

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**METALÚRGICA**



**T E S I S**

**Evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado  
térmicamente a diferentes intensidades en la planta ADR de Minera la  
Arena S.A. región La Libertad 2020**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Metalurgista**

**Autor:**

**Bach. Consuelo SANCHEZ QUIRICA**

**Asesor:**

**MSc. Ramiro SIUCE BONIFACIO**

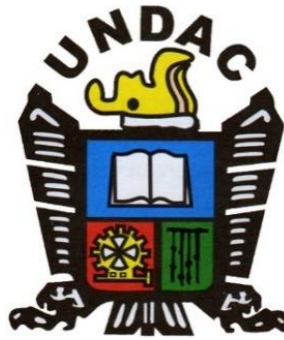
**Cerro de Pasco – Perú - 2022**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**METALÚRGICA**



**T E S I S**

**Evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado  
térmicamente a diferentes intensidades en la planta ADR de Minera la  
Arena S.A. región La Libertad 2020**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. José Elí CASTILLO MONTALVAN**  
**MIEMBRO**

---

**Mg. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO**  
**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

La presente investigación es dedicada a mis padres quienes apostaron por la educación, teniendo en cuenta que esta es la única forma de tener una mejor sociedad.

## **AGRADECIMIENTO**

A los docentes del Programa de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, que forjaron en mis los dones de buscar las causas del fenómeno físico o químico.

También debemos agradecer el apoyo a la Unidad Minera Tahoe La Arena S.A. por los datos brindados en el desarrollo de la presente investigación para ser analizados.

## RESUMEN

El estudio de investigación trata de la evaluación de la adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades de energía. Estas pruebas consistieron, en analizar las diferencias de adsorción de metales preciosos con carbones reactivados (reactivación química y reactivación térmica) y su influencia de la intensidad de energía (110, 130, 140 y 150 A) en la capacidad de adsorción de Au, Ag y Cu.

En el proceso de reactivación térmica, el material adquiere un área superficial que varía de unos cientos hasta más de mil metros cuadrados por gramo de carbón. Con el aumento de temperatura de activación, aumenta las regiones microcristalinas que tienen relación con las propiedades adsorptivas del carbón. Para que ocurra adsorción, la molécula reacciona más con la superficie interna de las partículas de carbón por difusión a través de los poros, de donde la estructura del poro tiene una influencia marcada en la cinética de adsorción.

El estudio se desarrolló aplicando el diseño experimental. Para determinar la capacidad de adsorción se extrajeron muestras a 20, 30, 60 y 120 min, y se verificó la eficiencia de adsorción.

De las pruebas se concluyó que, trabajando con carbón reactivado de 110 hasta 150 A, la capacidad de adsorción de metales preciosos se incrementó en 98,7 %, Ag 95,6 %, y Cu 23,5 %, así como también la eficiencia de adsorción.

**Palabra clave:** solución pregmat, carbón reactivado, adsorción,

## ABSTRACT

The research study deals with the evaluation of the adsorption of reactivated carbon thermally at different energy intensities. These tests consisted of analyzing the differences in the adsorption of precious metals with reactivated carbons (chemical reactivation and thermal reactivation) and their influence of energy intensity (110, 130, 140 and 150 A) on the adsorption capacity of Au, Ag and Cu.

In the process of thermal reactivation, the material acquires a surface area that varies from a few hundred to more than a thousand square meters per gram of carbon. As the activation temperature increases, the microcrystalline regions that are related to the adsorptive properties of carbon increase. For adsorption to occur, the molecule reacts more with the inner surface of the carbon particles by diffusion through the pores, whereby the pore structure has a marked influence on the adsorption kinetics.

The study was developed applying the experimental design, to determine the adsorption capacity, samples were extracted at 20, 30, 60 and 120 min, and to see the adsorption efficiency.

From the tests it was concluded that working with reactivated carbon of 110 up to 150 A, the precious metal adsorption capacity increased by 98.7%, Ag 95.6%, and Cu 23.5%, as well as the adsorption efficiency.

**Keyword:** pregmat solution, reactivated carbon, adsorption,

## INTRODUCCIÓN

El estudio de evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades en la planta ADR de Minera la Arena S.A., aborda la importancia de la adsorción del carbón reactivado de 110 a 150 A y su efecto en la capacidad de adsorción del Au, Ag, y Cu.

Como se sabe, el carbón activado es ampliamente usado por la minería, para la recuperación del oro y plata, y el uso permanente de este material, ocasiona que residuos orgánicos se incrusten en los poros reduciendo su capacidad de adsorción. Y la única forma de recuperar la capacidad adsorptivas del carbón es someténdolo a un proceso de reactivación química y térmica, para incrementar el área superficial de los poros.

Para alcanzar el objetivo de la tesis se estructuro de la siguiente manera:

En el capítulo I, se presenta el problema de investigación, objetivos y las razones por la que se decide realizar el estudio de evaluación de la capacidad de adsorción reactivado a diferentes intensidades de energía.

En el Capítulo II, compuesto por del marco teórico se presenta los antecedentes de estudio, el sustento teórico y científico relacionado con el carbón activado, propiedades del carbón activado, reactivación térmica y los parámetros que influyen en la adsorción de metales preciosos.

En el Capítulo III, concerniente a la metodología, en esta sección se sustenta como se desarrolló la investigación con el diseño metodológico y la toma y recolección de datos informativos.

En el Capítulo IV, discusión y resultados, se presentan todos los datos informativos de la investigación llegándose posteriormente a una conclusión final.

## **INDICE**

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

1.1.	Identificación y determinación del problema .....	1
1.2.	Delimitación de la investigación .....	2
1.3.	Formulación del problema .....	2
1.3.1.	Problema general .....	2
1.3.2.	Problemas específicos .....	2
1.4.	Formulación de objetivos .....	2
1.4.1.	Objetivo general .....	2
1.4.2.	Objetivos específicos .....	3
1.5.	Justificación de la investigación .....	3
1.6.	Limitaciones de la investigación .....	3

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

2.1.	Antecedentes de estudio .....	5
------	-------------------------------	---



2.2.	Bases teóricas – científicas .....	8
2.3.	Definición de términos básicos.....	24
2.4.	Formulación de hipótesis .....	24
2.4.1.	Hipótesis general.....	25
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	25
2.5.	Identificación de variables.....	25
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores .....	25

### **CAPITULO III**

#### **METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACIÓN**

3.1.	Tipo de investigación.....	26
3.2.	Nivel de investigación .....	26
3.3.	Métodos de investigación .....	26
3.4.	Diseño de investigación.....	27
3.5.	Población y muestra.....	28
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	29
3.7.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	29
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	30
3.9.	Tratamiento estadístico .....	30
3.10.	Orientación ética filosófica y epistémica.....	30

### **CAPITULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1.	Descripción del trabajo de campo.....	31
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	32
4.3.	Prueba de hipótesis .....	61
4.4.	Discusión de resultados .....	62

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

La empresa Minera la Arena S.A. se encuentra en el norte de Perú, a 480 km al norte-noroeste de Lima. La mina consiste en dos tipos de yacimientos minerales: mineralización aurífera epitermal de alta sulfuración encajada en arenisca en brecha oxidada dentro de la Formación Chimú, y mineralización de sulfuro de cobre y oro albergada en pórfidos en fase múltiple de intrusión

En la planta ADR se realiza la recuperación del oro en forma permanente, que consiste en la adsorción con carbón activado en un proceso continuo, sin embargo, el carbón necesita ser reactivado después del proceso de la adsorción del oro en la solución Pregnat y su posterior desorción del oro en la solución de desorción, pero este proceso hace que el carbón pierda sus propiedades de adsorción, para el cual debemos de realizarle la reactivación térmica. Además, últimamente la eficiencia de adsorción descendió a 95 %, esto debido a que no se estaba realizando un buen control de la reactivación térmica del carbón activado, motivo por el cual se trabajó en las pruebas experimentales con carbones

reactivado a diferentes intensidades de energía eléctrica para ver el efecto de la adsorción y si se mejoraba la eficiencia de extracción.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

El trabajo de investigación se realizó en la Empresa Minera la Arena ubicado en la Región la Libertad, provincia de Sánchez Carrión, distrito de Huamachuco, situada a una altura promedio de 3,400 metros sobre el nivel del mar.

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. Problema general**

¿Es posible realizar la evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades en la planta ADR de Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- ¿Cómo realizar la caracterización del carbón reactivado de la Empresa Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020?
- ¿Cómo realizar pruebas de adsorción con carbón reactivado térmicamente de la Empresa Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020?
- ¿Cómo determinar la velocidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente de la Empresa Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020?

## **1.4. Formulación de objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Realizar la evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades en la planta ADR de Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización del carbón reactivado de la Empresa Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020
- Realizar pruebas de adsorción con carbón reactivado térmicamente de la Empresa Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020
- Determinar la velocidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente de la Empresa Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020

#### **1.5. Justificación de la investigación**

El estudio se fundamenta principalmente en mejorar la adsorción del carbón activado, para esto se tuvo primero que reactivar el carbón a diferentes intensidades como: RQ, RT 110 A, RT 130 A, RT 140 A y RT 150 A. Seguidamente se realizó pruebas de adsorción con estos carbones para ver el comportamiento metalúrgico de cada uno de ellos.

El mejoramiento de la adsorción permite tener adsorbatos que no retorne de la solución barren a los pads de lixiviados, permitiendo de esta manera la mayor extracción de oro de la solución pregmat. Esto también beneficia a la operación y recurrir a menores costos de operaciones en la planta ADR.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

En el estudio se tuvo limitaciones con la información bibliográfica respecto a la adsorción de carbones reactivados a diferentes intensidades de

energía. También se tuvo limitaciones con el financiamiento para realizar varios experimentos, ya que esto, conllevará a la compra de materiales e insumos.

La adsorción de oro es un fenómeno físico - químico aun no comprendido, el oro adsorbido se considera que es atrapado como un complejo cianurado de oro dentro de la matriz de carbón activado se produce por el contacto del carbón activado cargado con una solución de cianuro. Seguir estudiando el proceso de absorción nos ayuda a entender mejor el proceso ya que se ha intensificado el uso del carbón en plantas metalúrgicas.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1. Antecedentes de estudio

**Feijoo (2019)** realizó un estudio sobre la **determinación de la capacidad de adsorción del complejo oro-cianuro en compósitos de carbón activado-vidrio**. Y como objetivo se planteó evaluar la influencia de la impregnación de vidrio en la estructura de un carbón de alta activación, CAA, de cuesco de palmiste, a fin de mejorar su dureza granular, minimizar las pérdidas por atrición y optimizar la capacidad de adsorción del complejo de oro-cianuro, en la estructura de compósitos de carbón activado – vidrio.

Teniendo como problema la recuperación de minerales preciosos, las pérdidas de material carbonáceo por atrición se traducen en importantes pérdidas económicas para las empresas mineras, debido a que se pierde material adsorbente en las pulpas cianuradas y los metales preciosos son adsorbidos en la superficie del carbón fino, lo que representa pérdidas de oro en carbón fino que pueden alcanzar valores de 110- 140 g/ton. De los estudios realizados en el proceso de recuperación de metales preciosos, del 100 % de las pérdidas por

atrición del carbón, el 46 % corresponde al proceso de cianuración en pulpa, el 7 % al proceso de elución y el 47 % a la regeneración del mismo

Llegando a las siguientes conclusiones:

- La fracción de carbón activado constituyente de los compósitos con fritas de esmalte, CAFE, y vidrio reciclado, CAVR, presentan un elevado porcentaje de carbón fijo, superando al valor del carbón fijo del carbón activado sin impregnación, CAA, deduciéndose que la masa vítrea logra reforzar significativamente la superficie del carbón.
- La incorporación de vidrio reciclado en la estructura superficial del carbón activado logró incrementar en 4 puntos la dureza granular del carbón de alta activación, a expensas de una reducción del índice de yodo de un 30 % aproximadamente, a pesar de eso, se obtuvieron adsorciones del 89.5 % del oro en solución.
- Se evidenció que la impregnación de vidrio reciclado en los granos del material carbonoso se distribuye de manera heterogénea, lográndose un reforzamiento y una reducción de las pérdidas por atrición menores del 46 %.
- En el caso de la impregnación de vidrio de fritas de esmalte, la dureza granular alcanzó 5,5 puntos más que en el CAA, con una reducción del 19 % en el índice de yodo y capacidades de adsorción del complejo oro-cianuro del 90.4 %. La incorporación de vidrio de fritas de esmalte en la superficie del carbón se logró de una manera homogénea y en forma de capas de esmalte, siendo evidente el reforzamiento de la matriz carbonosa, ya que se lograron pérdidas de atrición menores del 39 %.



- Estos resultados permiten evidenciar que, en el compositor con fritas de esmalte, los mecanismos de reforzamiento superficial del compuesto son los más apropiados para obtener carbones activados, con mayor rendimiento de recuperación de metales preciosos.

**Lapo (2014) realizó un estudio sobre reactivación química del carbón activado del tipo calgon americano 6 x 12 utilizado en la sociedad minera “Promine” para el proceso de adsorción de metales preciosos.** Planteándose como objetivo reactivar químicamente el carbón activado de tipo calgon americano para el proceso de adsorción de metales preciosos.

El problema que tiene la empresa es que la compañía presta sus servicios a más de una decena de sociedades para las operaciones, generando una utilización diaria de carbón activado, que luego de saturarse sus macro y microporos debe ser sometido al proceso de elusión, y enseguida su limpieza o reactivación química para la eliminación de sustancias extrañas presentes, y poder así continuar su ciclo de trabajo de adsorción. Además, la empresa tiene la responsabilidad de limpiar mensualmente al menos 1400 kilos de carbón activado para lo cual utiliza ácido nítrico en el proceso de reactivación, de esta manera hemos detectado que la empresa utiliza mes a mes una gran cantidad de carbón activado, por lo cual se quiere dar un respaldo teórico y experimental de cómo dar una limpieza óptima al carbón activado con estudios técnicos en el laboratorio de esta misma empresa.

Realizado los estudios llega a las siguientes conclusiones:

- Se logró reactivar químicamente el carbón activado con la ayuda de agentes químicos como lo es el ácido clorhídrico a una concentración del 5% un tiempo de agitación de 3 horas.

- Se logró establecer una técnica adecuada con el empleo de un lavado previo por dos horas con agua previo uso del agente químico.
- Realizando múltiples ensayos con el uso de agentes químicos hemos concluido que con el uso del ácido clorhídrico al 5 por 3 horas de agitación se logra obtener una apreciable limpieza del carbón activado.
- Hemos fijado las siguientes condiciones para el proceso de reactivación del carbón:
  - El PH del agua que se utilizara para su lavado previo a la reactivación debe ser neutro.
  - Las revoluciones del motor que impulsa el agitador deben ser no más de 60 rev/min.
  - El carbón activado después de su uso y antes de su reactivación química debe ser pasado por la malla # 14

## **2.2. Bases teóricas – científicas**

### **Carbón Activado**

Se conoce como carbón activado, CA, a todo material carbonoso que ha sido sometido a procesos químicos o físicos para aumentar su área superficial mediante la creación de porosidad en su estructura.

Los materiales que forman un carbón activo están unidos por capas grafénicas, cuyos espacios se conocen como porosidad. El principal uso de este material de elevada área superficial interna (500-1500 m<sup>2</sup>/g) es la adsorción de sustancias, presentes tanto en fase líquida como en fase gaseosa. El carbón activado es todo material carbonáceo amorfo, obtenido por pirolización y activación física y/o química, a partir de materiales con alto contenido carbón fijo, para obtener un producto con elevada área superficial y volumen de poro puede

ser usado en aplicaciones industriales, tanto en proceso de separación gaseosa como líquida. (Feijoo 2014) pág. 300.

### **Propiedades del carbón activado**

El carbón se utiliza para remover color, olor y sabor de una variedad de productos, por lo cual lo encontramos en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigeración, hasta en complejos industriales y modernas plantas de tratamientos de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos (Oudenne 1990).

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado. Las aplicaciones del carbón activado tienen dos características fundamentales: elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención.

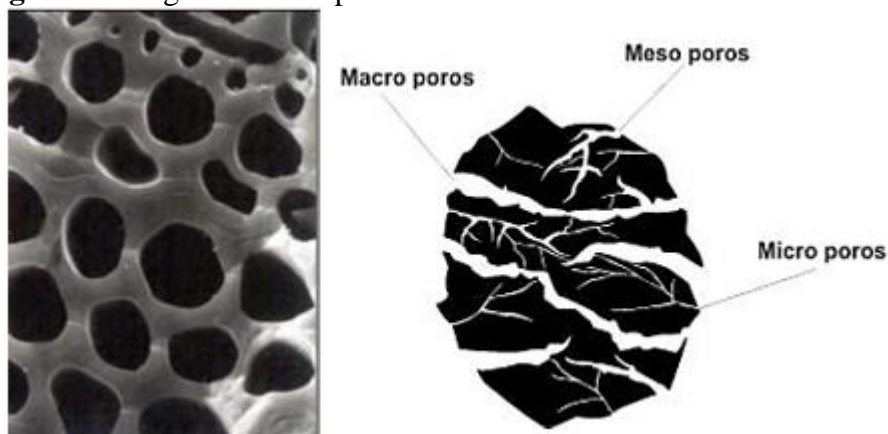
En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención al carbón, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido. (Pazmiño Ayala, 2007)

El carbón activado tiene poca especificidad en un proceso de retención, es un absorbente universal. Sin embargo, su naturaleza apolar y el tipo de fuerzas implicadas en los procesos de adsorción, retendrá moléculas apolares y de alto volumen molecular (fenoles, colorantes, hidrocarburos, etc.), por otro lado, las sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua no son retenidas por el carbón a una temperatura ambiente. (Sevilla, 2013).

Las propiedades adsorbentes del carbón activado no solo dependen de la superficie y la porosidad. En caso específico, las sustancias polares se retienen

débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón. En esta situación, la fijación al carbono de “heteroátomos”, principalmente oxígeno e hidrógeno, formando estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactosas, carbonilo, etc., elevan la afinidad de las sustancias polares por la superficie del adsorbente y pueden imprimir un carácter ácido-base al carbón (De Voys, 1983)

**Figura 1.** Imagen microscópica del carbón activado



*Nota.* Tomado de la Torre, Iordanov y Muñoz 2004)

### **Carbón activo a partir de la cáscara de coco**

A partir de la cáscara de coco es posible obtener diferentes tipos de carbones activados para aplicaciones diversas variando las condiciones de preparación. Por ejemplo, activando la cáscara de coco a alta temperatura (800°C) en presencia de vapor de agua se puede obtener un carbón hidrofílico (afinidad con el agua), micro poroso (con ultra micro poros de diámetros < 0,7 nm), apropiado para aplicaciones que involucran separación de gases; pero, si se activa a menor temperatura (450°C) usando un agente químico, como ácido fosfórico o cloruro de zinc, se puede obtener un carbón hidrofílico de poros más anchos (con meso poros > 2 nm) apropiado para aplicaciones en fase líquida [Reinoso, (2005)].

Además, de obtener una amplia distribución de poros, el carbón activado obtenido de la cáscara de coco resulta con mayor dureza y resistencia, comparado con el obtenido de madera. Otra ventaja que ofrecen los carbones activados obtenidos de materiales orgánicos, en relación a los obtenidos de materiales inorgánicos, es que, en los primeros, el porcentaje de cenizas es menor.



**Foto 1.** Carbón activado tomado de carbotecnia.info

### **Caracterización del carbón activado**

Es importante determinar las propiedades del carbón activado, que está (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) directamente relacionado con la adsorción del carbón. Entre las propiedades físicas del carbón activado se encuentra la densidad, área superficial, tamaño de partícula, porosidad y la dureza.

**La densidad** nos da información sobre el volumen de adsorbente que un peso dado de carbón activado puede ocupar. Cabe mencionar que los carbones activados con menos densidad tienen mayor capacidad de adsorción si la estructura porosa es la misma que la sus similares más densos (De la Torre, Iordanov y Muñoz 2004)

**El área superficial** está relacionada con la capacidad de adsorción del carbón activado. Además, se sabe que al disminuir el tamaño de partícula de una masa fija de carbón su área superficial aumenta y como consecuencia, su capacidad de

adsorción. Para determinar la distribución de tamaño de partícula se usa tamizado que consiste en hacer pasar una muestra de carbón activado a través de varias mallas de abertura conocida (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988)

La determinación del índice de yodo es el método estandarizado más usado para indicar el número de poros mayores a 1nm existentes en el carbón. (De la Torre, Iordanov y Muñoz 2004)

El índice de yodo es los miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón, y para algunos carbones, el valor numérico es cercano al área superficial interna, en metros cuadrados por gramo. El área superficial se puede determinar por el método de adsorción de nitrógeno gaseoso originalmente propuesto por Brunauer, Emmett y Teller (BET), y que consiste en poner en contacto al gas a la temperatura de nitrógeno líquido para formar una capa monomolecular sobre la superficie. El área característica de los carbones activados varía desde 400 m<sup>2</sup>/g para carbones de poca actividad y 1500 m<sup>2</sup>/g para carbones de alta actividad (Nicol, 1985).

**Resistencia del carbón a la abrasión** (dureza) es la destreza de soportar la degradación mecánica durante un proceso, y se expresa mediante el número de abrasión. La dureza es un factor limitante de la actividad del carbón activado, ya que a medida que el carbón activado es más poroso, su estructura es más débil, y por lo tanto, incrementan las pérdidas de material. Al seleccionar un carbón activado, se debe primero evaluar la dureza del carbón y luego seleccionar aquel con la mayor actividad. Este parámetro es de especial importancia cuando se trabaja con altas presiones o cuando el carbón se mantiene en el proceso por largo tiempo (Sevilla, 2013).

**Reactivación de carbón agotado**

La reactivación de carbones granulares agotados por diversos métodos, entre los cuales, tenemos lo más común el térmico (en horno rotatorio a 800°C y en atmósfera saturada con vapor de agua).

El carbón obtenido suele recuperar toda su capacidad de adsorción original. Con la reactivación, se evita la necesidad de disponer del carbón agotado (como residuo industrial) y se puede ahorrar hasta un 50% en la sustitución del carbón activado – reactivación

Después de que se haya agotado la capacidad de adsorción de un carbón activado es totalmente reciclable, los compuestos orgánicos adsorbidos son destruidos y el carbón reactivado se puede reciclar de manera segura y rentable para su uso continuo. En el proceso de reactivación lleva los siguientes pasos:

- El carbón activado usado se calienta en hornos desprovistos de oxígeno usando vapor como oxidante selectivo.
- Los compuestos orgánicos adsorbidos se volatilizan y se pirolizan a un carbón carbónico.
- Los materiales orgánicos volatilizados se destruyen en el post-combustión del horno.
- Los gases ácidos se eliminan por medio de un depurador térmico.
- La reacción a alta temperatura con vapor sirve para restaurar la capacidad de adsorción del carbón activado y controlar la sobre carbonización.

A través de la reactivación, el carbón activado granular gastado puede ser reciclado para su reutilización, eliminando prácticamente los costos y la responsabilidad que conlleva su disposición (Carbotecnia.info, 2012)

### **Tipos de reactivación del carbón**

A continuación, se realiza la descripción de algunos métodos de reactivación del carbón.

**a) Reactivación con vapor de agua**

Este método consiste en hacer circular vapor de agua a través de la cama de carbón, sin dejar que este se condense. De esta forma se desorben las moléculas orgánicas volátiles (que evaporen a menos 130 °C), y que habían sido retenidas por adsorción física.

Este es un método muy utilizado para recuperar solventes en corrientes de aire, ya que las moléculas desprendidas mantienen su estructura original. El carbón activado se somete a ciclos alternativos de adsorción-desorción. En el primero, se retiene el solvente hasta que el carbón se satura. En el segundo, se desorbe el solvente, y la mezcla de este y del vapor de agua se separa por decantación o por destilación, dependiendo de si son miscibles o no.

Mientras mayor sea la presión del vapor utilizado, mayor será su temperatura, y por lo tanto será capaz de desorber compuestos más pesados. La máxima presión a la que se maneja el vapor de una manera práctica es de 6 Kg/cm<sup>2</sup> (man), a la que le corresponde una temperatura cercana a los 150°C. (carbotecnia.info, 2010)

**b) Reactivación con ácido.**

Este método se utiliza para eliminar carbonatos u otras sales en carbón activado que se han utilizado en el tratamiento de aguas. Cabe mencionar que la reactivación térmica no alcanza eliminar dichos compuestos, por lo que es imprescindible realizar un lavado ácido.

Se puede utilizar cualquier tipo de ácido fuerte, pero el clorhídrico es el más común. Se prepara la solución de alrededor de 5% en peso, y el carbón se



inunda en esta. El proceso de disolución de las sales de calcio es lento. El tiempo varía dependiendo de qué tan incrustado se encuentra el carbón, pero puede tardar muchas horas. Para lograr mayor rapidez en el proceso, se calienta la solución a 60 – 70°C.

Una vez terminada la reactivación, el carbón debe haber recobrado su color negro.

**c) Reactivación térmica.**

Es el método más utilizado, que elimina normalmente todos los contaminantes orgánicos retenidos por adsorción física o química. Además, remueve ciertos compuestos inorgánicos, y destruye óxidos y grupos superficiales. Por lo tanto, reactiva carbones utilizados en decoloración o en la eliminación de cloraminas, permanganato de potasio, ozono y otros agentes oxidantes.

La reactivación térmica es la eliminación de los adsorbatos de un carbón agotado mediante un horno igual al utilizado para la activación térmica de carbón activado, pero a una menor temperatura y con una concentración más baja de vapor de agua. Mientras menos se acerque el proceso a las condiciones en las que se activa un carbón fabricado con la misma materia prima, menor será la cantidad de carbón que se pierda por oxidación.

Los gases del proceso de reactivación pueden contener contaminantes del aire. Pero la tecnología para evitar consiste en un postquemador seguido de un lavador de gases scrubber. El postquemador oxida los compuestos orgánicos, y el lavador de gases retiene partículas sólidas y compuestos químicos solubles. Normalmente se utiliza agua en el lavador, pero si se espera que se liberen vapores ácidos, se utiliza una solución diluida de sosa.

La reactivación térmica de un carbón que no tenga la suficiente dureza, no resulta rentable debido a que el proceso somete al carbón a una serie de movimientos y de acciones erosionantes -flujo de gases calientes y golpeteos- que lo rompen y disminuyen su tamaño. Por otro lado, los carbones menos duros son los más reactivos en presencia de gases oxidantes, y por lo tanto se convierten en CO<sub>2</sub> con mayor facilidad (Groso, 2010).

### **Adsorción con carbón activo**

Los fenómenos de adsorción presentan una enorme importancia en el desarrollo de operaciones y procesos en la industria química, en laboratorios y en el campo académico e investigativo. Múltiples aplicaciones de fenómenos de adsorción se hacen evidentes durante procesos de catálisis heterogénea (por ejemplo en reacciones de craqueo de petróleo, de eliminación de contaminantes, como en el caso de los convertidores catalíticos de automóviles —catálisis ambiental— y reacciones de química fina, entre otros), procesos de separación de mezclas (con variadas aplicaciones en cromatografía), tratamiento de residuos en solución acuosa, y procesos de purificación de gases y líquidos (por ejemplo, en procedimientos de purificación de agua y aceites) ( Carriazo et al. , 2008; Centi y Perathoner, 2008 ; Fernandes y col. , 2005 ; Tubert y Talanquer, 1997 ; Rouquerol y col. , 1999 ; Duff y col ., 1988 )

Para muchas de estas aplicaciones se recurre al uso de carbón activado como material adsorbente, debido a sus reconocidas propiedades: área superficial muy grande, microporosidad elevada y económicamente de bajo costo, entre otras (Podkoscielny Nieszporek, 2007; Figueredo et al.,1999).

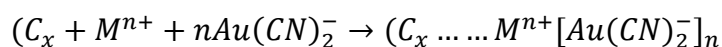
### **Adsorción de oro en carbón activado**

La recuperación de oro a partir de la mena involucra la oxidación del oro a  $Au^+$  y su coordinación con el cianuro para obtener la especie soluble  $Au(CN)_2^-$ . Convencionalmente, la recuperación del oro a partir de la solución cianurada se llevaba a cabo por sedimentación con zinc en el proceso Merrill-Crowe. Sin embargo, este método perdió aceptación cuando Zadra et al. y la U.S. Bureau of Mines desarrollaron el primer sistema de recuperación de oro por adsorción sobre carbón activado, y lo implemento industrialmente en el año de 1951 en la planta de tratamiento de Golden Cycle Gold ubicada en Cripple Creek. en el estado de Colorado. EEUU. El uso de este material poroso ofrecía serias ventajas sobre el proceso de sedimentación como eran la selectividad del carbón para adsorber especies de oro y plata, lo que evitaba pasos adicionales para separar impurezas como cobre y níquel, la facilidad de extraer el carbón por filtración y evitar los pasos de clarificación en el proceso con zinc, y la facilidad de eluir el oro para luego regenerar y reciclar al carbón, lo que reducía significativamente los costos operativos.

### **Mecanismo de Adsorción**

La compleja composición química y estructura porosa del carbón activado hace dificultosa la verificación de un solo mecanismo para el fenómeno de adsorción. A partir de la década de 1980. varios investigadores han propuesto algunas teorías que incluyen la adsorción de oro como  $Au(CN)_2^-$  por medio de fuerzas electrostáticas y de Vander Waals. la adsorción de la especie  $Au(CN)_2^-$ . la adsorción por precipitación del oro metálico, y la adsorción del aurodicianuro en La forma de par iónico con especies como  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$ . Esta última alternativa fue verificada por investigaciones posteriores con espectroscopia

Mossbauer y de fotoelectrón de rayos X (McDougall & Hancock, 1980). Esta teoría se ilustra de mejor manera mediante la siguiente ecuación general:



Donde:

$C_x$  representa la superficie del carbón y  $(C_x \dots \dots M^{n+} [Au(CN)_2^-]_n$  se entiende como la especie adsorbida en el carbón.  $M^{n+}$  es cualquier catión de origen alcalino o alcalino térreo ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ). Este mecanismo fue examinado por Davidson y McDougall, quienes propusieron un segundo paso luego de la adsorción del par iónico  $M^{n+} [Au(CN)_2^-]_n$ , en el cual el complejo se reducía y se polimerizaba para formar celdas con átomos de oro en estado metálico Au(0) y oxidado Au(I). En oposición a lo sugerido por Davidson y McDougall, Ibrado et al., sugiere que la especie que se adsorbe en el carbón es el  $Au(CN)_2^-$  y que la presencia de cationes sirve para preservar la electroneutralidad en la interfase.

A pesar de las discrepancias entre las dos teorías, la necesidad de especies canónicas estabilizantes en la solución ha sido verificada como un factor importante para la adsorción de oro. Se ha propuesto que la adsorción de oro incrementa proporcionalmente a la fuerza iónica en el medio, siendo el ion calcio el más estabilizante. De acuerdo con Davidson, la presencia de iones espectadores incrementa sustancialmente la adsorción de oro siguiendo la secuencia  $Ca^+ > Mg^+ > H^+ > Li^+ > Na^+ > K^+$ . En base a la teoría de par iónico, lo anterior sugiere que el aurodicianuro de calcio se adsorbe más fuertemente que el ácido aurodicianuro dependiendo del pH del medio. Adicionalmente se ha observado que con la total ausencia de estos iones la adsorción de oro se inhibe por completo.

### **Factores que afectan la adsorción de oro**

### **Tipo de Carbón**

El tipo de carbón producido por diferentes métodos tienen un rango de propiedades que afectan la velocidad de adsorción y capacidad de cargado.

Los carbones blandos tienen una alta capacidad de adsorción, debido a una estructura más porosa y extensa la cual reduce la fuerza mecánica del carbón. El tipo de carbón requerido para un proceso en particular depende de muchos factores incluyendo el tipo de proceso de adsorción, la concentración, la velocidad de flujo de la solución/pulpa, la velocidad de producción de oro, la velocidad de atracción del carbón y la severidad de las condiciones del proceso. (Tómala Andrade, 2016)

### **El pH de la solución**

Un descenso del pH de la solución hace que se produzca un incremento de la velocidad de adsorción y capacidad de adsorción de oro. El efecto de la velocidad de adsorción es completamente pequeño en el rango de pH aplicado en circuitos de cianuración, con solo una pequeña ventaja de ser aumentado reduciendo el pH. La capacidad de adsorción máxima se da en el rango de pH 9 y 11. (Tómala Andrade, 2016)

### **Dosis del adsorbente**

El incremento de la densidad de pulpa hace que decrezca la velocidad de adsorción del oro (Tómala Andrade, 2016), este efecto es atribuido a:

- Decrecimiento de la eficiencia de mezclado que resulta del incremento de viscosidad y decrecimiento de energía por unidad de masa de pulpa.
- Relleno físico de la superficie y poros del carbón por partículas finas de la mena.
- Solución reducida: el radio del carbón a altas densidades de pulpa.

### **Granulometría del adsorbente**

El efecto del tamaño de partícula es significativo sobre el área superficial externa del carbón activado, tiene solo un efecto muy pequeño sobre el área de superficie específica a causa de la altamente desarrollada estructura porosa interna. Como resultado, la máxima capacidad de carbón requerido es independiente del tamaño de partícula. Sin embargo, el tamaño tiene un gran efecto sobre la longitud media de poro dentro de las partículas de carbón y la velocidad de adsorción incrementa con el decrecimiento del tamaño de partícula. (Tómala Andrade, 2016)

Esto es un factor importante en los sistemas industriales de adsorción porque la mayoría opera con una dosis de carbón por debajo de la verdadera capacidad estimada. Los rangos de tamaños de partículas de carbones usados en aplicaciones industriales varían de 1.2x2.4 mm a 1.7x3.4mm. (Tómala Andrade, 2016)

### **Concentración de oro y plata en la solución**

La velocidad y el equilibrio de la capacidad de adsorción, ambos se incrementan con el incremento de la concentración de oro y plata en la solución. (Tómala Andrade, 2016)

### **Temperatura**

La adsorción involucra una relación específica entre las propiedades del carbón activo y el soluto. Por lo tanto, los efectos cuantitativos de la temperatura no son los mismos entre todos los carbones y solutos. El alcance de la adsorción puede verse incrementado con un decrecimiento de la temperatura debido a que las relaciones de adsorción son exotérmicas.

Sin embargo, el incremento de la temperatura también incrementa el grado de difusión del soluto en la fase líquida hacia los centros de adsorción, lo que eventualmente conduce a una adsorción mayor. (Universidad de Coruña, 2015)

Se puede afirmar que todos los circuitos de adsorción operan a temperatura ambiente, mientras que la desorción es realizada a temperaturas cercanas al punto de ebullición. (Asalde Horna, 2010).

### **Oxígeno disuelto**

Cuando se emplean disoluciones saturadas en oxígeno, la adsorción de oro en carbón activado aumenta, siendo este efecto más importante para disoluciones de baja fuerza iónica. Ejemplo, para disoluciones saturadas en oxígeno (8 mg/l), se produjo una mayor adsorción de oro en el carbón con relación a disoluciones de bajo contenido de oxígeno disuelto (0,8 mg/l) y en menor grado, para disoluciones de elevada fuerza iónica. (Navarro & Wilkomirsky, 1999)

### **Carbón sucio**

El carbón sucio, o envenenado, debido a la adsorción, precipitación, o el atrape físico de otras especies y constituyentes de mena pueden tener un efecto adverso sobre la eficiencia de adsorción de oro. (Tómala Andrade, 2016)

### **Concentración de cianuro**

La movilidad de los iones parece estar mayormente influenciada por la cantidad de cianuro libre, pues un incremento de este trae como consecuencia un efecto adverso en la capacidad y cantidad de carga. Por otro lado, si el nivel de cianuro libre decae debajo de ciertos límites, entonces el oro no será adsorbido correctamente. (Asalde Horna, 2010)

Además, si la carga se realiza en presencia de una concentración de cianuro demasiado baja, el carbón no se desorberá fácilmente. Investigadores

recomiendan que, para concentrados de oro y plata, varía entre 0.2 - 0.7%. de Cianuro de Sodio (NaCN), a fin de mantener una adecuada selectividad y recuperación de oro sobre el carbón y por ende una satisfactoria operación de re-extracción. (Bolívar Grimaldos, 2017)

### **Determinación de la capacidad de adsorción**

Estas pruebas se desarrollan a partir de una solución de cianuro, para varios grados de carbón activado granular (Misari Chuquipoma, 2010)

### **Procedimiento**

Las pruebas de adsorción fueron llevadas a cabo con una solución conteniendo aproximadamente 100mg Au/l. Esta solución fue preparada disolviendo 0,150 g de aurocianuro de potasio ( $\text{KAu}(\text{CN})_2$ ) en litro de solución estándar buffer a pH 10.

- Moler una muestra (aprox. 10 g) de carbón granular cuyo valor se determinó en 0.075 nm.
- Secar la muestra en un horno a 100 – 110 °C durante 15 a 16 horas.
- Pesar cuatro porciones de carbón seco, tales que las masas estén cerca de 0.05, 0.1, 0.2 y 0.3 g respectivamente.
- Las 4 porciones de carbón seco fueron pesadas. Cada muestra fue colocada en un frasco cónico de 250 ml.
- Se adiciono 100 ml de solución de  $\text{KAu}(\text{CN})_2$  y cada frasco fue tapado .
- Los frascos fueron agitados en un aparato a temperatura ambiente (20 a 22 °C) durante 18 horas.
- Las suspensiones fueron filtradas usando papel filtro Whatman N° 541



- La concentración residual de oro en el filtrado fue determinada en cada caso, así como también fue calculada la masa en mg de Au adsorbido sobre cada muestra de carbón
- Sobre papel del grafico log-log, la isoterma empírica de Freundlich fue ploteada, basada en la ecuación:

$$\frac{X}{M} = K \cdot C^{1/n}$$

$$\log \frac{X}{M} = \log K + \frac{1}{n} \log C$$

Donde:

X= masa de oro adsorbida (mg Au) = (Co – C) V

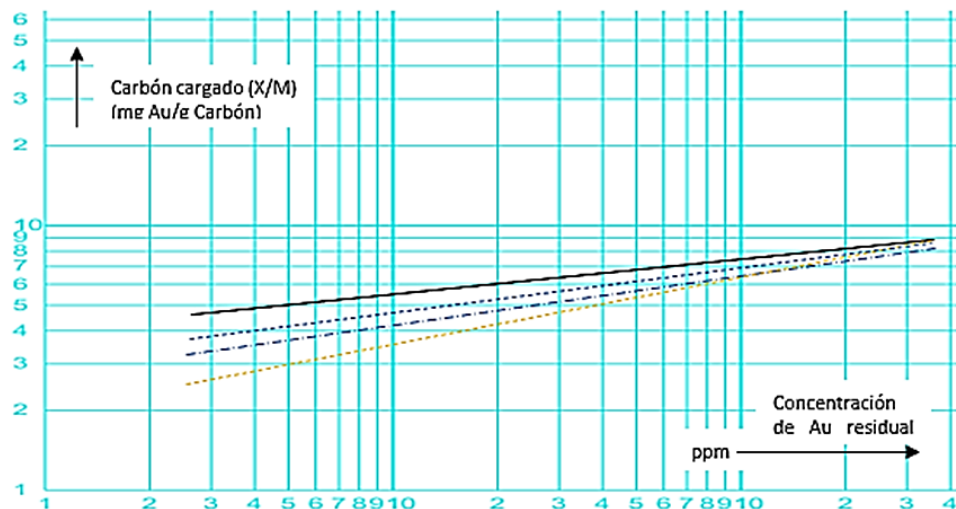
M= Masa de carbón (g)

C= Concentración residual de oro en el filtrado (mg Au/l)

Co= Concentración original de oro en la solución (mg Au/l)

K= constante = carbón cargado (mg Au/g – C) en el equilibrio con 1 mg/l de oro en la solución.

1/n= constante = pendiente de la línea recta obtenida ploteando X/M contra C sobre papel de gráfico log -log.



**Figura 2.** Isoterma de adsorción de oro desde una solución de cianuro sobre carbón activado granular.

### 2.3. Definición de términos básicos

**Adsorción.** La adsorción es la retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido de sustancias disueltas o dispersas en un fluido. Por lo general, cuando un sólido se halla en contacto con una disolución, la sustancia disuelta tiende a concentrarse en la superficie de contacto. Los agentes de adsorción atrapan átomos, iones o moléculas y los llevan a la superficie de un material.

**ADR.** Son las siglas el proceso de adsorción, desorción y reactivación del carbón activado en una planta de proceso de Oro.

**Capacidad de adsorción.** Está definida en base a las isotermas de adsorción en disolución. La isoterma de adsorción es la relación de dependencia, a una temperatura constante, de la cantidad de adsorbato adsorbido por peso unitario de adsorbente, con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio.

**Desorción.** Es la operación inversa a la adsorción. Es la operación unitaria en la cual uno o más componentes del líquido se transfieren al gas. También puede conseguirse aumentando la temperatura.

**Reactivación térmica.** Método que se utiliza para la eliminación de contaminantes orgánicos retenidos por adsorción física química. También remueve algunos compuestos inorgánicos, y destruye óxidos y grupos superficiales.

### 2.4. Formulación de hipótesis

### 2.4.1. Hipótesis general

Con la evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades se determina la eficiencia de adsorción en la Empresa Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020

### 2.4.2. Hipótesis específicas

- Con la caracterización del carbón reactivado térmicamente determinamos las condiciones físicas.
- Con las pruebas de adsorción con carbón reactivado térmicamente determinaremos la extracción de oro.
- La velocidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades nos determina la eficiencia de extracción.

### 2.5. Identificación de variables

#### Variable independiente

- Carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades de corriente

#### Variable dependiente

- Evaluación de la capacidad de absorción del carbón

### 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Ítem	VARIABLES	INDICADORES	INDICES
V.I	Carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades de corriente	Caracterización física-química del carbón reactivado	Tamaño de partícula % de porosidad Dureza
		Pruebas de adsorción con carbón reactivado	Ppm de Au, Ag, Cu
		Velocidad de adsorción	mg (Au, Ag, Cu) /g C-h
V.D	Evaluación de la capacidad de adsorción del carbón	Capacidad de adsorción	% de capacidad de adsorción

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es experimental puro, mediante este diseño se planificó las pruebas experimentales, para evaluar la capacidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades y su efecto en la eficiencia de extracción del metal precioso.

**Experimental**, debido a que se manipula los factores de la variable independiente y teniendo como vector respuesta el porcentaje de extracción de oro, plata y cobre.

#### **3.2. Nivel de investigación**

De acuerdo al nivel de investigación es descriptivo y aplicativo.

**Descriptivo**, esto debido a que se realiza la descripción de los resultados de los ensayos obtenidos del laboratorio químico.

**Aplicativo**, debido a que los resultados que se obtienen serán aplicados a la planta de adsorción de oro de Minera la Arena.

#### **3.3. Métodos de investigación**

Según (Raffino, 2020), el método es el camino más adecuado hacia un fin. Es decir, que un método es un procedimiento que elegimos para obtener un fin predeterminado.

Se utilizó el método científico fundamentado en sus componentes: la selección de un problema de estudio con connotación técnica, en el cual se formulan sus respectivas hipótesis para orientar la investigación, destacando su correspondiente sistema de variables que sirvieron de base para el diseño de los cuestionarios, entrevistas de opinión especializada, con la información obtenida se realizó el procesamiento de datos de la hipótesis formulada, a fin de plantear las conclusiones con sus respectivas recomendaciones en torno a la problemática en estudio.

### 3.4. Diseño de investigación

Según (Supo, 2014) Un diseño de investigación es una estrategia muy particular desarrollada para alcanzar un objetivo específico.

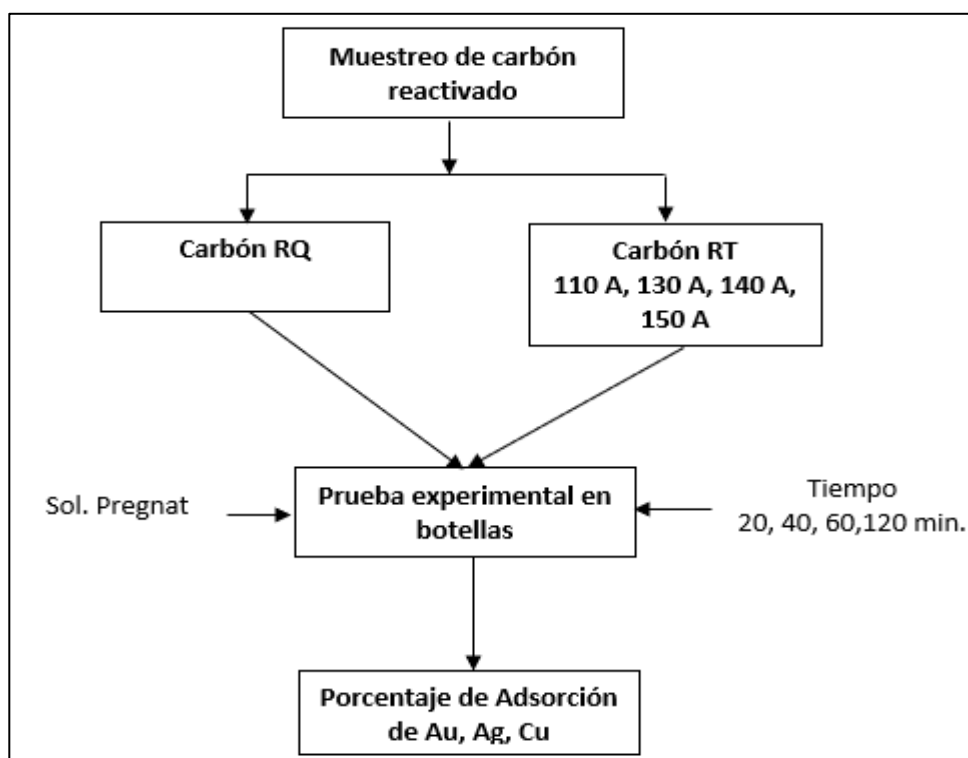


Figura 3. Esquema de las pruebas experimentales

Se procedió a tomar las muestras del carbón activado, el cual se identificó de acuerdo a la condición de activación térmica del horno de RT (RQ, RT -110A, RT -130A, RT -140A y RT -150A).

Estas 05 muestras tomadas, se procedió a someterlo a una agitación en botellas conteniendo solución pregnant (muestra de cabeza), la agitación total que se le dio a la prueba fue de 120 min, tomando una muestra de solución (barren) a los 20 min., 40 min., 60 min., 90 min. y 120 min.; estas muestras se analizaron por oro, plata y cobre.

Con los resultados obtenidos de las muestras que se tomaron a distintos tiempos de agitación, se construye la curva de adsorción para los distintos tipos de carbón activado (se diferencian porque fueron reactivados térmicamente a diferentes intensidades de corriente).

### **3.5. Población y muestra**

#### **Población**

La población está constituida por todos los sacos de carbón reactivado a diferentes intensidades de energía que se encuentra en la planta ADR de minera la Arena.

#### **Muestra**

La muestra está constituida por la cantidad de carbón extraído de los sacos de carbón reactivado térmicamente para cada prueba, y de igual manera para cada uno de las reactivaciones a diferentes intensidades de energía.

$$d = 0,48 \text{ mm}$$

$$\rho_{\text{carbón}} = 0,44 \text{ g/cc}$$

$$\text{Dureza} = 98 \text{ número de abrasión}$$

$$W = 0,44 \times 98 \times (0,48)^2 = 9,93 \text{ g}$$

**W** Peso de muestra = **10 g por cada prueba**

Para toda la prueba se utilizo 360 gr de carbón

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **Técnica de recolección de datos**

**La observación.** Mediante esta técnica se realizó la observación del ensaye químico de la adsorción de metales precios por el carbón reactivado térmicamente en la planta ADR de la empresa la Arena.

**La entrevista.** Se realizó a los ingenieros que laboran en la planta ADR de la Minera y en el laboratorio metalúrgico, referente a la adsorción del carbón activado a diferentes intensidades de corriente.

**Fuentes primarias.** Se obtuvo de los reportes de los ensayes del laboratorio químico referente a las pruebas metalúrgicas.

#### **Instrumentos de recolección de datos**

Entre los instrumentos de recolección de datos que se utilizaron fueron los siguientes:

**Equipo de cómputo;** se utilizó para el tratamiento estadístico como también en la elaboración del presente trabajo de investigación.

**Tabla de datos (Excel),** estas tablas se elaboraron para recolectar datos de laboratorio químico y con ello realizar cálculos como el balance metalúrgico.

**Ensaye de reporte - químico,** donde se reportan los análisis de los elementos de los puntos muestreados.

**Balanza.** Este equipo nos permitió determinar el peso de la muestra de carbón reactivado.

**Espectrofotómetro de absorción atómica.** Este equipo nos dio los ensayes tanta de la ley de cabeza de la solución pregmat y barren.

### **3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación**

Las tablas para la toma de datos y operación se validaron mediante el juicio técnico de los ingenieros que laboran en la planta adsorción, desorción de carbón activado ADR de la Empresa Minera la Arena S.A., teniendo en cuenta la experiencia de cada uno de ellos.

### **3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizó el Microsoft Excel, en la realización de los cálculos metalúrgicos y gráficos.

### **3.9. Tratamiento estadístico**

El tratamiento estadístico se realiza en el Minitab 18 en ello se realiza la prueba de hipótesis de los ensayos de recuperación de oro, plata y cobre, para afirmar o rechazar la hipótesis planteada en el estudio realizado.

### **3.10. Orientación ética filosófica y epistémica**

Esta investigación está orientado al grupo de interés de la empresa mejorando los beneficios económicos y la óptima recuperación de los metales preciosos en la planta ADR.

Los datos obtenidos en el estudio se realizaron teniendo en cuenta los valores éticos del investigador en la que se da fe de los ensayos obtenidos.



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Descripción del trabajo de campo

Antes de empezar con el muestreo, se efectuó el reconocimiento e identificación de las condiciones (granulometría, humedad, cantidad, etc) del carbón activado. De esta forma se concluyó en adoptar un procedimiento de muestreo sistemático que consistió en tomar una muestra de aproximadamente 2 Kg de todos los big bag (56) que contenían el carbón activado en desuso (carbón grueso) y de 0,7 Kg de todos los sacos (179) que contenían carbón activado fino (que se recupera en los DSM).



Foto 2. Muestreo de carbón activado

## Caracterización física químico del carbón activado

La Caracterización consistió en la determinación de las propiedades física químicas del carbón activado que se utiliza en la planta de ADR de la Empresa Minera la Arena. Los resultados se presentan en la siguiente tabla 1.

*Tabla 1 Parámetros del carbón activado Tipo GRC-22*

Distribución de tamaño de partícula (ASTM malla mm)	6 x 12 (3.35 x 1.7 mm)
Densidad aparente (g/cc)	0,44
Humedad (% peso)	4
Cenizas (% peso)	2
pH	9 -10
Dureza (Numero de abrasión) min	98
Área de superficie (m <sup>2</sup> /g)	1050
Porosidad (%)	85
Diámetro de partícula (mm)	1180 - 3350

Fuente: Fabricante

En la tabla 1 observamos, el número de abrasión del carbón activado en 98 que es un valor mínimo, además tiene una porosidad de 85 %, para un área de superficie de 1050 m<sup>2</sup>/g, la densidad aparente se determinó en 0,44 g/cc. Todos estos parámetros son importantes durante la reactivación del carbón en la planta ADR. Además, para evitar que se genere partículas finas que produciría las pérdidas del carbón.

## 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

### 4.2.1. Pruebas de adsorción con reactivación química (RQ)

Las pruebas en botellas se realizaron adicionando la solución pregmat en la botella que contiene el carbón reactivado térmicamente. A continuación, en la tabla tenemos el análisis químico de la solución rica.

Tabla 2 Ensaye de solución

SOLUCION			
PREGNANT		BARREN	
[Au] ppm	0,97	[Au] ppm	0,07
[Ag] ppm	0,14	[Ag] ppm	0,04
[Cu] ppm	7,13	[Cu] ppm	6,47

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta en tabla 3 de las pruebas realizadas en el laboratorio metalúrgico de la empresa Minera la Arena.

Tabla 3 Balances metalúrgicos de adsorción

TIEMPO		CARBÓN (gr)	SOLUCIÓN (gr)	Elementos de Solución						Adsorción (%)		
min	Hr			Au (ppm)		Ag (ppm)		Cu (ppm)		Au	Ag	Cu
				PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN			
0	0.0	10	1000	0,97	0,97	0,14	0,14	7,10	7,13	0,00	0,00	0,00
20	0.3	10	990	0,97	0,51	0,14	0,10	7,10	6,80	47,70	30,10	4,70
40	0.7	10	980	0,97	0,33	0,14	0,07	7,10	6,71	66,10	60,00	6,00
60	1.0	10	970	0,97	0,21	0,14	0,07	7,10	6,54	78,10	46,80	8,30
90	1.5	10	960	0,97	0,12	0,14	0,04	7,10	6,56	87,80	70,60	8,00
120	2.0	10	950	0,97	0,07	0,14	0,04	7,10	6,47	92,50	72,10	9,30

En la tabla 3 observamos que a medida que se incrementa el tiempo de adsorción hasta 2 horas, el carbón reactivado químicamente con HCl, también incrementa el porcentaje de adsorción en 92,50 % de Au, 72,10 % de Ag y 9,30 % de Cu.

Tabla 4 Contenido de metales adsorbidos en carbón

TIEMPO		CARBÓN (g)	SOLUCIÓN (kg)	METALES SOLUCIÓN (Au +Ag+Cu) mg/l		METALES EN CARBÓN	
min	h			PREGNAT	BARREN	(Au +Ag+Cu) gr/TM	(Au +Ag+Cu) Oz/TM
0	0,0	10	1,00	8,2	8,2	0	0,0
20	0,3	10	0,99	8,2	7,4	84	2,7
40	0,7	10	0,98	8,2	7,1	113	3,6
60	1,0	10	0,97	8,2	6,8	142	4,6
90	1,5	10	0,96	8,2	6,7	152	4,9
120	2,0	10	0,95	8,2	6,6	166	5,3

Fuente: elaboración propia

En la tabla 4 observamos el contenido de metales preciosos adsorbidos en el carbón activado químicamente (RQ) es 166 g/TM, para un tiempo de 2 horas de agitación en pruebas de botella.

#### 4.2.2. Prueba de adsorción con Carbón RT – 110 A

Tabla 5 Ensaye de solución

SOLUCION			
PREGNANT		BARREN	
[Au] ppm	0,97	[Au] ppm	0,07
[Ag] ppm	0,14	[Ag] ppm	0,04
[Cu] ppm	7,13	[Cu] ppm	6,43

Fuente: elaboración propia

Las pruebas en esta sección se trabajan con carbón reactivado térmicamente a 110 A.

Tabla 6 Cálculos metalúrgicos de adsorción

Tiempo		CARBÓN (gr)	SOLUCIÓN (gr)	Elementos en solución						Adsorción (%)		
				Au (ppm)		Ag (ppm)		Cu (ppm)		Au	Ag	Cu
min	hr			PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN			
0	0.0	10	1000	0,97	0,97	0,14	0,14	7,10	7,13	0,00	0,00	0,00
20	0.3	10	990	0,97	0,51	0,14	0,09	7,10	6,73	47,90	30,90	5,60
40	0.7	10	980	0,97	0,33	0,14	0,09	7,10	6,70	66,60	37,50	6,10
60	1.0	10	970	0,97	0,21	0,14	0,06	7,10	6,62	78,70	52,90	7,20
90	1.5	10	960	0,97	0,12	0,14	0,04	7,10	6,52	87,80	68,40	8,60
120	2.0	10	950	0,97	0,07	0,14	0,04	7,10	6,43	92,90	72,10	9,90

Fuente: elaboración propia

En la tabla 6 de igual manera observamos que, a medida que incrementa el tiempo de adsorción hasta 2 horas, el carbón reactivado térmicamente (RT), 110 A, alcanza una capacidad de adsorción de 92,90 % de Au, 72,10 % de Ag y 9,90 % de Cu.

Tabla 7 Contenido de metales adsorbidos en carbón

Tiempo		CARBÓN (gr)	SOLUCIÓN (kg)	(Au +Ag+Cu) mg/l		METALES EN CARBÓN	
min	hr			PREGNAT	BARREN	(Au +Ag+Cu) gr/TM	(Au +Ag+Cu) Oz/TM
0	0.0	10	1,00	8,21	8,24	0	0.0
20	0.3	10	0,99	8,21	7,33	91	2,9
40	0.7	10	0,98	8,21	7,12	114	3,6
60	1.0	10	0,97	8,21	6,89	136	4,4
90	1.5	10	0,96	8,21	6,68	157	5,4
120	2.0	10	0,95	8,21	6,54	170	5,5

Fuente: elaboración propia

En la tabla 7 observamos, el contenido de metales preciosos adsorbidos en el carbón reactivado térmicamente (RT) a 110 A es 170 g/TM, para un tiempo de 2 horas de agitación en botella.

### 4.2.3. Prueba de adsorción con Carbón RT – 130 A

Tabla 8 Ensaye de solución

SOLUCION			
PREGNANT		BARREN	
[Au] ppm	0,97	[Au] ppm	0,07
[Ag] ppm	0,14	[Ag] ppm	0,04
[Cu] ppm	7,13	[Cu] ppm	6,47

Fuente: elaboración propia

Las pruebas en esta sección se trabajan con carbón reactivado térmicamente a 130 A

Tabla 9 Cálculos metalúrgicos de adsorción

Tiempo		CARBÓN (gr)	SOLUCIÓN (gr)	Elementos en solución						Adsorción (%)		
min	Hr			Au (ppm)		Ag (ppm)		Cu (ppm)		Au	Ag	Cu
				PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN			
0	0.0	10	1000	0,97	0,97	0,14	0,14	7,10	7,13	0,00	0,00	0,00
20	0.3	10	990	0,97	0,46	0,14	0,10	7,10	6,67	52,30	26,50	6,50
40	0.7	10	980	0,97	0,26	0,14	0,07	7,10	6,66	72,90	52,20	6,70
60	1.0	10	970	0,97	0,15	0,14	0,05	7,10	6,54	84,80	64,70	8,30
90	1.5	10	960	0,97	0,08	0,14	0,04	7,10	6,42	92,00	72,80	10,10
120	2.0	10	950	0,97	0,05	0,14	0,03	7,10	6,35	94,90	75,00	11,00

Fuente: elaboración propia

En la tabla 9 de igual manera observamos que a medida que se incrementa el tiempo de adsorción hasta 2 horas, el carbón reactivado térmicamente (RT) a 130 A, alcanza una capacidad de adsorción de 92,90 % de Au, 72,10 % de Ag y 9,90 % de Cu.

Tabla 10 Contenido de metales adsorbidos en carbón

Tiempo		CARBÓN (gr)	SOLUCIÓN (kg)	(Au +Ag+Cu) mg/l		METALES EN CARBÓN	
min	hr			PREGNAT	BARREN	(Au +Ag+Cu) gr/TM	(Au +Ag+Cu) Oz/TM
0	0.0	10	1,00	8,21	8,24	0	0,0
20	0.3	10	0,99	8,21	7,23	100	3,2
40	0.7	10	0,98	8,21	6,99	125	4,0
60	1.0	10	0,97	8,21	6,74	151	4,8
90	1.5	10	0,96	8,21	6,54	171	5,5
120	2.0	10	0,95	8,21	6,43	181	5,8

Nota. Datos tomados del laboratorio químico (2020)

En la tabla 10 observamos, el contenido de metales preciosos adsorbidos en el carbón reactivado térmicamente (RT) a 130 A es 181 g/TM, para un tiempo de 2 horas de agitación en botella.

#### 4.2.4. Prueba de adsorción con Carbón RT – 140 A

Tabla 11 Ensayo de solución

SOLUCION			
PREGNANT		BARREN	
[Au] ppm	0,97	[Au] ppm	0,07
[Ag] ppm	0,14	[Ag] ppm	0,04
[Cu] ppm	7,13	[Cu] ppm	6,47

Nota. Datos tomados del laboratorio químico (2020)

Las pruebas se trabajan con carbón reactivado térmicamente a 140 A.

Tabla 12 Cálculos metalúrgicos de adsorción

Tiempo		CARBÓN (gr)	SOLUCIÓN (gr)	Elementos en solución						Adsorción (%)		
min	Hr			Au (ppm)		Ag (ppm)		Cu (ppm)		Au	Ag	Cu
				PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN			
0	0.0	10	1000	0,97	0,97	0,14	0,14	7,10	7,13	0,00	0,00	0,00
20	0.3	10	990	0,97	0,39	0,14	0,07	7,10	6,62	60,20	51,50	7,20
40	0.7	10	980	0,97	0,19	0,14	0,04	7,10	6,38	80,80	68,40	1,50
60	1.0	10	970	0,97	0,09	0,14	0,03	7,10	6,20	91,20	80,10	13,10
90	1.5	10	960	0,97	0,03	0,14	0,02	7,10	5,94	96,50	87,50	16,70
120	2.0	10	950	0,97	0,03	0,14	0,02	7,10	5,64	97,20	88,20	21,00

Nota. Datos tomados del laboratorio químico (2020)

En la tabla 12 de igual manera observamos, que a medida que se incrementa el tiempo de adsorción hasta 2 horas, el carbón reactivado térmicamente (RT) a 140 A, alcanza porcentaje de adsorción 97,20 % de Au, 88,20 % de Ag y 21,00 % de Cu.

Tabla 13 Contenido de metales adsorbidos en carbón

Tiempo		CARBÓN (gr)	SOLUCIÓN (kg)	(Au +Ag+Cu) mg/l		METALES EN CARBÓN	
min	hr			PREGNAT	BARREN	(Au +Ag+Cu) gr/TM	(Au +Ag+Cu) Oz/TM
0	0.0	10	1,00	8,21	8,24	0	0,0
20	0.3	10	0,99	8,21	7,08	117	3,8
40	0.7	10	0,98	8,21	6,61	163	5,2
60	1.0	10	0,97	8,21	6,32	193	6,2
90	1.5	10	0,96	8,21	5,99	225	7,2
120	2.0	10	0,95	8,21	5,69	256	8,2

Nota. Datos tomados del laboratorio químico (2020)

En la tabla 13 observamos, el contenido de metales preciosos adsorbidos en el carbón reactivado térmicamente (RT) a 140 A es 256 g/TM, para un tiempo de 2 horas de agitación en botella.

#### 4.2.5. Prueba de adsorción con Carbón RT – 150 A

Tabla 14 Ensayo de solución

SOLUCION			
PREGNANT		BARREN	
[Au] ppm	0,97	[Au] ppm	0,07
[Ag] ppm	0,14	[Ag] ppm	0,04
[Cu] ppm	7,13	[Cu] ppm	6,47

Nota. Datos tomados del laboratorio químico (2020)

Tabla 15 Cálculos metalúrgicos de adsorción

Tiempo		CARBÓN (g)	SOLUCIÓN (kg)	Elementos en solución						Adsorción (%)		
min	h			Au (ppm)		Ag (ppm)		Cu (ppm)		Au	Ag	Cu
		PREGNAT	BARREN	PREGNAT	BARREN	PREGNAT	Barren					
0	0.0	10	1000	0,97	0,97	0,14	0,14	7,10	7,13	0,00	0,00	0,00
20	0.3	10	990	0,97	0,36	0,14	0,04	7,10	6,54	63,00	70,80	8,30
40	0.7	10	980	0,97	0,17	0,14	0,03	7,10	6,32	82,80	78,60	11,40
60	1.0	10	970	0,97	0,07	0,14	0,02	7,10	6,10	92,40	88,50	14,50
90	1.5	10	960	0,97	0,02	0,14	0,01	7,10	5,71	97,70	93,10	19,90
120	2.0	10	950	0,97	0,01	0,14	0,01	7,10	5,45	98,70	95,60	23,50

Nota. Datos tomados del laboratorio químico (2020)



En la tabla 15 de igual manera observamos, que a medida que se incrementa el tiempo de adsorción hasta 2 horas, el carbón reactivado térmicamente (RT) a 150 A, alcanza porcentaje de adsorción 98,70 % de Au, 95,60 % de Ag y 23,50 % de Cu.

*Tabla 16 Contenido de metales adsorbidos en carbón*

Tiempo		CARBÓN (g)	SOLUCIÓN (kg)	(Au +Ag+Cu) mg/l		METALES EN CARBÓN	
min	h			PREGNAT	BARREN	(Au +Ag+Cu) gr/TM	(Au +Ag+Cu) Oz/TM
0	0.0	10	1,00	8,21	8,24	0	0,0
20	0.3	10	0,99	8,21	6,94	130	4,2
40	0.7	10	0,98	8,21	6,52	173	5,5
60	1.0	10	0,97	8,21	6,19	205	6,6
90	1.5	10	0,96	8,21	5,74	250	8,0
120	2.0	10	0,95	8,21	5.47	277	8,9

*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico (2020)

En la tabla 16 observamos el contenido de metales preciosos adsorbidos en el carbón reactivado térmicamente (RT) a 150 A es 277 g/TM, para un tiempo de 2 horas de agitación en botella.

#### 4.2.6. Velocidades de adsorción del carbón reactivado

##### A. Velocidad de adsorción de carbón con reactivación química RQ

Seguidamente se realizó los respectivos cálculos de la velocidad de adsorción con los datos requeridos.

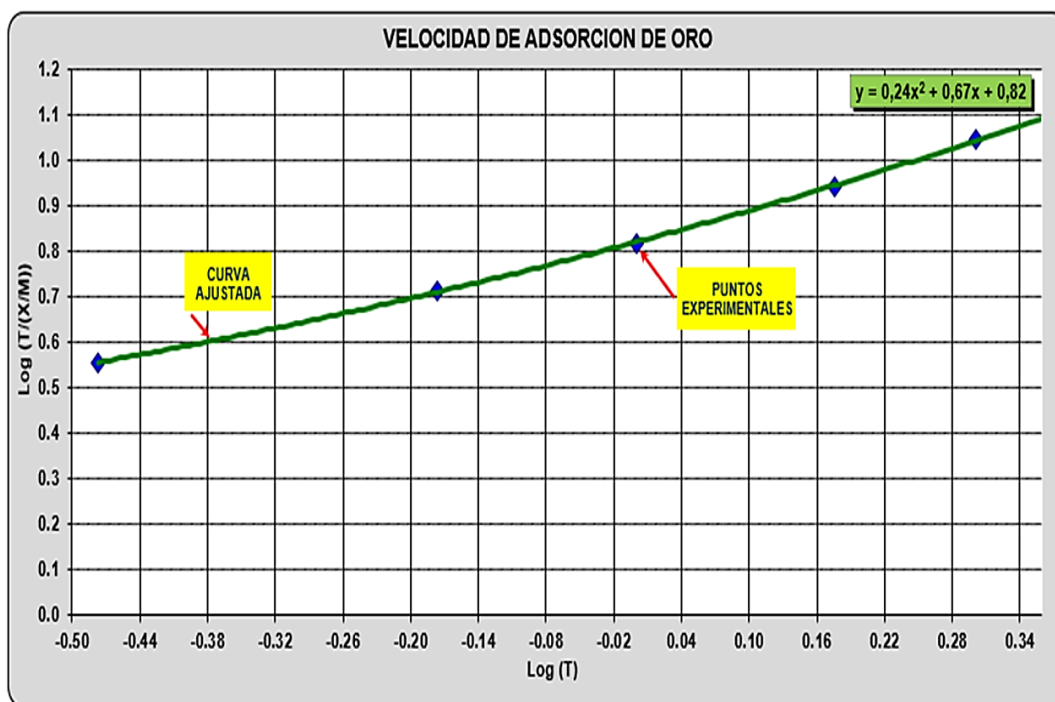
*Tabla 17 Velocidad de adsorción del Oro*

M =Masa de carbón (g)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (h)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Au Barren	0,97	0,51	0,33	0,21	0,12	10,70
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	0,46	0,64	0,76	0,85	0,90
X/M (mg Au/gr C*)	0,00	0,09	0,13	0,15	0,17	0,18
T / (X/M)	0,00	3,60	5,20	6,60	8,80	11,15
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	0,56	0,72	0,82	0,94	1,05
Porcentaje de Au Adsorbido	0,00	47,70	66,10	78,10	87,80	92,50
1 / n = pendiente	<b>0,63</b>					
R = Velocidad de adsorción	<b>0,15</b>	<b>mg Au/gr Carbón-h</b>				

*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

**Figura 4**

*Velocidad de adsorción del oro*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

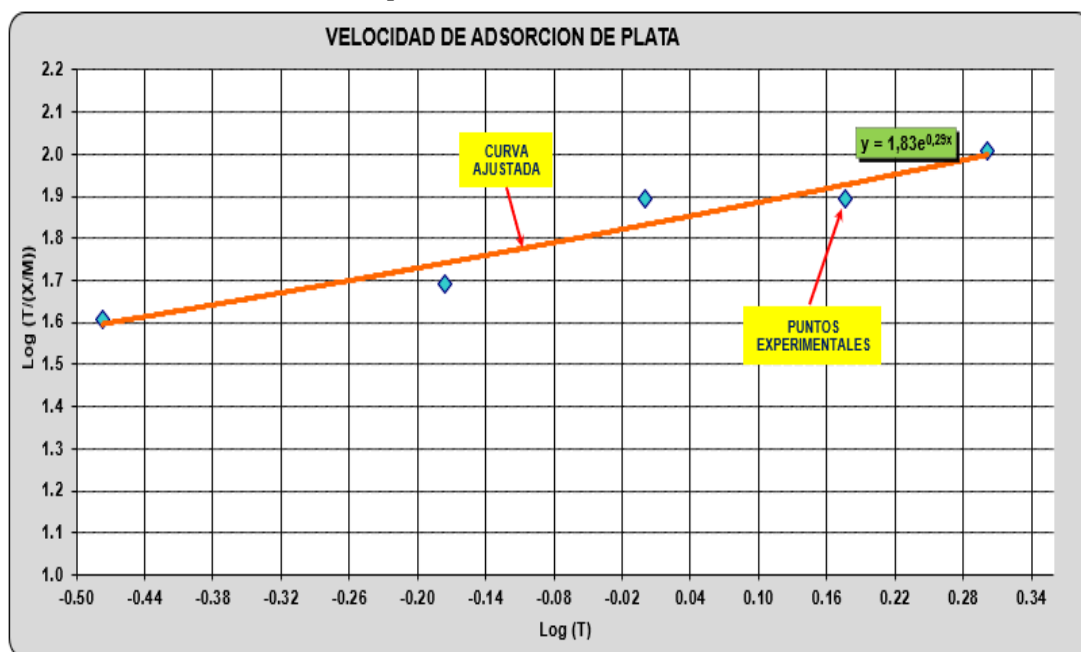
En la tabla 17 se determinó la velocidad de adsorción en 0,15 mg Au/g Carbón -h y esto lo podemos visualizar en la figura 4.

*Tabla 18 Velocidad de adsorción de la plata*

<b>M =Masa de carbón (gr)</b>	5	5	5	5	5	5
<b>T = Tiempo (hr)</b>	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
<b>C = Concentración Ag Barren</b>	0,00	0,10	0,07	0,07	0,04	0,04
<b>X = Au Adsorbido Carbón (mg)</b>	0,00	0,04	0,07	0,06	0,10	0,10
<b>X/M (mg Ag/gr C*)</b>	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
<b>T / (X/M)</b>	0,00	40,70	49,00	78,60	78,10	102,00
<b>Log T</b>	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
<b>Log T/(X/M)</b>	0,00	1,61	1,69	1,90	1,89	2,01
<b>Porcentaje de Ag Adsorbido</b>	0,00	30,10	50,00	46,80	70,60	72,10
<b>1 / n = pendiente</b>	<b>0,51</b>					
<b>R = Velocidad de adsorción</b>	<b>0,016</b>	<b>mg Ag/gr Carbón-hr</b>				

*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

**Figura 5**  
Velocidad de adsorción de la plata



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 18 determinamos que la velocidad de adsorción para la plata es 0,016 mg Au/g Carbón -h y esto lo podemos visualizar en la figura 5. Además, podemos observar a medida que se incrementa el tiempo de adsorción la plata adsorbida se incrementa hasta alcanzar 2,0 mg Ag/g carbón-h

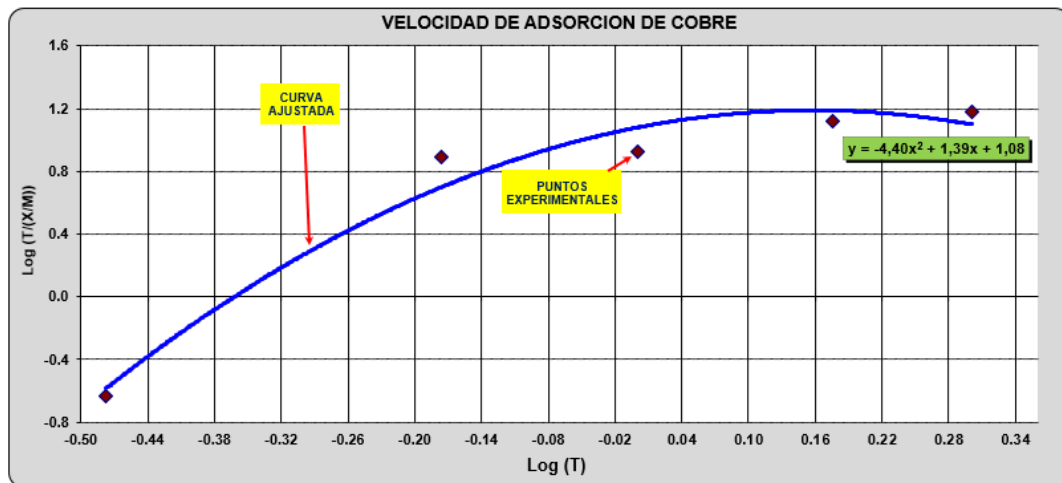
Tabla 19 Velocidad de adsorción del cobre

M =Masa de carbón (gr)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (hr)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Cu Barren	0,00	6,80	6,71	6,54	6,56	6,47
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	7,13	0,43	0,60	0,57	0,66
X/M (mg Cu/gr C*)	0,00	1,43	0,09	0,12	0,11	0,13
T / (X/M)	0,00	0,23	7,84	8,40	13,11	15,06
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	-0,63	0,89	0,92	1,12	1,18
Porcentaje de Cu Adsorbido	0,00	4,70	6,00	8,30	8,00	9,30
1 / n = pendiente	2,33					
R = Velocidad de adsorción	0,10	mg Cu/gr Carbón-hr				

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo

de la velocidad de adsorción.

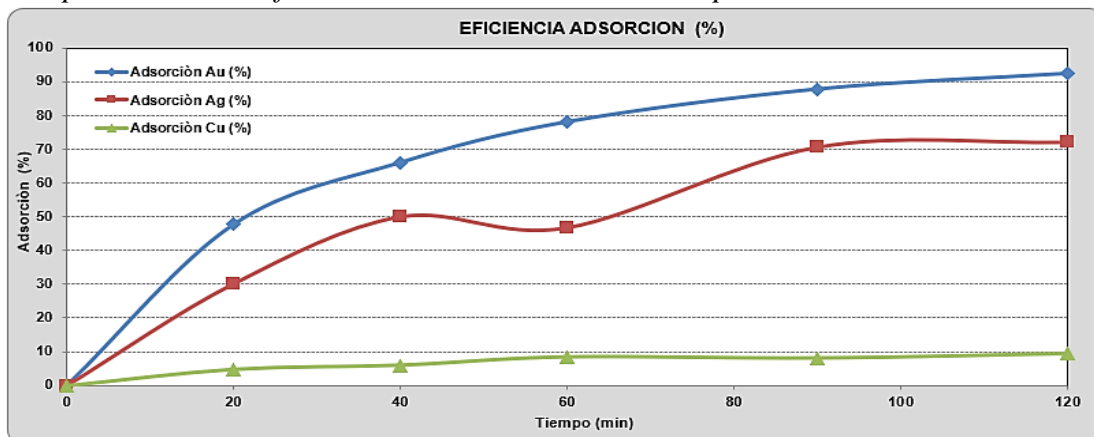
**Figura 6**  
*Velocidad de adsorción del cobre*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 19 determinamos que la velocidad de adsorción para la plata es 0,016 mg Au/g Carbón -h y esto lo podemos visualizar en la figura 6. Además, podemos observar que a medida que se incrementa el tiempo, la adsorción del cobre alcanza cerca de 1,2 mg Cu/g carbón-h

**Figura 7**  
*Comparación de la Eficiencia de adsorción de metales preciosos*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la figura 7, observamos que la adsorción del oro a medida que incremental el tiempo hasta 120 min, la eficiencia de adsorción por el carbón reactivado químicamente es 91 % en forma sostenida. En cuanto a la plata, la

eficiencia de adsorción es pareja hasta 50 % luego sufre una ligera caída para posteriormente llegar sobre 70 %. La adsorción del cobre alcanza hasta 10 %.

**B. Velocidad de adsorción de carbón reactivado térmicamente RT -110 A**

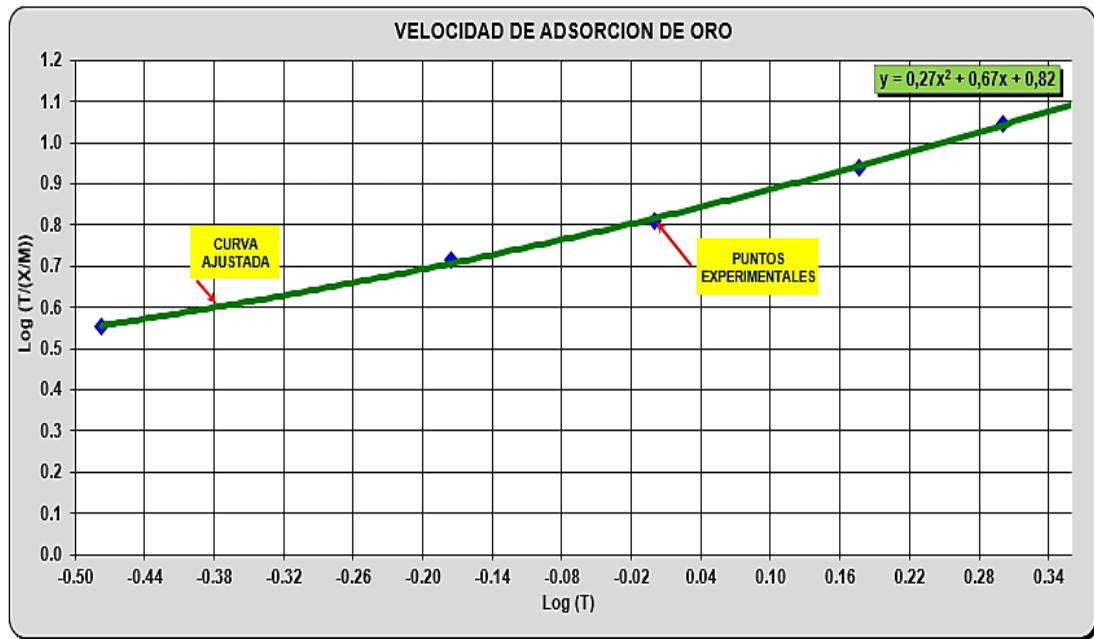
*Tabla 20 Velocidad de adsorción del oro*

<b>M =Masa de carbón (gr)</b>	5	5	5	5	5	5
<b>T = Tiempo (hr)</b>	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
<b>C = Concentración Au Barren</b>	0,97	0,51	0,32	0,20	0,11	0,07
<b>X = Au Adsorbido Carbón (mg)</b>	0,00	0,47	0,65	0,77	0,86	0,90
<b>X/M (mg Au/gr C*)</b>	0,00	0,09	0,13	0,15	0,17	0,18
<b>T / (X/M)</b>	0,00	3,58	5,16	6,47	8,71	11,10
<b>Log T</b>	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
<b>Log T/(X/M)</b>	0,00	0,55	0,71	0,81	0,94	1,05
<b>Porcentaje de Au Adsorbido</b>	0,00	47,90	66,60	79,70	88,80	92,90
<b>1 / n = pendiente</b>	<b>0,63</b>					
<b>R = Velocidad de adsorción</b>	<b>0,15</b>	<b>mg Au/gr Carbón-hr</b>				

*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

**Figura 8**

*Velocidad de adsorción del oro*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 20 se determinó, la velocidad de adsorción es 0,15 mg Au/g Carbón -h y esto lo podemos visualizar gráficamente en la figura 8.

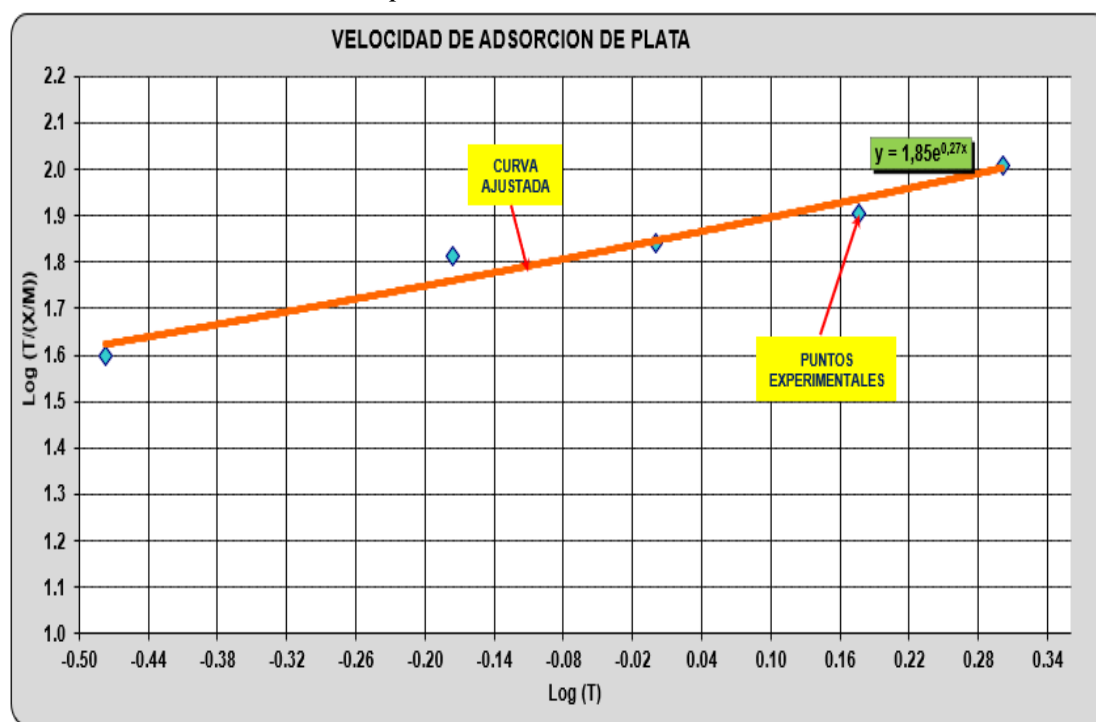
Tabla 21 Velocidad de adsorción de la plata

M =Masa de carbón (gr)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (hr)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Ag Barren	0,00	0,09	0,09	0,06	0,04	0,04
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	0,04	0,05	0,07	0,09	0,10
X/M (mg Ag/gr C*)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
T / (X/M)	0,00	39,70	65,40	69,40	80,60	102,00
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	1,60	1,82	1,84	1,91	2,01
Porcentaje de Ag Adsorbido	0,00	30,90	37,50	52,90	68,40	72,10
1 / n = pendiente	<b>0,53</b>					
R = Velocidad de adsorción	<b>0,012</b>	<b>mg Ag/gr Carbón-hr</b>				

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

Figura 9

Velocidad de adsorción de la plata



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 21 se determinó la velocidad de adsorción es 0,012 mg Ag/g Carbón -h y esto lo podemos visualizar gráficamente en la figura 9.

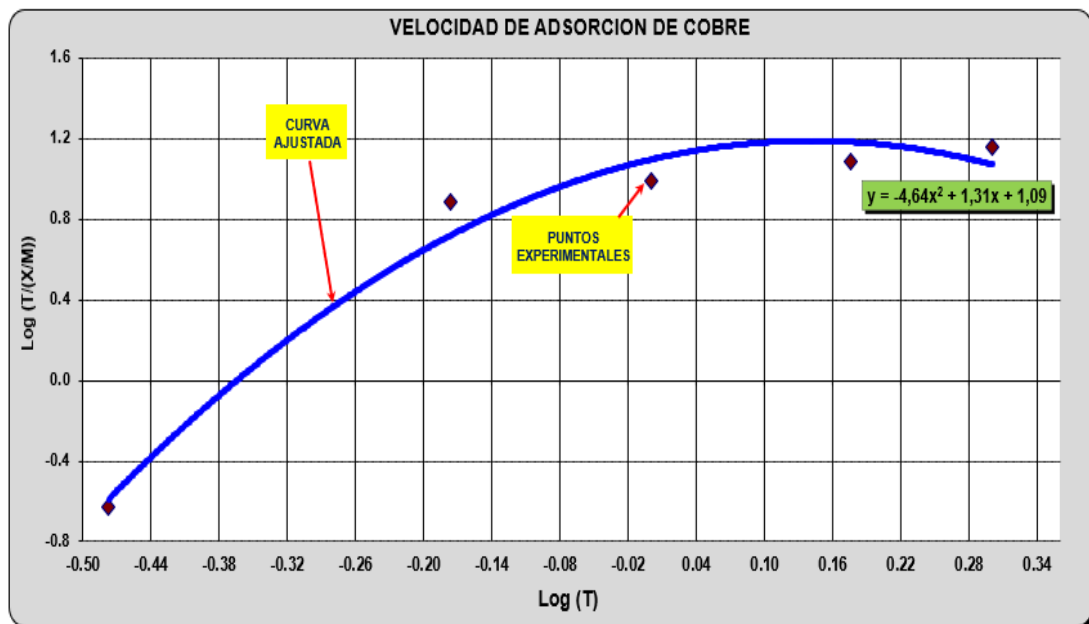
Tabla 22 Velocidad de adsorción del cobre

M = Masa de carbón (gr)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (hr)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Cu Barren	0,00	6,73	6,70	6,62	6,52	6,43
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	7,13	0,44	0,52	0,62	0,70
X/M (mg Cu/gr C*)	0,00	1,43	0,09	0,10	0,12	0,14
T / (X/M)	0,00	0,23	7,61	9,71	12,20	14,22
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	-0,63	0,88	0,99	1,09	1,15
Porcentaje de Cu Adsorbido	0,00	5,60	6,10	7,20	8,60	9,90
1 / n = pendiente	2,29					
R = Velocidad de adsorción	0,10	mg Cu/gr Carbón-hr				

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

Figura 10

Velocidad de adsorción del cobre

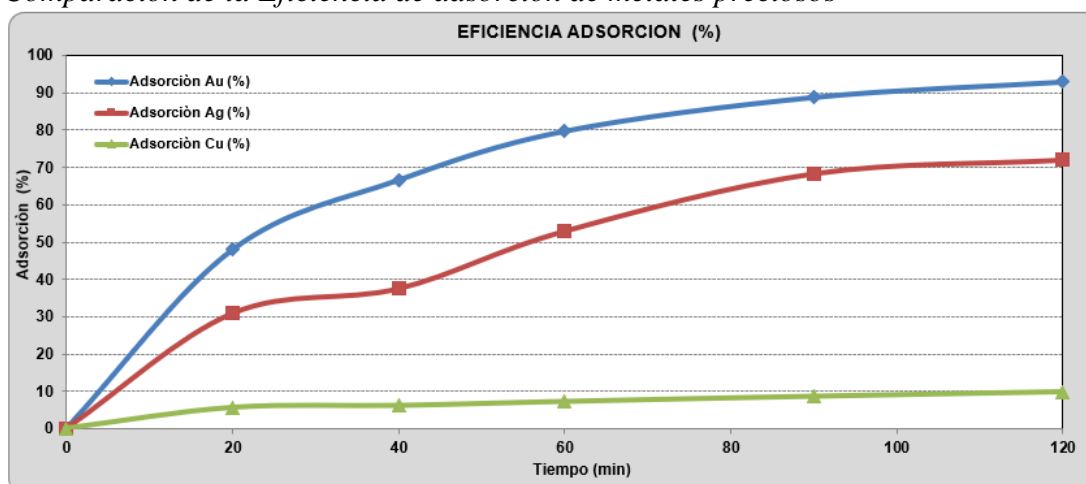


Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 22 determinamos que la velocidad de adsorción de cobre es 0.10 mg Au/g Carbón -h y esto lo podemos visualizar en la figura 10. Además, podemos observar que a medida que incrementa el tiempo, la adsorción del cobre alcanza cerca de 1,2 mg Cu/g carbón-h.

**Figura 11**

*Comparación de la Eficiencia de adsorción de metales preciosos*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la figura 11, observamos que la adsorción del oro a medida que se incremental el tiempo hasta 120 min, la eficiencia de adsorción por el carbón reactivado químicamente es 91 % en forma sostenida. En cuanto a la plata, la eficiencia de adsorción es pareja hasta 50 % luego sufre una ligera caída para posteriormente llegar sobre 70 %. La adsorción del cobre alcanza hasta 10 %.

### C. Velocidad de adsorción de carbón reactivado térmicamente RT -130 A

*Tabla 23 Velocidad de adsorción del oro*

<b>M =Masa de carbón (gr)</b>	5	5	5	5	5	5
<b>T = Tiempo (hr)</b>	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
<b>C = Concentración Au Barren</b>	0,97	0,46	0,26	0,15	0,08	0,05
<b>X = Au Adsorbido Carbón (mg)</b>	0,00	0,51	0,71	0,82	0,89	0,92
<b>X/M (mg Au/gr C*)</b>	0,00	0,10	0,14	0,16	0,18	0,18
<b>T / (X/M)</b>	0,00	3,29	4,71	6,08	8,41	10,86
<b>Log T</b>	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
<b>Log T/(X/M)</b>	0,00	0,52	0,67	0,78	0,92	1,04
<b>Porcentaje de Au Adsorbido</b>	0,00	52,30	72,90	84,80	92,00	94,90
<b>1 / n = pendiente</b>	<b>0,67</b>					
<b>R = Velocidad de adsorción</b>	<b>0,16</b>	<b>mg Au/gr Carbón-hr</b>				

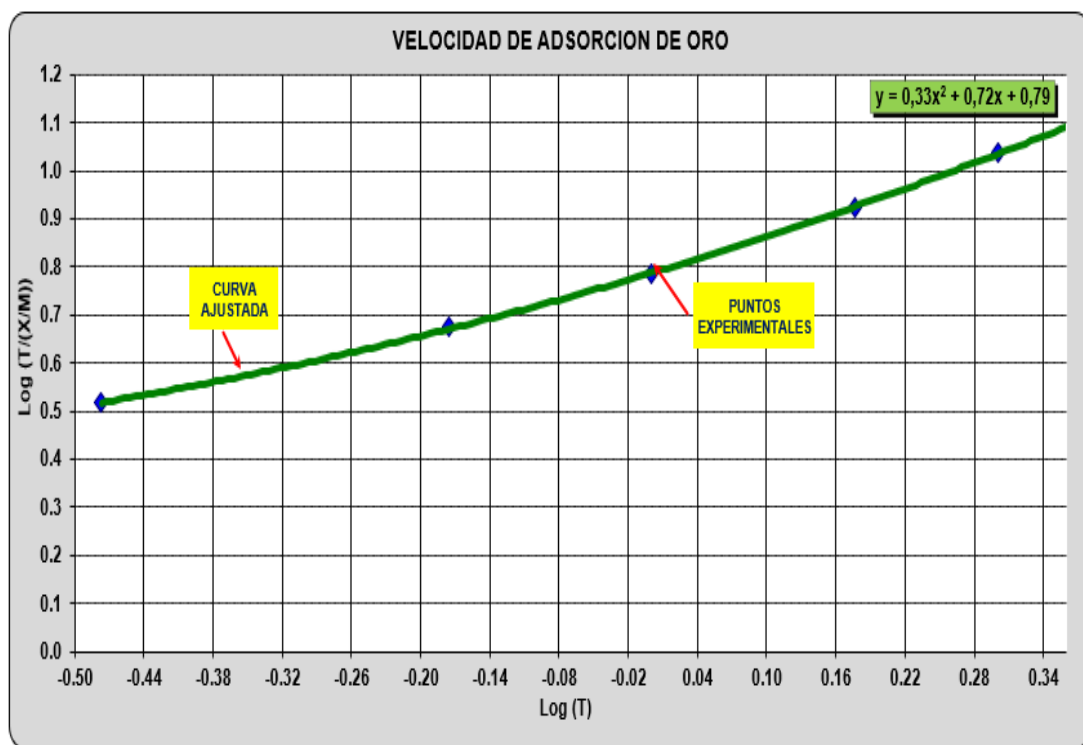
*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo

de la velocidad de adsorción.



**Figura 12**

*Velocidad de adsorción del oro*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 23, se determinó la velocidad de adsorción es 0,16 mg Au/g Carbón -h y esto lo podemos visualizar gráficamente en la figura 12.

*Tabla 24 Velocidad de adsorción de la plata*

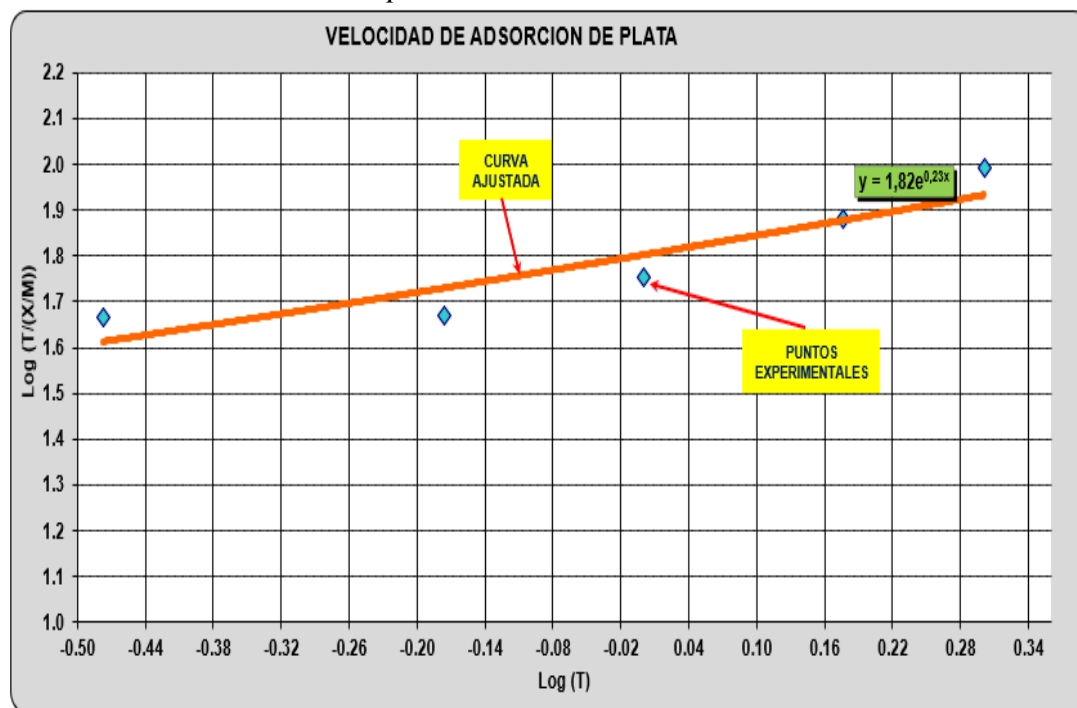
<b>M =Masa de carbón (gr)</b>	5	5	5	5	5	5
<b>T = Tiempo (hr)</b>	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
<b>C = Concentración Ag Barren</b>	0,00	0,10	0,07	0,05	0,04	0,03
<b>X = Au Adsorbido Carbón (mg)</b>	0,00	0,04	0,07	0,09	0,10	0,10
<b>X/M (mg Ag/gr C*)</b>	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
<b>T / (X/M)</b>	0,00	46,30	46,90	56,80	75,80	98,00
<b>Log T</b>	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
<b>Log T/(X/M)</b>	0,00	1,61	1,67	1,75	1,88	1,99
<b>Porcentaje de Ag Adsorbido</b>	0,00	26,50	52,20	64,70	72,80	75,00
<b>1 / n = pendiente</b>	<b>0,42</b>					
<b>R = Velocidad de adsorción</b>	<b>0,016</b>	<b>mg Ag/gr Carbón-hr</b>				

*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo

de la velocidad de adsorción.

**Figura 13**

*Velocidad de adsorción de la plata*



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 24 se determinó la velocidad de adsorción es 0,016 mg Ag/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar gráficamente en la figura 13.

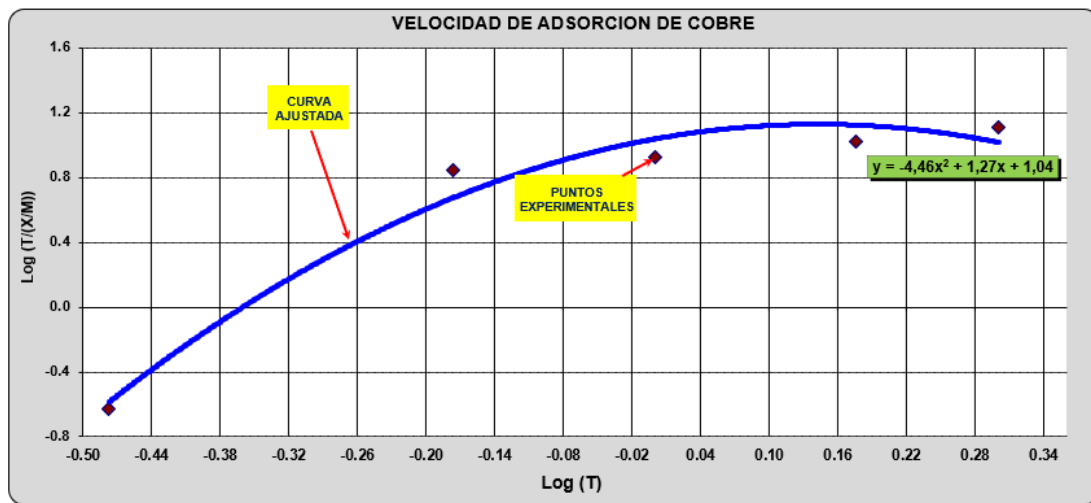
*Tabla 25 Velocidad de adsorción del cobre*

M = Masa de carbón (gr)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (hr)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Cu Barren	0,00	6,67	6,66	6,54	6,42	6,35
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	7,13	0,48	0,60	0,72	0,79
X/M (mg Cu/gr C*)	0,00	1,43	0,10	0,12	0,14	0,16
T / (X/M)	0,00	0,23	7,00	8,40	10,46	12,72
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	-0,63	0,85	0,92	1,02	1,10
Porcentaje de Cu Adsorbido	0,00	6,50	6,70	8,30	10,10	11,00
1 / n = pendiente	2,23					
R = Velocidad de adsorción	0,11	mg Cu/gr Carbón-h				

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo

de la velocidad de adsorción.

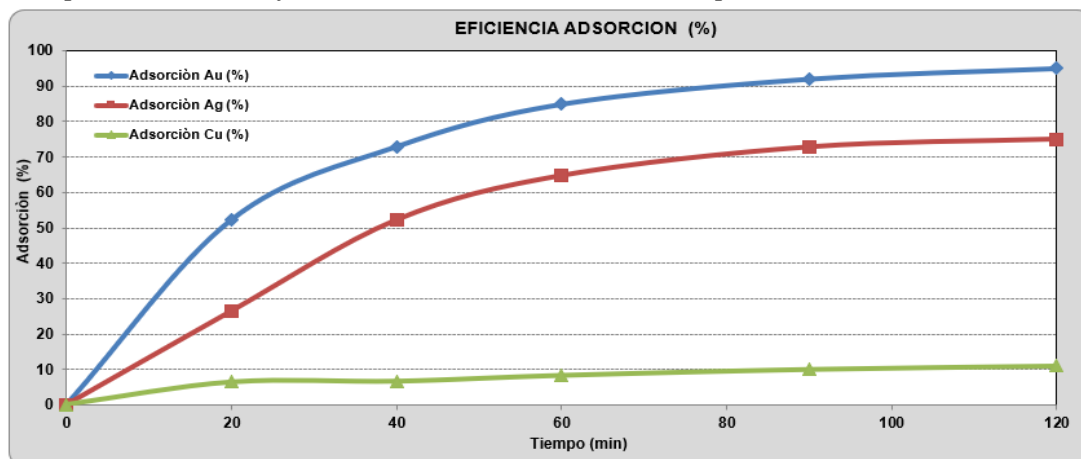
**Figura 14**  
*Velocidad de adsorción del cobre*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 25 determinamos que la velocidad de adsorción de cobre es 0.11 mg Au/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar en la figura 14. Además, podemos observar que a medida que incrementa el tiempo, la adsorción del cobre alcanza cerca de 1,1 mg Cu/g carbón-h.

**Figura 15**  
*Comparación de la Eficiencia de adsorción de metales preciosos*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la figura 15, observamos que la adsorción del oro a medida que se incremental el tiempo hasta 120 min, la eficiencia de adsorción por el carbón reactivado químicamente es 95 % en forma sostenida. En cuanto a la plata, la

eficiencia de adsorción es pareja hasta 75 %. La adsorción del cobre alcanza hasta 10 % en forma sostenida.

#### D. Velocidad de adsorción de carbón reactivado térmicamente RT -140 A

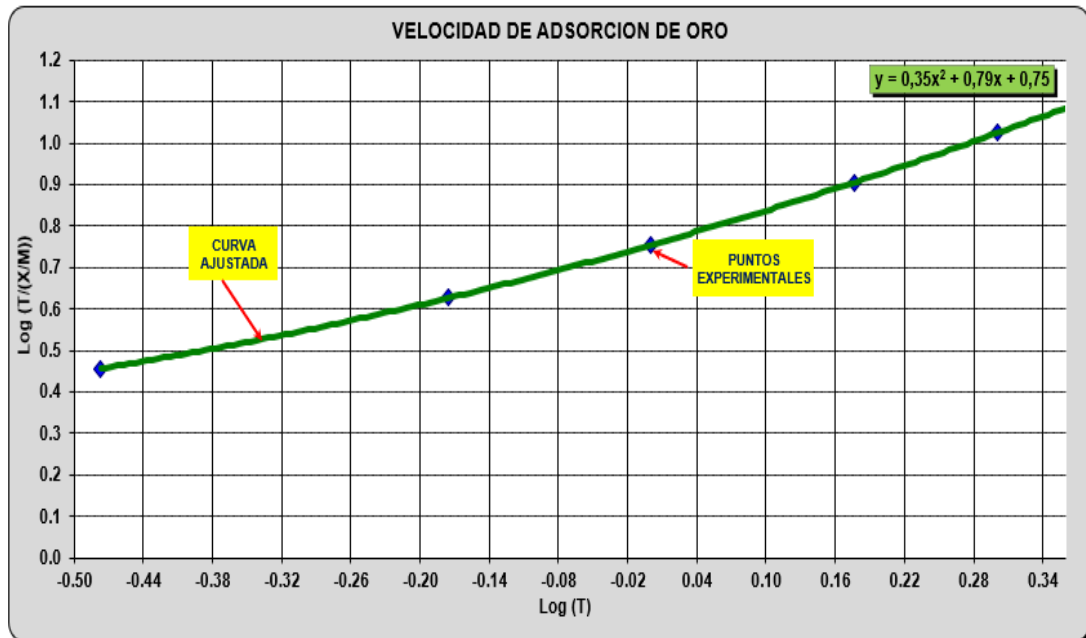
Tabla 26 Velocidad de adsorción del oro

M =Masa de carbón (g)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (h)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Au Barren	0,97	0,39	0,19	0,09	0,03	0,03
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	0,58	0,78	0,89	0,94	0,94
X/M (mg Au/gr C*)	0,00	0,12	0,16	0,18	0,19	0,19
T / (X/M)	0,00	2,85	4,25	5,65	8,01	10,60
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	0,46	0,63	0,75	0,90	1,03
Porcentaje de Au Adsorbido	0,00	60,20	80,80	91,20	96,50	97,20
1 / n = pendiente	0,73					
R = Velocidad de adsorción	0,17	mg Au/gr Carbón-h				

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

Figura 16

Velocidad de adsorción del oro



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 26, se determinó la velocidad de adsorción es 0,17 mg Au/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar gráficamente en la figura 16.

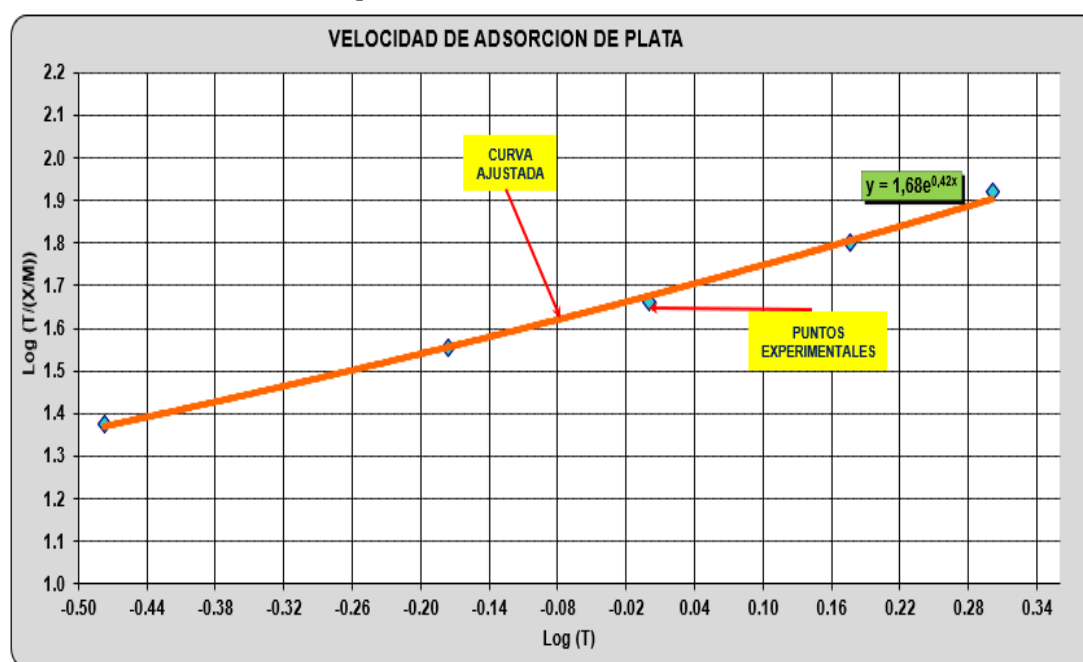
Tabla 27 Velocidad de adsorción del cobre

M =Masa de carbón (gr)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (hr)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Ag Barren	0,00	0,07	0,04	0,02	0,02	0,02
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	0,07	0,09	0,12	0,12	0,12
X/M (mg Ag/gr C*)	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
T / (X/M)	0,00	2,80	35,80	45,90	63,00	8,30
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	1,38	1,55	1,66	1,80	1,92
Porcentaje de Ag Adsorbido	0,00	51,50	68,40	80,10	87,50	88,20
1 / n = pendiente	0,70					
R = Velocidad de adsorción	0,021	mg Ag/gr Carbón-hr				

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

Figura 17

Velocidad de adsorción de plata



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 27 determinamos que la velocidad de adsorción de plata es 0.021 mg Ag/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar en la figura 17. Además, podemos observar en figura que a medida que incrementa el tiempo, la adsorción del cobre alcanza cerca de 1,9 mg Ag/g carbón-h.

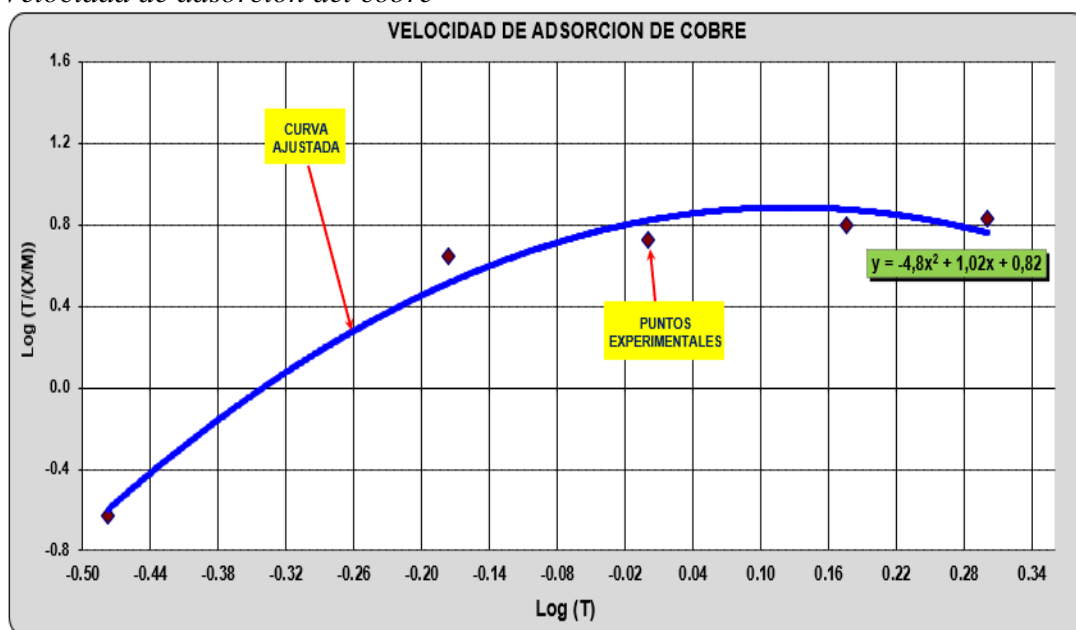
Tabla 28 Velocidad de adsorción del cobre

M =Masa de carbón (gr)	5	5	5	5	5	5
T = Tiempo (hr)	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
C = Concentración Cu Barren	0,00	6,62	6,38	6,20	5,94	6,64
X = Au Adsorbido Carbón (mg)	0,00	7,13	0,75	0,94	1,19	1,50
X/M (mg Cu/gr C*)	0,00	1,43	0,15	0,19	0,24	0,30
T / (X/M)	0,00	0,23	4,43	5,35	6,30	6,69
Log T	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
Log T/(X/M)	0,00	-0,63	0,65	0,73	0,80	0,83
Porcentaje de Cu Adsorbido	0,00	7,20	10,50	13,10	16,70	21,00
1 / n = pendiente	1,87					
R = Velocidad de adsorción	0,17	mg Cu/gr Carbón-hr				

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

Figura 18

Velocidad de adsorción del cobre

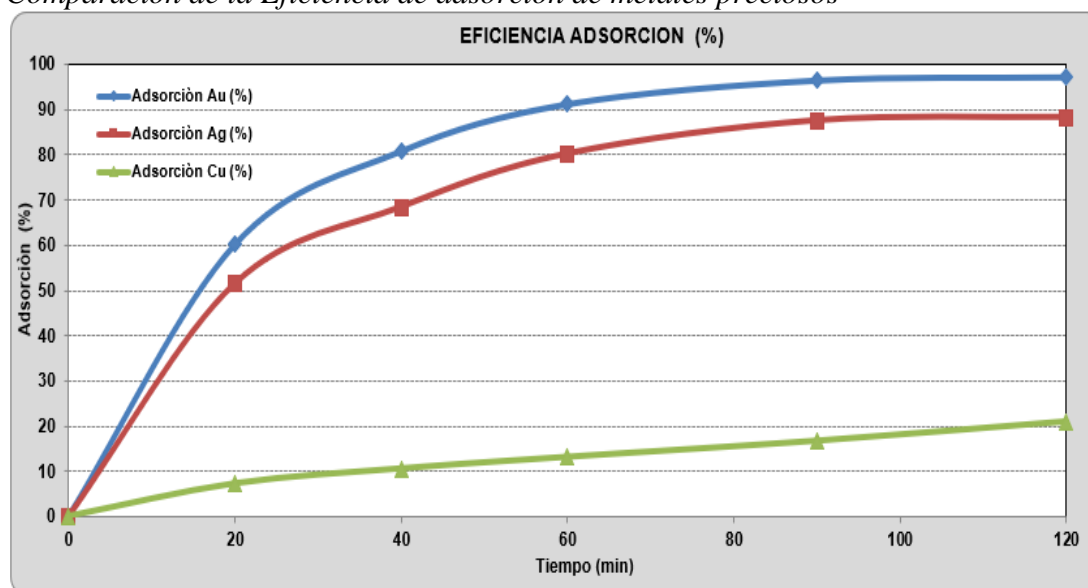


Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 28 determinamos que la velocidad de adsorción de cobre es 0.17 mg Cu/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar en la figura 18. Además, en esta figura observamos que a medida que incrementa el tiempo, la adsorción del cobre alcanza cerca de 0,81 mg Cu/g carbón-h.

**Figura 19**

*Comparación de la Eficiencia de adsorción de metales preciosos*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la figura 19, observamos que la adsorción del oro a medida que incremental el tiempo hasta 120 min, la eficiencia de adsorción por el carbón reactivado químicamente es 95 % en forma sostenida. En cuanto a la plata, la eficiencia de adsorción es pareja hasta 75 %. La adsorción del cobre alcanza hasta 10 % en forma sostenida.

#### **E. Velocidad de adsorción de carbón reactivado térmicamente RT -150 A**

*Tabla 29 Velocidad de adsorción del oro*

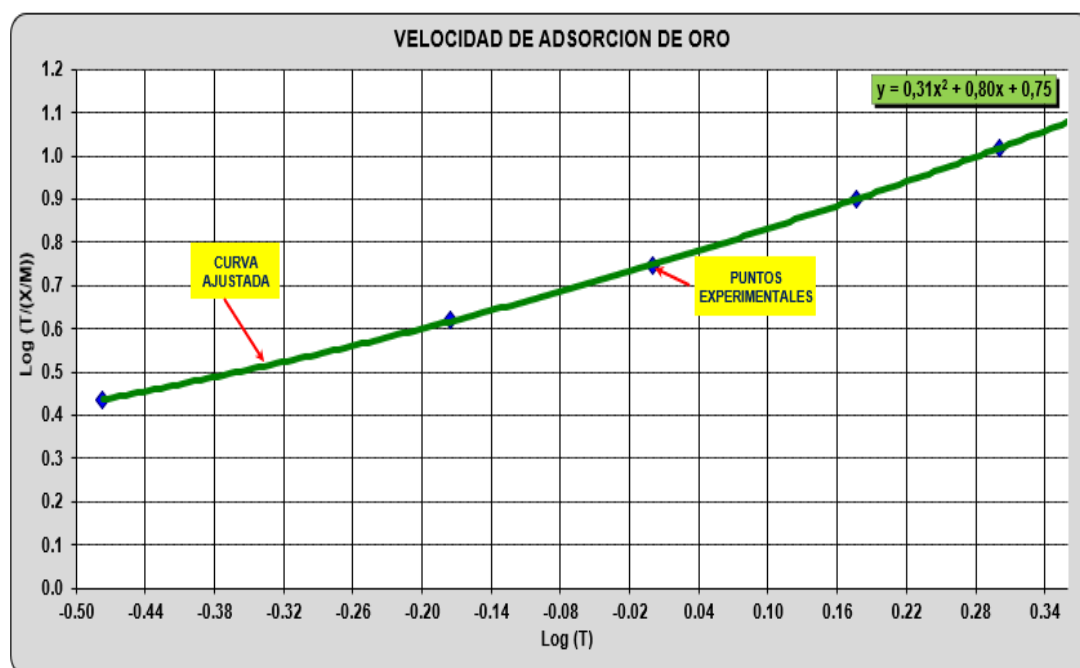
<b>M =Masa de carbón (gr)</b>	5	5	5	5	5	5
<b>T = Tiempo (hr)</b>	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
<b>C = Concentración Au Barren</b>	0,97	0,36	0,17	0,07	0,02	0,01
<b>X = Au Adsorbido Carbón (mg)</b>	0,00	0,61	0,80	0,90	0,95	0,96
<b>X/M (mg Au/gr C*)</b>	0,00	0,12	0,16	0,18	0,19	0,19
<b>T / (X/M)</b>	0,00	2,73	4,15	5,58	7,91	10,45
<b>Log T</b>	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
<b>Log T/(X/M)</b>	0,00	0,44	0,62	0,75	0,90	1,02
<b>Porcentaje de Au Adsorbido</b>	0,00	63,00	82,80	92,40	97,70	98,70
<b>1 / n = pendiente</b>	<b>0,75</b>					
<b>R = Velocidad de adsorción</b>	<b>0,18</b>	<b>mg Au/gr Carbón-hr</b>				

*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo

de la velocidad de adsorción.

**Figura 20**

*Velocidad de adsorción del oro*



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 29, se determinó la velocidad de adsorción es 0,18 mg Au/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar gráficamente en la figura 20. Donde la máxima adsorción llega a 1,01 mg Au/g Carbón-h.

*Tabla 30 Velocidad de adsorción de la plata*

<b>M =Masa de carbón (gr)</b>	5	5	5	5	5	5
<b>T = Tiempo (hr)</b>	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
<b>C = Concentración Ag Barren</b>	0,00	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
<b>X = Au Adsorbido Carbón (mg)</b>	0,00	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13
<b>X/M (mg Ag/gr C*)</b>	0,00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
<b>T / (X/M)</b>	0,00	17,30	31,20	41,60	59,20	76,90
<b>Log T</b>	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
<b>Log T/(X/M)</b>	0,00	1,24	1,49	1,62	1,77	1,89
<b>Porcentaje de Ag Adsorbido</b>	0,00	70,80	78,60	88,50	93,10	95,60
<b>1 / n = pendiente</b>	<b>0,83</b>					
<b>R = Velocidad de adsorción</b>	<b>0,024</b>	<b>mg Ag/gr Carbón-hr</b>				

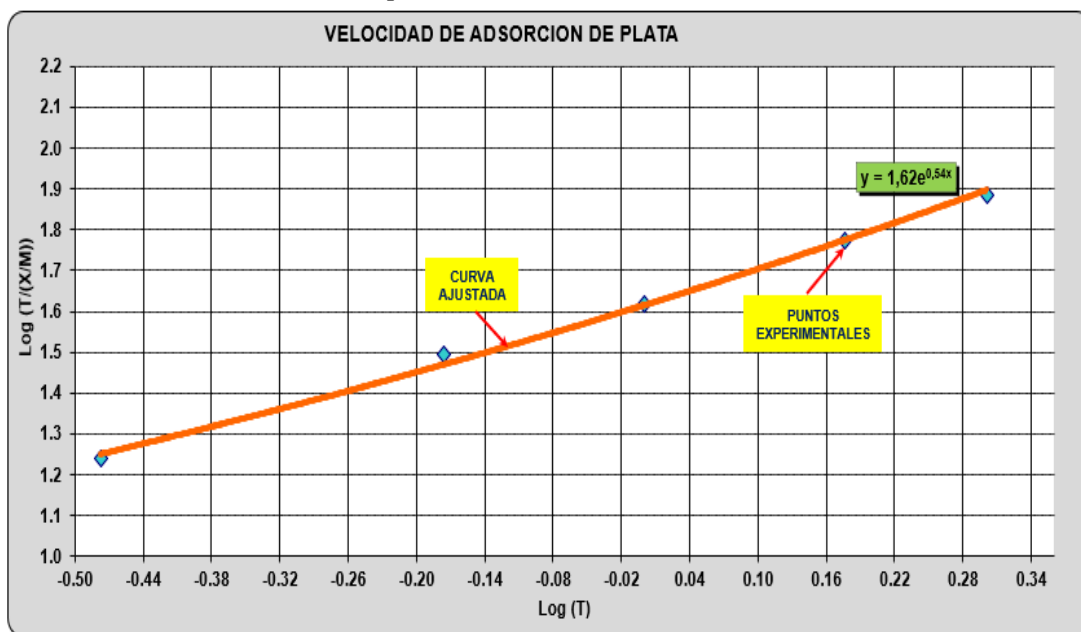
Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo

de la velocidad de adsorción.



**Figura 21**

*Velocidad de adsorción de la plata*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 30 determinamos que la velocidad de adsorción de plata es 0.021 mg Ag/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar en la figura 21. Además, podemos observar en figura que a medida que incrementa el tiempo, la adsorción del cobre alcanza cerca de 1,9 mg Ag/g carbón-h.

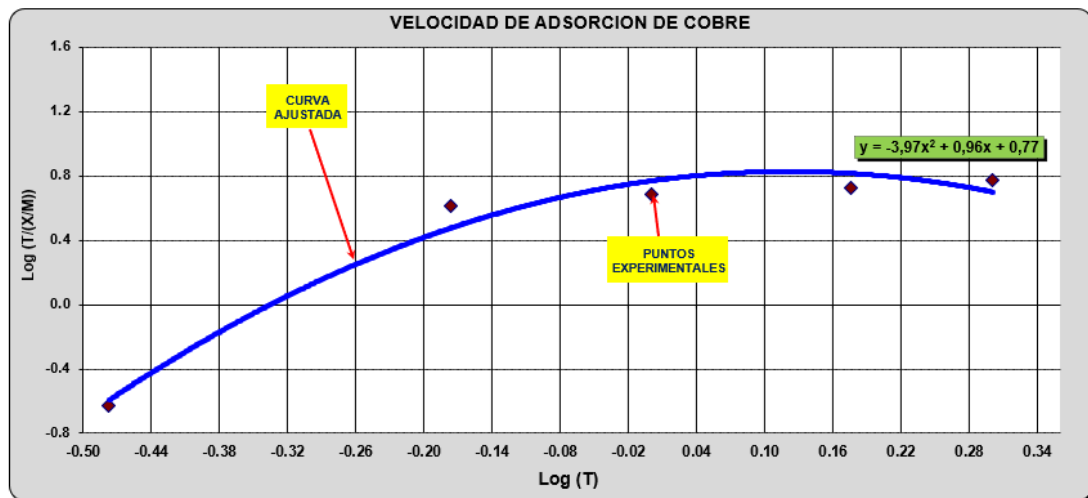
*Tabla 31 Velocidad de adsorción del cobre*

<b>M =Masa de carbón (g)</b>	5	5	5	5	5	5
<b>T = Tiempo (h)</b>	0,00	0,30	0,70	1,00	1,50	2,00
<b>C = Concentración Cu Barren</b>	0,00	6,54	6,32	6,10	5,71	5,45
<b>X = Au Adsorbido Carbón (mg)</b>	0,00	7,13	0,82	1,03	1,42	1,68
<b>X/M (mg Cu/gr C*)</b>	0,00	1,43	0,16	0,21	0,28	0,34
<b>T / (X/M)</b>	0,00	0,23	4,08	4,84	5,27	5,96
<b>Log T</b>	0,00	-0,48	-0,18	0,00	0,18	0,30
<b>Log T/(X/M)</b>	0,00	-0,63	0,61	0,68	0,72	0,77
<b>Porcentaje de Cu Adsorbido</b>	0,00	8,30	11,40	14,50	19,90	23,50
<b>1 / n = pendiente</b>	<b>1,81</b>					
<b>R = Velocidad de adsorción</b>	<b>0,18</b>	<b>mg Cu/gr Carbón-hr</b>				

*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo

de la velocidad de adsorción.

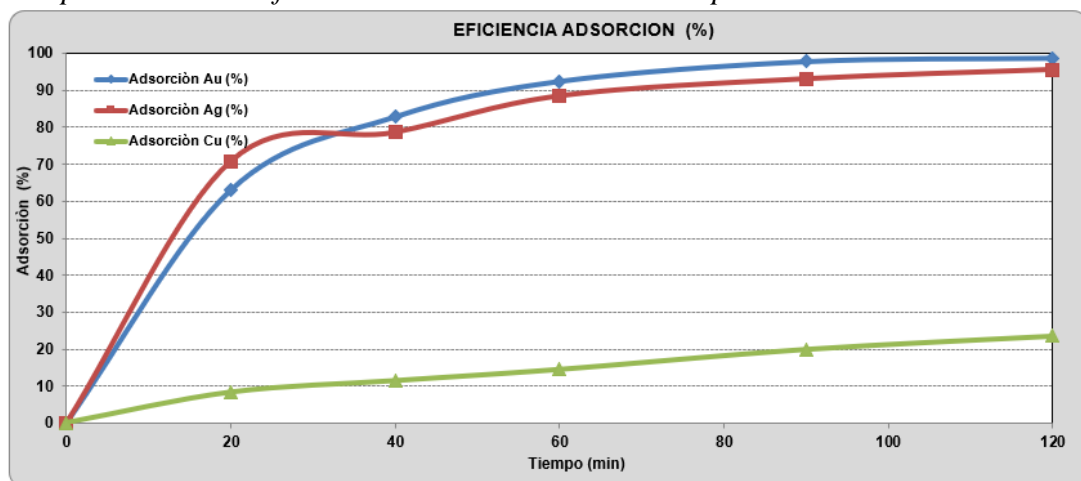
**Figura 22**  
*Velocidad de adsorción del cobre*



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

De la tabla 31 determinamos que la velocidad de adsorción de cobre es 0.18 mg Cu/g Carbón-h y esto lo podemos visualizar en la figura 22. Además, en esta figura observamos que a medida que incrementa el tiempo, la adsorción del cobre alcanza cerca de 0,81 mg Cu/g carbón-h.

**Figura 23**  
*Comparación de la Eficiencia de adsorción de metales preciosos*



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la figura 23, observamos que la adsorción del oro a medida que se incremental el tiempo hasta 120 min, la eficiencia de adsorción por el carbón reactivado químicamente es 95 % en forma sostenida. En cuanto a la plata, la

eficiencia de adsorción es pareja hasta 75 %. La adsorción del cobre alcanza hasta 10 % en forma sostenida.

#### 4.2.7. Resumen de adsorción de metales en diferentes carbones activados

A continuación, vamos a ver el resumen consolidado de las pruebas metalúrgicas de adsorción de metales a diferentes intensidades de energía eléctrica.

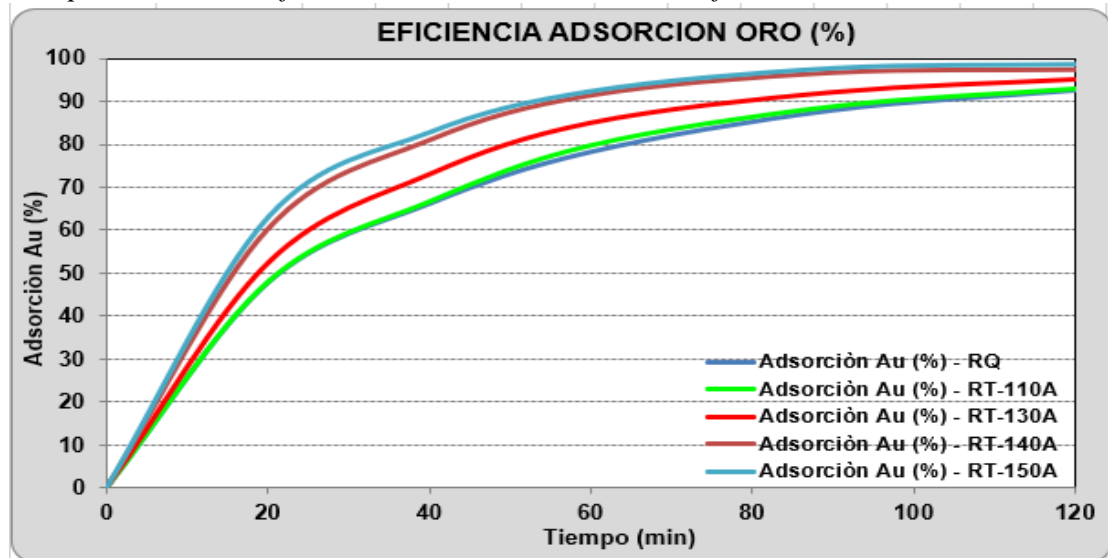
Tabla 32 Velocidad de adsorción de diferentes metales preciosos a diferentes intensidades

TIEMPO		RQ			RT - 110A			RT - 130A			RT - 140A			RT - 150A		
		ADSORCION (%)			ADSORCION (%)			ADSORCION (%)			ADSORCION (%)			ADSORCION (%)		
(min)	(hr)	Au	Ag	Cu	Au	Ag	Cu	Au	Ag	Cu	Au	Ag	Cu	Au	Ag	Cu
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.3	47.7	30.1	4.7	47.9	30.9	5.6	52.3	26.5	6.5	60.2	51.5	7.2	63.0	70.8	8.3
40	0.7	66.1	50.0	6.0	66.6	37.5	6.1	72.9	52.2	6.7	80.8	68.4	10.5	82.8	78.6	11.4
60	1.0	78.1	46.8	8.3	79.7	52.9	7.2	84.8	64.7	8.3	91.2	80.1	13.1	92.4	88.5	14.5
90	1.5	87.8	70.6	8.0	88.8	68.4	8.6	92.0	72.8	10.1	96.5	87.5	16.7	97.7	93.1	19.9
120	2.0	92.5	72.1	9.3	92.9	72.1	9.9	94.9	75.0	11.0	97.2	88.2	21.0	98.7	95.6	23.5

Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena para el cálculo de la velocidad de adsorción.

Figura 24

Comparación de la Eficiencia de adsorción de oro a diferentes intensidades

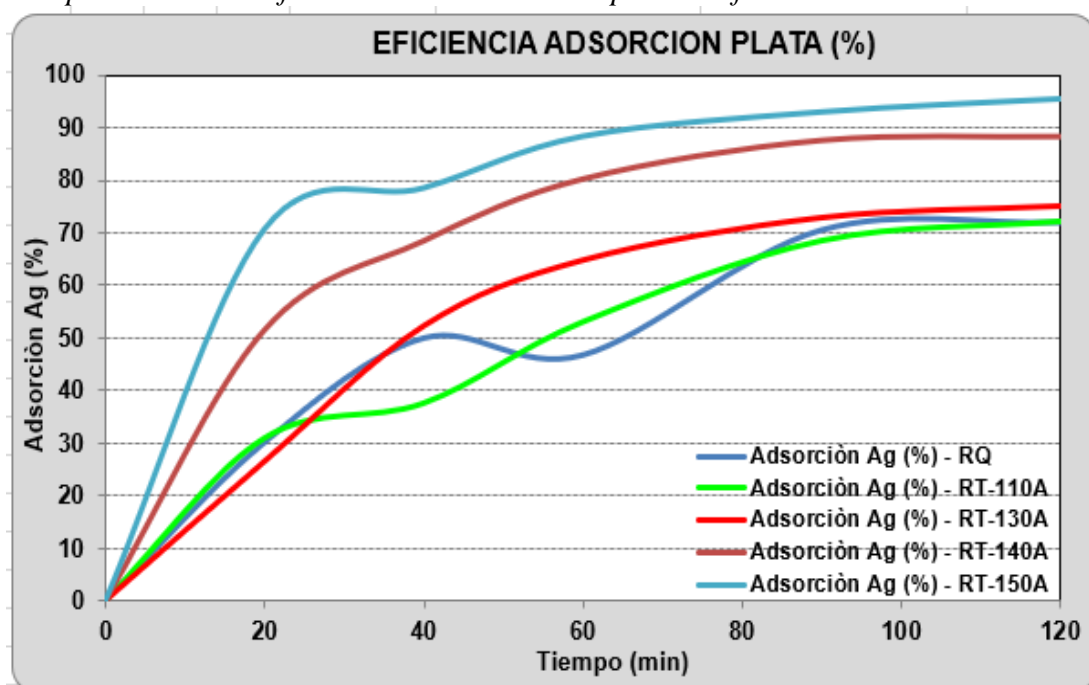


Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 32 visualizamos, que a medida que se trabajó con carbón reactivado químico y térmicamente a diferentes intensidades de energía (110 – 150 A), la eficiencia de adsorción del Au mejoró sobre 90 %. Por otra parte, se observa que el carbón reactivado químicamente y térmicamente tienen una diferencia de eficiencia de adsorción. De igual manera lo podemos reafirmar en la figura 24, confirmado lo mencionado líneas arriba.

**Figura 25**

*Comparación de la Eficiencia de adsorción de plata a diferentes intensidades*

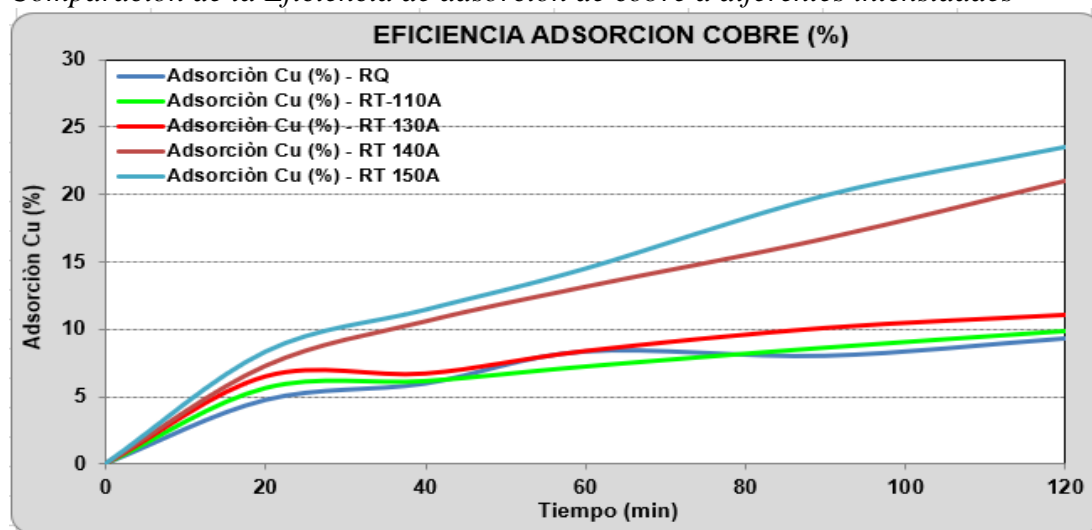


*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 32 observamos que la eficiencia de adsorción de la plata es mejor cuando se utiliza carbón reactivado a 150 A. también visualizamos, que la eficiencia de adsorción del carbón reactivado químicamente tienen igual eficiencia con el carbón reactivado térmicamente a 110 A, De igual manera lo podemos ver en la figura 25, confirmado lo mencionado líneas arriba.

**Figura 26**

*Comparación de la Eficiencia de adsorción de cobre a diferentes intensidades*



*Nota.* Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

En la tabla 32 se aprecia la eficiencia de adsorción del cobre, el cual indica por las líneas del carbón reactivado a diferentes intensidades de corriente (110 – 150 A) y reactivado químico, la eficiencia de adsorción del cobre es 23,5 % utilizando carbón reactivado a 150 A, además nuevamente comprobamos que el carbón reactivado químicamente tiene una baja adsorción de cobre en comparación con los restos de carbones. De igual manera lo podemos comprobar en la figura 26.

#### **A. Diferencia de la velocidad de adsorción vs capacidad de adsorción**

*Tabla 33 Velocidad de adsorción de diferentes metales preciosos a diferentes intensidades*

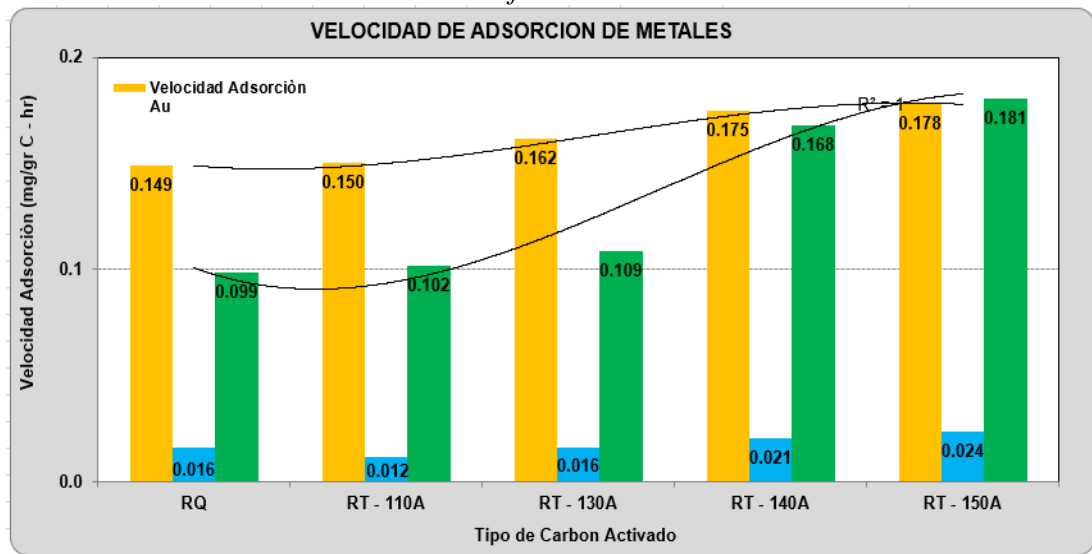
TIPO DE CARBÓN ACTIVADO	VELOCIDAD DE ADSORCIÓN (mg/g C <sup>*</sup> -h)			CAPACIDAD DE ADSORCIÓN (%)		
	Au	Ag	Cu	Au	Ag	Cu
RQ	0,149	0,016	0,099	92,5	72,1	9,3
RT-110 A	0,150	0,012	0,102	92,9	72,1	9,9
RT-130 A	0,162	0,016	0,109	94,9	75,0	11,0
RT-140 A	0,175	0,021	0,168	97,2	88,2	21,0
RT-150 A	0,179	0,024	0,181	98,7	95,6	23,5

En la tabla 33 se observa, la velocidad de adsorción de metales que se incrementa a medida que el carbón es reactivado hasta 150 A, de igual manera la

capacidad de adsorción de los metales se incrementa de 92,9 % a 98,7 % Au, de 72,1 a 95 % Ag y 9,9 % a 23,5 % Cu.

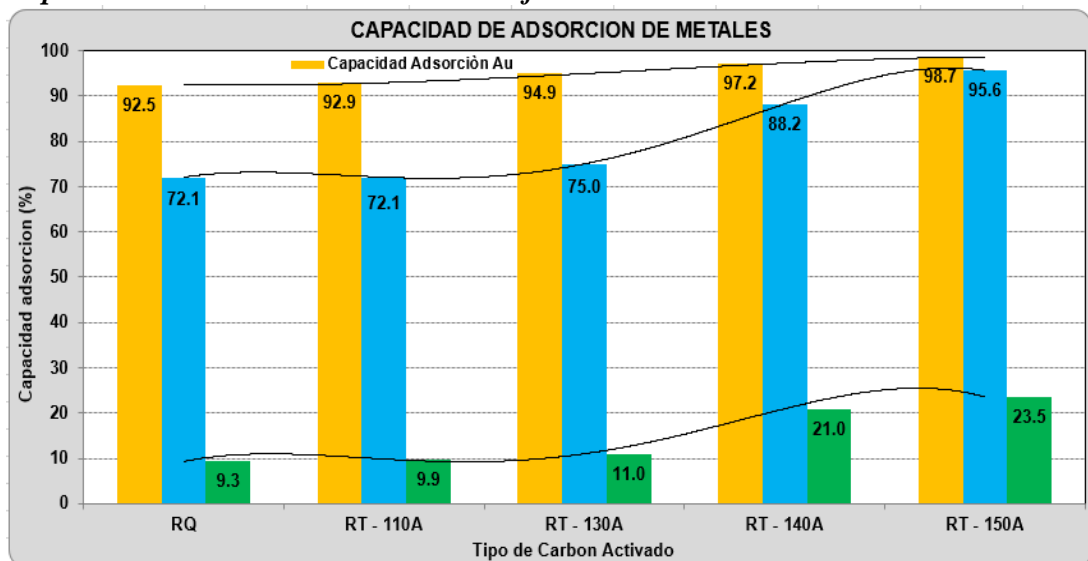
De igual manera lo manifestado podemos corroborar en la figura 27 y 28 donde las velocidades de adsorción de metales y capacidad de adsorción se incrementan con el aumento de intensidad de energía.

**Figura 27**  
*Velocidad de adsorción de metales a diferentes intensidades*



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

**Figura 28**  
*Capacidad de adsorción de metales a diferentes intensidades*



Nota. Datos tomados del laboratorio químico – Empresa Minera la Arena

### 4.3. Prueba de hipótesis

La hipótesis estadística se somete a prueba para determinar si se acepta o se rechaza la hipótesis nula. A continuación, presentamos la hipótesis estadística.

#### Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>)

La capacidad de adsorción del carbón, no mejora al utilizarse carbones reactivados térmicamente a diferentes intensidades de corriente en la planta ADR de Minera la Arena S.A Región la Libertad 2020.

#### Hipótesis alterna (H<sub>a</sub>)

La capacidad de adsorción del carbón, mejora al utilizarse carbones reactivados térmicamente a diferentes intensidades de corriente en la planta ADR de Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020.

Intensidad de reactivación	Eficiencia de Adsorción del carbón (%)		
	Au	Ag	Cu
RQ	92,5	72,1	9,3
RT- 110 A	92,9	72,1	9,9
RT- 130 A	94,9	75,0	11,0
RT- 140 A	97,2	88,2	21,0
RT- 150 A	98,7	95,6	23,5

#### Nivel de significancia

$$\alpha = 0.05$$

#### Estadístico de prueba

##### Análisis de Varianza

Fuente	SC Ajust.	GL	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Intensidad reactivación	536,3	4	134,07	8,00	0,007
Adsorción Carbón	18289,4	2	9144,71	545,95	0,000
Error	134,0	8	16,75		
Total	18959,7	14			

## Valor de decisión

$$F_{\text{calculado}} > F_{0,05,4,8} \text{ (Se acepta la } H_a)$$

$$545,95 > 3,838$$

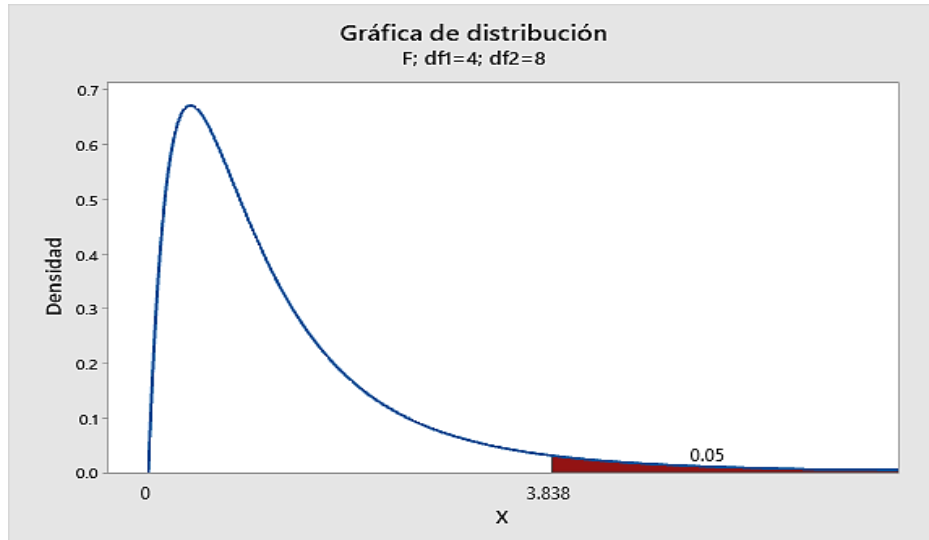


Figura 1. Prueba de hipótesis

## Decisión

Se acepta la hipótesis alterna

## Conclusión

Existe evidencia suficiente para afirmar que la capacidad de adsorción reactivado a diferentes intensidades de corriente mejora la eficiencia de adsorción de la planta ADR de la Minera la Arena S.A. Región la Libertad 2020, con un nivel de significancia del 5%.

### 4.4. Discusión de resultados

A partir de los hallazgos encontrados aceptamos la hipótesis alterna que establece que la evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades sí tiene relación con la capacidad de adsorción de metales preciosos.

Estos resultados tienen relación con el estudio realizado por Lapo (2014) que manifiesta la reactivación química logro una apreciable limpieza del carbón



activado con agentes químicos como el ácido clorhídrico al 5 % para un tiempo de agitación de 3 h. Sin embargo, el autor no realiza pruebas de reactivación térmica.

En lo que respecta a las características físicas químicas del carbón activado, es importante la dureza de abrasión del carbón activado, que se tuvo 98, parámetro importante en la reactivación térmica, para realizar la manipulación y transporte del carbón. Según Grosso (2010) manifiesta, la reactivación térmica de un carbón que no tenga la suficiente dureza, no resulta rentable ya que el proceso somete al carbón a una serie de movimientos y de acciones erosionantes (flujo de gases calientes y golpeteos) que lo rompen y disminuyen su tamaño. Por otro lado, los carbones menos duros son los más reactivos en presencia de gases oxidantes, y por lo tanto se convierten en CO<sub>2</sub> con mayor facilidad.

Las pruebas experimentales de adsorción con carbón reactivado a diferentes intensidades de energía, nos muestran que mejora la capacidad de adsorción de 92,5 a 98,7 % de Au, de 72,1 a 95,6 % de Ag y de 9,3 a 23,5 % de cobre, con el incremento de la intensidad de la reactivación térmica de 110 – 150 A. al respecto Grosso (2010) menciona, la reactivación térmica consiste en la eliminación de los adsorbatos de un carbón agotado mediante un horno igual al utilizado para la activación térmica de carbón activado, pero no menciona de pruebas de adsorción con estos carbones.

La velocidad de adsorción mejora cuando se trabaja con carbón reactivado térmicamente a 150 A y esto tiene influencia en la capacidad de adsorción de los diferentes metales. (Cortés et al., 2008) en uno de sus párrafos manifiesta que la activación del carbón aumenta la porosidad y capacidad de adsorción del material

carbonizado mediante tratamientos de oxidación de los grupos funcionales de la superficie del carbón.

## CONCLUSIONES

- Las características físicas-químicas del carbón activado es: densidad aparente de 0,44, número de abrasión 0,98, porcentaje de porosidad 85 %, Cenizas 2 % y pH 9 – 10. Todos estos parámetros son importantes para realizar la reactivación térmica del carbón para evitar que el carbón se rompa por abrasión al manipular dentro del horno.
- Las pruebas de adsorción del carbón reactivado a 150 A incrementan la capacidad de adsorción del Au en 98,7 %, Ag 95,6 %, y Cu 23,5 %, así como también la eficiencia de adsorción, el tiempo para la máxima adsorción se consigue trabajando con 2 horas de agitación de las pruebas en botellas.
- La velocidad de adsorción se incrementó cuando se trabajó con carbón reactivado a 150 A, siendo las velocidades de: 0,149 – 0,179 mg Au/g C\*-h, 0,016 – 0,024 mg Ag/g C\*-h y 0,099 – 0,181 mg Cu/g C\*-h. También se constató que la velocidad de adsorción del cobre es 8 veces mayor que la velocidad de adsorción de la plata, a pesar que en la cabeza el cobre es 53 veces mayor que el contenido de plata. Esto se explica debido a que la preferencia de adsorción entre el cobre y la plata, primero es la plata.

## **RECOMENDACIONES**

- Realizar la reactivación térmica del carbón activado RQ en el horno RT, éste trabaje en un rango de intensidad de corriente de 130A – 140A.
- Realizar supervisiones frecuentes en la formación de carbonatos dentro de los tanques de adsorción y desorción, por estar trabajando con valores altos de alcalinidad.
- Seguir realizando pruebas metalúrgicas de adsorción porque es un tema que todavía no está esclarecido con respecto a las reacciones que ocurren dentro de la columna.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bansal, R., Donnet, J., & Stoeckli, F. (1988). Una revisión de: "Carbón activo". *Revista de ciencia y tecnología de la dispersión*, 482.
- Carbotecnia.info. (21 de Febrero de 2012). *Qué es el carbón activado*. Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>
- Carriazo, J., Centi, G., Perathoner, S., Fernández, D., Tuber, I., Talanquer, V., . . . Ross, S. (2008). Catalysis by layered materials. *Microporous and Mesoporous Material*, 3-15.
- Cortés, J., Giraldo, L., García, A., García, C., & Moreno, J. (2008). Oxidación de un carbón activado comercial y caracterización del contenido de grupos ácidos superficiales. *Revista Colombiana de Química*, 37, 55-65. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/eq/v21n3/v21n3a7.pdf>
- De Voys, F. (1983). *The pore size distribution of activated carbon, Activated Carbon a fascinating material*. --: Anónimo.
- Feijoó, C., De la torre, E., & Uribe, R. (2019). Determinación de la capacidad de adsorción del complejo oro-cianuro en compósitos de carbón activado-vidrio. *Afinidad*, Vol. 76 (Num. 588). Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/361881> [View: 24-02-2021].
- Groso Cruzado, G. (19 de Febrero de 2010). *Reactivación de carbón activado granular*. Obtenido de Carbotecnia: <http://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/reactivacion-de-carbon-activado-granular/>

- Lapo Alverca, J. A. (2014). *Activación Química del carbón activado del tipo Calgon Americano 6x2 utilizado en la Sociedad Minera Promine para el proceso de adsorción de metales preciosos*. Machala-Ecuador: Tesis de Grado.
- McDougall, G., & Hancock, R. (1980). The mechanism of the adsorption of gold cyanide on activated carbon. *Institute Mine Metallurgical*, 344-356.
- Misari Chuquipoma, F. S. (2010). *Metalurgia del Oro*. Lima: San Marcos E.I.R.L.
- Nicol, M. (1985). Teoría de la elución. *artículo presentado en la Escuela SAIMM*, 14-18.
- Oudenne P, D. (1990). La experiencia en la carbonización, activación y regeneración de carbón activado. *Simposio Internacional de Metalurgia Extractiva y Manufacturera*.
- Pazmiño Ayala, J. (2007). Generalidades del carbón activado. *Anónimo*, --.
- Sevilla, U. d. (2013). *Manual del Carbón Activado*. Andalucía - España: Aguapedia.net.
- Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf> (accessed Octubre 2013)

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### PROCEDIMIENTO: ENSAYES DE ORO POR MÉTODO COMBINADO

#### 1. PERSONAL:

- 1.1.- Técnico Analista
- 1.2.- Supervisor de Laboratorio Químico

#### 2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP):

- 2.1.- Mameluco antiácido
- 2.2.- Capucha aluminizada con visor transparente
- 2.3.- Capucha aluminizada visor dorado
- 2.4.- Casaca aluminizada
- 2.5.- Guantes de cuero
- 2.6.- Guantes para alta temperatura aluminizado
- 2.7.- Protector auditivo
- 2.8.- Respirador con filtros para gases y partículas
- 2.9.- Guantes de nitrilo
- 2.10.-Lentes de Seguridad.
- 2.11.-Zapato de seguridad c/p de acero.

#### 3. EQUIPOS, HERRAMIENTAS, MATERIALES Y REACTIVOS:

##### 3.1. Equipos:

- 3.1.1 Balanza analítica
- 3.1.2 Carro cargador de crisoles
- 3.1.3 Sistema de extracción y lavador de plomo
- 3.1.4 Horno de fusión
- 3.1.5 Carro porta crisoles
- 3.1.6 Carro porta lingotera
- 3.1.7 Mesa de golpeo
- 3.1.8 Banco de preparación de flux
- 3.1.9 Horno de copelación
- 3.1.10 Cabina porta copelas
- 3.1.11 Sistema de extracción y lavador de vapores ácidos.
- 3.1.12 Plancha de calentamiento
- 3.1.13 Micro balanza
- 3.1.14 Dispensadores

##### 3.2. Herramientas / Materiales

- 3.2.1 Tenaza de colada múltiple
- 3.2.2 Tenaza y pinza
- 3.2.3 Tenedor copelero
- 3.2.4 Kit de limpieza para hornos
- 3.2.5 Martillo
- 3.2.6 Porta régulos
- 3.2.7 Gradilla de polietileno sumergible
- 3.2.8 Bandeja de acero inoxidable
- 3.2.9 Crisoles de arcilla de 30gr.
- 3.2.10 Copelas N° 7



- 3.2.11 Tubos de ensayo
- 3.2.12 Tiza de cera
- 3.2.13 Bolas de polietileno

### **3.3. Reactivos**

- 3.3.1 Flux para análisis de oro
- 3.3.2 Nitrato de Potasio
- 3.3.3 Bórax
- 3.3.4 Harina
- 3.3.5 Ácido nítrico QP al 50%
- 3.3.6 Ácido clorhídrico

## **4. PROCEDIMIENTO:**

### **4.1.- VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN:**

- 4.1.1.- El Supervisor de Laboratorio Químico dará la orden de trabajo por escrito, y la capacitación respectiva si lo amerita.
- 4.1.2.- El Técnico Analista en Fundición inspeccionara el área de trabajo, registrara en el formato SIGCO-F-LQ-012 (Check List Diario De Operación Área de Fundición). y realizará el llenado del IPERC, aplicando los controles respectivos.

### **4.2.- PROCESO DE ANÁLISIS:**

- 4.2.1.- Antes de iniciar la actividad verificar el funcionamiento del Sistema de Extracción y Lavador de Plomo.
- 4.2.2.- Poner en funcionamiento el horno de fusión para su previo calentamiento.
- 4.2.3.- Ordenar las muestras según el orden de trabajo SIGCO-F-LQ-030 (Orden de Trabajo Operativo Fundición - Geología), SIGCO-F-LQ-031 (Orden de Trabajo Operativo Fundición – Planta).
- 4.2.4.- Preparar el orden de los crisoles y enumerar con la tiza de cera, poner sobre la bandeja de madera.
- 4.2.5.- Poner las bolsas abiertas dentro de los crisoles
- 4.2.6.- Llevar la bandeja con los crisoles hasta la sala de balanzas y verificar la balanza analítica con las pesas patrones. Y registrar en el Formato SIGCO-F-LQ-006 (Verificación de Balanzas)
- 4.2.7.- Pesar la muestra sobre la bolsa plástica abierta, según el procedimiento SIGCO-PETS-PLC-LQ-025 (Pesado de muestras) y teniendo en cuenta la tabla del Formato SIGCO-F-LQ-004 (Tabla de Pesado de Muestras).
- 4.2.8.- Tener en cuenta el siguiente cuadro para las muestras de planta concentradora:

MUESTRAS DE PLANTA POLIMETÁLICO		MUESTRAS DE PLANTA OXIDO	
Tipo de Muestra	Peso (gr)	Tipo de Muestra	Peso (gr)
MRI (Patrón)	10.00	MRI (Patrón)	10.00
Cabeza	15.00	Cabeza	10.00
Concentrado Cobre	5.00	Cabeza Intermedia	10.00
Concentrado Plomo	5.00	Concentrado de PbS	5.00
Concentrado Zn	10.00	Concentrado de PbO	10.00
Relave	15.00	Relave	10.00

- 4.2.9.- Una vez concluido el pesado retornar todo al banco de preparación de fundente de la sala de fundición.
- 4.2.10.- Adicionar dentro de la bolsa, una medida de nitrato de potasio (aprox. 4 gr) y una medida de harina (aprox. 1 gr) según el tipo de mineral o concentrado y criterio del analista.
- 4.2.11.- Adicionar 85 gramos de flux aprox. Utilizando el medidor tipo cuchara para cada muestra la cual se adiciona dentro de la bolsa plástica. enseguida homogenizar cerrando la bolsa previamente
- 4.2.12.- Regresar la bolsa con el contenido dentro del crisol, luego se adiciona una medida de bórax (aprox. 10 gr) sobre la bolsa de manera que forme una capa de cobertura
- 4.2.13.- Ponerse la indumentaria para fundición (guantes, capucha y casaca aluminizado), y prender el extractor de plomo.
- 4.2.14.- Utilizando el carro cargador de crisoles se colocan los crisoles dentro del horno de fusión este proceso se realizará a una temperatura de 950°C a 1000°C.
- 4.2.15.- Completada la fusión en aprox. 45 minutos (el tiempo va a depender según esta completada la fusión de la muestra) con la tenaza de colada múltiple se retira los crisoles de 9 a la vez y se vierte el contenido en la lingotera de acero, la que previamente ha sido limpiada.
- 4.2.16.- Se deja enfriar, se retira la masa fría volteando la lingotera de acero sobre la mesa
- 4.2.17.- Luego separar el plomo de la escoria golpeando con el martillo sobre el yunque de la mesa de golpeo hasta darle la forma de un cubo el cual se le denomina régulo.
- 4.2.18.- Enumerar los régulos, luego se procede a pesar y anotar en el formato SIGCO-F-LAQ-030 (Orden de Trabajo Operativo Fundición - Geología) el peso promedio es de 35 gramos, caso contrario se reanaliza la muestra mejorando la dosificación de reactivos.

- 4.2.19.- Se precalienta las copelas, utilizando el tenedor copelero se ingresa las copelas al horno de copelación que está a 950° C por 15 minutos; luego con la ayuda de una pinza liza de largo alcance se coloca el régulo dentro de las copelas, se cierra la puerta y cuando el botón de plomo se ha licuado completamente se abre el Dámper de Tiro a fin de permitir la entrada de aire para la oxidación del plomo, que se volatiliza en aprox. 45 minutos.
- 4.2.20.- El punto final de la copelación es aquel en el que se produce un brillo especial (relampagueo de la plata)
- 4.2.21.- Utilizando el tenedor copelero se retira las copelas del horno de copelación y se coloca dentro de la cabina porta copelas, se deja enfriar y una vez fría, se extrae el botón de oro y plata llamada doré.
- 4.2.22.- Colocar cada Doré en su respectivo tubo de ensayo previamente codificado y/o enumerado, con la ayuda de la pinza. Los tubos deben estar en una gradilla de polietileno sumergible.
- 4.2.23.- Agregar 1 ml de ácido nítrico al 50% a cada uno de los tubos y colocar la gradilla en baño maría a punto de hervor, la plancha de calentamiento no debe exceder los 100°C; y se debe trabajar en la campana extractora de gases encendida. Por un tiempo de 15 a 20 minutos.
- 4.2.24.- Luego añadir 1 ml, de ácido clorhídrico concentrado y dejar reaccionar por 15 minutos, siempre en baño maría.
- 4.2.25.- Retirar de la plancha de calentamiento y dejar enfriar, agregar 8 ml de agua destilada, tapar los tubos de ensayo, agitar manualmente y dejar reposar hasta que el cloruro de plata se haya depositado en el fondo del tubo.
- 4.2.26.- Llevar la gradilla de polietileno sumergible con los tubos de ensayo a la Sala de Absorción Atómica.

## **5. RESTRICCIONES**

- 5.1.- No se realizará el trabajo si no se cuenta con el EPP adecuado.
- 5.2.- No se realizará la tarea si los equipos requeridos no se encuentran operativos.

## ANEXO 2

### PROCEDIMIENTO: ENSAYES DE PLATA POR VÍA SECA

#### 1. PERSONAL

- 1.1.- Técnico Analista
- 1.2.- Supervisor de Laboratorio Químico

#### 2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP):

- 2.1.- Mameluco con cintas reflectivas.
- 2.2.- Capucha aluminizada con visor transparente
- 2.3.- Capucha aluminizado visor dorado
- 2.4.- Casaca aluminizada
- 2.5.- Guantes de cuero
- 2.6.- Guantes para alta temperatura aluminizado
- 2.7.- Protector auditivo
- 2.8.- Respirador con filtros para gases y partículas
- 2.9.- Guantes de nitrilo
- 2.10.- Lentes de Seguridad.
- 2.11.- Zapato de seguridad c/p de acero.

#### 3. EQUIPOS, HERRAMIENTAS, MATERIALES Y REACTIVOS:

##### 3.1. Equipos

- 3.1.1 Balanza analítica
- 3.1.2 Carro cargador de crisoles
- 3.1.3 Sistema de extracción y lavador de plomo
- 3.1.4 Horno de fusión
- 3.1.5 Carro porta crisoles
- 3.1.6 Carro porta lingotera
- 3.1.7 Mesa de golpeo
- 3.1.8 Banco de preparación de flux
- 3.1.9 Horno de copelación
- 3.1.10 Cabina porta copelas
- 3.1.11 Micro balanza

##### 3.2. Herramientas / Materiales

- 3.2.1 Tenaza de colada múltiple
- 3.2.2 Tenaza y pinza
- 3.2.3 Tenedor copelero
- 3.2.4 Kit de limpieza para hornos
- 3.2.5 Martillo
- 3.2.6 Porta régulos
- 3.2.7 Porta dore de teflón
- 3.2.8 Crisoles de arcilla de 30gr.
- 3.2.9 Copelas N° 7

- 3.2.10 Tiza de cera
- 3.2.11 Bolas de polietileno

### **3.3. Reactivos**

- 3.3.1 Flux para análisis de plata
- 3.3.2 Nitrato de Potasio
- 3.3.3 Bórax
- 3.3.4 Harina

## **4. PROCEDIMIENTO:**

### **4.3.- VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN:**

- 4.1.1.- El Supervisor de Laboratorio Químico dará la orden de trabajo por escrito, y la capacitación respectiva si lo amerita.
- 4.1.2.- El Técnico Analista inspeccionará el área de trabajo, registrará en el formato SIGCO-F-LQ-012 (Check List Diario De Operación Área de Fundición). y realizará el llenado del IPERC, aplicando los controles respectivos.

### **4.4.- PROCESO DE ANÁLISIS:**

- 4.2.1.- Antes de iniciar la actividad verificar el funcionamiento del Sistema de Extracción y Lavador de Plomo.
- 4.2.2.- Poner en funcionamiento el horno de fusión para su previo calentamiento.
- 4.2.3.- Ordenar las muestras según el formato SIGCO-F-LQ-031 (Orden de Trabajo Operativo Fundición - Planta).
- 4.2.4.- Preparar el orden de los crisoles y enumerar con la tiza de cera, poner sobre la bandeja de madera.
- 4.2.5.- Poner las bolsas abiertas dentro de los crisoles
- 4.2.6.- Llevar la bandeja con los crisoles hasta la sala de balanzas y verificar la balanza analítica con la pesa patrones. Y registrar en el Formato SIGCO-F-LQ-006 (Verificación de Balanzas)
- 4.2.7.- Pesar la muestra sobre la bolsa plástica abierta, según el procedimiento SIGCO-PETS-PLC-LQ-025 (Pesado de muestras) y teniendo en cuenta la tabla del Formato SIGCO-F-LQ-004 (Tabla de Pesado de Muestras).
- 4.2.8.- Tener en cuenta el siguiente cuadro para las muestras de planta concentradora, el análisis realizar por duplicado:

MUESTRAS DE PLANTA POLIMETÁLICO		MUESTRAS DE PLANTA OXIDO	
Tipo de Muestra	Peso (gr)	Tipo de Muestra	Peso (gr)
MRI (patrón)	5.00	MRI (patrón)	10.00
Concentrado Cobre	5.00	Concentrado de PbS	10.00
Concentrado Plomo	5.00	Concentrado de PbO	10.00

- 4.2.9.- Una vez concluido el pesado retornar todo al banco de preparación de fundente de la sala de fundición.
- 4.2.10.- Adicionar una medida de nitrato de potasio (aprox. 4gr) y una medida de harina (aprox. 1gr) según el tipo de mineral o concentrado.
- 4.2.11.- Adicionar 85 gramos de flux aprox. Utilizando el medidor tipo cuchara para cada muestra la cual se adiciona dentro de la bolsa plástica. enseguida homogenizar cerrando la bolsa previamente
- 4.2.12.- Regresar la bolsa con el contenido dentro del crisol, luego se adiciona una medida de bórax (aprox. 10 gr) sobre la bolsa de manera que forme una capa de cobertura
- 4.2.13.- Ponerse la indumentaria para fundición (guantes, capucha y casaca aluminizado), y encender el extractor de plomo.
- 4.2.14.- Utilizando el carro cargador de crisoles se colocan los crisoles dentro del horno de fusión este proceso se realizará a una temperatura de 950°C a 1000°C.
- 4.2.15.- Completada la fusión en aprox. 45 minutos (el tiempo va a depender según esta completada la fusión de la muestra) con la tenaza de colada múltiple se retira los crisoles de 9 a la vez y se vierte el contenido en la lingotera de acero, la que previamente ha sido limpiada.
- 4.2.16.- Se deja enfriar, se retira la masa fría volteando la lingotera de acero sobre la mesa
- 4.2.17.- Luego separar el plomo de la escoria golpeando con el martillo sobre el yunque de la mesa de golpeo hasta darle la forma de un cubo el cual se le denomina régulo.
- 4.2.18.- Se precalienta las copelas, utilizando el tenedor copelero se ingresa las copelas al horno de copelación que está a 950° C por 15 minutos; luego con la ayuda de una pinza liza de largo alcance se coloca el régulo dentro de las copelas, se cierra la puerta y cuando el botón de plomo se ha licuado completamente se abre el Dámper de Tiro a fin de permitir la entrada de aire para la oxidación del plomo, que se volatiliza en aprox. 45 minutos.

- 4.2.19.- El punto final de la copelación es aquel en que un brillo especial se produce (relampagueo de la plata); sin exceder los 930 a 950°C para evitar la volatilización de plata. Haciendo uso del visor transparente.
- 4.2.20.- Utilizando la pinza liza se retira las copelas del horno de copelación y se coloca dentro de la cabina porta copelas, se deja enfriar y una vez fría, se extrae el botón de plata.
- 4.2.21.- Se coloca el botón de plata en la lingotera de teflón en el orden respectivo para su pesado en la micro balanza.
- 4.2.22.- Verificar el nivel de la balanza y destarar con el platillo adentro.
- 4.2.23.- Pesar el botón de plata y registrar en el Formato SIGCO-F-LQ-054 (Pesado de Dore - Plata).
- 4.2.24.- Dejar el área de trabajo limpio y ordenado.

## **5. RESTRICCIONES**

- 5.1.- No se realizará el trabajo si existe un peligro de alto riesgo.
- 5.2.- No se realizará el trabajo si no se cuenta con el EPP adecuado.

### ANEXO 3: Fotos



Foto 1: Sacos de carbón reactivado FOTOGRAFIA



Foto 2: Sacos de carbón reactivado listos para el muestreo





Foto 3: Muestreo de carbón reactivado



Foto 4: Carbón homogenizado para el cuarteo de carbón reactivado



Foto 5: Cuarteo del carbón reactivado



Foto 6: Pruebas en botellas