

INTRODUCCIÓN

El Salar de Uyuni cuenta con importantes componentes para la industria química, lo que se busca es el beneficio de estos recursos, para apoyar, orientar, desarrollar y promover la industrialización de los recursos evaporíticos del Salar. La mayoría del sulfato de potasio que se produce es utilizado en la fabricación de fertilizantes y la agricultura, su presencia es de gran importancia para la salud del suelo, el crecimiento de las plantas y la nutrición animal. El proyecto consiste en establecer el proceso para la obtención de sulfato de potasio a partir de salmuera proveniente del Salar de Uyuni.

Para este efecto se desarrollaron trabajos orientados a alcanzar la caracterización de la materia prima, el establecimiento del proceso de obtención del sulfato de potasio, la caracterización del producto final

ANTECEDENTES

En la actualidad, el país está interesado en industrializar progresivamente todos los recursos naturales estratégicos existentes en el territorio nacional, procurando establecer sus propios procesos de transformación a partir de investigaciones específicas sustentadas técnica y económicamente por recursos preferentemente bolivianos. Es el caso de los recursos evaporíticos del Salar de Uyuni.

Entre los principales recursos yacentes en el Salar de Uyuni que cobran interés comercial en mercado internacional, están el sodio, potasio, magnesio, boro y el litio, este último de singular importancia actual, por ser un elemento estratégico para el desarrollo moderno de la industria vehicular que se ha propuesto emplear energía alternativa menos nociva para el medio ambiente natural.

Estos temas proviene de las canteras de minas en Macuro (estado Sucre) y el otro de España con respecto a este tema se tiene, una investigación donde se utilizó dos tipos de yeso, con la finalidad de hacerlo reaccionar con cloruro de potasio (KCl) en solución acuosa amoniacal para obtener sulfato de potasio (K_2SO_4). Para ello se realizó la caracterización de las muestras, donde el yeso de España demostró poseer un alto contenido de ion sulfato (SO_4^{2-}), en comparación a la muestra de Macuro. Posteriormente se realizaron los cálculos necesarios para

llevar a cabo la reacción en un reactor por carga con agitación continua; favoreciendo la formación y precipitación de sulfato de potasio, el cual fue separado por filtración, lavado y secado. El estudio consistió en determinar cuál yeso ofrece el mejor rendimiento de sulfato de potasio, para luego realizar una comparación que permita obtener los resultados que favorezcan en forma factible un proceso para la fabricación de sulfato de potasio. La reacción se llevó a cabo fijando la temperatura en 5 °C, velocidad de agitación en 400 rpm, exceso de yeso en un 20% p/p. Las variables estudiadas fueron: concentración inicial de amoníaco, y relación de yeso a solución amoniacal. Los resultados revelan que el yeso de España presento valores más prometedores que la muestra de Macuro, obteniéndose que para una relación de yeso a solución amoniacal 1:5 p/p y concentración inicial de amoníaco de 32% p/p se alcanzó un 80, 15% de rendimiento contra un 53,49% alcanzado por el yeso de Macuro (IV EX, 2003; Femándezy Wint, 1979).

El K_2SO_4 era fabricado a través de la reacción de KCl con ácido sulfúrico. Sin embargo, posteriormente se descubrió que una serie de minerales terrestres podían ser manipulados para producir K_2SO_4 y desde entonces es el método más común de producción. Por ejemplo, minerales naturales que contienen K (como la kainita y schoenita) se extraen y lavan cuidadosamente con soluciones salinas para remover subproductos y producir K_2SO_4 . Un proceso similar se utiliza para extraer K_2SO_4 del Gran Lago Salado en Utah, y de depósitos minerales subterráneos. En Nuevo México (EE.UU.), el K_2SO_4 es separado de los minerales de langbeinita haciéndola reaccionar con una solución de KCl, que remueve los subproductos (como el Mg) y libera el K_2SO_4 . Técnicas similares de procesamiento son utilizadas en muchas partes del mundo, dependiendo de las materias primas disponibles.

La producción industrial se obtiene atacando el cloruro de potasio con ácido sulfúrico concentrado a elevadas temperaturas (500-600 °C) en un horno, la reacción produce el sulfato de potasio y libera ácido clorhídrico que deberá ser

recuperado ya que es sumamente tóxico y afecta sensiblemente el medio ambiente.

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se realiza porque en la sociedad hay mayor cantidad de demanda de fertilizantes y se sabe por revisión de anteriores investigaciones que en el salar de Uyuni ubicado en el departamento de Potosí provincia Daniel Campos existen reservas de potasio siendo este el segundo metal en mayor proporción en él, salar de Uyuni

También este trabajo es realizado como un aporte a la investigación ya que se pueden tomar diferentes fuentes y de esta manera poder complementar el trabajo obteniendo para mejores resultados.

La finalidad de esta investigación de la obtención del sulfato de potasio del, salar de Uyuni es como una contribución a las investigaciones realizadas en el salar de Uyuni. Tomando en cuenta las características de esta materia prima y de consideración a los aspectos técnicos económicos que presentan los diferentes métodos empleados para la obtención del sulfato de potasio, se vio por conveniente el método de precipitación.

En Bolivia la falta de industrialización de fertilizantes crea la necesidad de la importación de la misma esto fue reflejado por el periódico “los tiempos (11 de mayo 2010) con el siguiente artículo. “Los almacenes de Insumos Bolivia, regional Cochabamba, dispone de 50 mil quintales y fertilizantes químicos para su distribución a precios accesibles entre organizaciones campesinas y de productores del departamento. Se trata de tres clases de fertilizantes donados por el Gobierno Japonés para su respectiva distribución por Insumos Bolivia entre pequeños productores de los valles y entre asociaciones en el trópico de Cochabamba, informó el gerente regional de la empresa estatal, Gildo Muñoz.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo obtener el sulfato de potasio, de calidad comercial para el uso de fertilizantes a partir de la salmuera procedente del salar de Uyuni del departamento de Potosí?

OBJETO DE INVESTIGACIÓN

El objeto de investigación es la “salmuera” del salar de Uyuni mediante la precipitación reactiva con sulfato de calcio catalizado con amonio.

CAMPO DE ACCIÓN

Nuestro campo de acción es el proceso de precipitación para la obtención del sulfato de potasio en la salmuera del salar de Uyuni.

OBJETIVO GENERAL

- Obtener sulfato de potasio, de calidad comercial para el uso de fertilizantes a partir de la salmuera procedente del salar de Uyuni.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Realizar una revisión bibliográfica sobre el salar de Uyuni la obtención sulfato de potasio y los métodos de precipitación.
- Analizar las propiedades físico- químico de la muestra de silvinita.
- Realizar pruebas de precipitación para la obtención del sulfato de potasio.
- Evaluar los resultados obtenidos para su interpretación.

HIPÓTESIS

Utilizando el proceso de precipitación reactiva con sulfato de calcio en las salmuera del salar de Uyuni, se obtendrá sulfato de potasio comercial para el uso de fertilizantes.

ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Materiales

Para desarrollar el proceso de investigación científica que permita resolver el problema y alcanzar los objetivos planteados se utilizaran los materiales

de vidrio de laboratorio, equipos de medición analítica así como espectrofotometría de absorción atómica, refractómetro de rayos x, y otros

MÉTODOS TEÓRICOS

- **Análisis-síntesis**, Este método permitirá la obtención de del sulfato de potasio para su uso de fertilizantes Si se realizaría más a fondo el trabajo de la obtención de cloruro de potasio como fertilizante este se podría llegar a financiar una fábrica para la industrialización.
- **Inducción deducción**, permitirá, realizar el razonamiento e interpretación de los datos obtenidos del sulfato de potasio luego interpretar de manera general y a la inversa
- **Hipotético deductivo**, Este método permitirá la verificación de la hipótesis planteada para luego sacar conclusiones a partir de la serie de datos obtenidos o poder adelantar y verificar nuevas hipótesis de la obtención del sulfato de potasio. permitirá formular la hipótesis y es objeto de aceptar o refutar en caso de refutar, la deducción permite re formular nueva hipótesis en base a los resultados alcanzados.

MÉTODOS EMPÍRICOS

Observación

Este método implica que se hizo una observación a nivel científico, desde que se tiene la muestra, en el proceso hasta obtener el producto (sulfato de potasio), sobre sus propiedades fisicoquímicas. Para ello se utilizara herramientas cuaderno de apuntes, cámara fotográfica, videograbadoras.

Experimentación

Mediante estos métodos se realizaran pruebas preliminares como ser la determinación de la pureza de las muestras, variables dependientes e independientes, para la obtención de sulfato de potasio con la experimentación se procede al rendimiento y la pureza, donde se seleccionará las variables incidentes en la obtención de sulfato de potasio de calidad comercial.

Medición

Este método permitirá realizar el proceso de determinación del valor real analítico a través del uso de instrumentos de medición así; medición de volumen y peso de la muestra de salmuera en todo el proceso se utilizara probetas, pipetas, buretas etc., y balanza analítica. No obstante se desarrollara los métodos analíticos químicos cuantitativos para la determinación gravimetría para sulfato y el método instrumental para el potasio (espectrofotometría de absorción atómica). Finalmente se realizaran cálculos matemáticos para alcanzar otros valores de medición, así como la determinación de las variables dependientes que son importantes para la interpretación de los resultados de la investigación en unidades de porcentajes tales como % de recuperación del potasio, % de pureza del sulfato de potasio.

TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo: investigación explicativa o experimental a nivel de laboratorio

TIPOS DE VARIABLES

a. Variable independiente

- Temperatura
- Concentración de amónico

b. Variables dependientes

En el trabajo se encontró el rendimiento de sulfato de potasio como producto en función de la concentración de potasio de las muestras de salmueras, esto dependerá del lugar de donde se tomen las muestras ya en algunos lugares hay mayor concentración de potasio que en otras es por esto que se debe tener cuidado de donde tomar la muestras de las salmueras para el respectivo análisis de la muestra.

1.1. Salar de Uyuni

El salar de Uyuni es el mayor desierto de sal del mundo, con una superficie de 12.000 km². Está situado a unos 3.650 metros de altura en la región del sudoeste de Bolivia (Departamento de Potosí) en el Altiplano de Bolivia, sobre la Cordillera de los Andes.

Tabla 1.1: Panorama del salar Uyuni

Salar de Uyuni	
País	 Bolivia
División	 Potosí
Sub-división	Daniel Campos
Superficie	10.582 (12.000) km ²
Altitud	3.663 msnm
Espesor máx.	130 m
Afluentes	Río Grande de Lípez
Desagües	Evaporación

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Salar_de_Uyuni

1.1.1. Formación

El área que hoy ocupa este desierto, estaba cubierta hace 40.000 años por el Lago Minchin. El Salar de Coipasa y los lagos Poopó y Uru Uru también son vestigios de este gran lago prehistórico. El salar de Uyuni tiene una superficie aproximadamente 25 veces mayor que la de las Planicies de Sal de Bonneville (*Bonneville Salt Flats*) en los Estados Unidos.

1.1.2. Influencia económica

El Salar de Uyuni, como se estima, contiene 10 mil millones de toneladas de sal, de la cual 25,000 toneladas son extraídas cada año, además cuenta con 140 millones de toneladas de litio, según datos oficiales de la estatal Corporación Minera de Bolivia (CO.MI.BOL), convirtiéndose en una de las más grandes reservas a nivel mundial de este mineral.

1.1.3. Composición

Existen aproximadamente 11 capas de sal, con espesores que varían entre los dos y diez metros. La costra que se encuentra en la superficie tiene un espesor de 10 metros. La profundidad del salar es de 120 metros, el cual está compuesto de capas de salmuera superpuestas y barro lacustre.

1.2. Salmuera

La salmuera es agua con una alta concentración de sal disuelta (NaCl). Existen ríos y lagos salados en donde no hay vida por el exceso de sal y de donde se extrae la salmuera, principalmente para obtener su sal evaporando el agua en salinas. La salmuera puede ser venenosa para algunos animales que beben de esta.

Por extensión, también se llama salmuera a disoluciones altamente concentradas de otras sales. Son ejemplos de ello la salmuera de cloruro de calcio, cloruro de potasio y de bicromato sódico.

Esta salmuera se compone de litio, boro, potasio, magnesio, carbonatos (bórax) y sulfatos de sodio, cloruros. Un mineral muy interesante es la ulexita "piedra televisión", es transparente y tiene el poder de refractar a la superficie de la piedra la imagen de lo que está debajo. A este salar se le considera como la mayor reserva de litio, aunque es de muy difícil extracción por la falta de agua.

1.2.1. Química de la salmuera

Los componentes mayoritarios de la salmuera son: sodio, magnesio, potasio, litio, boro, calcio, cloruro y sulfato disueltos. En la mayor parte del salar, las salmueras son del tipo Na-Cl con altos contenidos de boro y litio. En la parte sureste del salar, las salmueras están más concentradas y pertenecen al grupo Mg-Cl. Sus contenidos de boro y litio están entre las más altas del mundo y han sido originados a partir de la alteración de las rocas volcánicas de los alrededores

La zona más concentrada en litio, potasio, boro y otros se encuentra al sureste del Salar, cerca de la desembocadura del Río Grande. Esta zona es una anomalía

geoquímica producida por los aportes del Río Grande desde hace 10,000 años. La Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos de Bolivia de la COMIBOL, entidad estatal encargada de la industria-lización de los recursos evaporíticos del país, ha iniciado operaciones, para la producción de cloruro de potasio y carbonato de litio, en la zona más rica del Salar. Se presenta el análisis químico de una muestra de la salmuera, actualmente bombeada a la planta piloto de la GNREB, y de una muestra del agua del Río Grande de Lipez principal afluente del Salar de Uyuni

**Tabla N° 1.2: Análisis químico de salmuera típica alimentada a la planta piloto
De la GNREB y del agua del Río Grande de Lipez.**

Elementos	Planta piloto GNREB[*] g/l	Río Grande deLipez [2] g/l
Li	1.75	0.0031
Na	63.29	0.515
K	22.98	0.027
Mg	27.36	0.045
Ca	0.23	0.161
B	1.57	0.010
Cl	187.88	0.875
SO4	29.23	0.300
pH	6.57	8.07
densidad	1.235	1.000

Fuente: <https://www.google.com/search?q=análisis químico de planta piloto De la GNREB>

1.2.2. Usos de la (Salmuera)

- ❖ A nivel mundial el 95% de la producción de potasio se destina al uso como fertilizante, siendo el 90% de esa producción en forma de cloruro de potasio. El restante es consumido por la industria química.
- ❖ En sistemas de refrigeración, como medio de transmisión de calor, ya que debido a su bajo punto de congelación (solidificación), se utiliza como refrigerante secundario.
- ❖ Para deshacer la nieve en carreteras.
- ❖ Para la purificación y limpieza de la misma sal, para el uso de ésta en aplicaciones de consumo humano y en otras actividades que requieren sal de alta pureza.

- ❖ Para preservar y curar ciertos productos alimenticios, además de funcionar como un elemento culinario.
- ❖ También se usa para la conservación de alimentos.
- ❖ Almacenado en frascos de salmuera se hacen los pepinillos o encurtidos.
- ❖ Antiguamente, los marineros la utilizaban para endurecer/curtir la piel de las manos.
- ❖ Junto con el vapor puede generar un fluido motor para mover turbinas y generar electricidad.
- ❖ En Procesos de Estimulación de Pozos de Petróleo.

1.3. Silvinita

La silvinita es una roca sedimentaria salina formada como evaporita, puede considerarse sinónimo de su componente fundamental, el mineral silvina. Muchas veces se presenta en camas de extensión irregular, es más rara que la halita que se forma cuando se evapora el agua salada; se localiza en depósitos salinos y fumarolas volcánicas.

- ❖ Nombre de la roca: silvita (Cloruro de Potasio, fundamentalmente cloruro de sodio)
- ❖ Su fórmula es KCl $NaCl$.
- ❖ Tipo básico: Evaporita sedimentaria. Halogenuros: simples, anhídridos e hidratados.
- ❖ Grupo: haloides, haluros; halite
- ❖ Sistema Cristalino / Estructura: cristaliza en el sistema cúbico regular. Isométrico, hectaedral; cúbico perfecto
- ❖ Composición química: KCl , cloruro de potasio 52,45 % K; 47,55% Cl

1.3.1. Usos de la silvinita

Sus componentes son minerales muy importantes y necesarios para el funcionamiento general del cuerpo humano. La silvinita es usada en fuegos

artificiales, perfumes, fotografía y producción de fertilizantes. Y en Suria se utiliza principalmente en la fabricación de adobes.

1.4. Sulfato de potasio

El fertilizante potásico es comúnmente utilizado para mejorar el rendimiento y la calidad de las plantas creciendo en suelos sin una adecuada oferta de este nutriente esencial. La mayoría de los fertilizantes potásicos provienen de antiguos depósitos de sal localizados alrededor del mundo. La palabra “potasa” es un término general que más frecuentemente se refiere al cloruro de potasio (KCl), pero es también aplicado a todos los demás fertilizantes potásicos, como el sulfato de potasio (K_2SO_4 , comúnmente denominado como sulfato de potasa o SOP).

1.4.1. Producción

El potasio (K) es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre y la producción de fertilizantes potásicos tiene lugar en todos los continentes habitados. Sin embargo, el K_2SO_4 raramente se halla en forma pura en la naturaleza. Por el contrario, está naturalmente mezclado con sales que contienen magnesio (Mg), sodio (Na), y cloro (Cl). Estos minerales requieren de un proceso adicional para separar sus componentes. Históricamente, el K_2SO_4 era fabricado a través de la reacción de KCl con ácido sulfúrico. Sin embargo, posteriormente se descubrió que una serie de minerales terrestres podían ser manipulados para producir K_2SO_4 y desde entonces es el método más común de producción. Por ejemplo, minerales naturales que contienen K (como la kainita y schoenita) se extraen y lavan cuidadosamente con soluciones salinas para remover subproductos y producir K_2SO_4 . Un proceso similar se utiliza para extraer K_2SO_4 del Gran Lago Salado en Utah, y de depósitos minerales subterráneos. En Nuevo México (EE.UU.), el K_2SO_4 es separado de los minerales de langbeinita haciéndola reaccionar con una solución de KCl, que remueve los subproductos (como el Mg) y libera el K_2SO_4 . Técnicas similares de procesamiento son utilizadas en muchas partes del mundo, dependiendo de las materias primas disponibles.

Tabla: N° 1.3. Propiedades físicas

Apariencia	sólido blanco
Densidad	2660 kg/m ³ ; 2.66 g/cm ³
Masa molar	174.259 g/mol
Punto de fusión	1342 K (1069 °C)
Punto de ebullición	1962 K (1689 °C)

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Sulfato_de_potasio

Tabla: N° 1.4. Propiedades químicas

Fórmula química:	K ₂ SO ₄
Contenido de K ₂ O:	48 a 53%
Contenido de S:	17 a 18%
Solubilidad en agua (25 °C):	120 g/L
pH solución:	aprox.7

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Sulfato_de_potasio

1.4.2. Uso agrícola

Las concentraciones de K en el suelo son generalmente demasiado bajas para permitir un saludable crecimiento vegetal. El K es necesario para cumplir con muchas funciones esenciales en las plantas tales como activar reacciones enzimáticas, sintetizar proteínas, formar sacarosa y otros azúcares, y regular el flujo de agua en las células y hojas. El K₂SO₄ es una excelente fuente para la nutrición de las plantas. La porción potásica del K₂SO₄ no es diferente a la de otras fuentes de fertilizantes potásicos. Sin embargo, también aporta una fuente valiosa de azufre (S), que es a veces deficiente para el crecimiento vegetal. El azufre es requerido para la síntesis de proteínas y el funcionamiento enzimático. Hay ciertos suelos y cultivos donde la aplicación de Cl debe ser restringida. En estos casos, el K₂SO₄ es una fuente de K muy aconsejable. El K₂SO₄ posee solo un tercio de la solubilidad del KCl, por lo que no es comúnmente disuelto para la

aplicación a través de agua de riego a menos que haya necesidad de aportar S. Varios tamaños de partículas se encuentran comúnmente disponibles. Las partículas finas ($<0.015\text{mm}$) son utilizadas para realizar soluciones para riego o aplicaciones foliares ya que se disuelven más rápidamente. Las aplicaciones foliares de K_2SO_4 son una opción conveniente para aplicaciones adicionales de K y S para las plantas, complementando a los nutrientes tomados desde el suelo. Puede ocurrir daño foliar si la concentración es muy elevada.

1.4.3. Prácticas de manejo

El K_2SO_4 es frecuentemente utilizado para cultivos donde el Cl que posee el KCl no es deseable. El índice salino del K_2SO_4 es menor comparado con otras fuentes comunes de K, es decir que incrementa menos la salinidad total por unidad de K. El valor de salinidad (Conductividad Eléctrica, CE) de una solución de K_2SO_4 es menor a un tercio de la CE para concentraciones similares de soluciones de KCl (10 mmol/L). Donde son necesarias altas dosis de K_2SO_4 , generalmente se recomienda fraccionar la aplicación en dosis múltiples. Esto ayuda a evitar la acumulación de excedentes de K por la planta y también minimiza cualquier daño salino potencial

1.5. Curvas de solubilidad

En la Curva de solubilidad el coeficiente de solubilidad representado depende de la temperatura, de la naturaleza del soluto, de la naturaleza del disolvente y de la presión. Para el caso de un sólido disuelto, la influencia de la presión es muy pequeña. Al elevar la temperatura, el coeficiente de solubilidad aumenta si el fenómeno de disolución a temperatura constante es endotérmico (es el caso más frecuente), y disminuye en caso contrario.

La cantidad de soluto que se puede disolver en una cantidad determinada de un disolvente es limitada. De hecho, la cantidad máxima en la que ambos componentes se pueden mezclar formando una fase homogénea depende de la naturaleza de ambos y de la temperatura. El azúcar, por ejemplo, es soluble en agua, pero si en un vaso de agua añadimos cada vez más y más azúcar, llegará

un momento en el que ésta ya no se disuelva más y se deposite en el fondo. Además, se disuelve más cantidad de azúcar en agua caliente que en agua fría. La cantidad máxima (en gramos) de cualquier soluto que se puede disolver en 100 g de un disolvente a una temperatura dada se denomina solubilidad de ese soluto a esa temperatura. Así, la solubilidad se expresa en gramos de soluto por 100 g de disolvente. La solubilidad de una sustancia pura en un determinado disolvente y a una temperatura dada es otra de sus propiedades características. Cuando una disolución contiene la máxima cantidad posible de soluto disuelto a una temperatura dada, decimos que está saturada a esa temperatura. En este caso, si añadimos más soluto, éste se quedará sin disolver. Por tanto, de acuerdo con la solubilidad del soluto, se pueden preparar soluciones diluidas, saturadas y sobresaturadas.

- **Disolución diluida:** Contiene una pequeña cantidad del soluto disuelta en el disolvente y esta cantidad es más pequeña que la cantidad límite en la disolución saturada.
- **Disolución saturada:** Es aquélla que no disuelve más soluto; es decir, la solubilidad de soluto llegó a su límite. Esta disolución se encuentra en un equilibrio dinámico.
- **Disolución sobresaturada:** Contiene mayor cantidad de soluto que la disolución saturada. Corresponde a una situación de no equilibrio, meta estable.

En general, la solubilidad de una sustancia en un determinado disolvente aumenta a medida que se eleva la temperatura. Si se mide la cantidad de un soluto que se disuelve en 100 g de agua a diferentes temperaturas, al representar estos datos gráficamente se obtienen unas gráficas llamadas curvas de solubilidad, que obviamente dependen de la naturaleza del soluto y del disolvente

En esta gráfica se encuentran las curvas de solubilidad para diversas sales. Las líneas curvas representan las composiciones de las disoluciones saturadas correspondientes a las distintas temperaturas. Los puntos por debajo de las curvas

representan las disoluciones no saturadas y los puntos por encima de las curvas las disoluciones sobresaturadas

1.5.1. Solubilidad de los sólidos

La dependencia de la solubilidad de un sólido respecto de la temperatura varía de manera considerable, y dicha variación proporciona una forma para obtener sustancias puras a partir de mezclas. La precipitación selectiva es la separación de una mezcla de sustancias en sus componentes puros con base en sus diferentes solubilidades, pues se puede pasar del punto de saturación en la solución con respecto a uno de los solutos y obligarlo a precipitar, dejando el otro soluto en solución.

Este método funciona mejor si el compuesto que se va a purificar tiene una curva con una fuerte pendiente, es decir, si es mucho más soluble a altas temperaturas que a temperaturas bajas. De otra manera, una gran parte del compuesto permanecerá disuelto a medida que se enfría la disolución. La precipitación selectiva también funciona si la cantidad de impurezas en la disolución es relativamente pequeña.

Tabla: N° 1.5 solubilidad de sales que se forman en el proceso de obtención de cloruro de potasio

N°	Sales	Kps	Solubilidad / 100g agua
1	NaCl	-98.321	36g
2	KCl	-104.34	34.4g
3	MgCl ₂ *6H ₂ O	-597.24	54.2g (20°C)
4	Na ₂ SO ₄	-330.50	4.76g (0°C), 42.7g (100°C)
5	K ₂ SO ₄	-342.65	12g (25°C), 24g (100°C)
6	KMgCl ₃ *6H ₂ O		64.5g (19°C)frio
7	(NH ₄) ₂ SO ₄		70.6 g (0 °C), 74.4 (20 °C), 103.8 g (100 °C)
	CaSO ₄	$4.93 \times 10^{-5} \text{ }^2$	0.21g(20 °C) 0.24 g(20 °C)

Fuentes: fuhttps://en.wikipedia.org/wiki/Calcium_sulfate

Efectos del ion común sobre la solubilidad de los precipitados

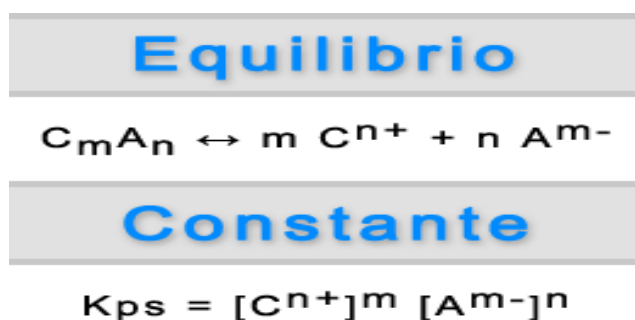
En el caso de la disolución de una sustancia pura en un disolvente puro, el efecto de presencia de otros iones en los sistemas que contienen sales poco solubles es de gran importancia. Dado que, en ciertas condiciones, el producto de las concentraciones de los iones de una sal poco soluble tiene que ser constante, un aumento de la concentración de uno de ellos hace disminuir la del otro, suponiendo el estricto cumplimiento del principio del producto de solubilidad

1.5.2. Coeficiente de solubilidad

Los resultados se traducen en las llamadas curvas de solubilidad, que son representaciones gráficas de la solubilidad de un soluto en función de la temperatura.

- En la solubilidad influyen la naturaleza del soluto, la del disolvente y la temperatura.
- Se llaman curvas de solubilidad a las representaciones gráficas de la solubilidad de un soluto en función de la temperatura.

1.5.3. Producto de solubilidad



Se conoce con el nombre de producto de solubilidad (o iónico) al compuesto iónico que surge de las concentraciones molares (el total de sustancia de soluto que hay en un litro de disolución) de los iones que lo constituyen, elevándolas dentro de la

ecuación de equilibrio a la potencia del coeficiente estequiométrico (un multiplicador que indica la cantidad de moléculas de un tipo determinado).

Dicho valor expresa la solubilidad de los compuestos iónicos de manera directamente proporcional. Se denomina efecto ion común a un fenómeno que tiene lugar al aumentar la concentración de uno de los iones (lo cual puede efectuarse al añadir una sustancia que produzca un ion del mismo tipo una vez disociada) y que permite recuperar el equilibrio disminuyendo la concentración del primer ion.

La solubilidad de una sustancia puede ser expresada de dos maneras:

- **En forma de solubilidad molar:** a través de la cantidad de soluto por cada litro de disolución saturada, representada por la razón mol /L;
- **Como solubilidad:** la razón de gramos de un soluto determinado por cada litro de disolución saturada, g/L.

En cualquier caso, el cálculo para obtener dicho valor debe llevarse a cabo sin dejar de lado la temperatura, la cual debe mantenerse constante y responder a las convenciones del trabajo en laboratorio: 25°C.

1.5.4. Factores que afectan la solubilidad

- **Temperatura**

La solubilidad de un soluto en un determinado disolvente principalmente depende de la temperatura. Para muchos sólidos disueltos en el agua líquida, la solubilidad aumenta con la temperatura hasta 100 °C, aunque existen casos que presentan un comportamiento inverso. En el agua líquida a altas temperaturas la solubilidad de los solutos iónicos tiende a disminuir debido al cambio de las propiedades y la estructura del agua líquida, el reducir los resultados de la constante dieléctrica de un disolvente menos polar.

Los solutos gaseosos muestran un comportamiento más complejo con la temperatura. Al elevarse la temperatura, los gases generalmente se vuelven menos solubles en agua (el mínimo que está por debajo de 120 ° C para la mayoría de gases), pero más solubles en disolventes orgánicos.

- **La presión:**

Para fines prácticos, la presión externa no tiene influencias sobre la solubilidad de líquidos y sólidos pero si influye sobre la solubilidad de los gases. Ley de Henry: la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión del gas sobre la disolución.

- **La adición de un ion común (efecto del ion común):**

Es el efecto que produce agregar determinada concentración de un ion que es común con uno de los iones de la sal cuando ambos se encuentran en la misma solución, dando como resultado la disminución de la solubilidad. El ion común desplaza el equilibrio de acuerdo con el principio de Le Chatelier.

- **Efecto salino**

Es el efecto que produce agregar determinada concentración de un ion que no es común con uno de los iones de la sal cuando ambos se encuentran en la misma solución, dando por resultado el aumento de la solubilidad.

1.5.5. Condiciones para la solubilidad ilimitada

Para que un material tenga solubilidad sólida ilimitada debe satisfacer ciertas condiciones conocidas como las reglas de Hume-Rothery que son las siguientes:

- Factor tamaño: los átomos o los iones deben tener tamaño semejante.
- Estructura cristalina: los materiales deben tener la misma estructura cristalina
- Valencia: los iones deben tener la misma valencia.

- Electronegatividad: los átomos deben tener más o menos la misma electronegatividad

1.6. Disolución

Una disolución es una mezcla de dos o más sustancias. El soluto es la sustancia presente en menor cantidad, y el disolvente es la sustancia que está en mayor cantidad.

1.6.1. Clasificación de las disoluciones

Se dice que una disolución se encuentra saturada cuando contiene la máxima cantidad de un soluto que se disuelve en un disolvente particular, a una temperatura específica.

Una disolución es no saturada cuando contiene menos cantidad de soluto que la que puede disolver. Una disolución se encuentra sobresaturada cuando contiene más soluto que el que puede haber en una disolución sobresaturada.

En este sentido, el proceso de disolución está relacionado con la solubilidad, la cual está referida a la proporción en que un soluto se disuelve en un solvente. Los factores importantes que afectan la solubilidad de los sólidos cristalinos son la temperatura, la naturaleza del solvente y la presencia de otros iones en la solución.

1.6.2. Propiedades físicas de las disoluciones

Cuando se añade un soluto a un disolvente, se alteran algunas propiedades físicas del disolvente. Al aumentar la cantidad del soluto, sube el punto de ebullición y desciende el punto de solidificación. Así, para evitar la congelación del agua utilizada en la refrigeración de los motores de los automóviles, se le añade un anticongelante (soluto), como el 1,2-etanodiol ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$). Por otra parte, al añadir un soluto se rebaja la presión de vapor del disolvente.

Otra propiedad destacable de una disolución es su capacidad para ejercer una presión osmótica. Si separamos dos disoluciones de concentraciones diferentes por una membrana semipermeable (una membrana que permite el paso de las moléculas del disolvente, pero impide el paso de las del soluto), las moléculas del disolvente pasarán de la disolución menos concentrada a la disolución de mayor concentración, haciendo a esta última más diluida (véase Ósmosis)

1.6.3. Concentración de una disolución

Existen distintas formas de expresar la concentración de una disolución, pero las dos más utilizadas son: gramos por litro (g/l) y molaridad (M). Los gramos por litro indican la masa de soluto, expresada en gramos, contenida en un determinado volumen de disolución, expresado en litros. Así, una disolución de cloruro de sodio con una concentración de 40 g/l contiene 40 g de cloruro de sodio en un litro de disolución.

La molaridad se define como la cantidad de sustancia de soluto, expresada en moles, contenida en un cierto volumen de disolución. El número de moles de soluto equivale al cociente entre la masa de soluto y la masa de un mol (masa molar) de soluto. Por ejemplo, para conocer la molaridad de una disolución que se ha preparado disolviendo 70 g de cloruro de sodio (NaCl) hasta obtener 2 litros de disolución, hay que calcular el número de moles de NaCl; como la masa molar del cloruro de sodio es la suma de las masas atómicas de sus elementos,

1.7. Precipitado

Un precipitado es el sólido que se produce en una disolución por efecto de una reacción química o bioquímica. A este proceso se le llama precipitación. Dicha precipitación puede ocurrir cuando una sustancia insoluble se forma en la disolución debido a una reacción química o a que la disolución ha sido sobresaturada por algún compuesto, esto es, que no acepta más soluto y que al no poder ser disuelto, dicho soluto forma el precipitado.

En la mayoría de los casos, el precipitado (el sólido formado) cae al fondo de la disolución, aunque esto depende de la densidad del precipitado: si el precipitado es más denso que el resto de la disolución, cae. Si es menos denso, flota, y si tiene una densidad similar, se queda en suspensión.

El efecto de la precipitación es muy útil en muchas aplicaciones, tanto industriales como científicas, en las que una reacción química produce sólidos que después puedan ser recogidos por diversos métodos, como la filtración, la decantación o por un proceso de centrifugado.

En síntesis, la precipitación es la sustancia sólida visible que se forma al combinar varias sustancias

1.7.1. Precipitación química

Mediante la adición de reactivos, los contaminantes solubles se transforman en formas insolubles o de una menor solubilidad. La eliminación de la disolución será tanto más completa (cuantitativa) cuanto más insoluble sea el compuesto formado. Por ejemplo, se pueden eliminar los bicarbonatos del agua mediante la adición de hidróxido de calcio, Ca(OH)_2 , el cual forma carbonato de calcio, CaCO_3 , compuesto poco soluble que sedimenta en forma de fino polvo.

Es la tecnología de pre tratamiento más común para la eliminación de contaminantes que se utiliza para reducir la concentración de metales en el agua residual a niveles que no causen preocupación. Es posible eliminar un metal pesado disuelto (como plomo, mercurio, cobre o cadmio, que esté como cloruro, nitrato o sulfato) adicionando hidróxido de sodio o de calcio, que produce la precipitación del correspondiente hidróxido de plomo, mercurio, cobre o cadmio. También se utiliza para eliminar la dureza del agua, técnica llamada ablandamiento

1.7.2. Proceso de precipitación química

Etapas del proceso de precipitación, de izquierda a derecha: solución sobresaturada, suspensión y solución saturada con precipitado en la parte inferior.

Un precipitado es el sólido que se produce en una disolución por efecto de cristalización o de una reacción química. A este proceso se le llama precipitación. Dicha reacción puede ocurrir cuando una sustancia insoluble se forma en la disolución debido a una reacción química o a que la disolución ha sido sobresaturada por algún compuesto, esto es, que no acepta más soluto y que al no poder ser disuelto, dicho soluto forma el precipitado.

En la mayoría de los casos, el precipitado (el sólido formado) baja al fondo de la disolución, aunque esto depende de la densidad del precipitado: si el precipitado es más denso que el resto de la disolución, cae. Si es menos denso, flota, y si tiene una densidad similar, se queda en suspensión.

El efecto de la precipitación es muy útil en muchas aplicaciones, tanto industriales como científicas, en las que una reacción química produce sólidos que después puedan ser recogidos por diversos métodos, como la filtración, la decantación o por un proceso de centrifugado.

En síntesis, la precipitación es la sustancia sólida visible que se forma al combinar varias sustancias.

1.7.3. Precipitación fraccionada o selectiva

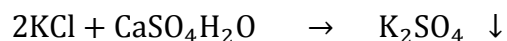
La precipitación fraccionada es una técnica en la que dos o más iones en disolución, todos ellos capaces de precipitar con un reactivo común, se separan mediante ese reactivo: un ion precipita mientras que el otro o los otros, con propiedades semejantes, permanecen en disolución. La condición principal para una buena precipitación fraccionada es que haya una diferencia significativa en las solubilidades de las sustancias que se van a separar (normalmente una diferencia significativa en sus valores de K_{ps}).

La clave de esta técnica es la adición lenta (por ejemplo con una bureta) de una disolución concentrada del reactivo precipitante a la disolución donde debe producirse la precipitación

1.8. Métodos para la obtención del K₂SO₄

1.8.1. Solución amoniacal para la obtención de sulfato de potasio

En el presente trabajo se estudiaron dos tipos de yeso, uno proveniente directamente de la cantera de Macuro y el proveniente de Espafta, donado por la empresa de cemento Cemex; se realizó la parte experimental para obtener el mejor rendimiento de K₂SO₄ a partir de KCl y yeso, mediante la siguiente reacción



La reacción se llevó a cabo en solución acuosa amoniacal debido a que el amoníaco tiene la propiedad de reducir las solubilidades de ciertas sales inorgánicas en soluciones acuosas afectando apenas la solubilidad de otras. Se utiliza este método para promover varios procesos de cristalización y algunas reacciones de doble descomposición entre sales inorgánicas. El uso del amoniaco en este tipo de reacciones ha sido publicado. Mediante esta reacción se estudió el efecto de la concentración de amoniaco y la relación yeso/solución acuosa amoniacal sobre el rendimiento de sulfato de potasio, empleando el yeso de Espafta y Macuro.

Para esta investigación se empleó un reactor cilíndrico de vidrio de 500 ml de capacidad, la temperatura se controló mediante un sistema de circulación de agua de temperatura constante.

Reactivos

Yeso natural (Espafta y Macuro) según composición presentada en la tabla 1, molido al tamaño deseado y cloruro de potasio con una pureza del 99,5 % en peso.

Tabla 1.6. Componentes Principales de las Muestras de Yeso Natural, % p/p

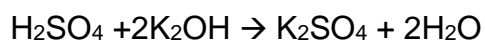
Muestra	Ca ⁺²	Mg⁺²	Na⁺¹	SO₄⁻²	K⁺¹
Yeso de España	27.55	0.035	0.0085	64.40	0.021
Yeso de Macuro	26.31	0.250	0.0018	46.38	0.0023

FUENTE: <http://www.ojs.udo.edu.ve/index.php/saber/article/view/558>

Soluciones amoniacaes a las concentraciones de 25 %, 28,5% y 32% p/p de amoniaco, se prepararon haciendo burbujear amoniaco gaseoso en agua, empleando hielo seco (CO₂, sólido) para obtener la refrigeración necesaria y conservar la solución a la concentración deseada.

1.8.2. Obtención de sulfato de potasio a partir Del cloruro de potasio

Se prepara tratando el sulfato de magnesio o bien con el sulfato doble de potasio y magnesio, con cloruro de potasio. El sulfato de potasio se precipita en la solución, (H₂SO₄) con hidróxido de potasio (KOH), cuya ecuación balanceada y



1.8.3. Obtención de sulfato de potasio a partir de vinaza

Un procedimiento para la obtención de sulfato de potasio a partir de vinaza que es principalmente del tipo obtenida como subproducto de las destilerías de producción de alcohol etílico y lo similar en donde se lleva a cabo la concentración de sólidos secos de la vinaza para posteriormente ser quemados en una caldera de recuperación de manera tal de poder obtener energía eléctrica a través del accionamiento de una turbina de vapor y al mismo tiempo recuperar los minerales fundidos desde el fondo de la caldera para obtener una reacción química de transformación de carbonatos a sulfatos, obteniendo principalmente Sulfato de Potasio en tasas de producción económica y técnicamente sustentables, siendo además un procedimiento que permite dar un destino más ecológico al residuo contaminante de vinaza.

2.1. Introducción

En este capítulo se indica toda la parte experimental realizada durante el presente trabajo de investigación planteado, para lo cual se menciona de manera general desde la caracterización de la materia prima consiste del punto de muestreo, recolección de la muestra y análisis físico-químico que es el comienzo para esta investigación donde se lo realizan los análisis físico-químico por los métodos de potenciómetro, picnómetro, refractómetro, gravimetría, volumetría, fotometría de llama (A.A.). También se presenta el proceso de la obtención del producto final como es el sulfato de potasio.

2.2. Toma de muestra

La muestra fue otorgada por el instituto de investigación de la Carrera de Química de la Universidad Autónoma Tomas Frías, en una cantidad de 5 litros de la muestra de salmuera, para la obtención de sulfato de potasio y de acuerdo a referencias de docentes de la institución, para toma de muestra se realiza la perforación de costra salina, donde se observa que la costra superior del cloruro de sodio es bastante dura, siendo necesario el uso del barreno y combos para la perforación. Una vez ya perforando la costra salina presenta capas de diferente espesor donde vienen acompañadas de materia orgánica.

A medida que se profundiza la fosa, la salmuera comienza a fluir y se llega a una profundidad aproximada de un metro. La salmuera fluye a alta presión y sale grandes cantidades de fluido, llenado rápidamente la fosa escavada donde se deja clasificar la solución por un momento y posteriormente se procede a recolectar la muestra de salmuera.

La salmuera es recolectada en bidones de plástico para el traslado a los laboratorios de la carrera de química de la Universidad Autónoma Tomas Frías de la ciudad de Potosí.

2.3. Análisis físico-químico de la muestra de salmuera del Rio Grande y el CaSO_4 (yeso)

Para analizar las concentraciones y determinar el contenido absoluto en gramos por litro de todos los iones disueltos presentes en la salmuera y en el yeso (CaSO_4), es necesario realizar las diluciones y acondicionar la muestra para posteriormente realizar la lectura de las mismas en el equipo de absorción atómica y por los métodos tradicionales adecuados, para cuantificar cada uno de los elementos o iones disueltos en la muestra, y las mismas son utilizadas durante toda la investigación.

2.3.1. Medición de parámetros fisicoquímicos

Realizar uno de los parámetros fisicoquímicos de la salmuera del Rio Grande mediante el análisis de laboratorio con el fin de determinar el sulfato de potasio para fertilizante de los suelos.

a) Conductividad

Las medidas de conductividad se utilizan para controlar la calidad de los suministros de la salmuera Rio Grande Este tipo de medición no es específica de iones, ya que a veces se puede utilizar para determinar la cantidad de sólidos totales disueltos (TDS) si se conoce la composición de la solución y su comportamiento de conductividad.

b) PH

Para realizar medidas del pH de la salmuera se utiliza un peachimetro, que determinar si la muestra es adecuada para la obtención de sulfato de potasio.

c) Densidad:

En la salmuera de Rio Grande es necesario determinar la densidad que será obtenida para reconocer el tipo de la muestra si la muestra es adecuada para la obtención de sulfato de potasio.

d) Índice de refracción

Este análisis se fundamenta en la, refracción de la luz, la cual es una propiedad física fundamental de cualquier sustancia. Donde una gota de muestra se lo coloca al vidrio del refractómetro donde la luz avanza por el aire y se encuentra con un bloque donde se encuentra en el vidrio y se refleja, al mismo tiempo se refracta. Y la escala de medición de este principio se llama índice de refracción.

2.3.2. Análisis químico de la salmuera y del yeso (CaSO_4)

En el análisis químico, está precedida por una serie de métodos en lo cual son: volumetría, gravimetría, fotometría de llama (A.A.) que el método volumétrico se utiliza para los análisis de cloruros, calcio, magnesio. El método gravimétrico es para realizar los análisis de sulfatos y el equipo de absorción se determinan los iones de potasio, sodio, litio estos análisis químicos se utilizan para toda la investigación.

2.4. Pruebas preliminares

Luego de conocer todos los datos fisicoquímicos de la muestra de salmuera con la que se trabaja, primeramente es necesario acondicionar la misma y separar los iones disueltos que interfieren. Dicha separación se efectúa con el único fin de llegar a tener solución remanente concentrada en cloruro de potasio que es la muestra que se necesita para la obtención de sulfato de potasio. Para llegar a tener solución remanente se realiza en diferentes etapas sucesivas de evaporación y cristalización fraccionada, que se detallan a continuación.

2.4.1. Eliminación de interferentes para la obtención de cloruro de potasio (Na^+ ; Ca^{+2} ; Mg^{+2} ; Li ; SO_4^{-2} $\text{B}_4\text{O}_7^{-2}$)

- ❖ Eliminación de sólidos suspendidos mediante el proceso de filtración
- ❖ **(ETAPA I).** En esta etapa se procede con separación de los interferentes mediante el proceso de evaporación hasta el 50% a una temperatura de 70°C , donde se van formando sales por sobresaturación.
- ❖ **(ETAPA II).** El ion sodio es un interferente para la obtención del cloruro de potasio, para eliminar como cloruro de sodio, la silvinita se disuelve con agua según su solubilidad del cloruro de potasio y cloruro de sodio, para lo cual se realiza una evaporación de 40% a una temperatura de 90°C posteriormente se realiza la filtración para separar el NaCl .
- ❖ **(ETAPA III).** El filtrado contiene el KCl con residuos de Na difícil de separar para ello se realiza una re cristalización, donde se disuelve el cloruro de potasio según su solubilidad, para realizar una evaporación de 50 %, a una temperatura de 90°C , y realiza la filtración donde queda eliminado los residuos de sodio y la solución forma cristales de cloruro de potasio.

2.5. Proceso para la obtención de sulfato de potasio (K_2SO_4) por precipitación reactiva

Se realizó la parte experimental para obtener el mejor rendimiento de K_2SO_4 a partir de KCl y CaSO_4 , mediante la siguiente reacción.



Solución amoniacal

- ❖ **(ETAPA I).** Para cada corrida experimental, de solución amoniacal se toma un volumen de 20 y 30 ml en un vaso de precipitación y posteriormente se añade el sulfato de calcio en la cantidad predeterminada, 6 % en exceso, según la reacción se llevó a cabo en solución acuosa amoniacal.

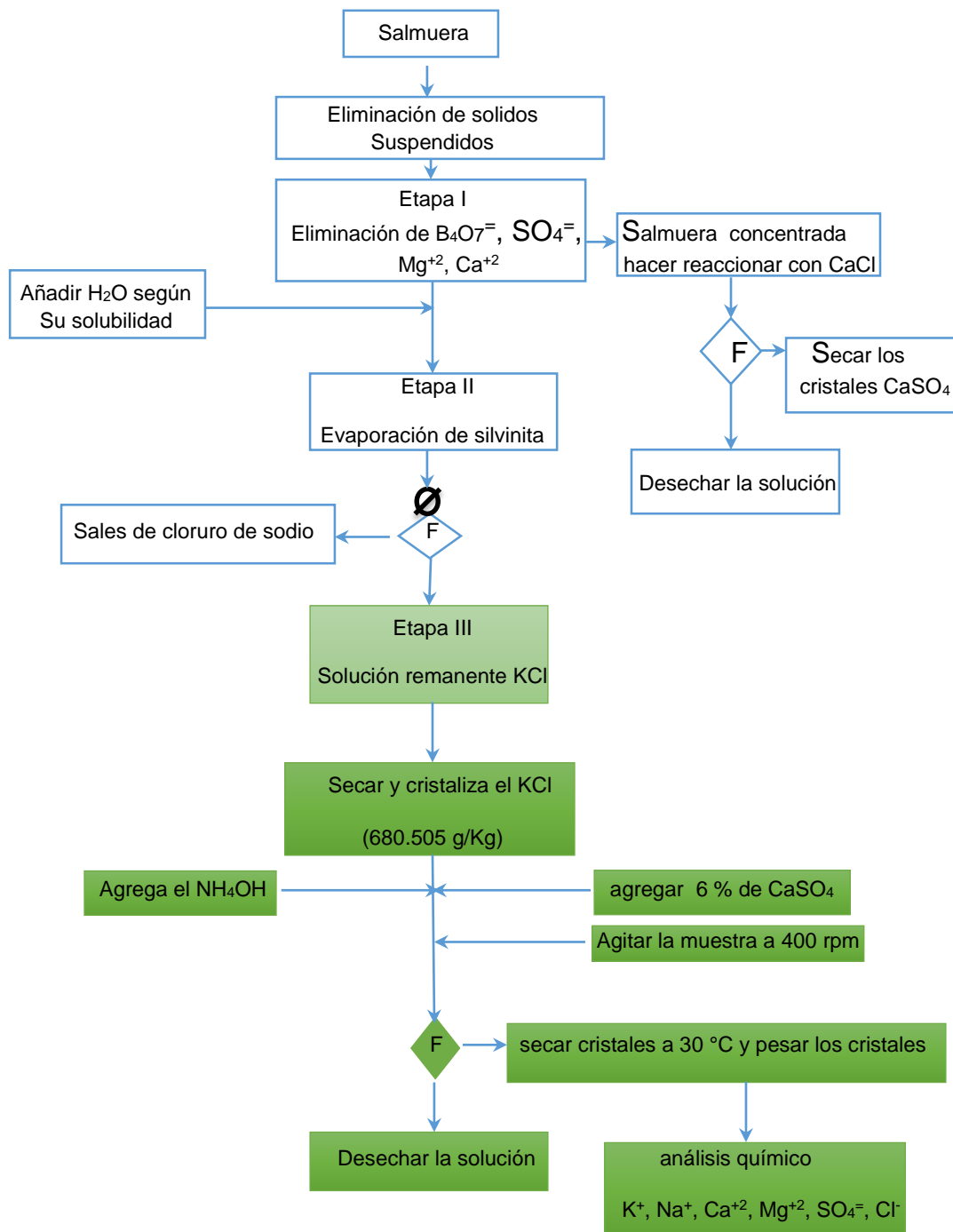
Debido a que el amoníaco tiene la propiedad de reducir las solubilidades de ciertas sales inorgánicas en soluciones acuosas afectando apenas la solubilidad de otras.

- ❖ **(ETAPA II).** Esta mezcla de yeso y el amónico se agitó a la velocidad de 400 rpm hasta alcanzar la temperatura de 5 °C. y 15 °C Seguidamente se añade al vaso de precipitación el cloruro de potasio necesario según la reacción. Mediante esta reacción se estudió el efecto de la concentración de amoniaco y la relación del sulfato de calcio acuoso amoniacal para el rendimiento de sulfato de potasio
- ❖ **(ETAPA III).** Después de un tiempo de reacción de 60 min, la suspensión se filtró y la torta se lavó con solución amoniacal, los sólidos se deja secar a una temperatura de 30 °C y se realizó los análisis. Al curso de la reacción se le hizo seguimiento mediante la determinación del cloruro de potasio convertido a sulfato de potasio según la reacción.

2.6 Flujo grama del trabajo experimental

El siguiente flujograma muestra todas las etapas y secuencia efectuadas en el trabajo de investigación, desde la salmuera bruta proveniente del salar de Uyuni hasta llegar a tener el producto final que es el sulfato de potasio

GRAFICA 2.1 FLUJOGRAMA DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



3.1 Interpretación de resultados de los parámetros fisicoquímicos de la muestra de salmuera del rio grande y el CaSO_4 (yeso)

Para saber con mayor precisión los resultados de los análisis fisicoquímico realizado en el laboratorio de la Carrera de Química de la U.A.T.F., con los equipos necesarios y métodos tradicionales de análisis, los valores obtenidos en el laboratorio y estos resultados pertenecen a la salmuera donde se obtiene a mayor porcentaje de la silvinita para la obtención del cloruro de potasio y luego al producto final que es el sulfato de potasio.

3.1.1 Resultados de los parámetros fisicoquímicos

Las propiedades físicas como el índice de refracción y densidad son los indicadores determinantes para la selección de la muestra, es decir que a mayores valores de dichas propiedades, la salmuera posiblemente tiene mayor concentración en iones litio, magnesio, cloruros, sulfatos, potasio, sodio, boratos, calcio se lo realiza análisis de los iones, así para determinar el sulfato de potasio.

Las medidas de conductividad se utilizan de forma rutinaria en la salmuera como un modo rápido, barato y fiable de medir el contenido iónico en una solución y las unidades S.I. de conductividad es el siemens por metro (S/m) donde se relaciona que a mayor conductividad hay más cantidad de iones en la salmuera.

Tabla N° 3.1 Propiedades fisicoquímicas de la muestra de salmuera

Muestra	Conductividad	PH	Densidad (g/ml)	I. refracción
Salmuera	7.9×10^{-2}	6.19	1.26	1.418

Fuente: elaboración propia

3.1.2 Resultados del análisis químico de la muestra de salmuera

En la TABLA N° 3.2, se puede observar el comportamiento de la concentración y los gramos por litros de todos los iones que están disueltos en la muestra inicial de la salmuera, a partir de los resultados obtenidos de los análisis químicos se

puede concluir que las concentraciones de ion sulfato con ion potasio reaccionan por su altas concentraciones lo que posibilitó la obtención de sulfato de potasio.

Tabla N° 3.2. Concentraciones de cationes y aniones principales en la muestra de salmuera

Salmuera							
Cl ⁻ g/l	SO ₄ ⁼ g/l	B ₄ O ₇ ⁼ g/l	Na ⁺ g/l	K ⁺ g/l	Li ⁺ g/l	Ca ⁺² g/l	Mg ⁺² g/l
203.40	31.27	12.17	38.2	29.95	3.08	0.298	63.28

Fuente: elaboración propia

3.1.3 Componentes Principales de las Muestras de Yeso (CaSO₄)

El CaSO₄ (yeso) fue obtenido de la misma salmuera concentrada, el ion sulfato presente en la salmuera reacciona con cloruro de calcio dando de esta manera el CaSO₄, esto se encuentra reflejado en los análisis del el ion sulfato y ion calcio que tienen altas concentraciones, donde se demuestra que el magnesio absorbe el agua es un ion interfiérete para la obtención del sulfato de calcio.

Estos resultados permitieron utilizar el sulfato de calcio en la obtención del sulfato de potasio.

Tabla N° 3.3 Resultados de análisis en la muestra de yeso (CaSO₄)

Yeso (CaSO ₄)				
SO ₄ ⁼ g/kg	Na ⁺ g/kg	K ⁺ g/kg	Ca ⁺² g/kg	Mg ⁺² g/kg
435.34	2.089	5.264	74.67	0.312

Fuente: elaboración propia

3.2 Resultados de análisis químico de la sal de silvinita

En la **TABLA N° 3.4** se muestran resultados de análisis químico de las sales de silvinita, donde la concentración de los iones potasio y sodio son elevadas de 125.936 y 73.358 g/kg debido a la filtración de la muestra evaporada en la solución remanente se eliminan los siguientes interferentes: magnesio, calcio, sulfatos, litio, boratos. A partir de los resultados de esta muestra se considera utilizarlo para

la obtención de sulfato de potasio, debido a que tienen concentraciones considerables del ion potasio y sodio.

Tabla N° 3.4 Resultados de análisis de los cristales de silvinita

Silvinita				
Cl ⁻ g/kg	SO ₄ ⁼ g/kg	Na ⁺ g/kg	K ⁺ g/kg	Mg ⁺² g/kg
356.246	0.08	73.358	125.936	34.12

Fuente: elaboración propia

3.3 Resultados de cristalización fraccionada del cloruro de potasio

Para la cristalización fraccionada del cloruro de potasio se controla varios parámetros químicos que son el sodio, potasio, magnesio, cloruros donde los resultados obtenidos de los análisis químicos del cloruro de potasio, particularmente es importante el contenido de la concentración de potasio, cloruros en relación a los demás componentes, de acuerdo a los análisis del cloruro de potasio se puede utilizar para el producto final que es el sulfato de potasio (K₂SO₄).

Tabla N° 3.5 Resultados de análisis químico de iones de cloruro de potasio (KCl)

Cloruro de potasio (KCl)			
Cl ⁻ g/kg	Na ⁺ g/kg	K ⁺ g/kg	Mg ⁺² g/kg
791.54	37.706	680.505	0.6817

Fuente: elaboración propia

3.4. Presentación e interpretación de resultados del producto final el sulfato de potasio (K₂SO₄)

Los siguientes resultados corresponden a la cantidad y la pureza obtenida del K₂SO₄ que fue realizado por precipitación reactiva, en dos diferentes pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de Química de la U.A.T.F. a diferentes condiciones de trabajo los cuales se presentan en el **Tabla N°3.6**, las variables

consideradas son la temperatura y la concentración del amoníaco, para tomar las pruebas necesarias debido a que el amoníaco tiene la propiedad de reducir las solubilidades de ciertas sales inorgánicas en soluciones acuosas.

Tabla N° 3.6 Resultados de las pruebas experimentales

N°	Iones		Variables		K ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄
	K ⁺ g/kg	SO ₄ ⁼ g/kg	T °C	Concentración del amónico %	g	%
Prueba 1	321.983	380.712	5	20	2.0776	68.89
Prueba 2	307.063	266.196	15	30	2.0573	66.56

Fuente: elaboración propia

Después de realizar toda las pruebas experimentales en laboratorios es necesario conocer en cuál de las pruebas el K₂SO₄ tiene mayor porcentaje de pureza, para así determinar cuál de las variables tiene mayor influencia en la obtención del K₂SO₄.

Como se puede observar de las dos pruebas experimentales realizadas, en la primera prueba se obtiene sulfato de potasio con mayor porcentaje de pureza. De los resultados obtenidos se puede determinar que:

- ❖ La segunda variable que influye es la temperatura ya que los compuestos iónicos aumenta su solubilidad con altas temperatura.
- ❖ La agitación en el proceso de la reacción es otra de las variables que influye ya que a mayor agitación, el contacto o la interacción entre los iones disueltos en los cristales de la silvinita es mucho mayor.
- ❖ Finalmente, la cantidad de amonio y el sulfato de calcio añadido es una variable que afecta significativamente, en la obtención de K₂SO₄, esto se debe a que el potasio que se encuentra en la sales de cloruro de potasio reacciona con la cantidad necesaria de los iones sulfato, que proviene de la adición del sulfato de amonio. A continuación se presentan los resultados

de los análisis químicos de las pruebas donde obtiene el sulfato de potasio con un 68.89 % y 66.56% de pureza.

3.4.1. Resultados basados en los análisis químicos de sulfato de potasio

De los resultados obtenidos de las dos pruebas se observa el comportamiento de la concentración y los gramos absolutos de todos los iones disueltos en la sales de silvinita hasta la solución.

Al hacer reaccionar con sulfato de calcio catalizado con amonio a una temperatura de 5°C y 15°C 400 rpm en los análisis se puede observar que disminuyen en las concentraciones de los iones (Mg^{+2} , Na^{+} , Ca^{+2} , Cl^{-}) es debido a que existe una transferencia de todo los iones de la fase liquida durante el proceso de reacción, donde existe un aumento progresivo en las concentraciones de los iones K^{+} SO_4^{-} que es el producto requerido para fertilizantes de suelos

Tabla N° 3.7 Resultados de análisis químico del sulfato de potasio

N°	Sulfato de potasio (K_2SO_4)					
	Cl^{-} g/kg	SO_4^{-} g/kg	Na^{+} g/kg	K^{+} g/kg	Ca^{+2} g/kg	Mg^{+2} g/kg
Prueba 1	10.179	380.712	7.278	321.983	5.376	2.419
Prueba 2	11.934	266.196	8.883	307.063	10.753	3.628

Fuente: elaboración propia

Comparando los dos pruebas obtenidas de sulfato de potasio empleando en la investigación que el $CaSO_4$ a solución amoniacal, velocidad de agitación, concentración de amoniaco se observa que ocurre una reacción entre el ion K^{+} presente en la sal de cloruro de potasio con el ion SO_4^{-} proveniente de adición de sulfato de calcio catalizado con amonio cuando se lo agita a una temperatura baja estos dos iones llegan a sobre saturarse y forman sales de sulfato de potasio (K_2SO_4) debido a que esta sal es soluble a altas temperaturas y poco soluble en bajas temperaturas, pero cabe recalcar que al formar el K_2SO_4 también empieza a cristalizar los demás iones que se encuentra disueltos en sal de cloruro de potasio y son arrastrados por oclusión en los cristales.

CONCLUSIONES

A continuación se presenta las conclusiones arribadas una vez efectuado el presente trabajo de investigación.

- ❖ Los pilares fundamentales de la investigación para alcanzar el objeto final son los consiguientes estudios documentales de las solubilidades de cloruro de potasio, cloruro de sodio, sulfato de amonio, sulfato de calcio sulfato de potasio, cloruro de amonio, seguidamente el proceso de concentración de los iones potasio en la solución mediante la eliminación de interferentes y finalmente las mejores condiciones de reacción entre el cloruro de potasio con sulfato de calcio catalizado con amónico para la obtención de sulfato de potasio.
- ❖ El tratamiento que se realiza a la muestra de salmuera proveniente del salar de Uyuni, juega un papel muy importante, debido a que cuando se elimina los demás iones que están disueltos en las muestras considerados interferentes y al eliminar las mismas, las sales de silvinita es rica en iones K^+ y Na^+ las cuales se asemejan a las concentraciones requeridas de 73.358 g/kg de Na^+ , 125.936 g/kg de K^+ 356.246 de Cl^- para la obtención del sulfato de potasio.
- ❖ Las concentraciones del ion potasio en la sal de cloruro de potasio tienen las siguientes concentraciones 680.505 g/kg K^+ , 791.54 g/kg Cl^- que fue obtenida de las sales de silvinita para la obtención del sulfato de potasio, es un factor muy importante las concentraciones del cloruro de potasio, que se debe tener muy en cuenta para la obtención del sulfato de potasio.
- ❖ Se demuestra que los variables influencia en la obtención de sulfato de potasio son: La temperatura de reacción y filtración a (5°C y 15°C) la concentración del Amonio (20 % y 30%) y la agitación de (400rpm).
- ❖ El método de reacción y cristalización empleado para obtener el sulfato de potasio permite alcanzar los siguientes resultados, 68.89% y 66.56%

RECOMENDACIONES

- ❖ Socializar con la toma de muestra que fue proporcionado de la institución de investigación de la carrera de química de la U.A.T.F. de 5 litros no es recomendable porque para la obtención del sulfato de potasio, se necesita una cantidad de 20 litros. y para realizar el muestreo personalmente se necesita varios materiales de alto costo no es recomendación del trabajo de investigación.
- ❖ Para la obtención de sulfato de potasio con mayor % de pureza, se recomienda trabajar con mayor cantidad de muestra, alrededor de 20 L.
- ❖ Realizar una investigación que considere otras variables tales como agitación y hacer la factibilidad del proyecto a escala industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Bailer, Moeller y Kleinberg: Química Básica, Edit Alhambra, Madrid (1968)
- ❖ Calvet, E.: Química General, Salvat, Barcelona (1962)
- ❖ Estudio Cinético de la Reacción de Conversión del Fosfoyeso y Cloruro de Potasio en Solución amoniacal, Tesis de Postgrado, Ingeniería 1999.
- ❖ Mercado de los insumos minerales para la producción de fertilizantes, Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, subdirección de planeación minera. Bogota, Colombia 2003.
- ❖ Tomado de Burns, Ralph A. Fundamentos de Química. Prentice-Hall Hispanoamericana
- ❖ https://www.ecured.cu/Sulfato_de_potasio
- ❖ <https://www.lifeder.com/sulfato-de-potasio/>
- ❖ <http://ichn.iec.cat/Bages/geologia/Imatges%20Grans/csilvina.htm>
- ❖ https://www.ecured.cu/Sulfato_de_calcio
- ❖ <https://www.cocinista.es/web/es/enciclopedia-cocinista/.../sulfato-de-calcio.htm>
- ❖ https://www.ecured.cu/Curva_de_solubilidad
- ❖ <https://es.wikipedia.org/wiki/Precipitado>
- ❖ <http://apuntes.rincondelvago.com/curvas-de-solubilidad.html> Curvas de Solubilidad
- ❖ <http://cristalesdelaboratorio.blogspot.com/2011/04/cristales-de-sulfato-de-potasio.html>
- ❖ <https://patentados.com/2013/proceso-para-la-produccion-simultanea>

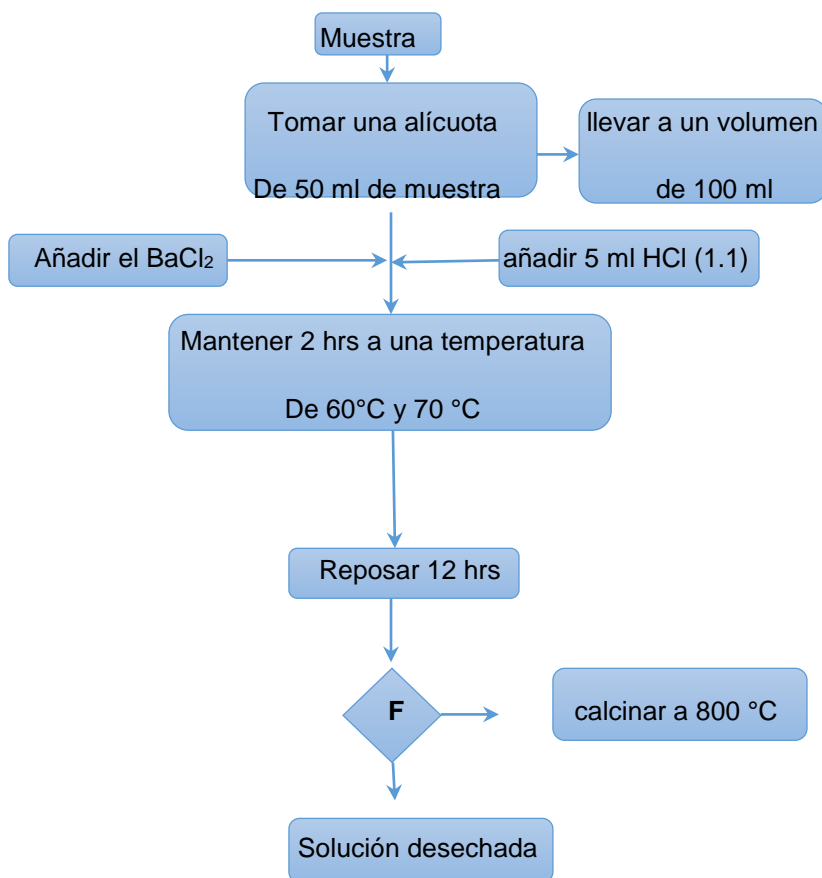
ANEXOS N°1.1

FLUJOGRAMAS UTILIZADO PARA EL ANALISIS FISICOQUIMICO DE LAS MUESTRAS.

Para el análisis fisicoquímico de las muestra se utiliza diferentes métodos normalizados, para cada elemento y que se detallan a continuación.

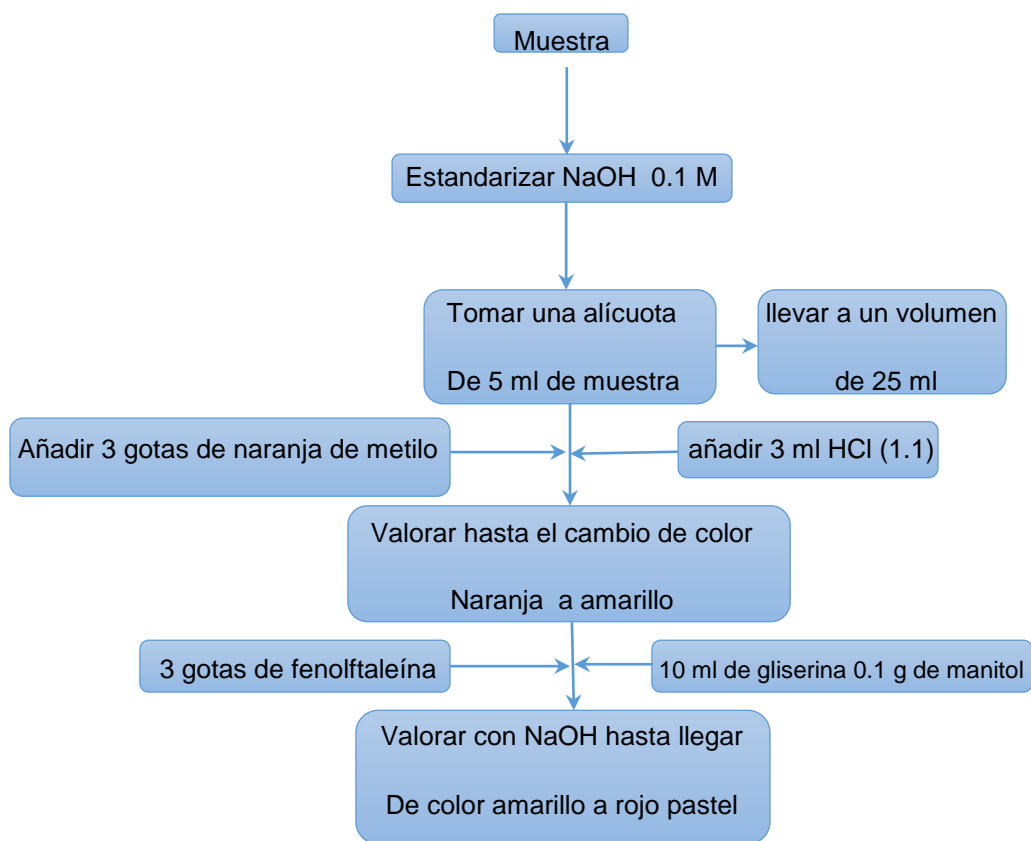
- Sulfatos

Para el análisis de este compuesto se emplea el método gravimétrico la cual consiste en precipitar al sulfato como sulfato de bario por adición de una solución de cloruro de bario.



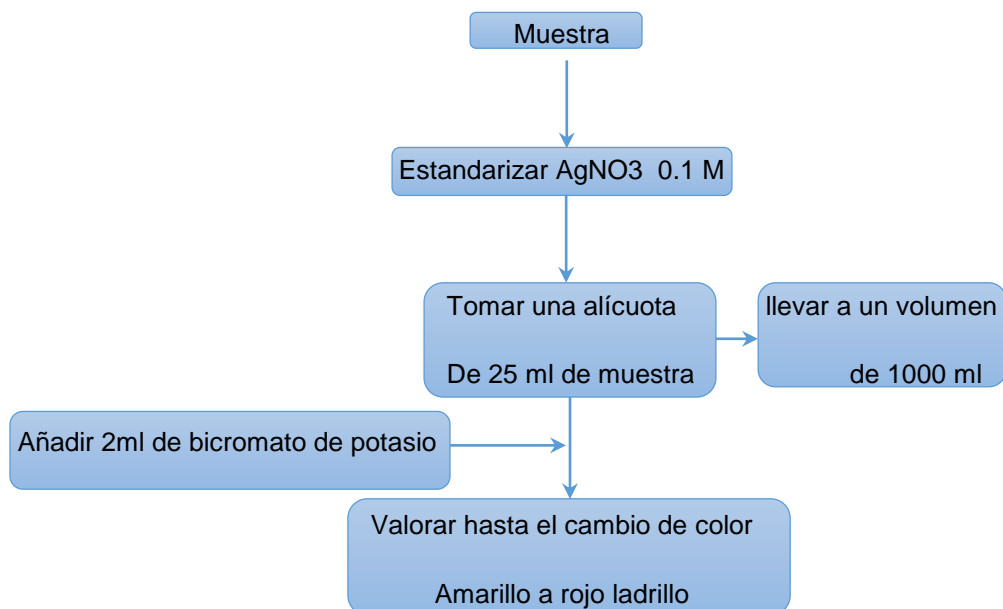
- Boratos

Para la determinación cuantitativa del anión borato en la solución de salmuera y sólidos formados por la cristalización se utilizó un método de análisis volumétrico. La solución acuosa alcalina se valora con anaranjado de metilo y agregando un compuesto orgánico que tenga un grupo funcional oxhidrilo más de uno



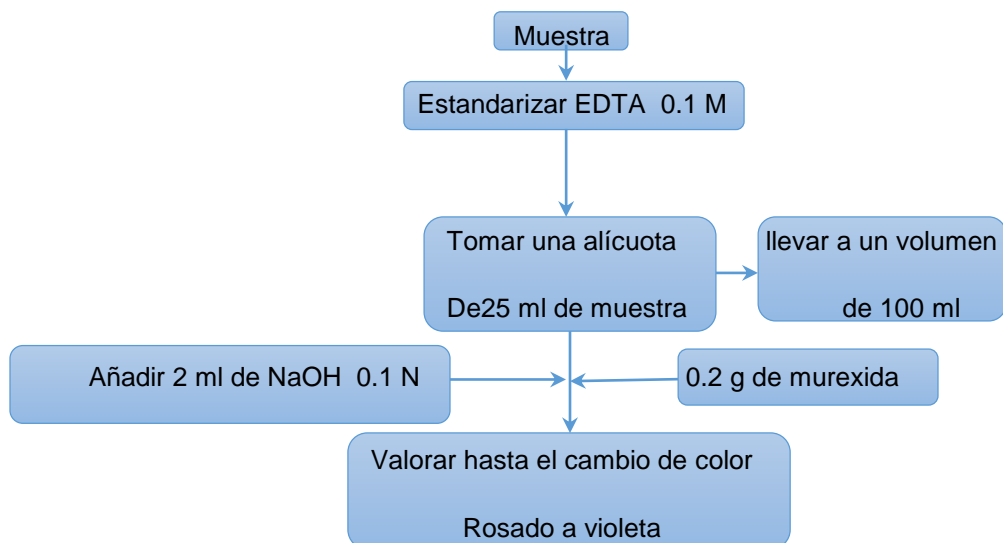
Cloruros:

Para la identificación de ion Cl^- se utiliza el método volumétrico más conocido como el titulométrico argentométrico, en la cual la muestra debe tener un PH neutro o ligeramente alcalino.



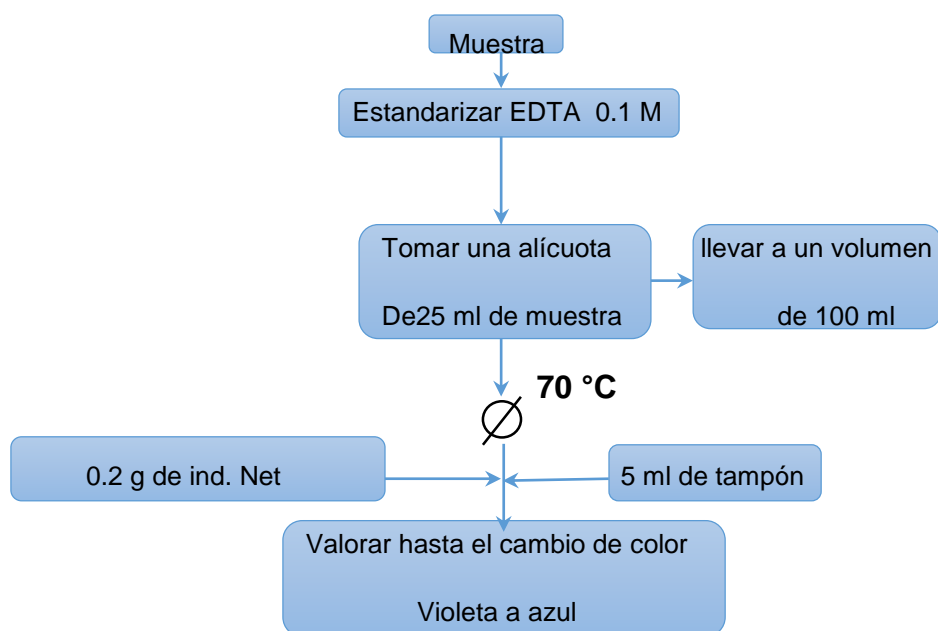
Calcio:

El calcio puede determinarse directamente, usándose EDTA por el método volumétrica ha sido el método normalmente usado para la determinación de cal



Magnesio:

La forma de determinar el ion Mg^{+2} es por el método volumétrico, empleado para la valoración el ácido etilendiaminotetraacético disódico (EDTA), por la adición de esta solución se llega a formar un complejo en forma de quelato



ANEXO 2.1
FOTOGRAFÍAS PARA LA OBTENCIÓN DEL CLORURO DE POTASIO

Figura 2.1.1 Muestra de salmuera en agitación

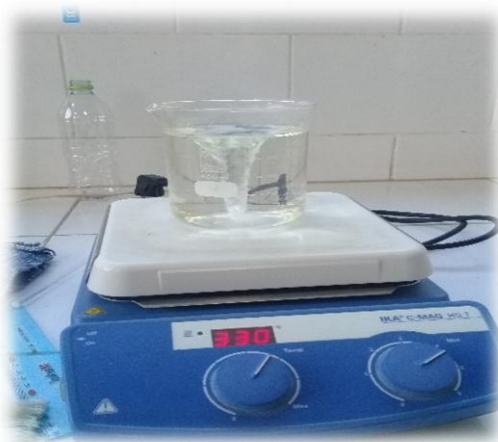


Figura 2.1.2 Salmuera cristalizada para obtener la silvinita



Figura 2.1.3 Cristales de silvinita



Figura 2.1.4 El cloruro de potasio en agitación



Figura 2.1.5 Filtración del cloruro de potasio



Figura 2.1.4 cristales de cloruro de potasio



ANEXO 3.1

FOTOGRAFÍAS PARA LA OBTENCIÓN DEL SULFATO DE POTASIO

Figura 3.1.1 solución amoniacal

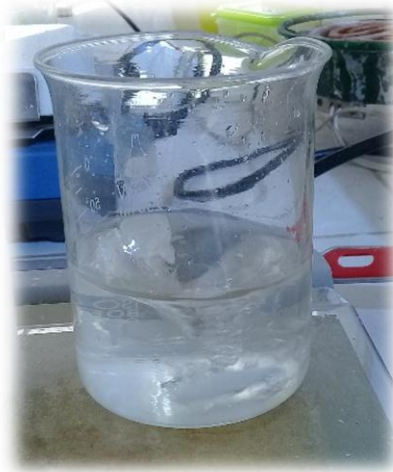


Figura 3.1.2 Añadiendo el sulfato de calcio



Figura 3.1.3 Agregando el cloruro de potasio



Figura 3.1.3 Sulfato de potasio

