

Comparación de valores medios de dos conjuntos de datos.

Tabla LXXVIII. Datos dos conjuntos de datos

Conjunto	Media	Varianza	Número de datos
1	$\bar{x}_1$	$S_1^2$	$n_1$
2	$\bar{x}_2$	$S_2^2$	$n_2$

Fuente: elaboración propia.

Para decidir si las medias muestrales  $\bar{x}_1$  y  $\bar{x}_2$  difiere significativamente se toma la hipótesis nula  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ .

Primero se comprueba que  $s_1^2 = s_2^2$  mediante la prueba F de Snedecor-Fisher.

Se tendrá dos posibilidades:

- Si  $s_1^2 = s_2^2$  se calcula una varianza promedio

$$s^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Se calcula el estadístico de t:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (\text{Ecuación 28})$$

Que tendrá  $n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad. Este valor de t se compara con el valor tabulado  $t(0.05, n_1 + n_2 - 2)$ . Si  $t < t_{crit}$  se acepta la hipótesis nula, es decir, las dos medias son estadísticamente iguales.

- Si  $s_1^2 \neq s_2^2$  se calcula el estadístico t como:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Ahora los grados de libertad se deben calcular como:

$$V_{eff} = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{s_1^4}{n_1^2(n_1-1)} + \frac{s_2^4}{n_2^2(n_2-1)}\right)} \quad (\text{Ecuación 30})$$

El valor de  $t$  se compara con  $t(0,05, V_{\text{eff}})$

Donde:

$t$  = Valor  $t$  Student

$\bar{X}$  = Media muestral

$S$  = Desviación muestral

$n_i$  = Número de muestras

El valor obtenido de la ecuación anterior será comparado con el valor en la tabla de  $t$  de Student con un grado de confiabilidad del 95 %. Si el valor absoluto de la ecuación es menor que el valor de la tabla de  $t$  de Student se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción

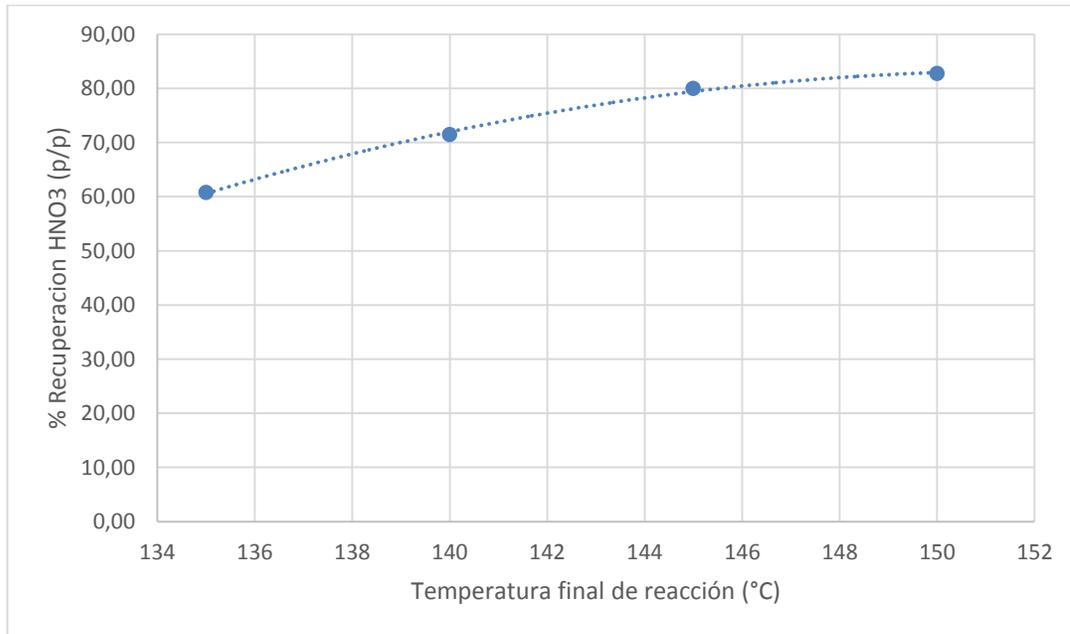
A continuación se presentan los resultados del porcentaje de recuperación de ácido nítrico a condiciones de reacción de alta concentración inicial de agua, bajas concentraciones iniciales de agua y temperaturas finales de reacción de 135, 140, 145 y 150 °C, con sus respectivas gráficas.

Tabla LXXIX. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

$T_{\text{final}} (^{\circ}\text{C})$	Porcentaje de recuperación ( p/p)
135	60,77
140	71,45
145	79,95
150	82,74

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla XXVIII.

Figura 3. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXX.

Tabla LXXX. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 3**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = -0,0788x^2 + 23,955x - 1736,6$	0,9979	[135,0 - 150,0]

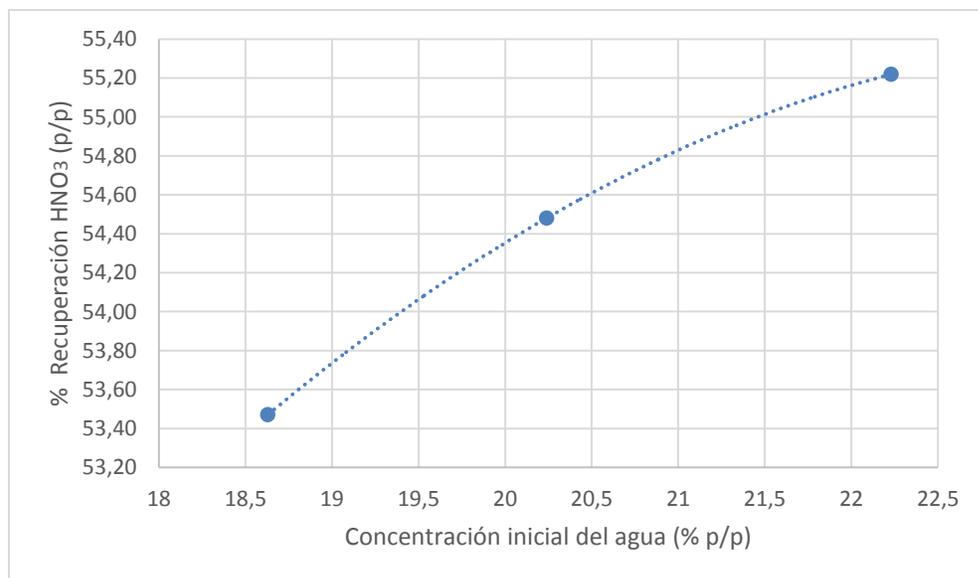
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXX.

Tabla LXXXI. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**

<b>%H<sub>2</sub>O<sub>0</sub> (p/p)</b>	<b>Porcentaje de recuperación</b>
22,23	55,22
20,24	54,48
18,63	53,47

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla LXXXII.

Figura 4. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXII.

Tabla LXXXII. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 4**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = -0,0711x^2 + 3,3888x + 14,998$	1	[18,63 - 22,23,0]

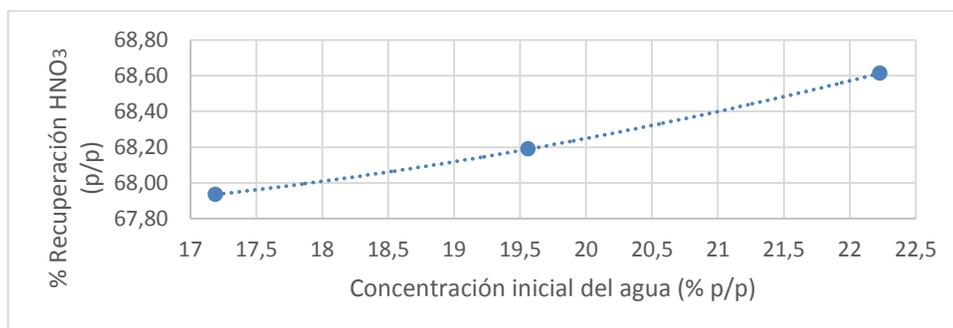
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXII.

Tabla LXXXIII. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de recuperación
22,23	68,61
19,56	68,19
17,19	67,94

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XXXII.

Figura 5. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de reacción de 140 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXIV

Tabla LXXXIV. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 5**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,0103x^2 - 0,2697x + 69,541$	1	[17,19 - 22,23]

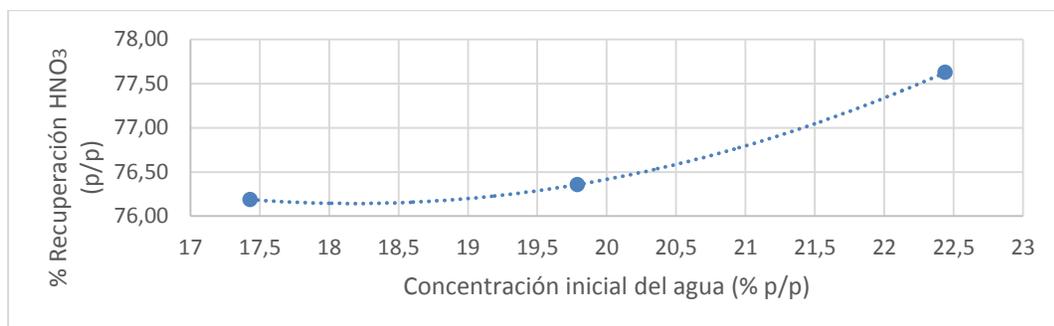
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXIV.

Tabla LXXXV. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de recuperación
22,44	77,63
19,79	76,36
17,43	76,19

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XXXIV.

Figura 6. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXVI.

Tabla LXXXVI. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 6**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,0813x^2 - 2,9542x + 102,98$	1	[17,43 - 22,44]

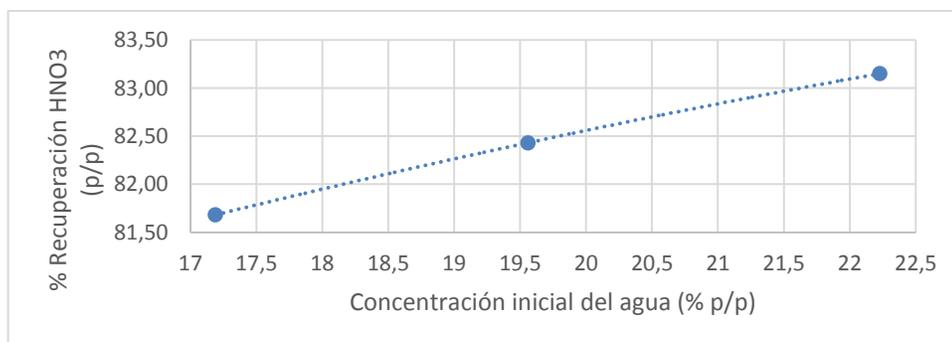
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXVI.

Tabla LXXXVII. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de recuperación
22,23	83,15
19,56	82,43
17,19	81,68

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XXXVI.

Figura 7. **Porcentaje de recuperación de ácido nítrico a diferentes concentraciones inicial de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXVIII.

Tabla LXXXVIII. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de ácido nítrico de la figura 7**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = -0,0093x^2 + 0,6571x + 73,128$	1	[17,19 - 22,23]

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla LXXXVIII.

#### 4.2. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción**

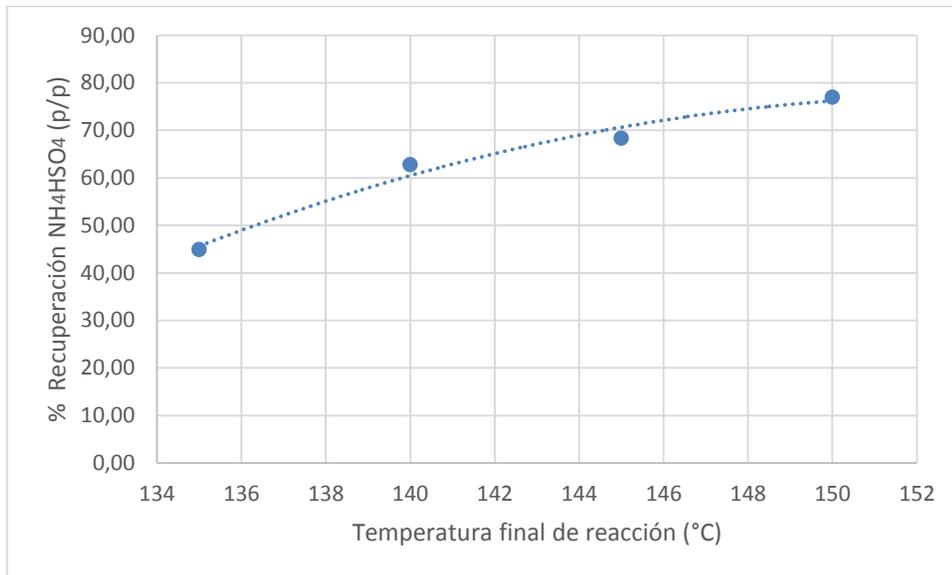
A continuación se presentan los resultados del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales a condiciones de reacción de alta concentración inicial de agua, bajas concentraciones iniciales de agua y temperaturas finales de reacción de 135, 140, 145 y 150 °C, con sus respectivas gráficas.

Tabla LXXXIX. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

T <sub>final</sub> (°C)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> (% p/p)
135	44,88
140	62,77
145	68,35
150	76,96

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XXXVIII.

Figura 8. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XC.

Tabla XC. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 8**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = -0,0928x^2 + 28,487x - 2108,6$	0,9787	[135,0 - 150,0]

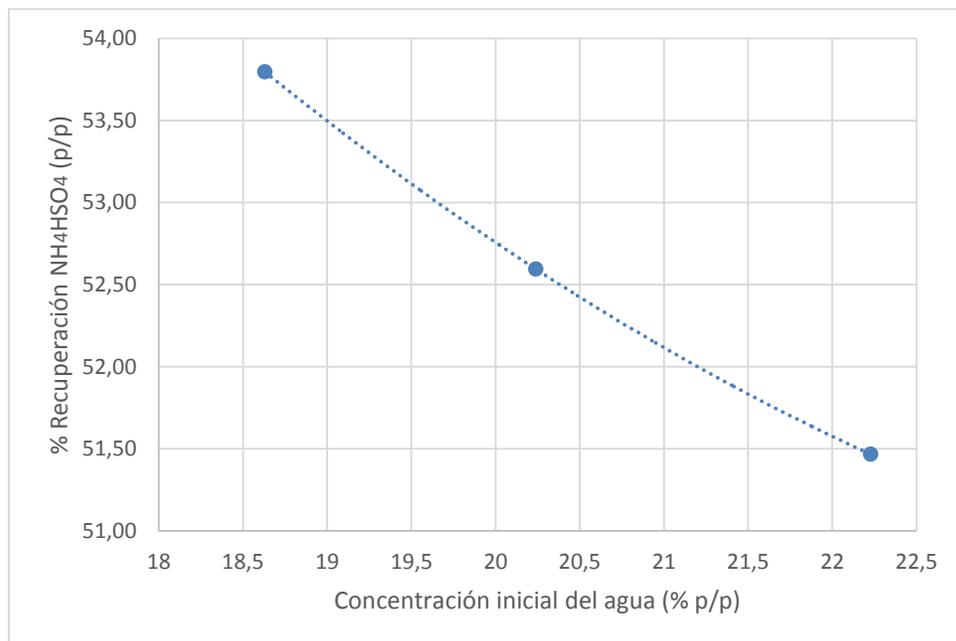
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XC.

Tabla XCI. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> (p/p)
22,23	51,47
20,24	52,59
18,63	53,80

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XL.

Figura 9. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCII.

Tabla XCII. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 9**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,0497x^2 - 2,6794x + 86,448$	1	[18,63 - 22,23]

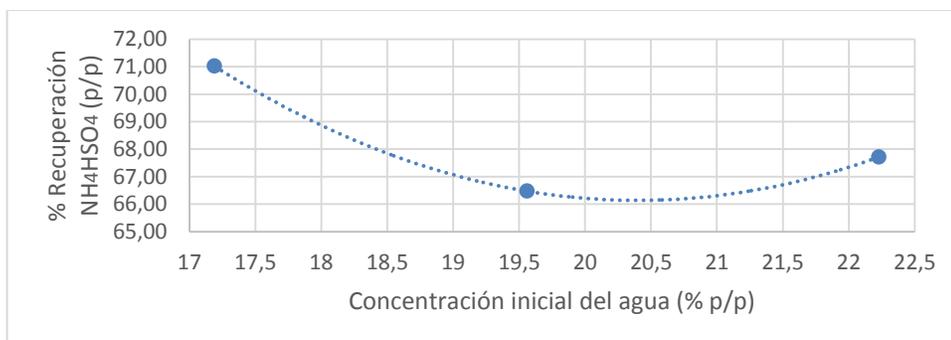
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCII.

Tabla XCIII. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> (p/p)
22,23	67,71
19,56	66,47
17,19	71,01

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XLII.

Figura 10. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCIV.

Tabla XCIV. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 10**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,4723x^2 - 19,272x + 262,75$	1	[17,19 - 22,23]

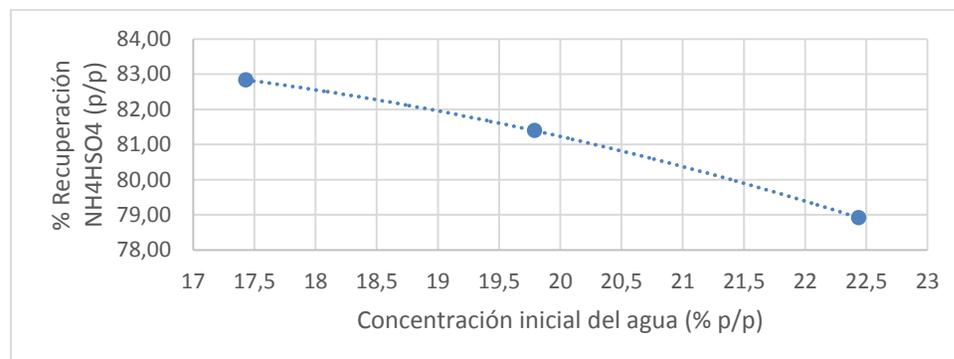
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCIV.

Tabla XCV. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> (% p/p)
22,44	78,92
19,79	81,39
17,43	82,84

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XLIV.

Figura 11. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCVI.

Tabla XCVI. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 11**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = -0,0642x^2 + 1,7762x + 71,377$	1	[17,43 - 22,44]

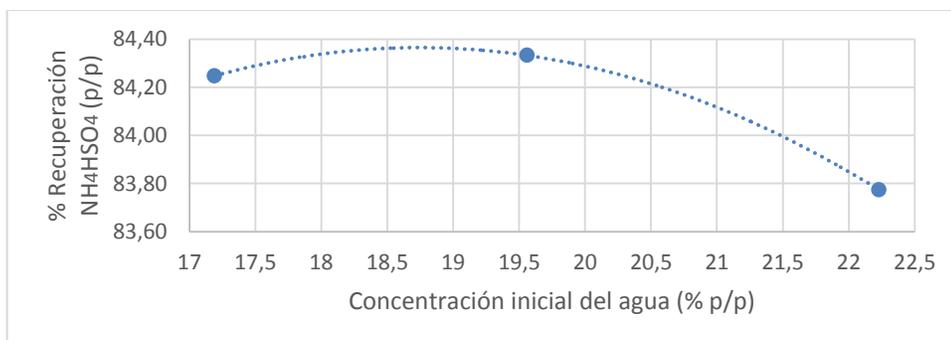
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCVI.

Tabla XCVII. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**

%H <sub>2</sub> O (p/p)	Porcentaje de recuperación NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> (% p/p)
22,23	83,77
19,56	84,33
17,19	84,25

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XLVI.

Figura 12. **Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCVIII.

Tabla XCVIII. **Modelo matemático del porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio de la figura 12**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = -0,0487x^2 + 1,8254x + 67,257$	1	[17,19 - 22,33]

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla XCVIII.

#### 4.3. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y diferentes temperaturas finales de reacción**

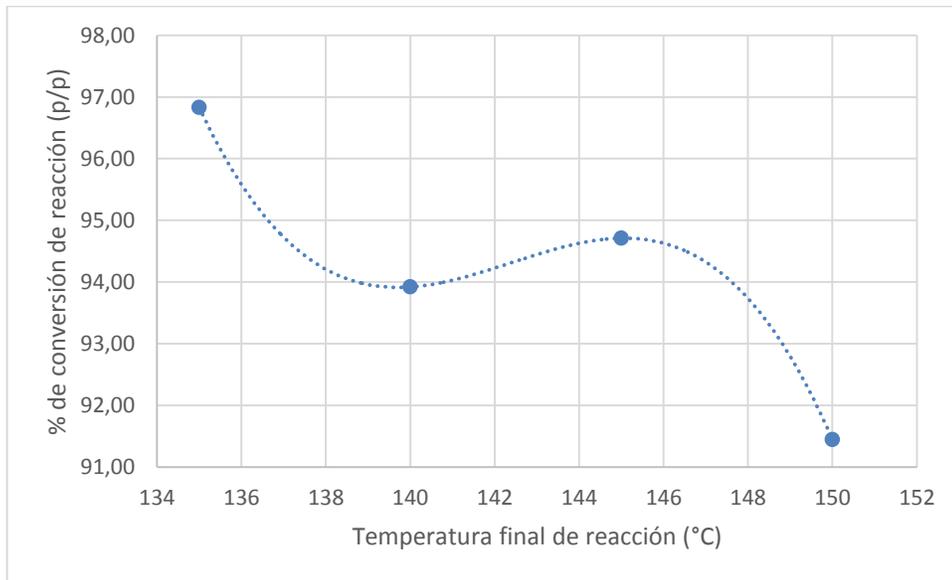
A continuación se presentan los resultados del porcentaje de conversión de reacción a condiciones de reacción de alta concentración inicial de agua, bajas concentraciones iniciales de agua y temperaturas finales de reacción de 135, 140, 145 y 150 °C, con sus respectivas gráficas.

Tabla XCIX. **Porcentaje de conversión de reacción a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

T <sub>final</sub> (°C)	Porcentaje de conversión de la reacción
135	96,83
140	93,92
145	94,71
150	91,45

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla XLVIII.

Figura 13. **Porcentaje de conversión de reacción a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla C.

Tabla C. **Modelo matemático del porcentaje de conversión de reacción de la figura 13**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = -0,0103x^3 + 4,416x^2 - 628,56x + 29906$	1	[135,0 - 150,0]

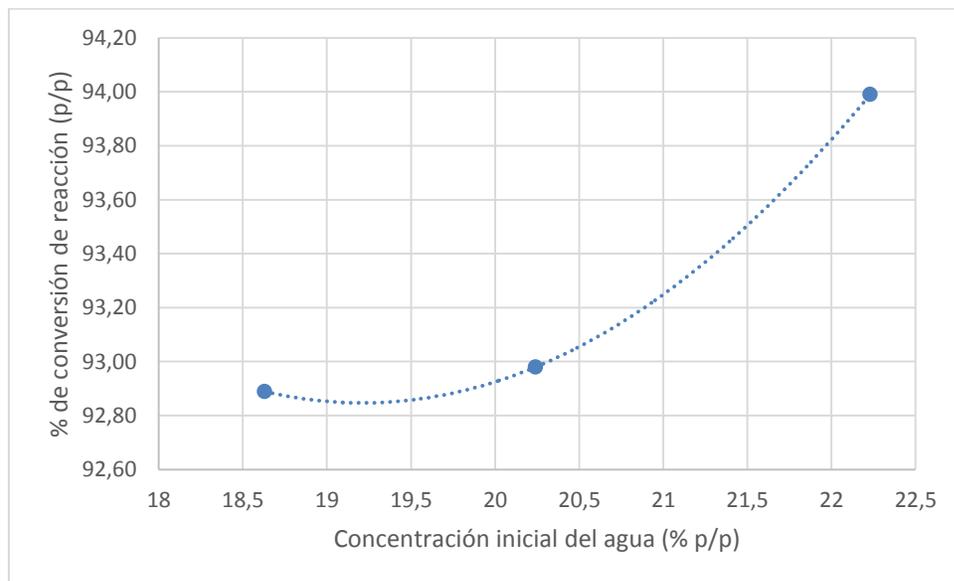
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla C.

Tabla CI. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de conversión (% p/p)
22,23	93,99
20,24	92,98
18,63	92,89

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la tabla L.

Figura 14. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CII.

Tabla CII. **Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 14**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,1254x^2 - 4,8193x + 139,14$	1	[18,63 - 22,23]

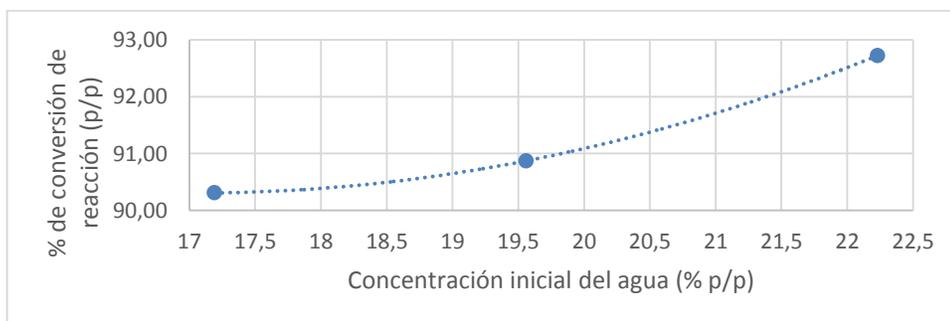
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CII.

Tabla CIII. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de conversión (p/p)
22,23	92,72
19,56	90,87
17,19	90,31

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LII

Figura 15. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CIV.

Tabla CIV. **Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 15**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,0902x^2 - 3,0787x + 116,57$	1	[17,19 - 22,23]

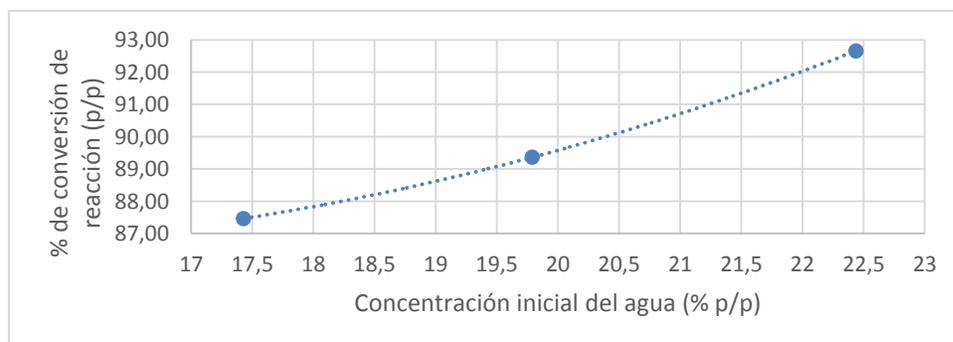
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CVI.

Tabla CV. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de conversión (p/p)
22,44	92,66
19,79	89,36
17,43	87,46

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LIV

Figura 16. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CVI.

Tabla CVI. **Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 16**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,0882x^2 - 2,4799x + 103,89$	1	[17,43 - 22,44]

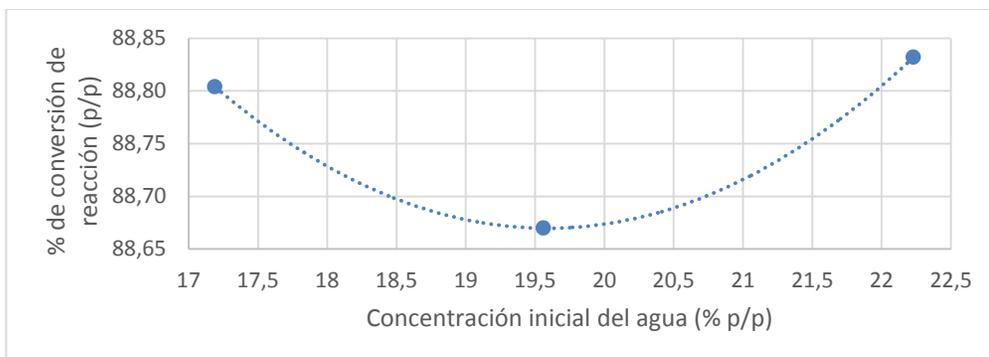
Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CVI.

Tabla CVII. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**

%H <sub>2</sub> O <sub>0</sub> (p/p)	Porcentaje de conversión (p/p)
22,23	88,83
19,56	88,67
17,19	88,80

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LVI

Figura 17. **Porcentaje de conversión de reacción a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**



Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CVIII.

Tabla CVIII. **Modelo matemático del porcentaje de conversión de la figura 17**

Modelo matemático	Correlación R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$y = 0,0233x^2 - 0,9117x + 97,6$	1	[17,19 - 22,23]

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados de la tabla CVIII.

#### 4.4. **Concentración final de los productos en medio acuoso después de extraídos los productos**

A continuación se presentan los resultados de la concentración de los productos en forma acuosa. Esto después de haber recuperado el ácido nítrico por evaporación y condensación y el bisulfato de amonio en forma de cristales a condiciones de reacción de alta concentración inicial, bajas concentraciones iniciales de agua y temperaturas finales de reacción de 135, 140, 145 y 150 °C.

Tabla CIX. **Concentración final de productos en medio acuoso a concentración inicial de agua de 45,87 % y diferentes temperaturas finales de reacción**

Concentración de productos (% p/p)	T <sub>final</sub> Reacción (°C)			
	135	140	145	150
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	54,54	48,71	51,07	37,69
HNO <sub>3</sub>	20,71	19,22	15,61	12,29
H <sub>2</sub> O	19,31	19,98	19,67	24,12
Inertes	2,56	3,82	4,73	6,4
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,89	8,27	8,91	19,5

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LVIII.

Tabla CX. **Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 135 °C**

Concentración de productos (% p/p)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
	18,63	20,24	22,23
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	45,83	47,05	48,77
HNO <sub>3</sub>	25,3	24,56	24,35
H <sub>2</sub> O	18,76	18,43	18,09
Inertes	2,86	2,84	2,8
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,25	7,11	5,99

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LIX

Tabla CXI. **Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 140 °C**

Concentración de productos (% p/p)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
	17,19	19,56	22,23
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	36,36	41,43	42,89
HNO <sub>3</sub>	23,12	21,06	22,63
H <sub>2</sub> O	19,94	19,83	19,41
Inertes	4,63	4,16	4,19
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15,96	13,53	10,87

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LX

Tabla CXII. **Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 145 °C**

Concentración de productos (% p/p)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
	17,43	19,79	22,24
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	13,95	22,53	35,04
HNO <sub>3</sub>	19,18	20,32	20,99
H <sub>2</sub> O	24,74	23,37	21,32
Inertes	7,71	7,05	6,26
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	34,42	26,73	16,38

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LXI

Tabla CXIII. **Concentración final de productos en medio acuoso a diferentes concentraciones iniciales de agua y temperatura final de reacción de 150 °C**

Concentración de productos (% p/p)	C <sub>o</sub> de H <sub>2</sub> O (% p/p)		
	17,19	19,56	22,23
NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	16,58	15,78	18,33
HNO <sub>3</sub>	14,42	12,6	11,34
H <sub>2</sub> O	22,88	24,97	24,68
Inertes	9,24	9,27	9,17
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	36,86	37,38	36,48

Fuente: elaboración propia, con base en la tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, tabla LXII

#### 4.5. Calor requerido para el proceso

A continuación se encuentra el estimado de calor requerido para el proceso a condiciones de reacción de concentración inicial de agua de 19,56 %, temperatura final de reacción de 140 °C y nitrato de amonio en exceso de 1,757 %.

$$\Delta H_{rxn} = 197,81403 \text{ KJ}$$

Ecuación 31

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para determinar el porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado a diferentes temperaturas finales de reacción, se mantuvo fija la concentración inicial de agua de reacción a 45,87 % y se agregó calor durante un tiempo mínimo de 120 minutos, hasta llegar a las temperaturas de 135, 140, 145 y 150 °C.

Con esto se determinó que el porcentaje de recuperación incrementa significativamente desde 60,77 % hasta 82,74 % respectivamente al aumentar la temperatura hasta estos valores.

Esto se puede apreciar en la tabla LXXIX y en la figura 3, aunque la concentración del ácido nítrico recuperado no es muy atractiva desde el punto de vista comercial ver tabla XXVIII.

Estos resultados sirvieron para determinar cuál es el porcentaje de recuperación máximo de ácido nítrico sin que la concentración inicial de agua fuera muy baja y pudiera interferir en el porcentaje de recuperación del ácido nítrico condensado.

Se agregó menor cantidad de agua inicial de reacción tal, que el ácido nítrico recuperado tuviera concentración superior al 50 %, agregando calor hasta 135 °C. Se determinó que el porcentaje de recuperación disminuyó con respecto al porcentaje de recuperación a esta temperatura cuando la concentración inicial de agua fue mayor.

El porcentaje de recuperación disminuyó a 55,22 % cuando la concentración inicial de agua fue de 22,23 y 53,47 % cuando la concentración inicial de agua fue de 18.63 %. Esto se puede apreciar en la tabla LXXXI y en la figura 4.

De igual forma se agregó menor cantidad de agua inicial de reacción y se agregó calor hasta temperaturas de 140, 145 y 150 °C, donde se observa que al incrementar la temperatura incrementa el porcentaje de recuperación de ácido nítrico pero es menor el porcentaje de recuperación que cuando se agrega mayor cantidad de agua inicial de reacción.

Esto se puede apreciar en las tablas LXXXIII, LXXXV, LXXXVIII y en las figuras 5, 6 y 7.

En las pruebas realizadas a concentración inicial de agua fija de 45,87 % y temperaturas finales de reacción de 135, 140, 145 y 150 °C se determinó que el porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio incrementa significativamente. Esto al incrementar la temperatura de reacción desde valores de 44,88 % hasta 76,96 % ver tabla LXXXIX y figura 8.

Cuando la concentración inicial de agua es menor y se agrega calor hasta temperaturas de 135, 140, 145 y 150 °C se incrementa aún más el porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio que cuando se agrega más agua inicial de reacción a las respectivas temperaturas, ver tablas XCI, XCIII, XCV, XCVII y figuras 9,10, 11 y 12. Esto puede ser un factor importante desde el punto de vista económico, ya que si se quisiera recircular las aguas madres generadas durante el proceso, mientras mayor cantidad de bisulfato de amonio recuperado, menor cantidad de aguas madres generadas. Esto resulta en un menor consumo de calor en calentar nuevos insumos.

En las pruebas realizadas a concentración inicial de agua fija de 45,87 % y temperaturas finales de reacción de 135, 140, 145 y 150 °C se determinó que el porcentaje de conversión disminuye significativamente a valores desde 96,83 % hasta 91,45 % al aumentar la temperatura hasta estos valores, ver tabla XCIX y figura 13. Esta información sirvió para determinar cuál es la conversión máxima que se puede alcanzar a alta concentración inicial de agua en la reacción.

Al disminuir la concentración inicial de agua de reacción y agregar calor hasta temperaturas de 135, 140, 145 y 150 °C se determinó que el porcentaje de conversión continuó disminuyendo con respecto a cuándo se agregó mayor concentración inicial de agua de reacción a la misma temperatura, ver tablas CI, CIII, CV y CVII y figuras 14, 15, 16 y 17.

Se determinó que la concentración del bisulfato de amonio y el ácido nítrico en medio acuoso, después de haber extraído el ácido nítrico condensado y el bisulfato de amonio en cristales, disminuyen al aumentar la temperatura. Aumentan al elevar la concentración inicial de agua de reacción, ver tablas CIX, CX, CXI; CXII; CXIII.

Se determinó con base en las condiciones de reacción de concentración inicial de agua de 19,56 % y temperatura final de reacción de 140 °C que es necesario aplicar calor. Esto para que se lleve a cabo el proceso, que la cantidad mayor de calor requerido se debe al agua que hay que evaporar. En segundo lugar al calor necesario para calentar los insumos o los productos a la temperatura de reacción y que la reacción es exotérmica a condiciones estándar.

Se comprobaron estadísticamente las hipótesis alternas, que indican que se obtiene el mayor porcentaje de recuperación de ácido nítrico. Esto al aumentar la temperatura y al aumentar la concentración inicial de agua de reacción.

## 6. LOGROS OBTENIDOS

1. Se obtuvo como producto ácido nítrico concentrado y bisulfato de amonio en cristales a partir de la reacción entre nitrato de amonio y ácido sulfúrico en medio acuoso.
2. Se determinó que la temperatura de reacción influye en el porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado y en el porcentaje de conversión de la reacción.
3. Se determinó que la concentración inicial de agua de reacción influye en el porcentaje de recuperación del ácido nítrico condensado y en el porcentaje de conversión de la reacción.
4. Se determinó que el mayor porcentaje de calor requerido para este proceso se debe a la evaporación del agua.



## CONCLUSIONES

1. Al incrementar la temperatura final de reacción en el rango de 135 a 150 °C incrementa el porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado.
2. Al incrementar la temperatura final de reacción en el rango de 135 a 150 °C incrementa el porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales.
3. Al incrementar la temperatura final de reacción en el rango de 135 a 150 °C disminuye el porcentaje de conversión de reacción.
4. Al incrementar la concentración inicial de agua de reacción en el rango de temperaturas de reacción de 135 a 150 °C incrementa el porcentaje de recuperación de ácido nítrico condensado.
5. Al incrementar la concentración inicial de agua de reacción en el rango de temperaturas de reacción de 135 a 150 °C disminuye el porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio en cristales.
6. Al incrementar la concentración inicial de agua de reacción en el rango de temperaturas de reacción de 135 a 150 °C incrementa el porcentaje de conversión de reacción.



## RECOMENDACIONES

1. Evaluar el porcentaje de recuperación de ácido nítrico y bisulfato de amonio y el porcentaje de conversión de reacción, recirculando al medio de reacción los productos en solución, obtenidos después de separar los cristales de bisulfato de amonio y el ácido nítrico condensado.
2. Utilizar un método de análisis químico o equipo más exacto y rápido para determinar la concentración del bisulfato de amonio obtenido en forma de cristales.
3. Calcular la cantidad de calor necesario para el proceso, considerando las variaciones de las capacidades caloríficas con la temperatura.
4. Evaluar procesos para convertir el bisulfato de amonio en productos con más aplicaciones que este.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ALCANIZ, Hernesto de Jesus. *Equilibrio entre Solido, Líquido y Gas*. [en línea]. <[http://www2.uah.es/edejesus/resumenes/QG/Tema\\_8.pdf](http://www2.uah.es/edejesus/resumenes/QG/Tema_8.pdf)>. [Consulta: 14 de enero de 2015].
2. ALLEN. L. Webster. *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. 3a ed. Colombia: McGraw-Hill, 270 p.
3. ARANEO, Antonio. *Química Analítica Cualitativa*. McGraw-Hill, 2010. 542 p.
4. CAMACHO, José. *Reacciones de doble sustitución*. [en línea]. <<http://www.lideshare.net/JoseCamacho17/reacciones-de-doble-sustitucion>>. [Consulta: 6 de febrero de 2014].
5. EACKMAN, James M.; YARBRO, Stephen L. *Prediction of Heat Capacities of Solid Inorganic Salts from Group*. [en línea]. <<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/426978>>. [Consulta: 30 de mayo de 2015].
6. Fenolftaleína. [en línea]. <<http://es.wikipedia.org/wiki/Fenolftale%C3%ADna>>. [Consulta: 7 de abril de 2014].

7. FOGHLER, Scott H. *Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas*. 3a ed. México: Prentice Hall, 2001. 800 p.
8. GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3a ed. México: Continental, 1998. 1150 p.
9. PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; MALONEY, James O. *Manual del Ingeniero Químico*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2001. 1200 p.
10. SMITH, J.M; VAN NESS, H.C; ABBOTT, M.M. *Termodinámica en Ingeniería Química*. 6a ed. México: McGraw Hill, 2003. 1050 p.
11. *Standard thermodynamic properties of chemical substances*. [en línea]. <[http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC\\_TD.pdf](http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC_TD.pdf)>. [Consulta: 25 de mayo de 2015].
12. WALPOLE, Ronald E., et al. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México: Pearson, 2012. 816 p.
13. WORTHINGTON, et al. *Method for the production of potassium sulfate using sulfuric acid and potassium chloride*. Estados Unidos: 800 p.

## **APÉNDICES**



Apéndice 1. **Equipo utilizado para la reacción y los métodos de análisis de nitrógeno**

Ilustración 1. **Equipo de reacción y condensación de ácido nítrico**



Fuente: datos experimentales recabados en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S.A.

Ilustración 2. **Equipo de condensación para determinar el porcentaje de nitrógeno amoniacal y nitratos**



Fuente: datos experimentales recabados en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S.A.

**Ilustración 3. Equipo de condensación para determinar el porcentaje de Nitrógeno Amonio**



Fuente: datos experimentales recabados en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Representaciones Químicas, S.A.

## Apéndice 2. Muestra de cálculo

Para la muestra de cálculo se seleccionó el experimento con condiciones de reacción de concentración inicial de agua de 19.56% y temperatura final de reacción de 140°C. Los datos utilizados para estos cálculos son el promedio de las diferentes corridas realizadas.

### 1. Productos teóricos esperados

Para saber las masas de los productos teóricos esperados, se debe considerar que el  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  fue agregado en un exceso de 1.7267% p/p, por lo que se calcula los insumos estequiométricos para determinar los productos teóricos esperados.

#### 1.1. Reacción

A continuación se escribe la ecuación química del proceso, y para los cálculos de requerimiento de calor se escriben los estados de la materia tanto de los insumos como de los productos.



Tabla CXIV. **Insumos agregados a concentraciones de los reactivos**

Compuesto	Concentración (% p/p)	Masa (g)
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	96,67	130
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,8	154,73
H <sub>2</sub> O	100	65
Sumatoria		349,73

Fuente: Elaboración propia a partir de recolección y ordenamiento de la información, tabla XXV.

### 1.2. Insumos agregados al 100 % de concentración

Se calcula la cantidad de insumos agregados al 100 % de concentración, ya que esto nos permitirá realizar cálculos posteriores para determinar el porcentaje de recuperación del ácido nítrico y bisulfato de amonio en cristales así como el porcentaje de conversión.

$$130g \text{ NH}_4\text{NO}_3 \text{ al } 96,67 \% * \frac{96,67 g \text{ NH}_4\text{NO}_3 \text{ al } 100 \%}{100 g \text{ NH}_4\text{NO}_3 \text{ al } 96,67 \%} = 125,67 g \text{ NH}_4\text{NO}_3 \text{ al } 100 \%$$

$$130g \text{ NH}_4\text{NO}_3 \text{ al } 96,67 \% * \frac{(100 - 96,67)g \text{ Inertes al } 100 \%}{100 g \text{ NH}_4\text{NO}_3 \text{ al } 96,67 \%} = 4,33 g \text{ Inertes al } 100 \%$$

$$154,73g \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 97,80 \% * \frac{97,80 g \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 100 \%}{100 g \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 97,80 \%} = 151,33 g \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 100 \%$$

$$154,73g \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 97,80 \% * \frac{(100 - 97,80)g \text{ H}_2\text{O al } 100 \%}{100 g \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ al } 97,80 \%} + 65g \text{ H}_2\text{O} = 68,40 g \text{ H}_2\text{O al } 100 \%$$

### 1.3. Insumos estequiométricos

Se calcula la masa estequiométrica de los insumos agregados, lo cual se realiza a partir de la cantidad de nitrato de amonio utilizada restándole la cantidad agregada como exceso.

$$130 \text{ g } NH_4NO_3 \text{ al } 96,67\% * \frac{96,67 \text{ g } NH_4NO_3 \text{ al } 100\%}{100 \text{ g } NH_4NO_3 \text{ al } 96,67\%} * (1 - 0,017267) = 123,50 \text{ g } NH_4NO_3$$

$$123,50 \text{ g } NH_4NO_3 * \frac{1 \text{ mol } NH_4NO_3}{80,0426 \text{ g } NH_4NO_3} * \frac{1 \text{ mol } H_2SO_4}{1 \text{ mol } NH_4NO_3} * \frac{98,0768 \text{ g } H_2SO_4}{1 \text{ mol } H_2SO_4} \\ = 151,33 \text{ g } H_2SO_4$$

### 1.4. Productos teóricos esperados

Se calculan la masa estequiométrica de los productos esperados, lo cual se realiza a partir de la cantidad de nitrato de amonio estequiométrica calculado anteriormente.

$$123,50 \text{ g } NH_4NO_3 * \frac{1 \text{ mol } NH_4NO_3}{80,0426 \text{ g } NH_4NO_3} * \frac{1 \text{ mol } HNO_3}{1 \text{ mol } NH_4NO_3} * \frac{63,0119 \text{ g } HNO_3}{1 \text{ mol } HNO_3} = 97,22 \text{ g } HNO_3$$

$$123,50 \text{ g } NH_4NO_3 * \frac{1 \text{ mol } NH_4NO_3}{80,0426 \text{ g } NH_4NO_3} * \frac{1 \text{ mol } NH_4HSO_4}{1 \text{ mol } NH_4NO_3} * \frac{115,1075 \text{ g } NH_4HSO_4}{1 \text{ mol } NH_4HSO_4} = 177,60 \text{ g } NH_4HSO_4$$

## 2. Porcentaje de recuperación de ácido nítrico

El porcentaje de recuperación de ácido nítrico se calcula en base a la masa recuperada y a la concentración determinada de este, tomándose la masa promedio utilizada para el análisis químico y el volumen de hidróxido de sodio promedio usado.

## 2.1. Concentración del ácido nítrico

Para calcular la concentración del ácido nítrico recuperado, se toma la masa promedio de la muestra, el volumen de hidróxido de sodio y la normalidad del hidróxido de sodio utilizado en los análisis de todas las corridas realizadas a las condiciones de reacción seleccionadas, utilizándose la forma que a continuación se escribe.

$$\% \text{HNO}_3 = \frac{6,30119 * \text{Volumen de NaOH} * \text{Normalidad NaOH}}{\text{masa de la muestra}} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde

%HNO3 = Concentración HNO3 (% p/p)

6,30103 = Factor

Los datos son:

Volumen de NaOH = 19,37 ml.

Normalidad NaOH = 0,5215 N

Masa de la muestra (g) = 1,0979 g.

$$\% \text{HNO}_3 = \frac{6,30109 * 19,38 \text{ ml de NaOH} * 0,5215}{1,0961 \text{ g}} = 58,10\%$$

## 2.2. Porcentaje de recuperación de ácido nítrico

El porcentaje de recuperación de ácido nítrico se calcula en base a las masas de ácido nítrico, los volúmenes de hidróxido de sodio y las masas utilizadas para los análisis de ácido nítrico de todas las corridas realizadas a las condiciones de reacción seleccionadas.

$$\% \text{ Recuperación HNO}_3 = \frac{\text{Masa de ácido nítrico recuperada} \cdot \text{Concentración HNO}_3}{\text{Masa de ácido nítrico esperada}} * 100$$

Ecuación 33

Los datos son:

Masa recuperada = 114,1067 g.

$$\% \text{ Recuperación HNO}_3 = \frac{114,1067 * 58,10 \%}{97,22g} * 100 = 68,19 \%$$

### 3. Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio

El porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio se calcula en base a la masa recuperada y en base a la concentración determinada de este. Se calcula la concentración de nitrógeno amoniacal, nitrógeno total y por diferencia se determina la concentración de nitrógeno nítrico, el cual es calculado como nitrato de amonio y por diferencia se determina la concentración del bisulfato de amonio.

#### 3.1. Concentración de nitrógeno amoniacal

Para calcular la concentración de nitrógeno amoniacal se usan el volumen de hidróxido de sodio utilizado mediante el análisis de una muestra en blanco, los volúmenes de hidróxido de sodio utilizado en la titulación y las masas de la muestra a analizar promedios usados en todas las corridas de las condiciones de reacción seleccionadas.

$$\% N = \left( \frac{V \text{ blanco} - V \text{ titulación}}{\left( \frac{\text{Masa muestra}}{\text{aforo}} \right) * \text{alícuota}} \right) * \text{Normalidad NaOH} * 1,4007 \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

%N = Porcentaje de nitrógeno (p/p)

V blanco = volumen de NaOH utilizado en la titulación del blanco (ml)

V titulación = volumen de NaOH utilizado en el análisis (ml)

Alícuota = volumen de la alícuota utilizada (ml)

Aforo = volumen a donde fue aforada la muestra (ml)

Datos obtenidos:

V blanco = 25,14 ml

V titulación = 18,21 ml

Masa muestra = 9,5476 g

Normalidad NaOH = 0,5211N

Aforo = 1 000 ml

Alícuota = 50 ml

$$\% N \text{ amoniacal} = \frac{(25,14 - 18,21)\text{ml}}{\frac{9,5476 \text{ g}}{1\ 000 \text{ ml}} * 50 \text{ ml}} * 0,5211N * 1,4007 = 10,60 \%$$

### 3.2. Concentración de nitrógeno total

Para calcular la concentración de nitrógeno total se usan el volumen de hidróxido de sodio utilizado mediante el análisis de una muestra en blanco, los volúmenes de hidróxido de sodio utilizados en la titulación y las masas de las muestras a analizar promedio usados en todas las corridas de las condiciones de reacción seleccionadas.

Datos para nitrógeno total:

V blanco = 25,19 ml

V titulación = 13,65 ml

Masa muestra = 9,5476 g

Normalidad NaOH = 0,5211N

Aforo = 1 000 ml

Alícuota = 50 ml

$$\% N \text{ amoniacal y nítrico} = \left( \frac{(25,19 - 17,07) \text{ ml}}{\frac{9,5476 \text{ g}}{1\,000 \text{ ml}} * 50 \text{ ml}} \right) * 0,5211N * 1,4007 = 12,41 \%$$

### 3.3. Concentración de nitrógeno nítrico

La concentración de nitrógeno nítrico se calcula mediante la resta del porcentaje de nitrógeno total y el nitrógeno amoniacal, para su posterior conversión.

$$\% \text{Nitrogeno nítrico} = \%N \text{ amoniacal y nítrico} - \%N \text{ amoniacal}$$

Ecuación 34

$$\% \text{Nitrógeno nítrico} = 12,41 - 10,60 = 1,81 \%$$

### 3.4. Concentración de bisulfato de amonio

La concentración del bisulfato de amonio se calculó, convirtiendo el porcentaje de nitrógeno nítrico a nitrato de amonio y por diferencia se calcula la concentración del bisulfato de amonio.

### 3.4.1. Concentración de nitrato de amonio

La concentración de nitrato de amonio se calcula mediante la conversión del porcentaje de nitrógeno nítrico a nitrato de amonio utilizando el factor estequiométrico para dicha conversión.

$$\%NH_4NO_3 = \%N \text{ nítrico} * 5,714471 \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde:

$\%NH_4NO_3$  = concentración  $NH_4NO_3$  (p/p)

$\%N$  nítrico = concentración de nitrógeno nítrico (p/p)

$$\%NH_4NO_3 = 1,81 * 5,714471 = 10,34 \% \approx 10,36 \%$$

### 3.4.2. Concentración de bisulfato de amonio

La concentración del bisulfato de amonio se calcula mediante la diferencia de la concentración de nitrato de amonio y el 100 %, considerando que los cristales solo contiene estos dos compuestos.

$$\%NH_4HSO_4 = 100 - \%NH_4NO_3$$

Ecuación 36

$$\%NH_4HSO_4 = 100 - 10,36 = 89,64 \%$$

### 3.5. Porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio

El porcentaje de recuperación de bisulfato de amonio se calcula mediante las masas recuperadas de cristales obtenidos y las concentraciones promedio de todas las corridas realizadas a las condiciones de reacción seleccionadas.

$$\% \text{ Recuperación } \text{NH}_4\text{HSO}_4 = \frac{\text{Masa de bisulfato de amonio recuperada} \cdot \text{Concentración } \text{NH}_4\text{HSO}_4}{\text{Masa de } \text{NH}_4\text{HSO}_4 \text{ esperada}} * 100 \quad (\text{Ecuación 37})$$

Datos:

Masa recuperada = 89,64 g.

$$\% \text{ Recuperación } \text{NH}_4\text{HSO}_4 = \frac{131,70 * 89,64 \%}{177,60g} * 100 = 66,47 \%$$

### 4. Porcentaje de conversión de la reacción

El porcentaje de conversión se calcula en base al nitrato de amonio que contienen los cristales de bisulfato de amonio y restándoles el nitrato de amonio agregado en exceso y se relaciona con la cantidad estequiometrica agregada.

$$\% \text{ conversión} = \left( 1 - \frac{\text{Masa de } \text{NH}_4\text{HSO}_4 \cdot \text{Conc. } \text{NH}_4\text{NO}_3 - (\text{Masa de } \text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ al } 100\% \text{ agre.} - \text{Masa } \text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ esteq.})}{\text{Masa de } \text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ esteq.}} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 38})$$

Donde:

% conversión = porcentaje de conversión de la reacción (p/p)

Masa de  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  = masa de cristales de bisulfato de amonio recuperada (g)

Masa de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  al 100 % agre = masa de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  al 100 % agregada (g)

Masa  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  esteq. = masa de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  estequiometrica (g)

$$\% \text{ conversión} = \left( 1 - \frac{(131.70g * 10.36\% - (125.67g - 123.50g))}{123.50 \text{ g}} \right) * 100 = 90,71 \% \approx 90,87 \%$$

## 5. Concentración de los productos en medio acuoso después de recuperado el ácido nítrico y el bisulfato de amonio

La concentración de los productos en medio acuoso después de extraído el ácido nítrico y los cristales de bisulfato de amonio se calcula mediante los insumos agregados, la eficiencia de reacción, las cantidad y concentraciones del ácido y bisulfato de amonio recuperados en todas las corridas realizadas a las condiciones de reacción seleccionadas.

### 5.1. Masa de los reactivos, agua e inertes al final de la reacción incluidos los compuestos extraídos del sistema

Se calcula la masa de los insumos que quedan al final de la reacción mediante la resta de lo estequiométrico y lo que no reaccionó más la masa de lo agregado en exceso para el caso del nitrato de amonio.

$$\text{masa reactivos} = \text{masa estequiometrica} * (1 - \text{conversión}) + \text{masa exceso} \quad (\text{Ecuación 39})$$

$$\text{NH}_4\text{NO}_3 = 123,5 * (1 - 0,9087) + 2,17 = 13,64 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 151,33 * (1 - 0,9087) = 13,82 \text{ g}$$

Como los inertes y el agua no es afectada por el porcentaje de conversión

$$\text{H}_2\text{O} = 68,40 \text{ g}$$

$$\text{Inertes} = 4,33 \text{ g}$$

## 5.2. Masa de los productos al final de la reacción incluidos los compuestos extraídos del sistema

Se calcula la masa de los productos que se formaron en base a la conversión y la masa estequiometrica esperada, considerando como el ácido nítrico y el bisulfato de amonio que se extrajeron del sistema.

$$\text{masa productos} = \text{masa estequiometrica} * \text{conversión} \quad (\text{Ecuación 40})$$

$$\text{HNO}_3 = 97,22 * 0,9087 = 88,34 \text{ g}$$

$$\text{NH}_4\text{HSO}_4 = 177,60 * 0,9087 = 161,39 \text{ g}$$

## 5.3. Masa de los compuestos extraídos en el ácido nítrico condensado y el bisulfato de amonio en cristales

Se calcula la masa del ácido nítrico, agua, bisulfato de amonio y nitrato de amonio que fueron extraídos del sistema mediante las masas y las concentraciones promedio de todas las corridas realizadas a las condiciones de reacción determinadas.

$$\text{masa extraida} = \text{masa recuperada} * \text{concentración} \quad (\text{Ecuación 41})$$

$$\text{HNO}_3 = 114,10 * 58,10 \% = 66,29 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 114,10 * (100 - 58,10) \% = 47,81 \text{ g}$$

$$\text{NH}_4\text{HSO}_4 = 131,70 * 89,64 \% = 118,06 \text{ g}$$

$$\text{NH}_4\text{NO}_3 = 131,70 * (100 - 89,64) \% = 13,64 \text{ g}$$

#### 5.4. Masa de los productos, reactivos, agua e inertes en medio acuoso después de extraídos el condensado y cristales

Se calcula las masas de los compuestos que queda en el sistema mediante la resta entre los compuestos que quedan sin considerar los compuestos extraídos y los compuestos extraídos y se realiza la sumatoria de todas las masas que queda en el sistema.

$$\text{Masa final} = \text{masa sin considerar compuestos extraídos} - \text{masa extraída} \quad (\text{Ecuación 42})$$

$$\text{NH}_4\text{NO}_3 = 13,64 - 13,64 = 0 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 13,82 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 68,40 - 47,81 = 20,59 \text{ g}$$

$$\text{Inertes} = 4,33$$

$$\text{HNO}_3 = 88,34 - 66,29 = 22,05 \text{ g}$$

$$\text{NH}_4\text{HSO}_4 = 161,39 - 118,06 = 43,33 \text{ g}$$

$$\text{Sumatoria de productos en medio acuosos} = 13,82 + 20,59 + 4,33 + 22,05 + 43,33 = 104,12 \text{ g}$$

#### 5.5. Concentración final en medio acuoso de los compuestos después de extraídos compuestos del sistema

Se calcula la concentración de los compuestos que quedan en el sistema después de extraído el ácido nítrico condensado y el bisulfato de amonio en cristales, mediante la fórmula siguiente.

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Masa final compuesto en medio acuoso}}{\text{Sumatoria de compuestos en medio acuoso}} * 100 \quad (\text{Ecuación 43})$$

$$\text{Concentración } H_2SO_4 = \frac{13,82}{104,12} * 100 = 13,27 \% \approx 13,53 \%$$

$$\text{Concentración } H_2O = \frac{20,59}{104,12} * 100 = 19,78 \% \approx 19,83 \%$$

$$\text{Concentración Inertes} = \frac{4,33}{104,12} * 100 = 4,16 \%$$

$$\text{Concentración } HNO_3 = \frac{22,05}{104,12} * 100 = 21,18 \% \approx 21,06 \%$$

$$\text{Concentración } NH_4HSO_4 = \frac{43,33}{104,12} * 100 = 41,61 \% \approx 41,43 \%$$

## 6. Requerimiento de calor

El calor requerido se determina mediante el calor estándar de reacción y el calor requerido para llevar todos los compuestos que quedan entre los productos hasta las condiciones finales de reacción de temperatura y su respectivo estado físico.

A continuación se muestran los cálculos tomando como base de cálculo los insumos agregados en esta experimentación a condiciones de reacción de temperatura final de 140 °C y concentración inicial de agua de 19,56 %, donde la concentración del ácido nítrico recuperado es de 58,1 % p/p.

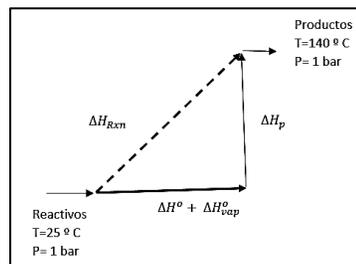
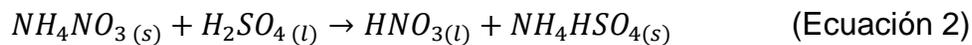


Figura 1. **Ruta de cálculo de calor de reacción a condiciones no estándar**

**a. Calor estándar de reacción**

Se calcula el calor estándar de reacción mediante los calores estándar de formación en su estado físico, sabiendo la cantidad de moles estequiométricas agregadas.



Con los siguientes datos de calor estándar de formación se determina el calor estándar de reacción

$$\Delta H^{\circ}f \text{ HNO}_3(l) = -174,1 \text{ KJ/mol}^8$$

$$\Delta H^{\circ}f \text{ NH}_4\text{HSO}_4(s) = -1027,0 \text{ KJ/mol}^9$$

$$\Delta H^{\circ}f \text{ NH}_4\text{NO}_3(s) = -365,6 \text{ KJ/mol}^{10}$$

$$\Delta H^{\circ}f \text{ H}_2\text{SO}_4(l) = -814,0 \text{ KJ/mol}^{11}$$

$$\Delta H^{\circ}rxn = (\Delta H^{\circ}f \text{ NH}_4\text{HSO}_4(s) + \Delta H^{\circ}f \text{ HNO}_3(l)) - (\Delta H^{\circ}f \text{ NH}_4\text{NO}_3(s) - \Delta H^{\circ}f \text{ H}_2\text{SO}_4(l)) \quad (\text{Ecuación 44})$$

$$\Delta H^{\circ}rxn = (-1027,0 - 174,1) - (-365,6 - -814,0) = -21,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

<sup>8</sup> Standard thermodynamic properties of chemical substances. [http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC\\_TD.pdf](http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC_TD.pdf). consulta: 25 de mayo de 2015.

<sup>9</sup> *Ibíd.*

<sup>10</sup> *Ibíd.*

<sup>11</sup> *Ibíd.*

Tomando la masa de nitrato de amonio reaccionado y como comprobación el ácido sulfúrico se tiene:

$$\text{Moles} = \text{masa estequiometrica agregada} * \text{conversión} * \frac{1}{\text{Peso molecular}} \quad (\text{Ecuación 45})$$

$$\text{Moles NH}_4\text{NO}_3 = 123,5\text{g} * 0,9087 * \frac{1 \text{ mol NH}_4\text{NO}_3}{80,0426\text{g NH}_4\text{NO}_3} = 1,402 \text{ mol NH}_4\text{NO}_3$$

$$\text{Moles H}_2\text{SO}_4 = 151,33\text{g} * 0,9087 * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{98,0768\text{g H}_2\text{SO}_4} = 1,402 \text{ mol H}_2\text{SO}_4$$

$$\Delta H^{\circ}\text{rxn} = 1,402\text{mol} * (-21,5) \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} = -30,143 \text{ KJ}$$

**b. Calor requerido para llevar los compuestos obtenidos al final de la reacción a las condiciones finales de reacción**

El calor requerido para este proceso abarca, el calor estándar de vaporización del ácido nítrico y del agua correspondiente a la cantidad obtenida en fase gaseosa y el calor sensible para llevar los compuestos obtenidos a la temperatura final de la reacción en la fase correspondiente.

**c. Productos obtenidos al final de la reacción**

Se escribe la cantidad de masas de productos obtenidos en la fase correspondiente como se fueron obtenidos tanto en gramos como en moles ya que es en esa última forma expresada se procesarán para determinar el calor requerido para esta etapa.

$$\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s}) = 13,64 \text{ g} = 0,1704 \text{ mol}$$

$$\text{Inertes} = 4,33 \text{ g (asumiendo que fuera NH}_4\text{NO}_3 = 0,0541 \text{ mol)}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4(\text{l}) = 13,82 \text{ g} = 0,1409 \text{ mol}$$

$$\text{H}_2\text{O}(\text{l}) = 20,59 \text{ g} = 1,1429 \text{ mol}$$

$$\text{H}_2\text{O}(\text{v}) = 47,81 \text{ g} = 2,6539 \text{ mol}$$

$$\text{HNO}_3(\text{l}) = 22,05 \text{ g} = 0,3499 \text{ mol}$$

$$\text{HNO}_3(\text{v}) = 66,29 \text{ g} = 1,0520 \text{ mol}$$

$$\text{NH}_4\text{HSO}_4(\text{s}) = 161,39 \text{ g} = 2,0163 \text{ mol}$$

### 6.1. Calor estándar de evaporación del ácido nítrico y del agua

A partir de los datos de calor estandar de formación en estado líquido y en estado vapor se determina el calor requerido para el proceso de evaporación en condiciones estandar.

$$\Delta H^\circ_f \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = -285,8 \text{ KJ/mol}^{12}$$

$$\Delta H^\circ_f \text{H}_2\text{O}(\text{v}) = -241,8 \text{ KJ/mol}^{13}$$

$$\Delta H^\circ_f \text{HNO}_3(\text{l}) = -174,1 \text{ KJ/mol}^{14}$$

$$\Delta H^\circ_f \text{HNO}_3(\text{v}) = -133,9 \text{ KJ/mol}^{15}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{evaporacion}} = \Delta H^\circ_f(\text{v}) - \Delta H^\circ_f(\text{l}) \quad (\text{Ecuación 46})$$

$$\Delta H^\circ_{\text{evaporacion}} \text{HNO}_3 = (-133,9) - (-174,1) = 40,2 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{evaporacion}} \text{HNO}_3 = 40,2 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} * 1,0520 \text{ mol} = 42,2904 \text{ KJ}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{evaporacion}} \text{H}_2\text{O} = (-241,8) - (-285,8) = 44,0 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{evaporacion}} \text{H}_2\text{O} = 44,0 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} * 2,6539 \text{ mol} = 116,7716 \text{ KJ}$$

<sup>12</sup> *Standard thermodynamic properties of chemical substances.*  
[http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC\\_TD.pdf](http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC_TD.pdf). consulta: 25 de mayo de 2015.

<sup>13</sup> *Ibíd.*

<sup>14</sup> *Ibíd.*

<sup>15</sup> *Ibíd.*

## 6.2. Calor sensible para llevar los compuestos finales de reacción a temperatura de 140 °C

A partir de los datos de capacidad calorífica estandar se puede determinar la cantidad de calor requerida para llevar los compuestos obtenidos al final de la reacción hasta la temperatura final de 140 °C suponiendo que la capacidad calorífica no cambia significativamente en función de la temperatura. Para los compuestos inertes como provienen del nitrato de amonio se asumen como que fueran este mismo compuesto.

$$Cp^{\circ} NH_4NO_3(s) = 139,3 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}C}^{16}$$

$$Cp^{\circ} H_2SO_4(l) = 138,9 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}C}^{17}$$

$$Cp^{\circ} H_2O(l) = 75,3 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}C}^{18}$$

$$Cp^{\circ} H_2O(v) = 33,6 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}C}^{19}$$

$$Cp^{\circ} HNO_3(l) = 109,9 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}C}^{20}$$

$$Cp^{\circ} HNO_3(v) = 54,1 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}C}^{21}$$

$$Cp^{\circ} NH_4HSO_4 = 137,7 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}C}^{22}$$

---

<sup>16</sup> *Standard thermodynamic properties of chemical substances.*  
[http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC\\_TD.pdf](http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC_TD.pdf). consulta: 30 de mayo de 2015

<sup>17</sup> *Ibíd.*

<sup>18</sup> *Ibíd.*

<sup>19</sup> *Ibíd.*

<sup>20</sup> *Ibíd.*

<sup>21</sup> *Ibíd.*

<sup>22</sup> EACKMAN, James M., YARBRO, Stephen L. *Prediction of Heat Capacities of Solid Inorganic Salts from group.* <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/426978>. Consulta: 30 de mayo de 2015.

El calor sensible se calcula de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$\Delta H_p = masa * C_p(T_2 - T_1) \quad (\text{Ecuación 47})$$

$$\Delta H_p \text{ NH}_4\text{NO}_3(s) = 0,2245 * 139,3(140 - 25) = 3,59637KJ$$

$$\Delta H_p \text{ H}_2\text{SO}_4(l) = 0,1409 * 138,9(140 - 25) = 2,25066KJ$$

$$\Delta H_p \text{ H}_2\text{O}(l) = 1,1429 * 75,3(140 - 25) = 9,89699KJ$$

$$\Delta H_p \text{ H}_2\text{O}(v) = 2,6539 * 33,6(140 - 25) = 10,25466KJ$$

$$\Delta H_p \text{ HNO}_3(l) = 0,3499 * 109,9(140 - 25) = 4,42221KJ$$

$$\Delta H_p \text{ HNO}_3(v) = 1,0520 * 54,1(140 - 25) = 6,54502KJ$$

$$\Delta H_p \text{ NH}_4\text{HSO}_4(s) = 2,0163 * 137,7(140 - 25) = 31,92912KJ$$

$$\text{Sumatoria } \Delta H_p = 68,89503KJ$$

### 6.3. Calor total requerido

El calor total requerido comprende la suma del calor estándar de reacción, el calor estándar de evaporación de la cantidad evaporada de agua y ácido nítrico y el calor sensible para calentar todos los compuestos obtenidos al final de la reacción hasta la temperatura final de reacción de 140 °C.

$$\Delta H_{rxn} = \Delta H^\circ_{rxn} + \Delta H^\circ_{\text{evaporacion HNO}_3} + \Delta H^\circ_{\text{evaporacion H}_2\text{O}} + \text{sumatoria } \Delta H_p \quad (\text{Ecuación 48})$$

$$\Delta H_{rxn} = -30,143 + 42,2904 + 116,7716 + 68,89503 = 197,81403 KJ$$

# ANEXOS

## Anexo 1. Tabla de requisitos académicos

### ÁREA DE QUÍMICA

- **QUIMICA 3 Y 4:** Conceptos básicos, propiedades químicas y físicas de la materia
- **ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO:** propiedades extensivas e intensivas.
- **QUIMICA ORGANICA 1 Y 2:** Reacciones de Oxidación y grupos funcionales

### ÁREA DE FISICOQUÍMICA

- **FISICOQUÍMICA 1 Y 2:** propiedades fisicoquímicas
- **LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA 1 Y 2:** comportamientos de presión y temperatura
- **TERMODINAMICA 3 Y 4:** propiedades termodinámicas.
- **CINÉTICA DE LAS REACCIONES:** propiedades de la cinética química

### ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS

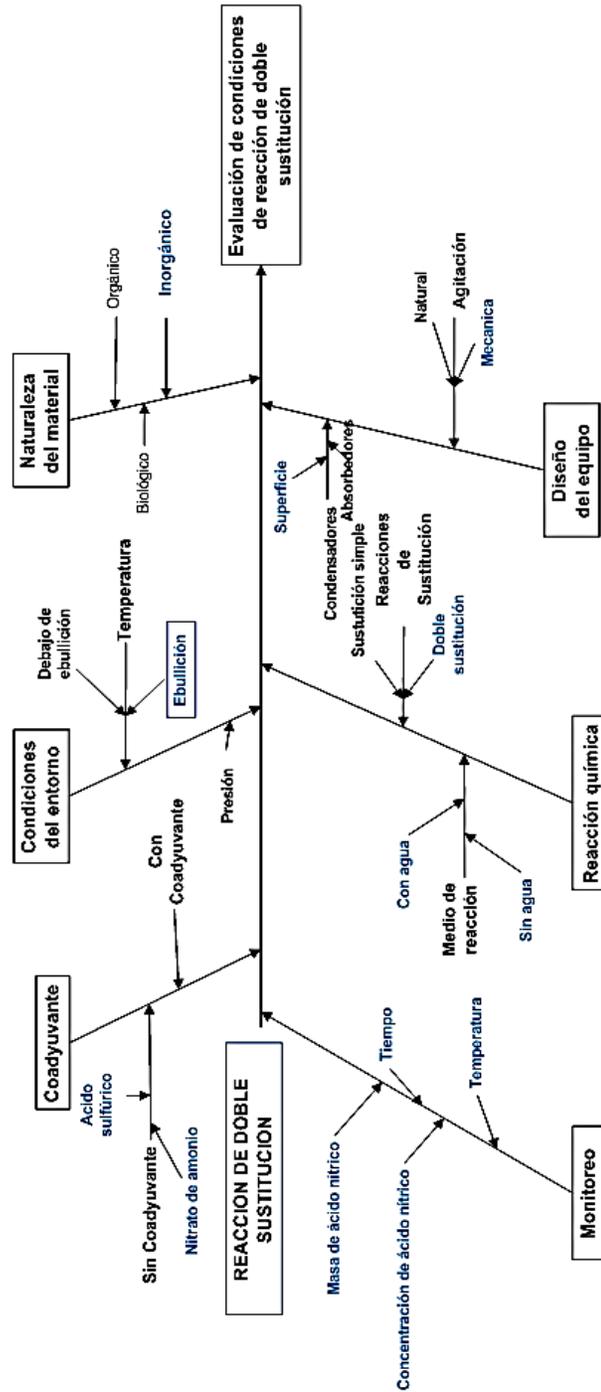
- **FLUJO DE FLUIDOS (IQ2):** Flujo de fluidos y diámetro nominal
- **TRANSFERENCIA DE CALOR (IQ3):** Sellado por Inducción de Calor
- **TRANSFERENCIA DE MASA (IQ4):** Transferencia de masa

### OTRA ÁREA

- **INGENIERÍA ECONOMICA 3:** Análisis económico

Fuente: elaboración propia a partir del diseño metodológico.

Anexo 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia a partir del diseño metodológico.