



# Trabajo de Diploma

---

Sustitución del agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora del sistema de recuperación de Amoniaco.

AUTOR(S): Yonniel Juan Milanés Torres.

TUTOR(ES): Dr.C. Pedro Enrique Beyris Mazar.  
Ing. Ismael Rondón Contrera.

---

Moa, 2023

# Pensamiento

” La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar el mundo”

Nelson Mandela

# Dedicatoria

Con muchísimo amor le dedico este trabajo a mis Padres, que estuvieron siempre presentes en mi educación, ayudándome y motivándome para que tuviera un mejor futuro, gracias a ellos hoy me gradúo de ingeniero metalúrgico.

## Agradecimientos

Agradezco al personal de la planta de Recuperación de amoniaco y Cobalto de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara por la ayuda brindada, a mis tutores Dr.C Pedro Enrique Beyris y el Ing. Ismael Rondón y por su interés en la realización de este trabajo, a todos los que en el momento oportuno me brindaron su apoyo incondicional.

A todos.

Muchas gracias

## Índice

Capítulo I. Antecedentes Bibliográficos .....	10
1.1. Estado del arte de la investigación .....	10
1.2. Absorción. ....	11
1.3. Tipos de absorción: física y con reacción química. ....	11
1.3.1. Absorción física .....	11
1.3.2. Absorción con reacción química.....	11
1.4. Optimización del proceso de absorción. ....	14
1.5. Consumo de amoníaco según el proyecto.....	14
1.6. Pérdidas de amoníaco durante la puesta en marcha. ....	15
Conclusiones del Capítulo I .....	16
Capítulo II. Materiales y métodos.....	17
2.1. Introducción .....	17
2.2. Materiales empleados.....	17
2.3. Equipos empleados.....	17
2.4. Técnicas de análisis empleadas en la investigación.....	17
2.4.1. Método factorial para el desarrollo de la experimentación.....	18
2.4.2. Metodología de toma de muestras.....	20
2.5. Parte experimental.....	21
2.5.1. Diseño de experimentos.....	21
2.6. Descripción de la instalación experimental.....	23
2.7. Modelación estadística .....	25
2.8. Conclusiones del capítulo II.....	26
Capítulo III. Resultados y Discusión .....	27
3.1. Resultados de los experimentos realizados. ....	27
3.2. Comparación de los resultados obtenidos en la depuradora. ....	28
3.3. Valoración de la eficiencia.....	29
3.4. Valoración socio- ambiental. ....	29
3.4.1. Impacto Ambiental .....	29
Conclusiones del capítulo III .....	30
Conclusiones .....	31
Recomendaciones.....	32
Referencias.....	33

## **Resumen**

La sección de recuperación de amoníaco y CO<sub>2</sub> que se encuentra en la planta de recuperación de amoníaco y cobalto, de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, y a pesar de los años ha tratado los gases que provienen de la destilación de licor producto y las colas, junto a los gases provenientes de la termo-eléctrica y la empresa Pedro Soto Alba.

Este trabajo tiene como objetivo determinar cómo influye en la calidad del licor fresco en sustitución del agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora del sistema de recuperación de amoníaco, para ello se determinó la eficiencia de absorción de NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub> bajo diversos factores, como el flujo del amoníaco, la temperatura, la concentración del licor débil y la presión.

Para realizar este trabajo se determinó el número de muestras a procesar a partir del método factorial completo. Las muestras tomadas se realizaron en la parte inferior de la torre depuradora. A través de los resultados obtenidos de las muestras 11 que presenta 74% de absorción de NH<sub>3</sub> y 85% de CO<sub>2</sub> demostramos que es más eficiente la absorción del amoníaco y el dióxido de carbono con esta propuesta de sustitución del absorbente en la torre depuradora. Logrando una mejora en la calidad del licor fresco, minimizando la contaminación ambiental y recuperando los gases de una forma más eficiente.

### Summary

The ammonia and CO<sub>2</sub> recovery section located in the ammonia and cobalt recovery plant of the Comandante Ernesto Che Guevara company, and despite the years, has treated the gases that come from the distillation of product liquor and tails, along with the gases from the thermoelectric plant and the Pedro Soto Alba company.

This work aims to determine how the replacement of washing water with weak recirculation liquor in the purification tower of the ammonia recovery system influences the quality of the fresh liquor; for this, the absorption efficiency of NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> under various conditions was determined factors, such as ammonia flow, temperature, weak liquor concentration, and pressure.

To carry out this work, the number of samples to be processed was determined using the full factorial method. The samples taken were taken at the bottom of the treatment tower. Through the results obtained from samples 11, which present 74% absorption of NH<sub>3</sub> and 85% of CO<sub>2</sub>, we demonstrate that the absorption of ammonia and carbon dioxide is more efficient with this proposal to replace the absorbent in the purification tower. Achieving an improvement in the quality of fresh liquor, minimizing environmental pollution and recovering gases in a more efficient way.

## **Introducción**

La presente investigación está relacionada con el proceso hidrometalúrgico que tiene lugar en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Punta Gorda, la cual inició sus operaciones en el año 1986, cincuenta y cuatro años después de la primera Industria de su tipo en el país y el mundo, la planta René Ramos Latourt en Nicaro, creada por la Freeport Sulphur Co de Estados Unidos de América (EUA). Debido a la existencia de esta planta en el país existía cierta experiencia en la tecnología carbonato-amoniaco (Proceso Caron), no siendo así el caso de otras industrias.

La empresa trabaja bajo el sistema de perfeccionamiento empresarial, método que le permite lograr un nivel competitivo mundial. El desarrollo de la industria del níquel exige cada día más de la realización de investigaciones para lograr una elevada producción, aumentar la eficiencia y disminuir la contaminación ambiental.

La planta de recuperación de amoníaco desempeña un papel fundamental ya que tiene la función de recuperar el amoníaco y el dióxido de carbono de los licores y las colas con el objetivo de formar una solución carbonato amoniaco capaz de lixiviar el níquel concentrado en la pulpa del mineral para lo que se añade una cierta cantidad adicional de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  para reponer las pérdidas sufridas en el proceso y recuperar el níquel mediante la calcinación del carbonato amoniaco básico. La eficiencia es esencial en el proceso tecnológico ya que determina la recuperación del amoníaco y del dióxido de carbono para su recirculación al proceso, lo que disminuye el costo de producción del producto final de la empresa, por tanto, el control sistemático de estos indicadores constituye un elemento esencial.

Por lo que, en el presente trabajo se hará una propuesta de modificación del sistema de absorción en la planta de recuperación de amoníaco, utilizando licor débil de recirculación en la torre depuradora, para lograr mayor eficiencia en la absorción del  $\text{CO}_2$  proveniente de la termo-energética que actualmente pues actualmente no se recupera de manera eficiente.

Al lograr mejorar la absorción de estos gases, entonces mejorara el licor fresco se envía a la planta de lixiviación y lavado, aumentando la eficiencia de la planta y la empresa, también ayudaremos a minimizar la contaminación que se emite cada día, en la planta de recuperación ya que  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  constituyen un alto nivel de contaminantes del medio ambiente.



**El problema de la investigación**

Insuficiente conocimiento de los factores que inciden en la calidad del licor fresco cuando se sustituye el agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora del sistema de recuperación de amoníaco.

**El objeto de la investigación**

Procesos de recuperación de amoníaco en el sistema de absorción de amoníaco y CO<sub>2</sub>.

**El campo de acción**

Regulación físico- Química en los sistemas absorción de amoníaco y CO<sub>2</sub>.

**La hipótesis del trabajo**

Si se sustituye el agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora del sistema de recuperación de amoníaco (NH<sub>3</sub>) se podrá evaluar su influencia en la calidad del licor fresco, en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

**Objetivo General**

Determinar la influencia de los factores (Flujo de NH<sub>3</sub>, Temperatura, Concentración de licor débil y Presión) en la sustitución del agua de lavado de gases por licor débil de recirculación en las torres depuradora en el proceso de recuperación de amoníaco y CO<sub>2</sub>, en el sistema de absorción de amoníaco y CO<sub>2</sub>.

**Objetivos Específicos**

1. Determinar los principales factores que influyen en la sustitución del agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora del sistema de absorción de amoníaco.
2. Evaluar antes y después de la sustitución del agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora.

**Tareas del trabajo**

1. Sistematización de los conocimientos existentes referentes al tema en estudio.
2. Seleccionar los factores a evaluar en la investigación.
3. Implementación y aplicación del diseño experimental en el trabajo.
4. Determinación del modelo estadístico a seguir.
5. Planificación y realización de los análisis químicos.
6. Corroborar la hipótesis planteada mediante el análisis de los resultados.

## **Capítulo I. Antecedentes Bibliográficos**

### **Introducción**

En este capítulo se realiza un análisis bibliográfico de los principales trabajos relacionados sobre el proceso de absorción del amoníaco y el dióxido de carbono, con el objetivo de realizar un análisis crítico de los mismos y establecer los puntos comunes con la presente investigación.

#### **1.1. Estado del arte de la investigación**

La absorción es un fenómeno en el cual un gas se disuelve en un líquido para formar una solución. En el caso del amoníaco y el dióxido de carbono, se utilizan líquidos absorbentes específicos para capturar y eliminar estos gases de corrientes de aire o gases de proceso.

(Esvelín D. y José V., 1993) Abordaron sobre el proceso de absorción que se emplea para extraer componentes valiosos a partir de mezclas gaseosas. Donde la absorción de las moléculas de gas por la fase líquida o sea por transferencia de las masas ocurre en la superficie divisoria de las fases, el gas se difunde en la superficie húmeda de la empaquetadura.

La difusión molecular trata lo relativo de la sustancia en la virtud de su energía térmica. En el caso de la teoría Simplificada, se considera que una molécula se mueve en línea recta a una velocidad uniforme hasta que choque con otra molécula debido a lo cual su velocidad cambia en dirección y magnitud. La difusión molecular conduce a una concentración completamente uniforme de las sustancias a través de una solución que no pudo haber sido uniforme anteriormente. Si la solución es totalmente uniforme en la concentración de sus compañeros no se lleva a cabo ninguna alteración, en caso contrario la solución se dirige espontáneamente por difusión en estado uniforme, moviéndose las sustancias desde el lugar de mayor concentración al de menor concentración.

La absorción consiste en la transferencia físico-química de uno varios componentes solubles presentes en una mezcla en fase gaseosa (soluto) a un líquido que actúa como absorbente (Bravo Valero A., 2009) siendo el soluto absorbido en todo el volumen del líquido absorbente; mientras que, en la adsorción, el compuesto transferido (puede ser gaseoso o líquido), se acumula en la superficie del compuesto que lo recibe. (Tuberti I. y Talanquer V., 1997)

## **1.2. Absorción.**

La absorción consiste en la transferencia físico-química de uno varios componentes solubles presentes en una mezcla en fase gaseosa (soluto) a un líquido que actúa como absorbente (Bravo Valero A., 2009) siendo el soluto absorbido en todo el volumen del líquido absorbente; mientras que, en la adsorción, el compuesto transferido (puede ser gaseoso o líquido), se acumula en la superficie del compuesto que lo recibe (Tuberti I. y Talanquer V., 1997). Existen dos tipos de absorción: física y con reacción química.

## **1.3. Tipos de absorción: física y con reacción química.**

### **1.3.1. Absorción física**

(Kenig E.Y. y Górak A., 2005) Planteó que el proceso de absorción se denomina absorción física, cuando se trata de un proceso físico controlado por la transferencia de materia, que depende de la solubilidad del gas y de las condiciones de operación (presión y temperatura). Cuando se produce una reacción entre el gas absorbido y algún soluto presente en el líquido absorbente, que acelera o exalta el proceso de separación, se trata de absorción química. En este caso, influye la estequiometría de la reacción, la concentración de los reactivos y la velocidad de transferencia de materia.

En la absorción física, no existe reacción química alguna entre la fase gaseosa y la fase líquida, el elemento o compuesto absorbido tiene mayor solubilidad en el absorbente que el resto de compuestos que pudieran estar presentes en la fase gaseosa, (Soriano Bermúdez A.J., 2020) así, tiene lugar una transferencia de materia desde la fase gaseosa a la líquida hasta que la disolución del gas en el absorbente alcance un equilibrio, (Ana Belén L.G., 2013), (Danckwerts P.V., 1953) punto que dependerá directamente de la presión parcial de la corriente gaseosa del compuesto el cual se desea absorber, por ello, la absorción física no resulta del todo rentable cuando se trabaja en condiciones en las que el gas objetivo se encuentra en concentraciones bajas. (US, 2012)

### **1.3.2. Absorción con reacción química.**

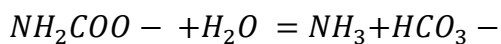
En la elección de los disolventes de absorción, es necesario tener en cuenta diversos factores relacionados, principalmente, con la composición de la corriente gaseosa requerida para su posterior uso y coste. Sin embargo, otras características del

disolvente tales como corrosividad, degradabilidad o facilidad de recuperación son de gran importancia, ya que influyen también en las pérdidas económicas (Zarzycki R. y Chacuk A., 1993). En el sistema de absorción ocurre la disolución del gas de NH<sub>3</sub> contenido en las mezclas gaseosas que provienen de la destilación de las colas y el licor producto, al mismo tiempo, se produce la reacción química de enlazado con el CO<sub>2</sub>, el NH<sub>3</sub> con el agua. La absorción sencilla está acompañada por un mecanismo químico ente el NH<sub>3</sub> y el CO<sub>2</sub>.

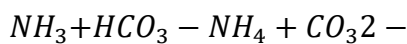
La mayor parte de los investigadores juzgan que la carbonatación se realiza pasando primeramente por el carbonate de amonio según el mecanismo de relación siguiente:



El cual después se hidroliza por la reacción:



Al mismo tiempo, de los productos de la reacción se forma el carbonato



La velocidad de carbonatación se incrementa al aumentar el contenido de NH<sub>3</sub> en el licor y el CO<sub>2</sub> en el gas. Por eso es necesario que los licores conteniendo altas concentración de NH<sub>3</sub> participen en el proceso de absorción, además que los gases provenientes de la planta eléctrica y PSA tengan un alto contenido de CO<sub>2</sub>.

La absorción de las moléculas de gas por la fase líquida (transferencia de masa) se realiza en la superficie húmeda de la empaquetadura de la absolvedora, la cual se difunde el gas en el líquido.

En la superficie de contacto de la empaquetadora húmeda por donde cae el líquido, en el límite de flujos del líquido y en la fase gaseoso se forma una capa limite, la cual forma dos capas pegadas "películas", una de las cuales se componen de la molécula del líquido.

Las composiciones de las partículas líquidas y gaseosas directamente en el límite de ambas fases, responde a la concentración del equilibrio, o sea, que en el límite existente la fase de equilibrio.

Durante el proceso de absorción esta fase perturbada con el ingreso de las nuevas partículas y la salida de las mismas las cuales ya estuvieron en contacto, lo que ocasiona que las composiciones de ambas fases en todo el volumen no vayan a ser iguales. Perturbando la fase de equilibrio, ocasionando concentraciones no iguales del

gas disuelto en la superficie y en el interior del líquido, se realiza la difusión de las moléculas del gas al líquido.

El gas absorbido del líquido se difunde primero en el gas inerte y luego pasa a la partícula de líquido donde forma una solución y después, la solución continúa la masa mayor del líquido. La cantidad de masa que pasa por el gas a la fase líquida está dando por la velocidad de intercambio de masas (transferencia de masa).

Durante el proceso de absorción a contracorriente, donde el gas fluye en sentido contrario, el líquido puede perturbar el proceso de la absorción con una velocidad no proporcional del gas. Esto explica que, en el flujo del gas a contracorriente, el movimiento del líquido es frenado. Esta disminución de velocidad (frenado) del líquido se aumenta durante el incremento de la velocidad del flujo del gas hasta que la fuerza de fricción del gas o del líquido se equilibre a la fuerza de la gravedad, este es el momento donde empieza el llamado ahogamiento o inundación del absolvedor. Esto es causado por un aumento rápido de la cantidad de agua en la empaquetadura y de la velocidad del gas, esto disminuye el diámetro efectivo.

Durante el aumento de la velocidad del flujo de gases en el cual empieza la inundación, se unen la fuerza de gravedad del líquido de abajo hacia arriba y ocurre la inundación del absolvedor.

La condición necesaria para alcanzar un mojado perfecto de la empaquetadura del absolvedor es hacer un duchado uniforme de las capas superiores de las mismas, esto es, densidad de duchado. Se expresa por la cantidad de duchas en  $m^3/m^2$  del diámetro del absolvedor por una hora, (Eselín D. y José V., 1993)

Durante esta absorción, se produce una reacción química entre el gas objetivo de estudio y la fase líquida que, según las condiciones de trabajo, puede ser reversible (US, 2012). Dicha reacción química reduce la presión parcial del gas en estado de equilibrio con la fase líquida que tiene como consecuencia directa el aumento de la solubilidad del gas absorbido. “Si la reacción es irreversible la presión parcial de equilibrio es cero, siempre que exista reaccionante en la fase líquida”, (Tevíño Revert J.A., 2015)

En cuanto a la fase líquida, la absorción del gas depende de factores físico-químicos (solubilidad, concentración, constantes de velocidad de reacción y de equilibrio, etc.)

y factores hidrodinámicos (velocidad de circulación del líquido, densidad, etc.). (Teviño Revert J.A., 2015).

#### **1.4. Optimización del proceso de absorción.**

(Esvelín D. y José V., 1993) Abordaron que el contenido de gas en la solución dependerá de las propiedades del gas y del líquido, de la presión, la temperatura y del contenido de la fase gaseosa (presión parcial del gas solvente en la mezcla gaseosa).

Una solución de un gas en un líquido ejerce, a una temperatura y concentración definida, una presión parcial del gas disuelto, también determinado.

La solubilidad de un gas varía con la presión total, si ésta es grande. Este efecto es pequeño a presiones menores de 5 atmósferas. Una cantidad dada de un líquido disolverá cualquier cantidad de cualquier gas, si es muy soluble o ligeramente soluble, de acuerdo con la presión parcial del gas disuelto en la fase en contacto con el líquido. Cuando una fase gaseosa y otra líquida están en equilibrio, la presión parcial del soluto en la fase gaseosa es igual a la presión parcial del soluto procedente de la fase líquida, a condición de que la fase gaseosa obedezca a la ley de los gases ideales cuando en equilibrio con el líquido se encuentra una mezcla de gases, la ley de Henry se puede emplear para cada uno de los componentes de la mezcla por separado.

La ley de Henry es aplicable para soluciones de gases, cuyas temperaturas críticas son más elevadas que la temperatura de la solución y será solamente para soluciones ideales. Por esta razón, la ley con la exactitud suficiente es aplicable solo para soluciones reales muy diluidas que por sus propiedades se aproximan a las ideales, es decir, se observa bajo concentraciones pequeñas del gas disuelto cuando solubilidad es pequeña. Para los gases con elevada solubilidad, cuando es grande su concentración en la solución, la solubilidad es menor de la que se espera conforme a la ley de Henry.

#### **1.5. Consumo de amoníaco según el proyecto**

El amoníaco se utilizará para compensar las pérdidas en el proceso tecnológico de la fábrica y suministrará al sistema de absorción en forma de amoníaco acuoso (al 25% de  $\text{NH}_3$ ). El consumo de amoníaco se considera igual a 2.84 kg por toneladas de mineral tratado. Ello corresponde al consumo anual de 8400t de amoníaco, o sea, 33 600 t para compensar las pérdidas de agua de destilación de las colas perdidas mecánicas.

### **1.6. Pérdidas de amoníaco durante la puesta en marcha.**

Los factores son diversos, (Manual de operaciones) como perdidas en el sistema de absorción de lixiviación, de recuperación, en la destilación de licor y colas, pérdidas por derrames y salideros, así como las perdidas indeterminadas que son valores altos. También las pérdidas de amónico están dadas también por los frecuentes derrames y salideros que se encuentran en los recipientes, equipos y líneas tecnológicas. En la planta de lixiviación por concepto los salideros proporcionan valores de pérdidas de amoniaco de 1.82 t/d.

Raúl R, M. (1989) planteo que la empresa no ha podido alcanzar la capacidad de la producción prevista por el proyecto, más aún, no se ha estabilizado a plenitud las dos líneas de producción existentes. En la planta de Lixiviación y Lavado se han tenido que poner en operación 15 de 19 sedimentadores instalados. Dadas las deficiencias de su diseño de este equipo motivado por la gran altura de sus brazos del fondo metálicos se forma un piso o cama de mineral de un volumen considerable, aproximadamente el 50% de su volumen; cuando la existencia de un inventario pasivo en licor que acompaña al sólido de la cama de 100 t de  $\text{NH}_3$ , como este  $\text{NH}_3$  es imposible contabilizar se declara pérdida por asimilación de nueva capacidad en sedimentadores. De igual manera cuando los sedimentadores salen de operación o mantenimiento, el  $\text{NH}_3$  en la forma de inventario pasivo tiene que ser eliminado, establecido esto como medida de seguridad y que se logra por difusión del amoníaco al añadir agua se logra de lavado al piso. Por ende, la preparación del sedimentador ocasiona una pérdida de 100 t de  $\text{NH}_3$ .

Desde la puesta en marcha hasta la actualidad la salida de operación de los sedimentadores por cuestiones no es imputable a su reparación programada ha sido una cuestión de gran incidencia, motivado por averías o errores de diseño que ha sido necesario para mantener la operatividad de la fábrica.

En el informe realizado en el año (1996) la planta de recuperación de amoniaco no estaba funcionando bien bajo las condiciones actuales de operación. Con un aumento anticipado en la producción, sobre una base gradual, esta sección de la planta será ineficiente, conduciendo a grandes pérdidas de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del sistema.

Para recuperar los gases, se utiliza el vapor como el “medio de extracción”. El vapor es producido de la turbina de retropresión en la termoeléctrica. La eficiencia de la utilización del vapor es importante para la economía total del proceso. De la misma forma, el valor utilizado en los alambiques de las colas para recuperar el  $\text{NH}_3$  y el  $\text{CO}_2$  antes de descargar el mineral tratado a la presa de colas. En los ambos casos, el empleo de vapor es demasiado alto y se necesita de la optimización del proceso.

Para lograr máxima la absorción de los gases es necesario un enfriamiento adecuado para los licores recirculantes del sistema absolvedor. El sistema actual es muy complicado, ineficiente y se deteriorará posteriormente con altas tasas de producción.

### **Conclusiones del Capítulo I**

Se realizó un análisis bibliográfico de los principales trabajos relacionados sobre el proceso de absorción de amoníaco y el dióxido de carbono, con el propósito de determinar los principales problemas que afectan el funcionamiento de la planta de recuperación de amoníaco y dióxido de carbono. Se determinó que las pérdidas de amoníaco se dan en el sistema de absorción de lixiviación, de recuperación, en la destilación de licor y colas, perdidas por derrames y salideros afectan la eficiencia de la empresa.



## Capítulo II. Materiales y métodos

### 2.1. Introducción

En éste capítulo se expone todo lo referente a los materiales utilizados, así como una descripción de la parte experimental, los métodos de análisis, procedimientos de cálculo empleados, y lo referente a los análisis químicos.

### 2.2. Materiales empleados

Para la realización de este trabajo se empleó licor débil de recirculación producto del sistema de compensación proveniente de los tanques 255-TK-406 y 407 de la Unidad Básica de Producción Recuperación de Amoniac y Cobalto de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

- Licor débil de recirculación.

El licor de recirculación se obtiene a partir de la absorción de los gases de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  obtenidos como consecuencia de la destilación de licor producto y las colas.

El licor es un líquido incoloro, su densidad es de  $1 \text{ t/m}^3$  ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

La composición química de este licor es la es la siguiente:

$\text{NH}_3 = (130 \text{ a } 140) \text{ g/L}$ ,  $\text{CO}_2 = (60 \text{ a } 74) \text{ g/L}$ ,  $\text{Ni} \leq 0,05 \text{ g/L}$

**Nota: (La composición química del licor débil de recirculación, es el resultado de varias muestras promediadas ya que el análisis se realizó a escala industrial).**

### 2.3. Equipos empleados

- Reactor con spin magnético.
- Vaso de precipitados.
- Fluxómetro.
- Embudo.
- Termómetro.
- Pipeta graduada.
- Agitador magnético.
- Columna de vidrio graduada.
- Barómetro.

### 2.4. Técnicas de análisis empleadas en la investigación

- Método matricial factorial completo.
- Análisis de las muestras por el método de análisis químico (NC-ISO 78-2)

#### **2.4.1. Método factorial para el desarrollo de la experimentación.**

En el campo de la industria es frecuente hacer experimentos o pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una idea. Sin embargo, es común que estas pruebas o experimentos se hagan sobre la marcha, con base en el ensayo y error, apelando a la experiencia y a la intuición, en lugar de seguir un plan experimental adecuado que garantice una buena respuesta a las interrogantes planteadas. Aunque se logran mejoras utilizando este método hay situaciones de cierta complejidad, donde es mejor proceder de forma que se obtengan respuestas a las interrogantes planteadas en un periodo corto de tiempo y utilizando pocos recursos. El diseño de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas (Gutierrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R., 2008)

En este trabajo la experimentación se realiza utilizando el método factorial completo. El mismo presupone la combinación de todos los factores con un número de experimentos igual a  $N = O^K$  donde:

O: número de niveles.

K: número de factores.

N: número de ensayos.

Durante la investigación se estudiaron tres factores y dos niveles por lo que la cantidad de ensayos sería  $N = 2^4 = 16$ , donde los factores a estudiar son  $X_1$ : Flujo de  $NH_3$ ,  $X_2$ : Temperatura,  $X_3$ : concentración de licor débil y  $X_4$ : presión. Los niveles serían, para cada uno de estos factores un mínimo y un máximo. Donde, para  $X_1$ : el valor máximo sería  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  y el mínimo  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $X_2$ : el valor máximo sería  $58^\circ\text{C}$  y el mínimo  $38^\circ\text{C}$ ,  $X_3$ : el valor máximo sería  $120 \text{ g/L}$  y el mínimo  $84 \text{ g/L}$ ,  $X_4$ : el valor máximo sería  $38 \text{ A}$  y el mínimo  $32 \text{ A}$ . **Nota: (La presión de va a estar dada por el rendimiento del ventilador 255-BE-405).** A partir de esto se elabora la matriz codificada que se muestra en la tabla 1.

<b>Ensayos</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>X<sub>3</sub></b>	<b>X<sub>4</sub></b>
<b>1</b>	+	+	+	-
<b>2</b>	-	+	+	+
<b>3</b>	+	-	+	-
<b>4</b>	-	-	+	+
<b>5</b>	+	+	-	-
<b>6</b>	-	+	-	+
<b>7</b>	+	-	-	-
<b>8</b>	-	+	-	+
<b>9</b>	-	+	+	-
<b>10</b>	+	-	+	+
<b>11</b>	-	-	+	-
<b>12</b>	+	+	+	+
<b>13</b>	-	+	-	-
<b>14</b>	+	-	-	+
<b>15</b>	-	-	-	-
<b>16</b>	+	-	-	+

Tabla 1 Matriz de experimentación codificada.

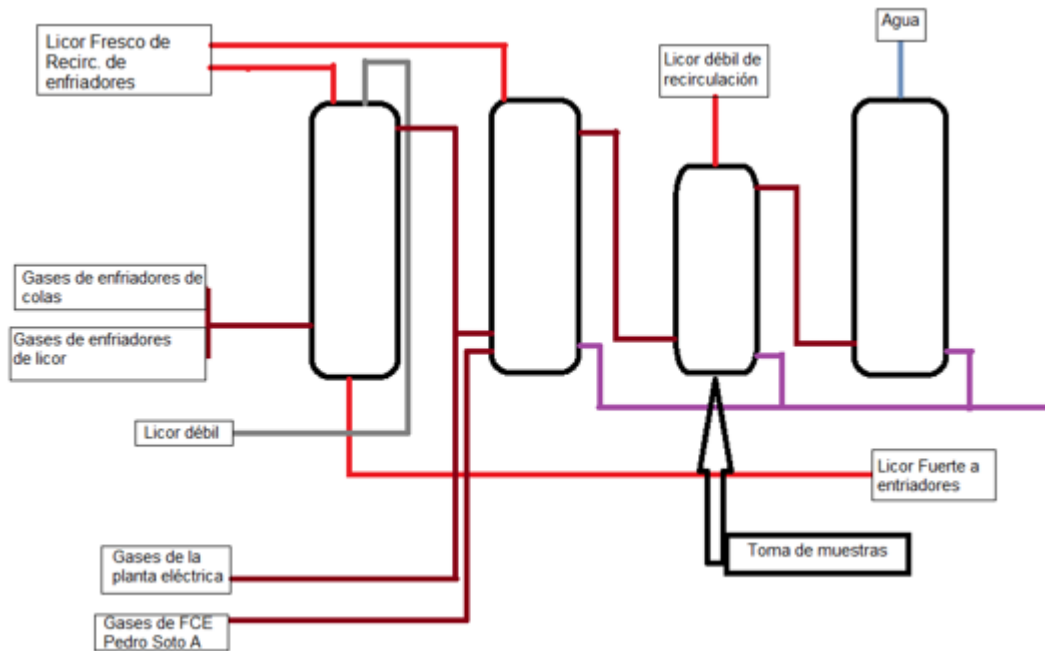
La matriz descodificada, teniendo en cuenta los valores predeterminados para los niveles y factores se presenta en la tabla 2

Experimentos	Flujo de NH <sub>3</sub>	Temperatura, presión	Concentración de licor débil	Presión
1	15	41	120	32
2	10	41	120	38
3	15	38	120	32
4	10	38	120	38
5	15	41	84	32
6	10	41	84	38
7	15	38	84	32
8	10	41	84	38
9	10	41	120	32
10	15	38	120	38
11	10	38	120	32
12	15	41	120	38
13	10	41	84	32
14	15	38	84	38
15	10	38	84	32
16	15	38	84	38

**Tabla 2. Matriz descodificada.**

#### **2.4.2. Metodología de toma de muestras.**

Para la toma de las muestras se realizó por cada 12 horas por la parte inferior de la torre depuradora. En la figura 1 se muestra el esquema utilizado en la investigación.



**Figura 1. Esquema del flujo tecnológico del sistema de recuperación de NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>**

### 2.5. Parte experimental

Para llevar a cabo la parte experimental, (Rubén E., 2021) se preparan matraces de 100mL de agua destilada y disoluciones de NH<sub>3</sub>, al hacer tres medidas de cada concentración, se prepara una para cada medida de las concentraciones escogidas (0.05M, 0.1M, 0.3M, 0.5M, 0.8M, 1 M), todas con un volumen final de 100mL. Para obtener el volumen de NH<sub>3</sub> a añadir en cada disolución, se debe calcular previamente la cantidad necesaria a tomar de este compuesto partiendo de los siguientes datos del etiquetado del NH<sub>3</sub>:

Densidad: 0.895g/mL      M: 17.03g/mol Riqueza: 30%

#### 2.5.1. Diseño de experimentos

Teniendo en cuenta dichos datos, se realizan los cálculos pertinentes para tomar la cantidad requerida de amoníaco:

AMONIACO 0,05 M:

$$\left(\frac{0.05\text{mol}}{L}\right) \times \left(\frac{1L}{1000mL}\right) \times 100mL \times \left(\frac{17.03g}{mol}\right) \times \left(\frac{1mL}{0.895g}\right) \times \left(\frac{1}{0.3}\right) = 0.317mL$$

AMONIACO 0.1 M:

$$\left(\frac{0.1\text{mol}}{L}\right) \times \left(\frac{1L}{1000mL}\right) \times 100mL \times \left(\frac{17.03g}{mol}\right) \times \left(\frac{1mL}{0.895g}\right) \times \left(\frac{1}{0.3}\right) = 0.634mL$$

AMONIACO 0.3 M:

$$\left(\frac{0.3\text{mol}}{L}\right) \times \left(\frac{1L}{1000\text{mL}}\right) \times 100\text{mL} \times \left(\frac{17.03\text{g}}{\text{mol}}\right) \times \left(\frac{1\text{mL}}{0.895\text{g}}\right) \times \left(\frac{1}{0.3}\right) = 1.902\text{mL}$$

AMONIACO 0.5 M:

$$\left(\frac{0.5\text{mol}}{L}\right) \times \left(\frac{1L}{1000\text{mL}}\right) \times 100\text{mL} \times \left(\frac{17.03\text{g}}{\text{mol}}\right) \times \left(\frac{1\text{mL}}{0.895\text{g}}\right) \times \left(\frac{1}{0.3}\right) = 3.171\text{mL}$$

AMONIACO 0.8 M:

$$\left(\frac{0.8\text{mol}}{L}\right) \times \left(\frac{1L}{1000\text{mL}}\right) \times 100\text{mL} \times \left(\frac{17.03\text{g}}{\text{mol}}\right) \times \left(\frac{1\text{mL}}{0.895\text{g}}\right) \times \left(\frac{1}{0.3}\right) = 5.171\text{mL}$$

AMONIACO 1 M:

$$\left(\frac{1\text{mol}}{L}\right) \times \left(\frac{1L}{1000\text{mL}}\right) \times 100\text{mL} \times \left(\frac{17.03\text{g}}{\text{mol}}\right) \times \left(\frac{1\text{mL}}{0.895\text{g}}\right) \times \left(\frac{1}{0.3}\right) = 6.342\text{mL}$$

Una vez obtenidos los volúmenes necesarios, se procede a la elaboración de las disoluciones para lo cual se vierte una cantidad aproximada en un vaso de precipitados para evitar una posible contaminación cruzada. En este experimento, se realizan 3 repeticiones para cada molaridad y temperatura por lo que se preparan 3 matraces para cada concentración (0.05M, 0.1M, 0.3M, 0.5M, 0.8M y 1M) Además de las disoluciones, se prepara otros 3 matraces con agua destilada para las medidas del H<sub>2</sub>O. Para añadir la cantidad de NH<sub>3</sub> necesario en cada disolución, se hace uso de pipetas graduadas del tipo A de 1mL, 2mL, 5mL y 10mL, según el volumen requerido para cada preparación a fin de no desperdiciar producto. Cada volumen es vertido respectivamente en un matraz aforado de 100mL y se enrasa con agua destilada con ayuda de una pipeta Pasteur.

Paralelamente, se realiza en una cabina aislada el montaje del equipo necesario para la toma de datos que consiste en: un baño termostático, utilizado para atemperar de forma constante los matraces que se dispondrán en su interior (para evitar que se puedan dañar o flotar, se utiliza en cada uno de ellos, un aro de sujeción metálico), también dentro del baño, se introduce un frasco lavador de gases que sirve para humedecer el gas al pasar por su interior, a continuación, se conecta a un flujo de gas, situado junto a un flujómetro con graduación y banda blanca, que se encuentra conectado a un reactor encamisado de vidrio y sellado superiormente con una tapa de dos bocas una de 29/32 y otra 14/23 aplicando silicona, consiguiendo así, que la temperatura del

interior del reactor se mantenga a la misma que la del baño. Finalmente, se coloca el reactor sobre un agitador magnético y se conecta a una columna de vidrio graduada en cuya parte inferior se instala una pera de silicona que contiene una mezcla jabonosa que se utiliza para hacer las burbujas al paso del flujo de  $\text{CO}_2$ . De esta forma, el montaje del circuito para el experimento estaría finalizado tal y como puede verse en el anexo 1 figura 2.

## **2.6. Descripción de la instalación experimental**

Antes de comenzar, se mide la presión atmosférica mediante un barómetro en el laboratorio y una vez todo preparado, se introducen los matraces con el agua (blanco) y las disoluciones con cada concentración en el baño termostático que se ajusta para la temperatura escogida para esa tanda ( $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ) y se enciende junto al flujómetro, simultáneamente, se abre la llave que deja pasar un flujo constante de  $\text{CO}_2$ . De este modo se deja que el reactor encamisado tome la temperatura del baño y que el flujo de gas expulse el aire que hay previamente en el interior de éste durante, aproximadamente, 12 minutos; una vez se alcanza la temperatura, se introduce en el interior del reactor un spin magnético y se añade la disolución/blanco objetivo con ayuda de un embudo para evitar fugas. Seguidamente, se cierra de nuevo el reactor y se espera otros 3 minutos para que el  $\text{CO}_2$  expulse el posible aire que haya podido entrar en el interior del reactor. Anexo 1 (Figura 3)

Pasado el tiempo de espera para que no haya  $\text{O}_2$  en el interior del reactor, se presiona la pera de silicona con la finalidad de hacer ascender burbujas de jabón por el paso de flujo de  $\text{CO}_2$  obteniendo un grupo de burbujas que humedecen las paredes de la columna graduada, tras varias tandas de burbujas, tomaremos un grupo como referencia para la toma de datos. Se deja ascender el grupo referencia de burbujas (del cual haremos seguimiento de la inferior) hasta quedar por encima de 0 mL, pero sin salir de la columna graduada (Anexo 2.Figura 4), en ese momento se cierra la llave de paso de flujo de  $\text{CO}_2$  y se activa el agitador magnético de forma que se crea vacío en el reactor, lugar donde tiene lugar la absorción de  $\text{CO}_2$ , esto se refleja en el descenso de las burbujas a lo largo de la columna, descenso que se registra cada mililitro descendido en segundos hasta tener 25 medidas. Obtenidos los datos, se apaga el agitador magnético, se retiran las conexiones del reactor, se extraen el spin de su interior mediante una varilla magnética y se vierte el contenido residual del reactor en

su contenedor correspondiente para ser tratado correctamente. Finalmente, para eliminar toda la humedad del reactor tras lavarlo con agua destilada y poder volver a utilizarlo, se introduce en una estufa Memmert de aireación forzada (DIN 12880 KL, Typ.: ULE 600, 230 V, F. – Nr: g600. 0006) durante unos 20 minutos sacándolo con precaución usando unos guantes aislantes del calor. Tras eliminar toda la humedad, se procede de nuevo al montaje experimental y se activa el reflujo de agua; para atemperar el sistema de forma más rápida a los grados 13 deseados, se ayuda añadiendo hielo al interior del baño termostático. Este proceso se repetirá para cada repetición, concentración y temperatura comprobando que no existan diferencias significativas entre las tres medidas de una misma concentración a la misma temperatura, en cuyo caso se realiza una cuarta medida para evitar fallos en el tratamiento de los datos. Tomados todos los tiempos y registrados en ordenador con ayuda de una hoja de cálculo, se calcula el promedio (=PROMEDIO (“primera medida”: “segunda medida”: “tercera medida”)) y la desviación típica (=DESVEST (“primera medida”: “segunda medida”: “tercera medida”)). A continuación, se simplifican las tablas mostrando el volumen (0 mL a 25mL), el promedio expresado en segundos y la desviación típica anteriormente calculadas y se sitúan en tablas ordenados por concentraciones frente a temperaturas y viceversa {ANEXO 3, (tablas 3-9) y ANEXO 4 (tabla 10-15)}. Elaboradas todas las tablas, se procede a hacer una gráfica que exprese la absorción del CO<sub>2</sub> en función de la temperatura y las concentraciones. Por un lado, se elaboran las tablas que muestran los niveles de absorción en función de la temperatura para una misma concentración y por otro, las gráficas que muestra la variabilidad en la absorción en función de las concentraciones para una misma temperatura. Posteriormente, se elaboran las tablas del caudal (Q) y del flujo de absorción, para ello obtendremos la ecuación de la recta (y=ax+b) y la R<sup>2</sup> de las gráficas. El caudal es igual a la pendiente “a” de la ecuación de la recta y para obtener el flujo de absorción de CO<sub>2</sub>, se servirá de esta fórmula:

$$\text{Flujo} = P \times Q / (R \times T \times A) \text{ (mol / mx } 2 \times \text{s)}$$

Donde

- P es la presión expresada en atm;
- Q el caudal obtenido en la ecuación de la recta;
- R la constante universal de los gases (0.082 (atm × L) / (K × mol));



- T la temperatura expresada en K y A el área interfacial ( $35.2610 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ).

Tras haber realizado todos los cálculos requeridos para el análisis de los datos, se procede a su discusión.

## 2.7. Modelación estadística

La modelación estadística constituye una de las herramientas principales para determinar la influencia de factores por separado en un proceso determinado, teniendo como objetivo la matriz de un modelo estadístico lineal. El cual tendrá como base la influencia de cada factor en la variable de salida. La cual estará en función de la matriz experimental.

Los datos a obtener desde el punto de vista técnico y experimental se procesarán en el software Microsoft Excel 2007.

### Determinación de la eficiencia de absorción (Balance total).

$$A + B + C = D + E$$

Entonces:

**A:** Colas a destilación + licor producto a destilación (LP) + gases de la termo-eléctrica (CTE) + gases de la PSA.

**B:** H<sub>2</sub>O

**C:** Solución compensadora (SC)

**D:** Licor fresco. (LF)

**E:** Gases a la atmósfera.

$$\text{Colas} + \text{LP} + \text{CTE} + \text{PSA} + \text{H}_2\text{O} + \text{SC} = \text{LF} + \text{Gases}$$

### Balance por componentes.

Para el NH<sub>3</sub>:

$$NH_{3\text{Colas}} + NH_{3\text{LP}} + NH_{3\text{SC}} = NH_{3\text{LF}} + NH_{3\text{Gases}}$$

Para el CO<sub>2</sub>:

$$CO_{2\text{Colas}} + CO_{2\text{LP}} + CO_{2\text{CTE}} + CO_{2\text{PSA}} = CO_{2\text{LF}} + CO_{2\text{Gases}}$$

La eficiencia de la absorción está determinada por la cantidad de NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub> que son absorbidos respecto a los gases totales que entran al sistema, o sea:

Para el amoniaco:

$$E_{NH_3} = \frac{NH_{3\text{LF}}}{NH_{3\text{TOTAL}}} * 100$$

$$E_{NH_3} = \frac{NH_{3LF}}{NH_{3Colas} + NH_{3LP} + NH_{3SC}} * 100$$

Para el CO<sub>2</sub>:

$$E_{CO_2} = \frac{CO_{2LF}}{CO_{2TOTAL}} * 100$$

$$E_{CO_2} = \frac{CO_{2LF}}{CO_{2Colas} + CO_{2LP} + CO_{2CTE} + CO_{2PSA}} * 100$$

## **2.8. Conclusiones del capítulo II**

Se muestran los principales materiales, reactivos, equipamientos y metodologías utilizados en la investigación. Se utilizó el análisis de las muestras por el método de análisis químico para garantizar la confiabilidad de los resultados. Se determinó el número de experimentos a realizar utilizando el método matricial factorial completo y el balance total para determinar la eficiencia de absorción del NH<sub>3</sub> y el CO<sub>2</sub>.

### Capítulo III. Resultados y Discusión

#### Introducción

Este capítulo tiene como objetivo valorar íntegramente todos los resultados alcanzados en la investigación para así explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado. Empleando para ello un análisis detallado de cada uno de los factores que intervienen en el trabajo.

#### 3.1. Resultados de los experimentos realizados.

En la tabla 16, se muestra los resultados de la absorción en función de las condiciones de experimentación.

Experim entos	Flujo de NH <sub>3</sub> m <sup>3</sup> /h	Temperatu ra (°C)	Concentración de licor débil g/L	Presión Ampere	R-22
1	15	41	120	32	137.3
2	10	41	120	38	100.90
3	15	38	120	32	131.9
4	10	38	120	38	101.3
5	15	41	84	32	128.3
6	10	41	84	38	134.9
7	15	38	84	32	128.0
8	10	41	84	38	134.8
9	10	41	120	32	119.9
10	15	38	120	38	108.9
11	10	38	120	32	137.5
12	15	41	120	38	116.6
13	10	41	84	32	128.3
14	15	38	84	38	134.4
15	10	38	84	32	118.6
16	15	38	84	38	130.6

Tabla 16. Resultados de la absorción en función de las condiciones de experimentación.

En estas tablas se observa la mayor absorción de los gases en los resultados en la muestra 11, obteniendo una mejora en licor fresco de la R-22, y este se envía a la planta de lixiviación, la cual pertenece a un flujo de 10 m<sup>3</sup>/h, una temperatura de 38°C, una concentración de 120 g/L y una presión de 32 A.

A continuación aremos un análisis comparativo mediante el gráfico 1.

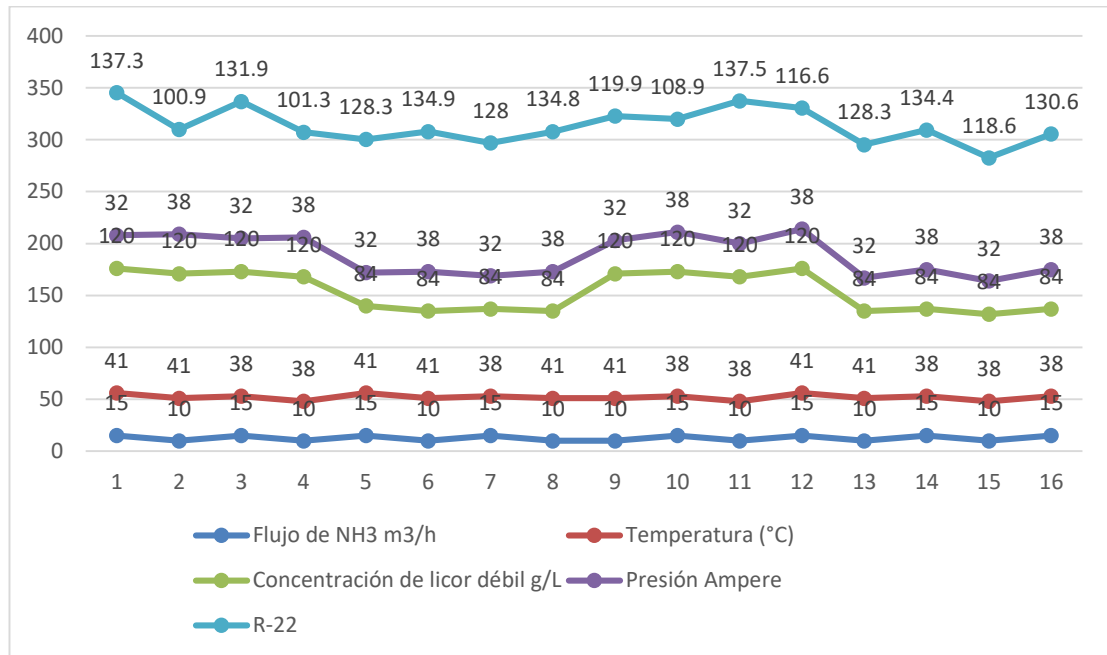


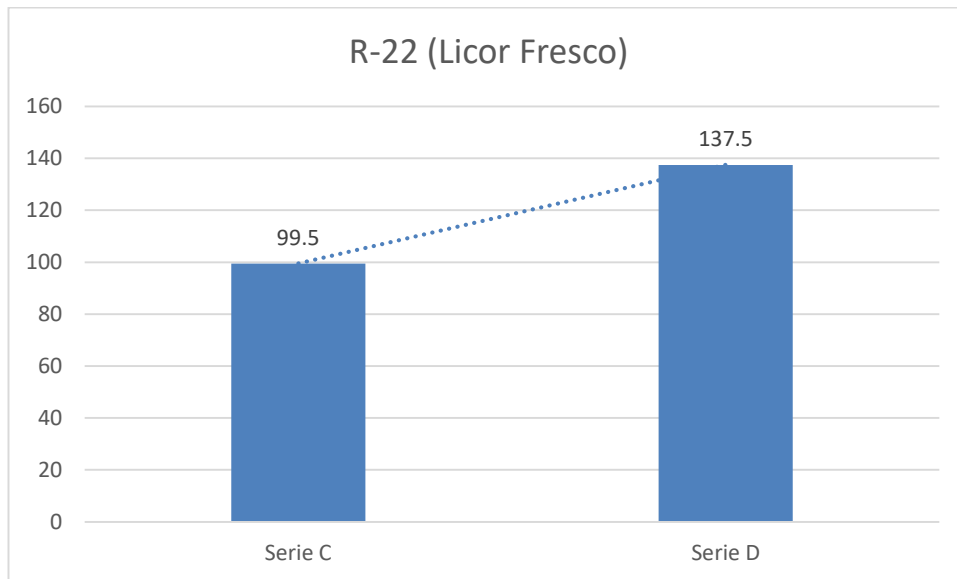
Gráfico 1. Comportamiento de la R-22 según los diferentes factores.

### 3.2. Comparación de los resultados obtenidos en la depuradora.

En tabla 17 y gráfico 2 se evidencia los resultados obtenidos en la depuradora de la serie C y la serie D después de la utilización de licor débil de recirculación, mostrando una mejora en la eficiencia de la absorción del NH<sub>3</sub> y el CO<sub>2</sub>, estos varía en dependencia de los parámetros utilizados, y comparándolos con los de absorción de las otras series de la planta esta tiene mayor eficiencia.

	Serie C	Serie D
R-22	99.5	137.5

Tabla 17. Resultados obtenidos en depuradora la serie C y la Serie D después de la utilización de licor débil en la torre depuradora.



**Gráfica 2. Muestra la comparación entre la depuradora de la serie C y la serie D después de la utilización de licor débil en la torre depuradora.**

En esta gráfica se puede observar como hay un aumento de licor de fresco favorable aunque esto puede variar en dependencia de las concentraciones del licor débil de recirculación y de los otros factores analizados en este trabajo.

### **3.3. Valoración de la eficiencia.**

La eficiencia de la absorción de está determinada por la cantidad de amoníaco y dióxido de carbono que fueron absorbidos respecto al total de gases que entran al sistema de absorción de gases para el  $\text{NH}_3$  fue de un 74 % y para el  $\text{CO}_2$  fue 85%,

### **3.4. Valoración socio- ambiental.**

#### **3.4.1. Impacto Ambiental**

Para el proceso de absorción se utiliza el vapor con contenido de  $\text{CO}_2$ , es más ligero que el aire y forman con él mezclas explosivas y tóxicas. Cuando absorbe vapor de agua del aire se hace más pesado y tiende a bajar. Este gas en concentraciones pequeñas puede provocar el adormecimiento y mareos. El amoníaco acciona al organismo de diferentes formas según las vías de penetración al mismo y estas pueden ser:

- **Inhalación:** El gas puede ser sofocante. Es extremadamente irritante a la membrana mucosa y al tejido del pulmón. Puede ocasionar lesión permanente o muerte si es una exposición prolongada a altas concentraciones. Provoca

quemaduras y ampollas de la piel, así como edema de pulmón serio, ocurren rápidamente cuando está por encima de los 1700 mg/L en el aire.

- Contacto con los ojos: Es extremadamente irritante para los ojos. Por encima de los 700 mg/L en el aire ocasiona lesiones severas a los ojos y posible pérdida de la visión si no se trata de forma inmediata.
- Contacto con la piel: El Amoníaco no es un veneno, pero su alcalinidad es corrosiva a los tejidos del cuerpo, los daños en la piel pueden ocurrir debido al contacto repetido, prolongado o a exposición a altas temperaturas. El contacto con Amoníaco líquido producirá quemaduras por el frío, además de los daños corrosivos.
- Ingestión: Extremadamente corrosivo.

Posibles efectos crónicos a la salud: Este producto no se considera cancerígeno.

#### **Medidas para eliminarlos o mitigarlos:**

El empleo de los medios de protección individual que se utilizan en el puesto de trabajo tales como: overol de trabajo, bota de trabajo, caretas contra gases con filtro para amoniaco, tapones contra ruido. Control estricto de las operaciones con el objetivo de evitar salideros.

#### **Conclusiones del capítulo III**

- Se evaluaron los parámetros que describen el proceso de absorción en función del flujo del  $\text{NH}_3$ , la temperatura, la presión y la concentración del licor de recirculación débil.
- Se determinaron los cálculos preliminares de los experimentos aplicados, demostrando que la muestra 11 es la más factible, pues al tener un flujo de  $\text{NH}_3$ : 12 m<sup>3</sup>/h, una temperatura: 38°C, una concentración de licor débil: g/L y presión: 32A.
- Desde el punto de vista socio ambiental con la disminución de los gases emitidos al medio ambiente, los daños a las personas disminuyen cuantitativamente al mantenerse en los valores permisible.

**Conclusiones**

Los factores que se tuvieron en cuenta como el flujo de  $\text{NH}_3$ , temperatura, concentración del licor débil y la presión, el que más influyó en la absorción de los gases fue la temperatura pues con  $38^\circ\text{C}$  se logró mejorar el licor fresco de la R-22 que se envía a la planta de lixiviación.

- La eficiencia de absorción de  $\text{NH}_3$  de 74 % y para el  $\text{CO}_2$  fue 85%, demostrando que la propuesta de sustitución de agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora es factible.
- Se determinó la cantidad de muestras a procesar utilizando el método matricial.
- Se ayudó a minimizar en la planta de recuperación de amoníaco y  $\text{CO}_2$  la contaminación ambiental y sobre todo al cuidado de cada trabajador con el uso de los medios de protección.

## **Recomendaciones**

Teniendo en cuenta las necesidades que tiene la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, en el proceso de recuperar los gases en la planta de Recuperación de amoníaco y dióxido de carbono, y mejorar el licor fresco que se envía a la planta de recuperación lixiviación se recomienda.

- Realizar un estudio cómo se comportaron las pérdidas por chimeneas en la torre final después de haber sustituido el agua de lavado por licor débil de recirculación en la torre depuradora del sistema de absorción de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ .
- Realizar un estudio más profundo de como minimizar o solucionar las pérdidas que hay en las planta de recuperación de amoníaco y dióxido de carbono causado por las deterioro o rupturas de las tuberías y la mala operación de los trabajadores. Ya que esto constituyen pérdidas de materia prima, afectando a la planta y a la empresa.



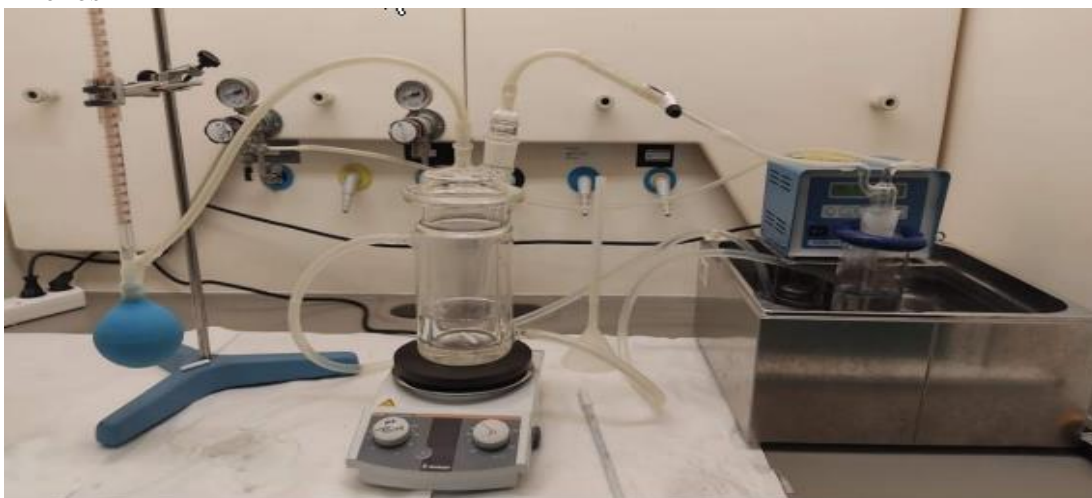
**Referencias**

- Ana Belén L.G. (2013). *Absorción del Dióxido de Carbono, a elevadas presiones parciales, por disoluciones de mezclas binarias de alcalinoaminas*. Universidad de Jaén, España.
- Bravo Valero A. (2009). *Evaluación del efecto de la concentración y flujo de hidróxido de sodio en la absorción química del dióxido de carbono puro en la columna de relleno del laboratorio de operaciones y procesos unitarios de la FIQ*. Universidad nacional del centro de Perú, Perú.
- Danckwerts P.V. (1953). *Temperature effects accompanying the absorption of gases in liquids*. Appl. Sci. Res. 3 (A).
- Eselín D. y José V. (1993). *Valoración de la eficiencia en la absorción de NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub> con anillos cerámicos*. ISMM. Moa, Holguin, Cuba.
- Gutierrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y Diseño de experimentos*. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara, México: editorial McGraw – Hill Interamericana, p. 564.
- Kenig E.Y. y Górak A. (2005). *Reactive absorption, in K Sundmacher, A. Kienle, A. Seidel Morgenstern (Eds.), Integrated Chemical Processes, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. . Weinheim, Germany,*.
- Manual de operaciones. (s.f.). *Manual de operaciones de la planta de recuperación de amoníaco, fábrica Comandante Ernesto Che Guevara*. Moa.
- NC-ISO 78-2. (s.f.). *Disposiciones para las normas Parte 2. Método de análisis químico*.
- Rubén E., (2021). *Absorción física y con reacción química de dióxido de carbono en disoluciones de amoníaco*. Jaén.
- Soriano Bermúdez A.J. (2020). *Absorción física y con reacción química de dióxido de carbono en disoluciones de etanolamina*. TFG Universidad de Jaén.
- Teviño Revert J.A. (2015). *Transferencia de materia en procesos de absorción con reacción química*. Tesis doctoral Universidad Complutense de Madrid.
- Tuberti I. y Talanquer V. (1997). *“Para saber, experimentar y simular sobre adsorción”*. Universidad nacional autónoma de México: Revista Educación química. Vol. 8, N°4.

US. (2012). *Absorción Química como sistema de abatimiento*. <http://bibing.us.es> .

Zarzycki R. y Chacuk A. (1993). *Absorption: Fundamentals and Applications*.  
universidad de Oxford, Reino Unidos: Pergamon Press.

Anexos 1



**Figura 2: Montaje del circuito experimental. Fuente: Propia**



**Figura 3: Reactor con spin magnético y disolución en su interior.**

## Anexo 2



**Figura 4: Columna graduada.**

**Anexo 3**

**TIEMPOS DE ABSORCIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA**

Tabla 3. Tiempos de absorción para el H2O en función de la temperatura (de 15°C a 40°C)

H2O												
Volumen (mL)	15°C (288K)	Desviación Típica	20°C (293K)	Desviación Típica	25°C (298K)	Desviación Típica	30°C (303K)	Desviación Típica	35°C (308K)	Desviación Típica	40°C (313K)	Desviación Típica
	TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	11	0,0052	9	0,0010	8	0,0005	6	0,0005	8	0,0000	9	0,0000
2	22	0,0048	19	0,0025	17	0,0005	13	0,0020	17	0,0005	20	0,0000
3	36	0,0023	28	0,0039	26	0,0005	20	0,0044	24	0,0000	27	0,0005
4	48	0,0014	37	0,0049	35	0,0005	28	0,0054	32	0,0000	36	0,0000
5	60	0,0084	48	0,0059	43	0,0015	35	0,0069	41	0,0000	46	0,0005
6	71	0,0062	58	0,0069	51	0,0010	42	0,0079	48	0,0005	55	0,0005
7	83	0,0074	68	0,0083	60	0,0015	49	0,0088	56	0,0000	64	0,0010
8	95	0,0084	78	0,0093	68	0,0025	57	0,0103	63	0,0000	73	0,0005
9	107	0,0021	88	0,0098	78	0,0020	65	0,0123	72	0,0005	82	0,0005
10	120	0,0015	98	0,0103	87	0,0020	73	0,0108	80	0,0000	91	0,0005
11	132	0,0057	109	0,0108	97	0,0029	80	0,0128	88	0,0000	100	0,0015
12	144	0,0106	119	0,0113	105	0,0029	88	0,0137	96	0,0005	110	0,0005
13	156	0,0041	130	0,0108	114	0,0034	97	0,0137	106	0,0000	120	0,0010
14	169	0,0210	140	0,0108	124	0,0039	105	0,0152	115	0,0000	131	0,0010
15	181	0,0058	151	0,0108	134	0,0039	114	0,0162	124	0,0000	141	0,0005
16	194	0,0041	162	0,0103	149	0,0044	122	0,0167	133	0,0005	152	0,0000
17	207	0,0084	173	0,0093	159	0,0025	132	0,0187	143	0,0000	161	0,0005
18	220	0,0074	185	0,0088	169	0,0039	142	0,0192	152	0,0005	172	0,0005
19	232	0,0054	195	0,0079	179	0,0025	150	0,0201	163	0,0005	183	0,0010
20	242	0,0087	207	0,0069	189	0,0020	160	0,0211	173	0,0010	194	0,0005
21	254	0,0098	217	0,0049	200	0,0010	169	0,0216	184	0,0005	202	0,0010
22	266	0,0025	228	0,0034	209	0,0000	178	0,0231	194	0,0005	213	0,0010
23	278	0,0044	240	0,0020	219	0,0010	187	0,0221	206	0,0005	222	0,0010
24	289	0,0058	251	0,0005	228	0,0020	197	0,0221	216	0,0015	232	0,0010
25	301	0,0025	263	0,0025	238	0,0000	205	0,0226	227	0,0005	239	0,0011

		0,05M											
Volumen (mL)	15°C (288K)	Desviación Típica	20°C (293K)	Desviación Típica	25°C (298K)	Desviación Típica	30°C (303K)	Desviación Típica	35°C (308K)	Desviación Típica	40°C (313K)	Desviación Típica	
	TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	8	0,0029	6	0,0065	5	0,0083	6	0,0005	6	0,0015	7	0,0000	
2	12	0,0020	13	0,0005	11	0,0079	13	0,0021	13	0,0025	12	0,0010	
3	17	0,0039	19	0,0000	17	0,0079	20	0,0015	18	0,0020	17	0,0005	
4	23	0,0044	25	0,0005	24	0,0079	28	0,0057	24	0,0020	22	0,0010	
5	28	0,0059	32	0,0005	30	0,0083	34	0,0106	31	0,0029	26	0,0010	
6	34	0,0064	39	0,0000	36	0,0083	40	0,0041	36	0,0029	31	0,0010	
7	40	0,0074	46	0,0005	42	0,0079	47	0,0210	42	0,0034	36	0,0010	
8	46	0,0083	52	0,0005	49	0,0079	54	0,0058	47	0,0039	41	0,0011	
9	52	0,0088	59	0,0005	55	0,0079	61	0,0041	53	0,0039	46	0,0005	
10	58	0,0088	66	0,0010	62	0,0074	67	0,0084	59	0,0045	50	0,0005	
11	63	0,0093	73	0,0015	69	0,0021	74	0,0087	64	0,0058	55	0,0005	
12	69	0,0093	80	0,0015	75	0,0024	81	0,0102	70	0,0057	59	0,0010	
13	75	0,0074	87	0,0025	82	0,0026	87	0,0018	75	0,0084	64	0,0005	
14	81	0,0083	93	0,0025	88	0,0029	93	0,0021	82	0,0025	69	0,0010	
15	90	0,0079	100	0,0029	95	0,0029	100	0,0025	87	0,0029	74	0,0005	
16	96	0,0079	107	0,0034	102	0,0034	106	0,0029	93	0,0020	78	0,0010	
17	103	0,0079	114	0,0034	108	0,0039	112	0,0029	99	0,0039	83	0,0010	
18	109	0,0083	120	0,0039	115	0,0039	119	0,0034	105	0,0044	88	0,0010	
19	115	0,0083	127	0,0044	121	0,0044	126	0,0039	111	0,0059	92	0,0011	
20	121	0,0079	134	0,0049	128	0,0025	132	0,0201	117	0,0064	97	0,0005	
21	128	0,0079	141	0,0059	135	0,0106	139	0,0211	122	0,0074	101	0,0005	
22	134	0,0079	147	0,0064	141	0,0041	146	0,0216	128	0,0083	106	0,0005	
23	140	0,0074	154	0,0069	148	0,0210	151	0,0231	134	0,0088	110	0,0010	
24	147	0,0097	161	0,0074	154	0,0058	158	0,0221	140	0,0088	115	0,0005	
25	153	0,0099	168	0,0079	161	0,0041	165	0,0084	145	0,0095	119	0,0010	

Tabla 4. Tiempos de absorción para el NH<sub>3</sub> 0,05M en función de la temperatura (de 15°C a 40°C)

0,1 M												
Volumen (mL)	15°C (288K)	Desviación Típica	20°C (293K)	Desviación Típica	25°C (298K)	Desviación Típica	30°C (303K)	Desviación Típica	35°C (308K)	Desviación Típica	40°C (313K)	Desviación Típica
	TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4	0,0010	7	0,0010	6	0,0005	6	0,0005	5	0,0001	5	0,0000
2	9	0,0010	14	0,0025	12	0,0005	12	0,0020	10	0,0050	9	0,0005
3	14	0,0025	19	0,0039	18	0,0005	19	0,0044	14	0,0010	15	0,0000
4	19	0,0020	25	0,0049	24	0,0005	24	0,0054	19	0,0012	18	0,0000
5	24	0,0039	30	0,0059	30	0,0015	30	0,0069	24	0,0025	22	0,0005
6	29	0,0039	35	0,0069	36	0,0010	36	0,0079	28	0,0064	26	0,0000
7	34	0,0049	41	0,0083	42	0,0015	41	0,0088	33	0,0079	31	0,0000
8	39	0,0059	47	0,0093	48	0,0025	47	0,0103	37	0,0025	35	0,0000
9	45	0,0069	53	0,0098	55	0,0020	53	0,0123	42	0,0064	39	0,0005
10	49	0,0079	59	0,0103	61	0,0020	59	0,0108	48	0,0079	44	0,0000
11	55	0,0074	64	0,0108	67	0,0029	65	0,0128	52	0,0079	48	0,0005
12	60	0,0074	70	0,0113	73	0,0029	71	0,0137	58	0,0088	53	0,0005
13	64	0,0079	75	0,0108	80	0,0034	77	0,0137	62	0,0103	56	0,0010
14	71	0,0093	80	0,0108	87	0,0039	83	0,0152	68	0,0123	61	0,0005
15	76	0,0108	86	0,0108	93	0,0039	88	0,0162	72	0,0108	66	0,0005
16	81	0,0118	92	0,0103	100	0,0044	94	0,0167	76	0,0103	70	0,0005
17	87	0,0128	98	0,0093	106	0,0025	101	0,0187	81	0,0079	74	0,0015
18	92	0,0142	103	0,0088	113	0,0039	106	0,0192	86	0,0088	79	0,0005
19	97	0,0142	109	0,0079	120	0,0029	113	0,0201	91	0,0103	83	0,0010
20	102	0,0157	115	0,0069	126	0,0034	118	0,0211	96	0,0123	87	0,0005
21	108	0,0167	121	0,0049	132	0,0039	124	0,0216	100	0,0108	92	0,0010
22	113	0,0167	126	0,0034	139	0,0039	129	0,0231	105	0,0103	96	0,0010
23	118	0,0177	132	0,0020	146	0,0044	135	0,0221	109	0,0123	100	0,0010
24	123	0,0187	137	0,0005	152	0,0025	141	0,0221	113	0,0108	105	0,0010
25	128	0,0182	144	0,0025	158	0,0039	147	0,0226	117	0,0088	109	0,0011

Tabla 5. Tiempos de absorción para el NH3 0,1M en función de la temperatura (de 15°C a 40°C)

0,3 M												
Volumen (mL)	15°C (288K)	Desviación Típica	20°C (293K)	Desviación Típica	25°C (298K)	Desviación Típica	30°C (303K)	Desviación Típica	35°C (308K)	Desviación Típica	40°C (313K)	Desviación Típica
	TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4	0,0005	4	0,0010	6	0,0005	3	0,0010	2	0,0005	3	0,0000
2	7	0,0005	8	0,0010	12	0,0005	7	0,0015	5	0,0005	5	0,0005
3	10	0,0005	13	0,0010	16	0,0005	10	0,0015	7	0,0005	7	0,0000
4	12	0,0005	16	0,0015	22	0,0005	13	0,0010	9	0,0005	11	0,0000
5	15	0,0005	20	0,0015	27	0,0005	17	0,0015	12	0,0005	13	0,0005
6	18	0,0010	24	0,0010	33	0,0005	20	0,0015	14	0,0005	16	0,0000
7	21	0,0010	27	0,0015	38	0,0010	23	0,0010	16	0,0010	18	0,0000
8	24	0,0010	32	0,0015	44	0,0010	27	0,0015	19	0,0010	21	0,0000
9	27	0,0015	36	0,0015	50	0,0015	30	0,0015	22	0,0015	23	0,0005
10	31	0,0015	40	0,0020	55	0,0015	33	0,0015	24	0,0010	26	0,0000
11	35	0,0015	44	0,0020	61	0,0010	37	0,0020	26	0,0015	28	0,0005
12	38	0,0015	48	0,0020	66	0,0015	41	0,0020	28	0,0020	31	0,0005
13	43	0,0015	52	0,0020	72	0,0015	44	0,0034	31	0,0025	33	0,0010
14	46	0,0015	57	0,0020	78	0,0015	47	0,0029	33	0,0020	36	0,0005
15	49	0,0020	61	0,0020	84	0,0020	51	0,0034	35	0,0025	39	0,0005
16	52	0,0020	65	0,0025	90	0,0020	54	0,0039	38	0,0034	42	0,0005
17	55	0,0029	69	0,0029	96	0,0034	58	0,0039	40	0,0029	44	0,0015
18	58	0,0010	73	0,0029	102	0,0029	61	0,0044	43	0,0034	47	0,0005
19	61	0,0010	78	0,0034	108	0,0034	64	0,0025	45	0,0034	50	0,0010
20	63	0,0015	82	0,0039	115	0,0034	68	0,0039	48	0,0034	53	0,0005
21	66	0,0015	86	0,0039	121	0,0034	72	0,0029	50	0,0034	56	0,0010
22	69	0,0015	91	0,0044	127	0,0034	75	0,0034	54	0,0039	58	0,0010
23	73	0,0015	95	0,0048	133	0,0039	79	0,0039	56	0,0034	61	0,0010
24	76	0,0015	98	0,0051	139	0,0034	82	0,0039	59	0,0039	64	0,0010
25	79	0,0015	103	0,0055	145	0,0039	86	0,0044	62	0,0038	67	0,0011

Tabla 6. Tiempos de absorción para el NH<sub>3</sub> 0,3M en función de la temperatura (de 15°C a 40°C)



0,5 M												
Volumen (mL)	15°C (288K)	Desviación Típica	20°C (293K)	Desviación Típica	25°C (298K)	Desviación Típica	30°C (303K)	Desviación Típica	35°C (308K)	Desviación Típica	40°C (313K)	Desviación Típica
	TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	0,0005	2	0,0000	3	0,0000	3	0,0039	1	0,0029	1	0,0000
2	5	0,0010	4	0,0000	6	0,0015	8	0,0039	3	0,0034	3	0,0005
3	7	0,0015	5	0,0005	9	0,0020	10	0,0039	4	0,0034	5	0,0000
4	10	0,0025	7	0,0005	11	0,0025	13	0,0034	6	0,0039	6	0,0000
5	12	0,0025	10	0,0010	13	0,0020	17	0,0039	8	0,0044	8	0,0005
6	14	0,0025	11	0,0020	15	0,0020	20	0,0034	9	0,0049	9	0,0000
7	16	0,0025	14	0,0020	18	0,0020	22	0,0034	10	0,0049	11	0,0000
8	19	0,0034	15	0,0025	20	0,0020	25	0,0034	12	0,0049	12	0,0000
9	21	0,0034	17	0,0025	22	0,0020	27	0,0108	13	0,0044	14	0,0005
10	23	0,0034	19	0,0029	25	0,0025	29	0,0113	15	0,0044	15	0,0000
11	26	0,0044	21	0,0034	27	0,0029	32	0,0108	16	0,0044	16	0,0005
12	29	0,0039	23	0,0034	29	0,0029	35	0,0108	18	0,0044	18	0,0005
13	31	0,0044	25	0,0039	31	0,0029	37	0,0108	19	0,0059	19	0,0010
14	33	0,0044	27	0,0039	34	0,0034	40	0,0103	21	0,0088	21	0,0005
15	36	0,0044	29	0,0044	36	0,0025	43	0,0049	22	0,0103	22	0,0005
16	38	0,0039	31	0,0044	39	0,0029	46	0,0049	23	0,0108	24	0,0005
17	41	0,0039	33	0,0044	41	0,0029	49	0,0054	25	0,0118	25	0,0015
18	43	0,0034	35	0,0049	43	0,0029	52	0,0049	26	0,0123	26	0,0005
19	45	0,0039	37	0,0044	45	0,0034	54	0,0054	28	0,0187	28	0,0010
20	47	0,0039	39	0,0044	48	0,0034	57	0,0059	29	0,0182	30	0,0005
21	50	0,0039	41	0,0049	50	0,0039	60	0,0054	30	0,0182	31	0,0010
22	53	0,0039	43	0,0049	52	0,0044	63	0,0054	32	0,0187	33	0,0010
23	55	0,0039	45	0,0049	55	0,0049	66	0,0054	34	0,0182	34	0,0010
24	58	0,0039	47	0,0054	57	0,0049	69	0,0057	36	0,0177	36	0,0010
25	60	0,0039	49	0,0049	60	0,0046	72	0,0057	38	0,0177	37	0,0011

Tabla 7. Tiempos de absorción para el NH3 0,5M en función de la temperatura (de 15°C a 40°C)

		0,8 M											
Volumen (mL)	15°C (288K)	Desviación Típica	20°C (293K)	Desviación Típica	25°C (298K)	Desviación Típica	30°C (303K)	Desviación Típica	35°C (308K)	Desviación Típica	40°C (313K)	Desviación Típica	
	TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	3	0,0015	1	0,0005	2	0,0005	2	0,0005	1	0,0005	1	0,0000	
2	6	0,0020	3	0,0005	4	0,0005	4	0,0005	2	0,0005	3	0,0005	
3	7	0,0020	4	0,0010	6	0,0010	5	0,0010	4	0,0010	4	0,0000	
4	9	0,0025	6	0,0005	7	0,0005	7	0,0005	5	0,0005	5	0,0000	
5	11	0,0020	7	0,0010	9	0,0010	8	0,0005	6	0,0005	6	0,0010	
6	12	0,0020	9	0,0015	10	0,0015	10	0,0010	7	0,0005	8	0,0005	
7	14	0,0025	10	0,0010	12	0,0010	11	0,0010	8	0,0005	9	0,0005	
8	16	0,0034	12	0,0010	14	0,0010	13	0,0010	10	0,0010	10	0,0005	
9	17	0,0039	14	0,0015	15	0,0025	14	0,0015	11	0,0005	12	0,0010	
10	19	0,0049	15	0,0015	16	0,0020	16	0,0010	12	0,0010	13	0,0010	
11	21	0,0044	16	0,0020	18	0,0020	17	0,0015	13	0,0005	14	0,0005	
12	22	0,0044	18	0,0015	19	0,0025	18	0,0015	14	0,0005	16	0,0015	
13	24	0,0044	20	0,0020	21	0,0025	20	0,0015	15	0,0005	17	0,0005	
14	27	0,0039	21	0,0025	22	0,0023	22	0,0020	16	0,0005	18	0,0010	
15	28	0,0044	23	0,0025	23	0,0026	24	0,0020	17	0,0005	19	0,0010	
16	30	0,0039	24	0,0029	24	0,0029	26	0,0020	18	0,0005	21	0,0005	
17	32	0,0034	26	0,0025	25	0,0032	27	0,0025	19	0,0005	22	0,0000	
18	33	0,0025	27	0,0025	27	0,0034	29	0,0025	21	0,0010	23	0,0005	
19	35	0,0015	29	0,0029	28	0,0039	31	0,0025	22	0,0005	24	0,0005	
20	37	0,0031	30	0,0029	30	0,0039	32	0,0023	23	0,0010	26	0,0010	
21	38	0,0030	32	0,0034	32	0,0029	34	0,0026	24	0,0010	27	0,0005	
22	40	0,0029	33	0,0034	33	0,0034	36	0,0029	25	0,0005	29	0,0005	
23	42	0,0028	35	0,0035	34	0,0034	37	0,0032	27	0,0005	30	0,0005	
24	44	0,0028	37	0,0036	36	0,0039	39	0,0034	28	0,0005	31	0,0015	
25	45	0,0027	38	0,0038	37	0,0042	41	0,0020	30	0,0015	32	0,0005	

Tabla 8. Tiempos de absorción para el NH<sub>3</sub> 0,8M en función de la temperatura (de 15°C a 40°C)

		1 M											
Volumen (mL)	15°C (288K)	Desviación Típica	20°C (293K)	Desviación Típica	25°C (298K)	Desviación Típica	30°C (303K)	Desviación Típica	35°C (308K)	Desviación Típica	40°C (313K)	Desviación Típica	
	TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		TIEMPO (s)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	0,0005	1	0,0005	1	0,0005	2	0,0005	2	0,0000	1	0,0000	
2	3	0,0005	2	0,0005	2	0,0005	3	0,0005	3	0,0000	2	0,0010	
3	4	0,0010	3	0,0005	3	0,0010	5	0,0010	4	0,0005	3	0,0005	
4	5	0,0005	6	0,0005	5	0,0005	7	0,0005	5	0,0005	4	0,0000	
5	7	0,0010	7	0,0010	6	0,0005	8	0,0005	6	0,0005	6	0,0010	
6	8	0,0015	8	0,0010	7	0,0010	10	0,0010	8	0,0005	7	0,0010	
7	10	0,0010	9	0,0010	8	0,0010	12	0,0010	9	0,0010	8	0,0005	
8	11	0,0010	11	0,0010	9	0,0010	13	0,0010	10	0,0010	9	0,0015	
9	12	0,0015	12	0,0015	10	0,0015	14	0,0015	11	0,0010	10	0,0005	
10	14	0,0015	14	0,0015	12	0,0010	15	0,0010	12	0,0010	11	0,0000	
11	15	0,0020	15	0,0020	13	0,0015	17	0,0015	13	0,0015	13	0,0005	
12	16	0,0015	16	0,0020	14	0,0015	18	0,0015	14	0,0015	14	0,0010	
13	17	0,0020	17	0,0025	16	0,0015	20	0,0015	15	0,0015	15	0,0010	
14	19	0,0025	18	0,0025	17	0,0015	22	0,0020	16	0,0020	16	0,0005	
15	20	0,0025	19	0,0025	18	0,0020	23	0,0020	18	0,0020	17	0,0000	
16	21	0,0029	20	0,0029	19	0,0020	25	0,0020	19	0,0020	18	0,0010	
17	23	0,0025	22	0,0029	21	0,0020	26	0,0010	20	0,0020	19	0,0010	
18	24	0,0025	23	0,0031	22	0,0025	28	0,0015	21	0,0025	20	0,0005	
19	26	0,0029	24	0,0034	23	0,0025	29	0,0010	22	0,0025	21	0,0000	
20	27	0,0029	25	0,0029	24	0,0025	31	0,0015	23	0,0025	22	0,0000	
21	29	0,0034	26	0,0034	25	0,0025	33	0,0015	24	0,0025	24	0,0005	
22	30	0,0034	28	0,0034	27	0,0025	35	0,0015	24	0,0029	25	0,0005	
23	31	0,0039	29	0,0034	28	0,0034	37	0,0020	25	0,0025	26	0,0010	
24	33	0,0034	30	0,0034	30	0,0020	39	0,0015	26	0,0020	27	0,0000	
25	34	0,0038	32	0,0039	31	0,0020	40	0,0020	27	0,0015	28	0,0000	

Tabla 9. Tiempos de absorción para el NH3 1M en función de la temperatura (de 15°C a 40°C)

**Anexo 4.**

**TIEMPOS DE ABSORCIÓN EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN**

15°C (288K)														
Volumen (mL)	H2O		0,05M		0,1M		0,3M		0,5M		0,8M		1M	
	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	11	0,0052	8	0,0029	4	0,0010	4	0,0005	3	0,0005	3	0,0015	1	0,0005
2	22	0,0048	12	0,0020	9	0,0010	7	0,0005	5	0,0010	6	0,0020	3	0,0005
3	36	0,0023	17	0,0039	14	0,0025	10	0,0005	7	0,0015	7	0,0020	4	0,0010
4	48	0,0014	23	0,0044	19	0,0020	12	0,0005	10	0,0025	9	0,0025	5	0,0005
5	60	0,0084	28	0,0059	24	0,0039	15	0,0005	12	0,0025	11	0,0020	7	0,0010
6	71	0,0062	34	0,0084	29	0,0039	18	0,0010	14	0,0025	12	0,0020	8	0,0015
7	83	0,0074	40	0,0074	34	0,0049	21	0,0010	16	0,0025	14	0,0025	10	0,0010
8	95	0,0084	46	0,0083	39	0,0059	24	0,0010	19	0,0034	16	0,0034	11	0,0010
9	107	0,0021	52	0,0088	45	0,0069	27	0,0015	21	0,0034	17	0,0039	12	0,0015
10	120	0,0015	58	0,0088	49	0,0079	31	0,0015	23	0,0034	19	0,0049	14	0,0015
11	132	0,0057	63	0,0093	55	0,0074	35	0,0015	26	0,0044	21	0,0044	15	0,0020
12	144	0,0108	69	0,0093	60	0,0074	38	0,0015	29	0,0039	22	0,0044	16	0,0015
13	156	0,0041	75	0,0074	64	0,0079	43	0,0015	31	0,0044	24	0,0044	17	0,0020
14	169	0,0210	81	0,0083	71	0,0093	46	0,0015	33	0,0044	27	0,0039	19	0,0025
15	181	0,0058	90	0,0079	78	0,0108	49	0,0020	36	0,0044	28	0,0044	20	0,0025
16	194	0,0041	96	0,0079	81	0,0118	52	0,0020	38	0,0039	30	0,0039	21	0,0029
17	207	0,0084	103	0,0079	87	0,0128	55	0,0029	41	0,0039	32	0,0034	23	0,0025
18	220	0,0074	109	0,0083	92	0,0142	58	0,0010	43	0,0034	33	0,0025	24	0,0025
19	232	0,0054	115	0,0083	97	0,0142	61	0,0010	45	0,0039	35	0,0015	26	0,0029
20	242	0,0087	121	0,0079	102	0,0157	63	0,0015	47	0,0039	37	0,0031	27	0,0029
21	254	0,0098	128	0,0079	108	0,0167	66	0,0015	50	0,0039	38	0,0030	29	0,0034
22	266	0,0025	134	0,0079	113	0,0167	69	0,0015	53	0,0039	40	0,0029	30	0,0034
23	278	0,0044	140	0,0074	118	0,0177	73	0,0015	55	0,0039	42	0,0028	31	0,0039
24	289	0,0058	147	0,0097	123	0,0187	76	0,0015	58	0,0039	44	0,0028	33	0,0034
25	301	0,0025	153	0,0099	128	0,0182	79	0,0015	60	0,0039	45	0,0027	34	0,0038

Tabla 10. Tiempos de absorción para la temperatura de 15°C en función de la concentración de NH3 (0,05M, 0,1M, 0,3M, 0,5M, 0,8M y 1M)

		20°C (293K)													
Volumen (mL)	H2O		0,05M		0,1M		0,3M		0,5M		0,8M		1M		
	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	9	0,0010	6	0,0065	7	0,0010	4	0,0010	2	0,0000	1	0,0005	1	0,0005	
2	19	0,0025	13	0,0005	14	0,0025	8	0,0010	4	0,0000	3	0,0005	2	0,0005	
3	28	0,0039	19	0,0000	19	0,0039	13	0,0010	5	0,0005	4	0,0010	3	0,0005	
4	37	0,0049	25	0,0005	25	0,0049	16	0,0015	7	0,0005	6	0,0005	6	0,0005	
5	48	0,0059	32	0,0005	30	0,0059	20	0,0015	10	0,0010	7	0,0010	7	0,0010	
6	58	0,0069	39	0,0000	35	0,0069	24	0,0010	11	0,0020	9	0,0015	8	0,0010	
7	68	0,0083	46	0,0005	41	0,0083	27	0,0015	14	0,0020	10	0,0010	9	0,0010	
8	78	0,0093	52	0,0005	47	0,0093	32	0,0015	15	0,0025	12	0,0010	11	0,0010	
9	88	0,0098	59	0,0005	53	0,0098	36	0,0015	17	0,0025	14	0,0015	12	0,0015	
10	98	0,0103	66	0,0010	59	0,0103	40	0,0020	19	0,0029	15	0,0015	14	0,0015	
11	109	0,0108	73	0,0015	64	0,0108	44	0,0020	21	0,0034	16	0,0020	15	0,0020	
12	119	0,0113	80	0,0015	70	0,0113	48	0,0020	23	0,0034	18	0,0015	16	0,0020	
13	130	0,0108	87	0,0025	75	0,0108	52	0,0020	25	0,0039	20	0,0020	17	0,0025	
14	140	0,0108	93	0,0025	80	0,0108	57	0,0020	27	0,0039	21	0,0025	18	0,0025	
15	151	0,0108	100	0,0029	86	0,0108	61	0,0020	29	0,0044	23	0,0025	19	0,0025	
16	162	0,0103	107	0,0034	92	0,0103	65	0,0025	31	0,0044	24	0,0029	20	0,0029	
17	173	0,0093	114	0,0034	98	0,0093	69	0,0029	33	0,0044	26	0,0025	22	0,0029	
18	185	0,0088	120	0,0039	103	0,0088	73	0,0029	35	0,0049	27	0,0025	23	0,0031	
19	195	0,0079	127	0,0044	109	0,0079	78	0,0034	37	0,0044	29	0,0029	24	0,0034	
20	207	0,0069	134	0,0049	115	0,0069	82	0,0039	39	0,0044	30	0,0029	25	0,0029	
21	217	0,0049	141	0,0059	121	0,0049	86	0,0039	41	0,0049	32	0,0034	26	0,0034	
22	228	0,0034	147	0,0064	126	0,0034	91	0,0044	43	0,0049	33	0,0034	28	0,0034	
23	240	0,0020	154	0,0069	132	0,0020	95	0,0048	45	0,0049	35	0,0035	29	0,0034	
24	251	0,0005	161	0,0074	137	0,0005	98	0,0051	47	0,0054	37	0,0036	30	0,0034	
25	263	0,0025	168	0,0079	144	0,0025	103	0,0055	49	0,0049	38	0,0038	32	0,0039	

Tabla 11. Tiempos de absorción para la temperatura de 20°C en función de la concentración de NH3 (0,05M, 0,1M, 0,3M, 0,5M, 0,8M y 1M)

25°C (298K)														
Volumen (mL)	H2O		0,05M		0,1M		0,3M		0,5M		0,8M		1M	
	TEMPO (s)	Desviación Típica	TEMPO (s)	Desviación Típica	TEMPO (s)	Desviación Típica	TEMPO (s)	Desviación Típica	TEMPO (s)	Desviación Típica	TEMPO (s)	Desviación Típica	TEMPO (s)	Desviación Típica
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8	0,0005	5	0,0083	6	0,0005	6	0,0005	3	0,0000	2	0,0005	1	0,0005
2	17	0,0005	11	0,0079	12	0,0005	12	0,0005	6	0,0015	4	0,0005	2	0,0005
3	26	0,0005	17	0,0079	18	0,0005	16	0,0005	9	0,0020	6	0,0010	3	0,0010
4	35	0,0005	24	0,0079	24	0,0005	22	0,0005	11	0,0025	7	0,0005	5	0,0005
5	43	0,0015	30	0,0083	30	0,0015	27	0,0005	13	0,0020	9	0,0010	6	0,0005
6	51	0,0010	36	0,0083	36	0,0010	33	0,0005	15	0,0020	10	0,0015	7	0,0010
7	60	0,0015	42	0,0079	42	0,0015	38	0,0010	18	0,0020	12	0,0010	8	0,0010
8	68	0,0025	49	0,0079	48	0,0025	44	0,0010	20	0,0020	14	0,0010	9	0,0010
9	78	0,0020	55	0,0079	55	0,0020	50	0,0015	22	0,0020	15	0,0025	10	0,0015
10	87	0,0020	62	0,0074	61	0,0020	55	0,0015	25	0,0025	16	0,0020	12	0,0010
11	97	0,0029	69	0,0021	67	0,0029	61	0,0010	27	0,0029	18	0,0020	13	0,0015
12	105	0,0029	75	0,0024	73	0,0029	66	0,0015	29	0,0029	19	0,0025	14	0,0015
13	114	0,0034	82	0,0026	80	0,0034	72	0,0015	31	0,0029	21	0,0025	16	0,0015
14	124	0,0039	88	0,0029	87	0,0039	78	0,0015	34	0,0034	22	0,0023	17	0,0015
15	134	0,0039	95	0,0029	93	0,0039	84	0,0020	36	0,0025	23	0,0026	18	0,0020
16	149	0,0044	102	0,0034	100	0,0044	90	0,0020	39	0,0029	24	0,0029	19	0,0020
17	159	0,0025	108	0,0039	106	0,0025	96	0,0034	41	0,0029	25	0,0032	21	0,0020
18	169	0,0039	115	0,0039	113	0,0039	102	0,0029	43	0,0029	27	0,0034	22	0,0025
19	179	0,0025	121	0,0044	120	0,0029	108	0,0034	45	0,0034	28	0,0039	23	0,0025
20	189	0,0020	128	0,0025	126	0,0034	115	0,0034	48	0,0034	30	0,0039	24	0,0025
21	200	0,0010	135	0,0106	132	0,0039	121	0,0034	50	0,0039	32	0,0029	25	0,0025
22	209	0,0000	141	0,0041	139	0,0039	127	0,0034	52	0,0044	33	0,0034	27	0,0025
23	219	0,0010	148	0,0210	146	0,0044	133	0,0039	55	0,0049	34	0,0034	28	0,0034
24	228	0,0020	154	0,0058	152	0,0025	139	0,0034	57	0,0049	36	0,0039	30	0,0020
25	238	0,0000	161	0,0041	158	0,0039	145	0,0039	60	0,0046	37	0,0042	31	0,0020

Tabla 12. Tiempos de absorción para la temperatura de 25°C en función de la concentración de NH3 (0,05M, 0,1M, 0,3M, 0,5M, 0,8M y 1M)

30°C (303K)														
Volumen (mL)	H2O		0.05M		0.1M		0.3M		0.5M		0.8M		1M	
	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	6	0,0005	6	0,0005	6	0,0005	3	0,0010	3	0,0039	2	0,0005	2	0,0005
2	13	0,0020	13	0,0021	12	0,0020	7	0,0015	8	0,0039	4	0,0005	3	0,0005
3	20	0,0044	20	0,0015	19	0,0044	10	0,0015	10	0,0039	5	0,0010	5	0,0010
4	28	0,0054	28	0,0057	24	0,0054	13	0,0010	13	0,0034	7	0,0005	7	0,0005
5	35	0,0069	34	0,0106	30	0,0069	17	0,0015	17	0,0039	8	0,0005	8	0,0005
6	42	0,0079	40	0,0041	36	0,0079	20	0,0015	20	0,0034	10	0,0010	10	0,0010
7	49	0,0088	47	0,0210	41	0,0088	23	0,0010	22	0,0034	11	0,0010	12	0,0010
8	57	0,0103	54	0,0058	47	0,0103	27	0,0015	25	0,0034	13	0,0010	13	0,0010
9	65	0,0123	61	0,0041	53	0,0123	30	0,0015	27	0,0108	14	0,0015	14	0,0015
10	73	0,0108	67	0,0084	59	0,0108	33	0,0015	29	0,0113	16	0,0010	15	0,0010
11	80	0,0128	74	0,0087	65	0,0128	37	0,0020	32	0,0108	17	0,0015	17	0,0015
12	88	0,0137	81	0,0102	71	0,0137	41	0,0020	35	0,0108	18	0,0015	18	0,0015
13	97	0,0137	87	0,0018	77	0,0137	44	0,0034	37	0,0108	20	0,0015	20	0,0015
14	105	0,0152	93	0,0021	83	0,0152	47	0,0029	40	0,0103	22	0,0020	22	0,0020
15	114	0,0162	100	0,0025	88	0,0162	51	0,0034	43	0,0049	24	0,0020	23	0,0020
16	122	0,0167	106	0,0029	94	0,0167	54	0,0039	46	0,0049	26	0,0020	25	0,0020
17	132	0,0187	112	0,0029	101	0,0187	58	0,0039	49	0,0054	27	0,0025	26	0,0010
18	142	0,0192	119	0,0034	106	0,0192	61	0,0044	52	0,0049	29	0,0025	28	0,0015
19	150	0,0201	126	0,0039	113	0,0201	64	0,0025	54	0,0054	31	0,0025	29	0,0010
20	160	0,0211	132	0,0201	118	0,0211	68	0,0039	57	0,0059	32	0,0023	31	0,0015
21	169	0,0216	139	0,0211	124	0,0216	72	0,0029	60	0,0054	34	0,0026	33	0,0015
22	178	0,0231	146	0,0216	129	0,0231	75	0,0034	63	0,0054	36	0,0029	35	0,0015
23	187	0,0221	151	0,0231	135	0,0221	79	0,0039	66	0,0054	37	0,0032	37	0,0020
24	197	0,0221	158	0,0221	141	0,0221	82	0,0039	69	0,0057	39	0,0034	39	0,0015
25	205	0,0226	165	0,0084	147	0,0226	86	0,0044	72	0,0057	41	0,0020	40	0,0020

Tabla 13. Tiempos de absorción para la temperatura de 30°C en función de la concentración de NH3 (0,05M, 0,1M, 0,3M, 0,5M, 0,8M y 1M)

35°C (308K)														
Volumen (mL)	H2O		0,05M		0,1M		0,3M		0,5M		0,8M		1M	
	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8	0,0000	6	0,0015	5	0,0001	2	0,0005	1	0,0029	1	0,0005	2	0,0000
2	17	0,0005	13	0,0025	10	0,0050	5	0,0005	3	0,0034	2	0,0005	3	0,0000
3	24	0,0000	18	0,0020	14	0,0010	7	0,0005	4	0,0034	4	0,0010	4	0,0005
4	32	0,0000	24	0,0020	19	0,0012	9	0,0005	6	0,0039	5	0,0005	5	0,0005
5	41	0,0000	31	0,0029	24	0,0025	12	0,0005	8	0,0044	6	0,0005	6	0,0005
6	48	0,0005	36	0,0029	28	0,0064	14	0,0005	9	0,0049	7	0,0005	8	0,0005
7	56	0,0000	42	0,0034	33	0,0079	16	0,0010	10	0,0049	8	0,0005	9	0,0010
8	63	0,0000	47	0,0039	37	0,0025	19	0,0010	12	0,0049	10	0,0010	10	0,0010
9	72	0,0005	53	0,0039	42	0,0064	22	0,0015	13	0,0044	11	0,0005	11	0,0010
10	80	0,0000	59	0,0045	48	0,0079	24	0,0010	15	0,0044	12	0,0010	12	0,0010
11	88	0,0000	64	0,0058	52	0,0079	26	0,0015	16	0,0044	13	0,0005	13	0,0015
12	96	0,0005	70	0,0057	58	0,0088	28	0,0020	18	0,0044	14	0,0005	14	0,0015
13	106	0,0000	75	0,0084	62	0,0103	31	0,0025	19	0,0059	15	0,0005	15	0,0015
14	115	0,0000	82	0,0025	68	0,0123	33	0,0020	21	0,0088	16	0,0005	16	0,0020
15	124	0,0000	87	0,0029	72	0,0108	35	0,0025	22	0,0103	17	0,0005	18	0,0020
16	133	0,0005	93	0,0020	76	0,0103	38	0,0034	23	0,0108	18	0,0005	19	0,0020
17	143	0,0000	99	0,0039	81	0,0079	40	0,0029	25	0,0118	19	0,0005	20	0,0020
18	152	0,0005	105	0,0044	86	0,0088	43	0,0034	26	0,0123	21	0,0010	21	0,0025
19	163	0,0005	111	0,0059	91	0,0103	45	0,0034	28	0,0187	22	0,0005	22	0,0025
20	173	0,0010	117	0,0064	96	0,0123	48	0,0034	29	0,0182	23	0,0010	23	0,0025
21	184	0,0005	122	0,0074	100	0,0108	50	0,0034	30	0,0182	24	0,0010	24	0,0025
22	194	0,0005	128	0,0083	105	0,0103	54	0,0039	32	0,0187	25	0,0005	24	0,0029
23	206	0,0005	134	0,0088	109	0,0123	56	0,0034	34	0,0182	27	0,0005	25	0,0025
24	216	0,0015	140	0,0088	113	0,0108	59	0,0039	36	0,0177	28	0,0005	26	0,0020
25	227	0,0005	145	0,0095	117	0,0088	62	0,0038	38	0,0177	30	0,0015	27	0,0015

Tabla 14. Tiempos de absorción para la temperatura de 35°C en función de la concentración de NH<sub>3</sub> (0,05M, 0,1M, 0,3M, 0,5M, 0,8M y 1M)



40°C (313K)														
Volumen (mL)	H2O		0,05M		0,1M		0,3M		0,5M		0,8M		1M	
	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica	TIEMPO (s)	Desviación Típica
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	9	0,0000	7	0,0000	5	0,0000	3	0,0000	1	0,0000	1	0,0000	1	0,0000
2	20	0,0000	12	0,0010	9	0,0005	5	0,0005	3	0,0005	3	0,0005	2	0,0010
3	27	0,0005	17	0,0005	15	0,0000	7	0,0000	5	0,0000	4	0,0000	3	0,0005
4	36	0,0000	22	0,0010	18	0,0000	11	0,0000	6	0,0000	5	0,0000	4	0,0000
5	46	0,0005	26	0,0010	22	0,0005	13	0,0005	8	0,0005	6	0,0010	6	0,0010
6	55	0,0005	31	0,0010	26	0,0000	16	0,0000	9	0,0000	8	0,0005	7	0,0010
7	64	0,0010	36	0,0010	31	0,0000	18	0,0000	11	0,0000	9	0,0005	8	0,0005
8	73	0,0005	41	0,0011	35	0,0000	21	0,0000	12	0,0000	10	0,0005	9	0,0015
9	82	0,0005	46	0,0005	39	0,0005	23	0,0005	14	0,0005	12	0,0010	10	0,0005
10	91	0,0005	50	0,0005	44	0,0000	26	0,0000	15	0,0000	13	0,0010	11	0,0000
11	100	0,0015	55	0,0005	48	0,0005	28	0,0005	16	0,0005	14	0,0005	13	0,0005
12	110	0,0005	59	0,0010	53	0,0005	31	0,0005	18	0,0005	16	0,0015	14	0,0010
13	120	0,0010	64	0,0005	56	0,0010	33	0,0010	19	0,0010	17	0,0005	15	0,0010
14	131	0,0010	69	0,0010	61	0,0005	36	0,0005	21	0,0005	18	0,0010	16	0,0005
15	141	0,0005	74	0,0005	66	0,0005	39	0,0005	22	0,0005	19	0,0010	17	0,0000
16	152	0,0000	78	0,0010	70	0,0005	42	0,0005	24	0,0005	21	0,0005	18	0,0010
17	161	0,0005	83	0,0010	74	0,0015	44	0,0015	25	0,0015	22	0,0000	19	0,0010
18	172	0,0005	88	0,0010	79	0,0005	47	0,0005	26	0,0005	23	0,0005	20	0,0005
19	183	0,0010	92	0,0011	83	0,0010	50	0,0010	28	0,0010	24	0,0005	21	0,0000
20	194	0,0005	97	0,0005	87	0,0005	53	0,0005	30	0,0005	26	0,0010	22	0,0000
21	202	0,0010	101	0,0005	92	0,0010	56	0,0010	31	0,0010	27	0,0005	24	0,0005
22	213	0,0010	106	0,0005	96	0,0010	58	0,0010	33	0,0010	29	0,0005	25	0,0005
23	222	0,0010	110	0,0010	100	0,0010	61	0,0010	34	0,0010	30	0,0005	26	0,0010
24	232	0,0010	115	0,0005	105	0,0010	64	0,0010	36	0,0010	31	0,0015	27	0,0000
25	239	0,0011	119	0,0010	109	0,0011	67	0,0011	37	0,0011	32	0,0005	28	0,0000

Tabla 15. Tiempos de absorción para la temperatura de 40°C en función de la concentración de NH3 (0,05M, 0,1M, 0,3M, 0,5M, 0,8M y 1M)