

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
Y MANUFACTURERA



ESTUDIO TECNICO EXPERIMENTAL DE LA
DESORCION DEL CARBON ACTIVADO
CARGADO DE ORO

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO QUIMICO

YONY JULIA NAVARRO CORNEJO
MARIA DEL PILAR JOSEFINA SALERNO GONZALEZ

LIMA - PERU

1994

I N D I C E

INTRODUCCION	6
RESUMEN	8
I. GENERALIDADES	11
1.1 El oro: metal precioso	11
1.2 Perú : país aurífero	17
II. PROCESOS METALURGICOS EN LA RECUPERACION DE ORO DE MINERALES	22
2.1 Introducción	22
2.2 Tratamiento metalúrgico de los minerales de oro	22
2.2.1 Concentración gravimétrica	24
2.2.2 Amalgamación	24
2.2.3 Flotación	25
2.2.4 Cianuración	26
2.2.5 Biohidrometalurgia	28
2.3 Cianuración	29
2.3.1 Variables que afectan la cianuración	31
2.3.2 Métodos de cianuración	34
2.4 Tecnologías de recuperación de oro de las soluciones cianuradas	36
2.4.1 Cementación con zinc	38

2.4.2 Adsorción con carbón activado	40
2.4.3 Intercambio iónico	51
2.4.4 Electrodeposición	55
III. RECUPERACION DE ORO CON CARBON ACTIVADO	64
3.1 Introducción	64
3.2 Carbón activado	65
3.2.1 Estructura y caracterización	66
3.2.2 Propiedades adsorbitivas	73
3.2.3 Manufactura del carbón activado	75
3.3 Adsorción	93
3.3.1 Mecanismos de adsorción	94
3.3.2 Factores que afectan la capacidad de adsorción	96
3.4 Desorción	104
3.4.1 Efectos físicos y químicos	105
3.4.2 Métodos de desorción	112
3.4.2.1 Proceso Zadra	113
3.4.2.2 Proceso AARL	116
3.4.2.3 Desorción Oroánica	120
3.4.3 Equipos	122
3.5 Electrodeposición	127
3.6 Envenenamiento oroánico	129
3.7 Regeneración o reactivación del carbón activado.	130

IV. ESTUDIO EXPERIMENTAL	133
4.1 Generalidades	133
4.2 Procedimiento experimental	134
4.2.1 Descripción	134
4.2.2 Equipo experimental	137
4.2.3 Materiales y productos usados	144
4.3 Efecto de las principales variables	149
4.3.1 Efecto de la temperatura	150
4.3.2 Efecto en la composición de la solución desorbedora.	151
4.3.2.1 Efecto en la variación de la concentración de cianuro	151
4.3.2.2 Efecto en la variación de la concentración de NaOH	157
4.3.2.3 Efecto en la variación de la concentración de alcohol	163
4.3.3 Efecto de la razón de flujo en el proceso	174
4.4 Discusión de los resultados	175
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	186
BIBLIOGRAFIA	193
ANEXO	
GLOSARIO	

INTRODUCCION

El objetivo de este estudio técnico experimental es el estudio de los efectos de las variables más importantes que intervienen en el proceso de desorción del carbón activado cargado de oro.

Las variables estudiadas son la temperatura del proceso, la composición de la solución desorbedora, es decir el porcentaje de cianuro, soda y alcohol, así como el caudal de la misma.

En los primeros capítulos se presenta información actualizada de los diferentes procesos metalúrgicos para la recuperación de metales preciosos de los minerales.

La parte experimental está basada en la desorción orgánica del carbón activado, la cual se lleva a cabo en una columna donde se coloca el carbón cargado con el metal precioso y se hace pasar en sentido ascendente una solución cianurada alcohólica alcalina a presión atmosférica y a alta temperatura. La aplicación del estudio de las variables que afectan este proceso servirá para incrementar la eficiencia del mismo.

El estudio fue realizado con el apoyo y financiamiento de la empresa Finesse S.A. siendo la información obtenida

utilizada para la implementación del área de desorción del carbón activado cargado de oro de dicha empresa. la misma que presta servicios a diferentes compañías mineras.

Se presenta este trabajo como un aporte a la recuperación tecnificada y eficiente del oro del carbón activado cargado con este valor. La aplicación de los avances en la metalurgia del oro y plata son de gran importancia para el desarrollo de nuestra minería aurífera. permitiéndose así el tratamiento de yacimientos cuya explotación se consideraba antes antieconómica.

RESUMEN

El oro se ha empleado desde tiempos muy lejanos como una reserva de valor y es considerado como un metal precioso debido a varias razones. Una de ellas es que se le considera como dinero y producto.

El primer capítulo presenta un enfoque general del oro y su importancia en el mundo y en el Perú. El Perú posee recursos minerales variables y extensos, en todo el país se localizan 25 puntos auríferos bien conocidos esperando una adecuada explotación.

En el capítulo II se describen los métodos de tratamiento más frecuentemente usados en la minería aurífera: como son la concentración gravimétrica, la amalgamación, la flotación y la cianuración. La biometalurgia también se viene utilizando en algunos procesos extractivos.

La cianuración es el proceso más usado y eficiente para la lixiviación del oro que utiliza la propiedad de disolverse en soluciones cianuradas diluidas de sodio y potasio, en presencia de oxígeno, formando iones complejos disueltos en soluciones alcalinas.

Para la recuperación del oro de las soluciones cianuradas se emplean diferentes tecnologías, siendo las más importantes la cementación con polvo de zinc, adsorción

con carbón activado, intercambio iónico y la electrodeposición. El uso del carbón activado permite trabajar diferentes tipos de minerales de la más amplia variedad de leyes y volúmenes, lo que ha conllevado a una creciente popularidad y difusión de este método.

En el capítulo III se desarrolla la tecnología de la recuperación del oro con carbón activado. El carbón activado es una sustancia constituida por cadenas de hidrocarburos similar a la estructura del grafito, el cual ha sido procesado para desarrollar una gran porosidad interna. El fenómeno de la adsorción consiste en la captación de moléculas de la fase líquida (solución lixiviada) en la superficie de un sólido (carbón activado).

La tecnología de la recuperación del oro de soluciones cianuradas usando carbón activado consiste en adsorber o cargar el oro en el carbón para luego desorberlo obteniendo una solución rica y limpia. Esta puede pasarse a través de celdas electrolíticas para la electrodeposición de los metales en cátodos de lana de acero, los que luego son fundidos y refinados.

La desorción, proceso inverso de la adsorción, dependerá del control de las condiciones que reducen la capacidad de carga del carbón, como la temperatura, fuerza iónica, concentración de cianuro y presencia de solventes orgánicos entre los más importantes.

La eficiencia de un proceso con carbón activado depende de su actividad, la que va perdiendo durante el proceso de adsorción: motivo por el cual se reactiva o reenergiza dicha capacidad de adsorción.

En el capítulo IV presentamos los resultados del estudio experimental realizado: desorción orgánica. Se hace una descripción de los materiales y equipos usados. Luego se presenta el procedimiento experimental y los resultados obtenidos.

Las variables estudiadas fueron la temperatura, composición de la solución desorbedora (NaCN, NaOH y C₂H₅OH) y razón de flujo del proceso. Finalmente presentamos la discusión de dichos resultados para su efectiva aplicación en procesos de la industria.

Entre los resultados más importantes tenemos que el incremento de la temperatura favorece la desorción de oro del carbón activado: el uso de etanol en la solución desorbedora favorece la eficiencia de la desorción. Las concentraciones de la soda y cianuro no tienen gran incidencia en la eficiencia de la desorción si se los compara con los efectos de la temperatura.

Se alcanzó una desorción completa (97.4% a nivel industrial) en 8 horas 20 minutos usando una solución desorbedora con 0.1% de NaCN, 2% de NaOH y 20% de C₂H₅OH.

GENERALIDADES

1.1 El oro: metal precioso

Los Fenicios son reconocidos como los primeros en utilizar la moneda como medio de cambio. pero el oro y la plata se emplearon desde los albores de la historia como reserva de valor y desde entonces. la humanidad los ha reconocido como receptáculo de riqueza.

Es interesante porqué el oro. junto con la plata y recientemente el platino. fue y es un metal precioso y no así el hierro. el cobre o el plomo. o tantos otros metales que se encuentran en la naturaleza. Varias razones explican este hecho.

Autoridades reconocidas en el mundo del oro. (como el Señor Roberto Guy). (48) observaron recientemente que el oro es al mismo tiempo dinero y producto. La palabra en inglés es "commodity". una combinación de características que encontramos solamente en el oro.

Cuando el oro se percibe como dinero actúa de una manera y cuando es visto como producto actúa de otra.

Como se podría esperar, el potencial de confusión es evidente.

Analizaremos el caso del oro como dinero. El dinero es el denominador común de todas las transacciones económicas. es el producto que sirve como un medio de intercambio que es aceptado universalmente como un patrón de valor de mercado y es una reserva de valor. A fin de que un producto reúna todas estas condiciones: primero. debe ser durable (lo cual elimina productos como el trigo y maíz); debe tener un valor de mercado alto y debe ser fácilmente portable (lo cual elimina productos como metales básicos) y debe ser homogéneo y divisible (lo cual elimina productos como joyas preciosas).

Respecto al oro se puede afirmar que sus propiedades químicas lo hacen inerte a la acción del aire y del agua. por lo cual no se oxida ni lo atacan los agentes químicos. como sucede con los otros metales y por esta razón. se puede guardar indefinidamente sin temor a que se deteriore. Sus propiedades físicas permiten que se le corte con facilidad. se le pulverice y se le vuelva a fundir. Así. un lingote de diez onzas de oro vale igual que dos lingotes de cinco onzas e igual que diez onzas de oro en polvo. Esto no sucede con otros materiales valiosos. pues un

diamante de un kilate no vale igual a dos de medio kilate. ni al mismo diamante si está fracturado.

Las propiedades fisico-químicas del oro permiten que su metalurgia sea sencilla. pues éste se puede extraer con facilidad de los minerales auríferos. mientras otros metales. como el aluminio o el tungsteno. requieren de instalaciones complicadas para extraerlos.

En resumen. el oro es durable. portable. homogéneo y por lo tanto posee ventajas significativas sobre todos los otros medios de intercambio. (43)

La historia del oro es fascinante en cuanto al rol que ha desempeñado en el sistema monetario mundial por miles de años. El oro ha sido una de las formas más antiguas de protección financiera y las monedas bullón de oro son preferidas por muchos inversionistas porque pueden ser adquiridas en unidades menores a las barras tradicionales: porque son de "curso legal" en el país de origen y porque el contenido fino está garantizado por el país que las emite. Aunque el valor nominal de las monedas bullón no representa su verdadero valor. puesto que éste depende del contenido en fino. representa el mínimo redimible en caso de una caída catastrófica de los precios.

En la actualidad existen una gran variedad de mo-

nedas bullón de oro: El águila americana, el Maple Leaf de Canadá, el Panda de China, el Nugget de Australia y la Britannia del Reino Unido, entre los más populares. Todas tienen una onza troy de oro fino, son de curso legal y tienen un precio bajo. Una ventaja estas monedas es que es posible comprarlas en denominaciones fraccionarias, abriendo las puertas de las inversiones en metales preciosos a los pequeños ahorristas. (52)

La expectativa del oro como dinero es que sea una reserva de valor a través del tiempo, que mantenga su poder comprador; sin embargo, a corto plazo, el oro frecuentemente se comporta tan erráticamente como otros productos, desafiando los esfuerzos de los técnicos y de los fundamentalistas de encuadrarlo en una caja predecible. Pero si se analiza las expectativas a largo plazo del oro como producto, no hay duda de que la confusión persiste.

Tradicionalmente existen cuatro categorías básicas en la demanda de oro: joyería; uso industrial (electrónica, aeroespacio); inversiones privadas y sector oficial (bancos centrales). Este último puede también a veces contribuir a la oferta cuando bancos centrales son vendedores netos de oro, como fue el caso del año 99. Los bancos centrales poseen actualmente 36% de las 100.000 toneladas de oro que se estima han si-

do extraídas en toda la historia del hombre. La mayor parte del oro de los bancos centrales fue acumulada cuando el oro integraba todavía el sistema monetario. antes del colapso del acuerdo de Breton-Woods en agosto del año 71: el 10% del stock de metal de oro se ha destinado para uso industrial o se ha perdido y 24% ha sido absorbido como inversión privada.

La joyería representa el saldo de 30% del total del oro externo que existe en el mundo. La demanda tradicional de oro ha pasado por un cambio radical en los últimos años ya que la joyería ha reemplazado a los bancos centrales como principal consumidora. Una vez más. parte de la explicación es atribuible a las diferencias entre el oro dinero (bancos centrales) y el oro producto (joyería).

El aumento en la demanda de la joyería es sustentado por tres factores principales:

1. Una mayor prosperidad. principalmente en los países del Lejano Oriente: Taiwán, Corea, Japón, son hoy día grandes consumidores de oro.
2. La tendencia a la liberalización de mercados tales como Turquía y la India y
3. El aumento en el mundo de mujeres trabajando y la capacidad de influenciarlas para que compren oro joyería para sí mismas. No se anticipa que la demanda en joyería pueda revertirse a sus niveles

antiguos una vez que la mayor parte de esa demanda viene de fuentes totalmente nuevas. (1. 48)

Dentro de este panorama de incrementos masivos en la oferta y demanda de oro las proyecciones independientes para los próximos años son prácticamente unánimes en predecir enfáticamente el fin a la tendencia de crecimiento en la producción de oro. Esta empezó a frenarse en el '93 y hubo un declive gradual. Las razones para esta reducción en la producción después de una década de rápida expansión incluyen, pero no están limitadas, a la caída en el precio real del oro, hecho que no solamente ejerció presión al cierre de las minas marginales sino que, aún más importante, desestimuló la exploración y la apertura de nuevas minas. Este año (1.994) el precio del metal precioso se mantiene firme en el mercado con clara tendencia alcista. El precio del oro, luego de empezar mayo (1.994) fue de 375 USA \$/onza, continuó ascendiendo hasta llegar a 387 USA \$/onza a fines del mes, luego en junio estuvo sobre los 380 USA \$/onza. Llegó hasta los 392 USA \$/onza durante la cuarta semana y en la actualidad se mantiene alrededor de 387 USA \$/onza. (64. 59)

El precio del oro así como de los metales en general, se encuentra influenciado por factores que corresponden tanto a conceptos de comportamiento de

mercado como a ingredientes de carácter económico, financiero, político, tecnológico, estacional y especulativo. Para resumir, los fundamentos de oferta y demanda son más balanceados en esta década de acuerdo con los niveles promedio de demanda de inversión los precios deberían mejorar.

1.2 Perú : país aurífero

El Perú se encuentra actualmente en una serie de cambios políticos y económicos dedicados a estabilizar y reformar su economía.

El sector minero, sostén principal de la economía nacional aporta cerca del 12% del producto nacional total y cerca del 50% del valor de las exportaciones. La industria minera encara serios desafíos: el tipo de cambio que conlleva a la elevación de costos, perspectivas inciertas en los precios internacionales de algunas mercancías y los efectos acumulativos de altos impuestos e inversiones insuficientes. Todo esto da como resultado la incapacidad de consolidar nuevos proyectos de capital.

Para superar estas dificultades el gobierno ha declarado ser de interés público el promover la inversión privada en la minería. El programa estructural de reforma ya iniciado incluye la privatización de

muchas grandes empresas controladas por el estado, entre ellas las del sector minero y energético.

Los recursos geológicos del Perú lo mantienen a la vanguardia de los productores mineros del mundo, a pesar de los problemas de estos años. Sus recursos minerales son variables y extensos. Estas reservas podrán mantener a la minería con niveles altos de producción hasta la próxima centuria. (67, 62)

Actualmente se está invirtiendo en las diferentes empresas mineras ya que todo el Perú, en su integridad geográfica, orográfica e hidrográfica es un filón de oro. Lo que falta es su adecuada explotación. La decisión inversionista en nuestra minería aurífera quedó mucho más afianzada al término del I Simposium Internacional del Oro realizado en Lima en el que quedó claro que el Perú ofrece un incuestionable potencial para las grandes inversiones nacionales y extranjeras.

La metalogenia del oro es muy variada y por sus propiedades químicas se halla en la naturaleza en estado nativo. Hay tres tipos clásicos de yacimientos auríferos: a) filoneanos, b) aluviales o en placeros y c) como subproducto o co-producto.

En el Perú se localizan, 25 puntos auríferos bien conocidos y correspondientes a las diferentes re-

ciones del país. El oro aluvial se extrae de 10 ríos, donde hay lavaderos. Ellos son: el Madre de Dios, en toda su extensión, incluyendo más allá de la frontera con Brasil; y en los ríos Huallaga, Pachitea, Marañón, Santiago, Chinchipe, Ceneba, Puyango y Chuquicara-Santa. San Antonio de Poto también es un depósito detrítico-aluvional.

En la Cordillera Oriental hay dos centros auríferos principales: Pataz y Buidibuyo. En la franja volcánica terciaria, figuran Huampar y Orcopampa; en la franja sedimentaria mesozoico están los yacimientos auríferos Hualgayoc, Algamarca, Cabana-Pallasca, Yanaico, Tumpa, Sucahualla y Utupara. Y en el batolito, Ocoña, Calpa, Suniwilca y León.

El material aurífero depositado en los ríos peruanos y hasta en el mar es muy fino y está generalmente asociado a minerales pesados como la magnetita, hematita, ilmenita, rutilo y otros. En la franja Nazca-Ocoña hay numerosos depósitos de cobre con contenido de oro. Pero mayormente existen minas y prospectos de este metal precioso en las provincias de Palpa y Nazca en Ica, Lucanas y Parinacochas en Ayacucho, Caraveli y Condesuyos en Arequipa.

Se estima que el área aproximada de esta franja ocupa una superficie de 350 kilómetros de largo por 40

kilómetros de ancho y su altitud sobre el nivel del mar varia entre 600 y 3 mil metros.

Los yacimientos más importantes de oro filoneo se encuentran en los departamentos de Ica, Arequipa y Ayacucho. En Arequipa se estima que hay por lo menos 50 minas de oro en las provincias de La Unión, Condesuyos y Caylloma. Hubo el proyecto de rehabilitar la antigua mina Mishki, a 70 kilómetros al Sur-Este de Camaná.

La inercia aurífera, a pesar del valor del metal, ha ocasionado la falta de operatividad en las minas costeñas como Chabuca, Eugenia, Capitana y Alpacay, en Arequipa: Los Incas y Sol de Oro, en Ica: Suramarca y San Luis, en las alturas ayacuchanas. También cabe citar las zonas auríferas de La Libertad y Parcoy: Cochasayhuas en Apurímac y Santo Domingo en Puno.

En la mayoría de los yacimientos filoneos y en los complejos de plomo-zinc-plata hay importantes concentraciones de oro, inclusive en la superficie. Asimismo en los yacimientos de cobre porfirítico, Toquepala y Cuajone destacan por esto.

Aparte de los lavaderos citados, hay oro en los ríos Tabacones y Chirinos, en Cajamarca; Numpakay en Amazonas, Chira en Piura, La leche en Lambayeque, Za-

ña en La Libertad y Santa en Ancash. (41)

Como podemos ver, la comprobada riqueza aurífera de nuestro país merece la confianza y atención de los inversionistas. En el I Simposium Internacional del Oro se puso en evidencia que las 50 toneladas de oro (al año) que produce ahora el Perú, pueden llegar fácilmente a las 100 toneladas dentro de cuatro años. Para el primer quinquenio del cercano próximo siglo la producción de oro se estima que fluctue entre 300 a 400 toneladas si se amplía la inversión esperada. (59. 64)

II

PROCESOS METALURGICOS EN LA RECUPERACION DE ORO DE MINERALES

2.1 Introducción

El oro ha sido importante como metal precioso desde tiempos remotos. Sin embargo, el interés de su explotación ha experimentado un considerable aumento a raíz de la liberación de su precio en 1968. Desde entonces, las técnicas de su extracción y tratamiento han avanzado notablemente, renovándose antiguas instalaciones e iniciándose nuevas operaciones con los últimos adelantos. (19)

2.2 Tratamiento metalúrgico de los minerales de oro

La selección del procedimiento de tratamiento se hace a partir de sus propiedades físicas y químicas, su granulometría, su asociación con otros minerales, y el tipo de ganga acompañante.

Ya que casi todo el oro hallado en la naturaleza se encuentra aleado con plata y siendo así que la plata tiene propiedades similares a las del oro, tien

de a seguir los mismos procesos de recuperación que el oro.

Las propiedades más importantes del oro con respecto a su recuperación son:

Su alto peso específico (Specific-Gravity 15.3 a 19.3) en comparación con los minerales de ganga que los acompañan.

Su permeabilidad por el mercurio en el agua.

solubilidad en las soluciones diluidas de cianuros alcalinos. (71)

Por lo tanto. la concentración gravimétrica, la amaloamación y la cianuración de los minerales triturados y molidos constituyen los métodos de tratamiento usados más frecuentemente en la minería aurífera.

Sin embargo. debido a que una proporción significativa del oro se puede encontrar asociada a los sulfuros. se ha incorporado la flotación para poder producir concentrados de sulfuros auríferos de mejor ley. (68)

La biohidrometalurgia también se viene utilizando en algunos procesos extractivos.

Estas técnicas son detalladas a continuación.

2.2.1 Concentración gravimétrica

Es considerado como el método más antiguo usado por el hombre para la obtención del oro.

Un gran número de plantas de tratamiento de oro incorporan en su circuito una o más etapas de concentración gravimétrica para poder recuperar las partículas gruesas de los minerales auríferos liberados. Hoy cobra vigencia este tratamiento como etapa previa o complementaria de los otros procesos más extendidos, como son la flotación y lixiviación.

Los concentrados obtenidos por gravimetría se pueden tratar por amalgamación, cianuración, o se llevan a fundición directamente. (21. 19)

2.2.2 Amalgamación

Es también un método conocido desde hace mucho tiempo y se ha venido utilizando en la obtención del oro, sólo, o como método complementario del tratamiento por concentración gravimétrica.

El mecanismo de la amalgamación todavía no se conoce con certeza. La afirmación que el mercurio disuelve al oro es un error que se ha mantenido por siglos en la literatura científica. La solubilidad

del oro en el mercurio es baja, 0.13% a 20°C. (18)

La amaloamación para algunos autores no es un efecto de disolución del oro en el mercurio, sino un efecto de mojado o reacciones superficiales entre los dos elementos.

Su técnica se basa en la menor tensión superficial de la interfase oro-mercurio respecto a la de oro-agua, favoreciéndose la combinación de los dos metales en lo que se denomina una "amaloama". En la mezcla se puede observar una solución líquida del oro en el mercurio (0.1%), compuestos metálicos, o bien partículas de oro sólido entrampado en los compuestos. (71, 68)

El equipo más usual es la barrica de amaloama, en la cual los concentrados son rodados con agua, bolas de acero y mercurio.

2.2.3 Flotación

El oro, por sus propiedades hidrofóbicas, puede ser flotado, es decir que puede comportarse como un sulfuro. Este método se aplica para concentrar el oro y los sulfuros asociados al elemento valioso. Luego son tratados por amalgamación, cianuración o por tostación-cianuración.

La ventaja principal de la flotación en el caso del oro, es reducir la cantidad de material que luego va a ser tratado por otros métodos tales como la tostación, la cual sería muy costosa si se aplicara a todo el mineral evaluado.

Los reactivos utilizados son los convencionales para los sulfuros (xantatos, ditiofosfatos, DINO, silicatos). El pH se mantiene entre 7 y 10 con carbonato sódico o sosa. Como activadores se agregan sulfato cúprico, SO_2 e hiposulfito.

2.2.4 Cianuración

El oro puede ser disuelto o lixiviado por soluciones diluidas de una serie de reactivos como cianuros, tiosulfatos, tiourea, etc., a partir de las cuales puede ser recuperado con polvo de zinc, carbón activado o electrólisis.

La lixiviación es el único sistema aplicable cuando los procesos de gravimetría o flotación no resultan rentables en razón a la granulometría demasiado fina o por la baja ley del mineral. La lixiviación con cianuro o cianuración data de hace unos 100 años y ha sufrido constantes innovaciones. Es un método estable y simple, capaz de tratar diversos minerales con sólo ciertas adaptacio-

nes específicas.

La cianuración se basa en el hecho de que el oro nativo, la plata y los telurios de Au-Ag son solubles en una solución débil de cianuro de sodio o potasio.

La reacción química que rige la solubilidad del oro durante la cianuración es la siguiente:



Esta reacción denota la necesidad de oxígeno, que puede producirse simplemente por borboteo de aire en la pulpa durante la lixiviación. El ataque se produce en medio alcalino (pH = 9 a 12) para evitar la transformación de los cianuros (por hidrólisis) en ácido cianhídrico (HCN) gaseoso, de carácter tóxico. Esto se consigue con 0.5 a 1 kg de cal o soda cáustica por tonelada tratada. (68)

Actualmente se están probando otros disolventes como es la tiourea, que puede lixiviar el oro 10 veces más rápido que el cianuro y es menos afectada por otros iones presentes, pero de momento resulta más caro. Además se degrada por oxidación, y da problemas en la recuperación con carbón activado. El tiosulfato amónico y el malononitrilo tienen también posibilidades como agentes de lixi-

viación.

Dado que la cianuración sigue siendo el proceso más usado y eficiente para la lixiviación de metales preciosos y siendo un paso previo al proceso de desorción, tema de esta tesis, será tratada en el punto 2.3.

2.2.5 Biohidrometalurgia

Este proceso consiste en tratar una sustancia compleja (sulfuros o compuestos de fierro) con un disolvente, en este caso bacteriano, que permita obtener la parte soluble de ella.

Se utiliza principalmente la bacteria *Thiobacillus Ferroxidans*. Esta bacteria obtiene energía para su crecimiento de la oxidación del fierro y azufre, liberando de este modo los metales preciosos encapsulados por los sulfuros. Precisa de oxígeno del aire y monóxido de carbono para su crecimiento celular. Los fosfatos, sales de amonio, sulfatos ferrosos y de Magnesio son nutrientes necesarios para este tipo de bacterias. (20)

Los trabajos experimentales (68) arrojan ventajas al proceso combinado de biolixiviación en pilas de sulfuros, seguida de cianuración directa al obtenerse una recuperación global del oro de 52.2%:

contra los procesos de cianuración directa y thioureación directa, que arrojaron 8.72 y 5.04% respectivamente. (73)

Este proceso es valorado por su casi nula contaminación del medio ambiente, bajo costo de operación y porque permite el tratamiento de materiales refractarios con los métodos convencionales. Además, esta operación se puede realizar a temperatura y presión ambiental. (29.54)

2.3 Cianuración

Es un proceso de lixiviación que utiliza la propiedad del oro de disolverse en soluciones diluidas de cianuro de sodio o potasio en presencia de oxígeno, formando iones complejos y disueltos en soluciones alcalinas.

En la disolución del oro por cianuración: el mineral molido es agitado con una solución diluida alcalina en presencia de aire, normalmente por períodos entre 16 y 40 ó más horas, dependiendo de la ley de cabeza, el tamaño del grano y el tipo de mineral. (68)

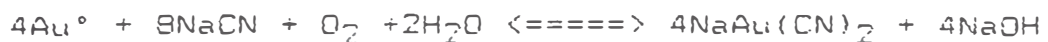
El cianuro de sodio se descompone al contacto con ácidos siendo así que las soluciones de lixiviación

tienen que ser alcalinas. A esto se le llama protección alcalina y se obtiene generalmente con la adición de cal u ocasionalmente de hidróxido de sodio.

El cianuro es altamente tóxico y se tienen que tomar precauciones extremas en las plantas con la creciente importancia que se da a toda posibilidad de contaminación ambiental. (71)

Hay controversia sobre la naturaleza precisa de la reacción. Muchas teorías han sido desarrolladas para explicar la disolución del oro y plata por el cianuro.

En 1843, L. Elsner (65) propuso una reacción, la cual es generalmente aceptada para definir la disolución del oro :



Algunos minerales o sus productos de descomposición pueden reaccionar con el cianuro causando un excesivo consumo del citado reactivo (cianicidas) o pueden reaccionar con el oxígeno de la solución de cianuro y desde luego reducir la velocidad de disolución de los minerales de oro.

2.3.1 Variables que afectan la cianuración

Entre las principales variables que afectan la cianuración, describiremos las siguientes:

Efecto del tamaño de la partícula en la velocidad de disolución del oro.

Cuando se presenta oro grueso libre en la mena, la práctica generalizada es recuperarlo por medio de concentración gravimétrica, trampas, etc., antes de la cianuración, ya que las partículas gruesas podrían no disolverse en el tiempo disponible de cianuración.

Bajo condiciones consideradas ideales con respecto a la aereación y agitación, Barsky encontró que la velocidad máxima de disolución del oro llega a ser de 3.25 mg/cm²/hora. (54)

Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de disolución del oro

La velocidad de disolución del oro aumenta rápidamente con la concentración de cianuro hasta alcanzar un máximo. Por encima de este punto hay una ligera disminución en la disolución y más bien aumenta el consumo de cianuro debido a que las impurezas son atacadas con mayor intensidad.

Barsky, Swainson y Hedley comprobaron que concentración de la solución para una rápida disolución de oro es de 0.05% de Na CN. (54)

Efecto del oxígeno sobre la disolución del oro

El uso de oxígeno o un agente oxidante es esencial para la disolución del oro bajo condiciones normales de cianuración. Los agentes oxidantes, tales como el permanganato de potasio, peróxido de sodio, bromo y cloro fueron usados en el pasado con relativo éxito pero, debido al costo de estos reactivos y las complicaciones que su uso implicaba, no se utilizan en la actualidad.

Efecto de la alcalinidad

En el proceso de cianuración se mantiene un determinado nivel de alcalinidad (pH 9 a 12 para minerales auríferos) con ayuda de diversos álcalis, entre los cuales la cal hidratada es la más usada por su bajo costo y fácil manipulación.

La cantidad de cal que se añade, expresada en términos de kilogramos de óxido de calcio por tonelada de mena tratada, se llama "alcalinidad protectora". Aunque un exceso de cal protege al cianuro de sodio de la hidrólisis, si está presente en grandes cantidades puede retrasar la velocidad de

disolución del oro. especialmente si se trata de menas sulfurosas. Por tanto, la alcalinidad debe ser cuidadosamente controlada, y en general, es mejor mantener en un punto lo más bajo posible para lograr una buena recuperación.

Efecto de la temperatura

Cuando se aplica calor a una solución de cianuro que contiene oro metálico, dos factores opuestos influyen en la velocidad de disolución. El aumento de la temperatura agiliza la actividad de la solución y consiguientemente acelera la velocidad de disolución del oro. Al mismo tiempo, la cantidad de oxígeno en la solución disminuye porque la solubilidad de los gases decrece con el aumento de la temperatura.

En la práctica el uso de soluciones calientes para la extracción del oro de una mena tiene muchas desventajas, tales como el costo de calentamiento de la pulpa, el aumento de la descomposición del cianuro debido al calor y el consumo excesivo de cianuro a causa de la reacción acelerada entre los cianocidos de la mena (sulfuros de cobre, de hierro, etc.) y el cianuro. (54)

2.3.2 Métodos de cianuración

Muchas son las maneras de efectuar el contacto entre el oro y la solución de cianuro, siendo ellas variantes de los siguientes métodos:

- Lixiviación por agitación

La lixiviación por agitación de la pulpa es el método más corriente usado hoy en día para la recuperación del oro.

En este proceso la pulpa consiste en una suspensión de solución de cianuro a través de la cual se hace pasar mineral de oro (previa molienda) con perfusión permanente de aire u oxígeno en agitadores mecánicos o en "pachucas". (68. 65)

- Lixiviación por percolación

La lixiviación por percolación o filtraje puede realizarse de las siguientes formas:

. Lixiviación en tinajas (ovats-leaching)

Se realiza con mineral triturado o arenas de mineral. Este se deposita en pozas o tanques, recubriéndose con solución de cianuro. Para luego de un determinado tiempo proceder a la recuperación de oro de la solución enriquecida.

. Lixiviación en pilas (heap-leaching)

La lixiviación en pilas ha crecido en popularidad debido al ahorro de capital en las etapas más costosas: molienda, agitación, separación sólido-líquido y clarificación de plantas convencionales. Sin embargo el heap-leaching tiene ciertas desventajas, como una relativamente baja recuperación de valores metálicos un 75% de extracción de oro y 50-60% de recuperación de plata es considerado como excelente, por lo que su aplicabilidad es básicamente para minerales de baja ley, 0.1 onz/TC. (71, 28).
Fig. 2.1

pila es roceada con solución diluida de cianuro por medio de aspersores. Esta solución percola a través del mineral apilado disolviendo el oro, que es recuperado de la solución rica (pregnant) la cual va a un pozo de recolección. De allí se envía a la planta de recuperación (con zinc en polvo o columnas de carbón activado).

. Lixiviación en montones (dump-leaching)

Se aplica a desmontes antiguos si el material tiene cierta porosidad y si se encuentra depositado sobre terreno impermeable. Es una

operación muy económica y aunque la recuperación general puede ser baja, puede justificarse para el tratamiento de arenas y de residuos de mina que ni siquiera serían tratados. (68. 11)

No se efectúa ninguna preparación especial del mineral ni del piso. (Fig. 2.2)

. Lixiviación In-situ (insitu leaching)

Aplicable para minerales oxidados con cierta porosidad y si las condiciones locales lo permiten (piso impermeable). (71. 68. 65)

2.4 Tecnologías de recuperación de oro de las soluciones cianuradas

La aplicación de los últimos avances en la metalurgia del oro y la plata podrían ser de gran importancia para el desarrollo de nuestra minería aurífera, ya que estos métodos permitirían el tratamiento de yacimientos cuya explotación se consideraba anti-económica. Además, sería económicamente factible la recuperación de oro y plata contenidos en los relaves de explotaciones antiguas. (9)

De la solución lixiviada resultante, se recupera el oro y la plata usando los siguientes procesos:

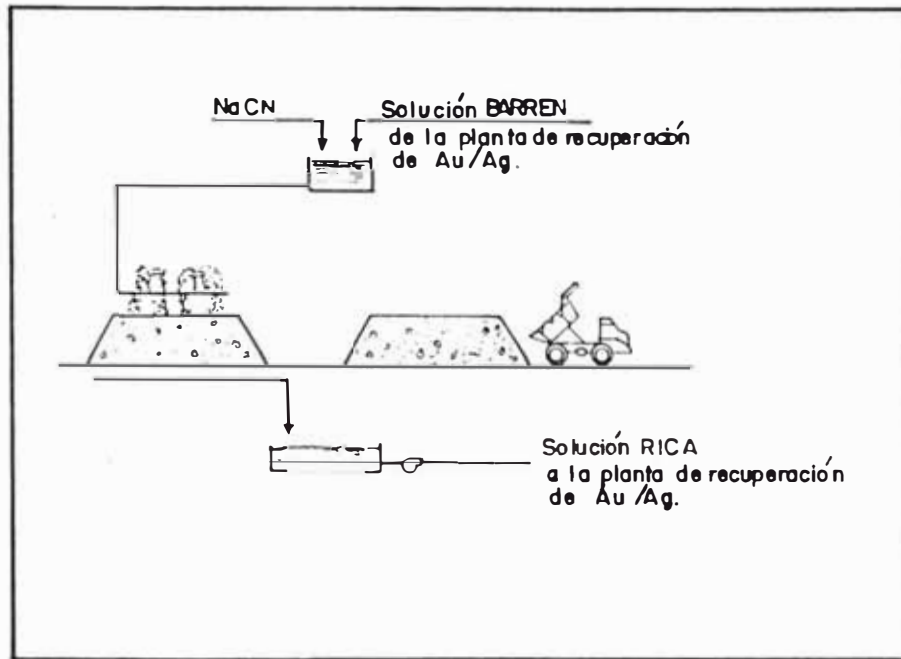


FIG. 2.1 ESQUEMA DEL PROCESO DE LIXIVIACION EN PILAS (HEAP LEACHING).

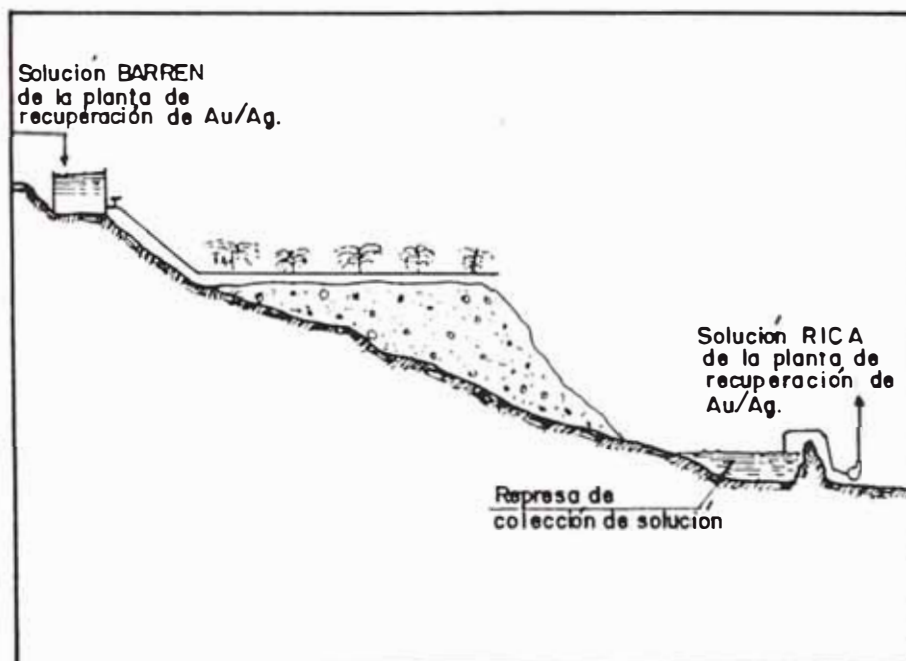


FIG. 2.2 ESQUEMA DEL PROCESO DE LIXIVIACION EN MONTONES (DUMP LEACHING).

Cementación con polvo de zinc.

Adsorción con carbón activado.

Intercambio Iónico.

Electrodeposición.

En la Fig. 2.3 se muestra el proceso de los minerales de oro su tratamiento con cianuro y las alternativas para la recuperación final del metal.

2.4.1 Precipitación o cementación con zinc en polvo

(Proceso Merrill-Crowe)

Este proceso aplicado a soluciones cianuradas clarificadas (menos de 1 ppm de sólidos en suspensión) está basado en el hecho de que el oro al ser recuperado de la solución es más noble que el zinc (el oro se encuentra en el extremo opuesto al zinc en la serie electromotriz). Siendo por lo tanto desplazado electroquímicamente por este último de las soluciones cianuradas.

La operación se lleva a cabo bajo condiciones reducidas (deaireación seguida por adición de zinc en polvo) y a pH 10 tal que los iones cianurados de zinc son las especies estables en solución. La deaireación en las soluciones a menos de 1 ppm de oxígeno reduce significativamente el consumo de zinc, pues el oxígeno en presencia de cianuro libre

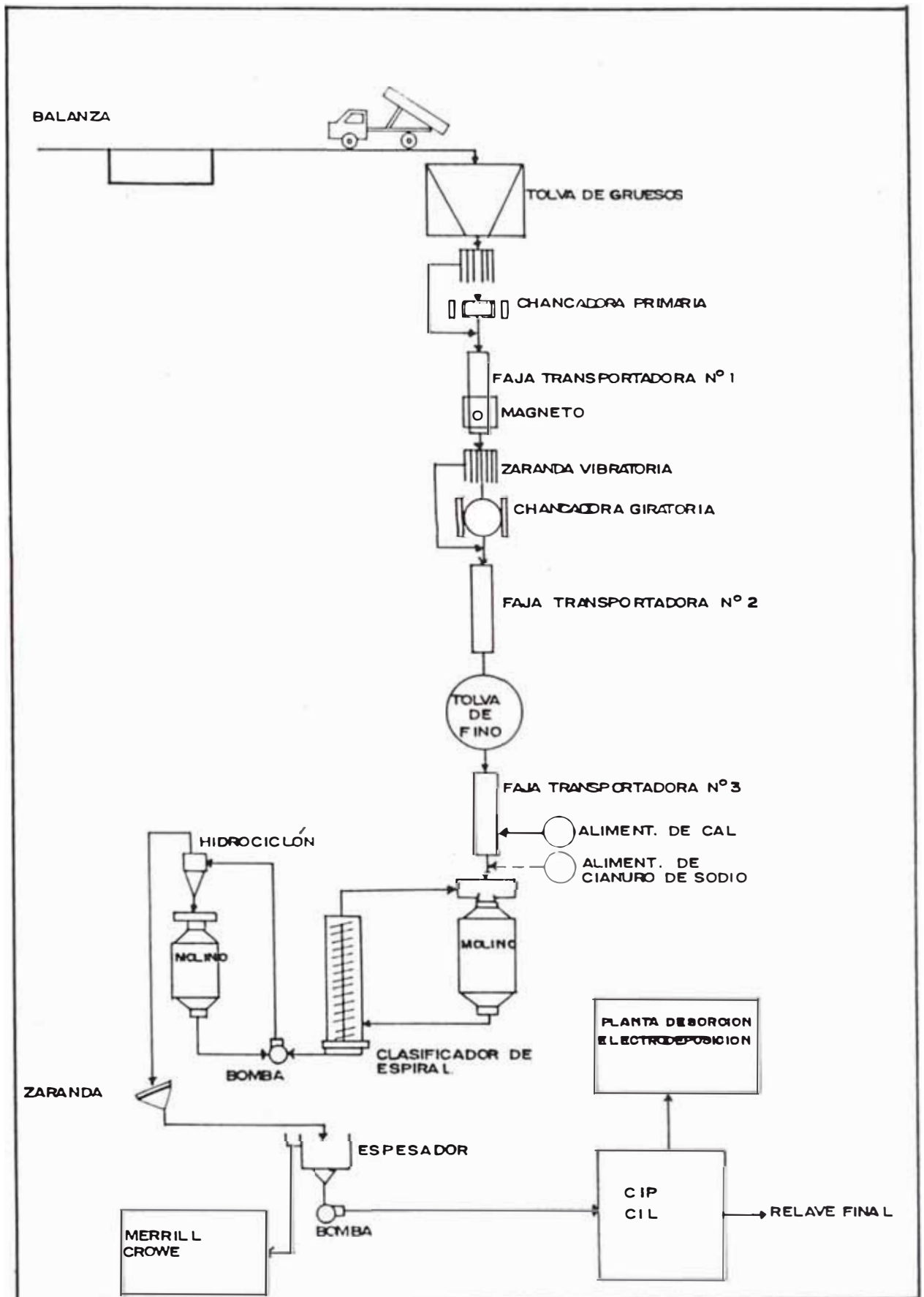


FIG. 2.3 TRATAMIENTO DE LOS MINERALES DE ORO Y PLATA CON CIANURO Y ALGUNAS TECNOLOGIAS PARA LA RECUPERACION DE LAS SOLUCIONES GENERADAS.

redisuelve el oro precipitado disminuyendo la eficiencia hasta en un 50%.

Otras mejoras importantes fueron hechas para incrementar la eficiencia del proceso. La adición de algunas sales de plomo en cantidades controladas (relación 1/30) para producir una aleación plomo-zinc en la superficie de las partículas de zinc que inhibe la pasivación de dichas superficies, permite la deposición continua de oro.

Dada su simplicidad y química, el proceso Merrill-Crowe ha sido usado a través del mundo para la recuperación de Au y Ag de todo tipo de minerales. Sin embargo ha habido desarrollo e implementación comercial de algunos procesos alternativos (discutidos luego). (71, 68)

La Fig. 2.4 muestra el típico proceso Merrill-Crowe.

2.3.2 Adsorción con carbón activado

El fenómeno de la adsorción consiste en la captación de moléculas (adsorbatos) de la fase líquida (solución lixiviada) en la superficie de un sólido (adsorbente) en este caso el carbón activado.

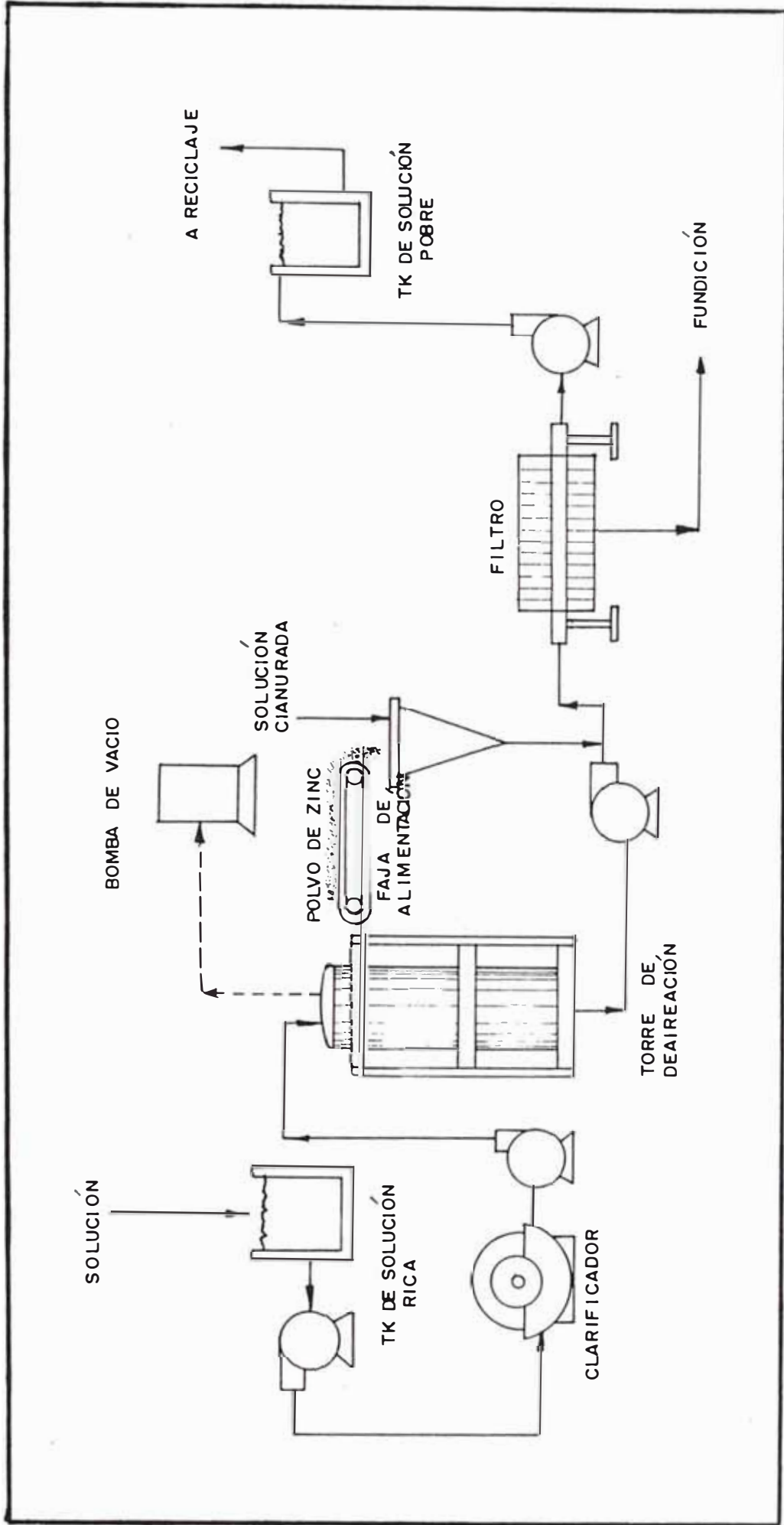


FIG. 2.4 PROCESO MERRILL CROWE

El hecho que el oro puede ser adsorbido en carbón activado fue bien conocido a fines del siglo XIX.

El carbón de madera fue usado comercialmente por primera vez en la Mina de Yuanmi localizada en el oeste del continente Australiano en el año 1894. Esta técnica implicaba pasar la solución rica a través de columnas de carbón, para luego quemar el carbón y recuperar el oro adsorbido. (22)

Dado el costo del carbón y costo asociado de embarque y fundido, este proceso no podía competir con el Merrill-Crowe.

El deseo del uso repetitivo del carbón motivó al United States Bureau of Mines a desarrollar un proceso de lixiviación de oro cargado en el carbón usando una solución de soda cáustica y sulfuros, seguido de una electrodeposición. Un proceso modificado utilizó una solución caliente de soda cáustica cianuro de sodio para extraer el oro del carbón activado. El proceso fue evaluado en Honduras tomó cerca de 20 años para su primera implementación comercial en Homestake South Dakota (1970). (33)

El éxito de la tecnología en Homestake y el aumento del precio del oro y la plata en los 70, a-

presuraron la instalación de numerosas plantas de adsorción en carbón activado en el mundo.

El método fue atractivo para tratamientos de minerales lamosos que presentan dificultad para la separación sólido-líquido necesaria en el proceso Merrill-Crowe. (8)

La tecnología del carbón activado ha logrado desplazar a la antigua tecnología de decantación en contracorriente. Fundamentalmente debido a menores gastos de inversión en capital. menores costos de operación. mejor productividad y mejores eficiencias de recuperaciones metalúrgicas. (8)

Se han eliminado espesadores. la etapa de dea-reacción. de purificación. sección de vacío. etapa de precipitación con zinc. la etapa de filtrado y del secado. Al disminuir toda esta cantidad de equipos e instalaciones. disminuyen también los costos de mantenimiento mecánico eléctrico. Las nuevas plantas que usan carbón activado son más simples y más compactas. (9)

La tecnología del carbón activado ha permitido trabajar minerales de baja ley que por los métodos tradicionales no eran económicamente viables. Esto es atribuido a la fuerza adsortiva presente en el carbón activado debido a su enorme área superficial

y la disponibilidad de una gran porosidad, captando valores de oro finamente diseminados con mucha facilidad.

El perfeccionamiento de esta moderna tecnología con diversas aplicaciones industriales en muchos países para diferentes tipos de minerales de la más amplia variedad de leyes y volúmenes, está conllevando a su mayor difusión y aplicación al mismo tiempo que ha constituido una mayor motivación las compañías mineras para intensificar las exploraciones.

Básicamente existen dos métodos para utilizar el carbón activado en la recuperación de oro y plata de la solución pregnant o rica. (10)

- 1) Tratamiento de la solución clarificada con carbón activado granular, percolando la solución ascendentemente en columnas (CIC).
- 2) Adición del carbón a la misma pulpa de cianuración, recuperando el carbón en cedazos vibratorios. Si el carbón se agrega después de la lixiviación en agitadores tipo AIR-LIFT el proceso se denomina carbón en pulpa (CIP); pero si el mineral contiene sustancias grafiticas que precipiten al oro y el carbón se agrega directamente a la pulpa durante la lixiviación, el

proceso se denomina carbón en lixiviación (CIL).
(54)

- Carbón en Columna (CIC)

La aplicación de ese método es recomendable para soluciones cianuradas claras, como las generadas en los procesos de heap leaching o en circuitos que utilizan espesadores.

El proceso CIC se lleva a cabo en columnas cilíndricas dispuestas en serie. A través de estas columnas cargadas con carbón, circula solución en forma ascendente. Cuando el carbón de la primera columna ha sido suficientemente cargado, se retira de la columna y se envía a desorber. La columna es cargada luego con carbón fresco y dispuesta al final del circuito en serie. (22, 51)

Con una alimentación de 1 ppm de oro y el carbón de grado superior se puede obtener teóricamente una carga de 900 onzas de oro por tonelada (22). Sin embargo este nivel operacional es raro porque :

- 1) Otros iones en la solución, como la plata compiten en cierto grado con el oro en la adsorción, particularmente en carbones de baja actividad.

2) Las sales de calcio depositadas o la regeneración incompleta del carbón interfieren con la recuperación. (22. 8)

- Carbón en Pulpa (CIP)

En la cianuración en pulpa se emplea carbón activado granulado de un tamaño mayor que el mineral molido. En este proceso no se necesita clarificar la solución rica, eliminándose la necesidad de separar la solución del mineral tratado.

Fundamentalmente pueden ser 4 ó más tanques con agitación puestos a trabajar en serie en donde la pulpa es alimentada luego de ser lixiviada, en los tanques de CIP. Allí se alimenta la solución cianurada (con valores de oro en solución) y el carbón activado, que entra en contacto con la solución mediante la agitación mecánica que tiene cada tanque. Durante todo el tiempo de residencia de la pulpa en carbón activado, se carga oro en éste. La solución pasará al segundo tanque y así sucesivamente hasta el último tanque obteniéndose cada vez valores más pobres de oro en la solución. Mientras que el carbón va en la dirección opuesta al flujo de pulpa cargándose cada vez de mayores valores de oro como se puede obser

var en las Figuras 2.5 y 2.6.

Cuando el carbón es extraído del primer tanque, se le añade carbón nuevo debidamente reactivado al final del circuito. (69. 35. 1)

- Carbón en Leach (CIL)

Esto es una modificación del proceso CIP y puede ser preferido en algunos casos.

Consiste en el uso del carbón en forma directa en los tanques de lixiviación realizándose la lixiviación del mineral y la recuperación del oro en el mismo tanque debido sobre todo a la gran docilidad del mineral a la cianuración. El carbón siempre tendrá un movimiento en contracorriente a la pulpa. Se representa este proceso en la Fig. 2.7.

El circuito CIL se desarrolló originalmente para ser empleado en minerales de oro que contenían sustancias naturales con propiedades de adsorción (tales como arcillas y carbón adsorbido natural). Añadiendo carbón granulado durante el proceso de cianuración, la recuperación de oro se mejora sustancialmente. Se está considerando cada vez más el uso de procesos CIL o procesos híbridos de CIP y CIL para otros minerales.

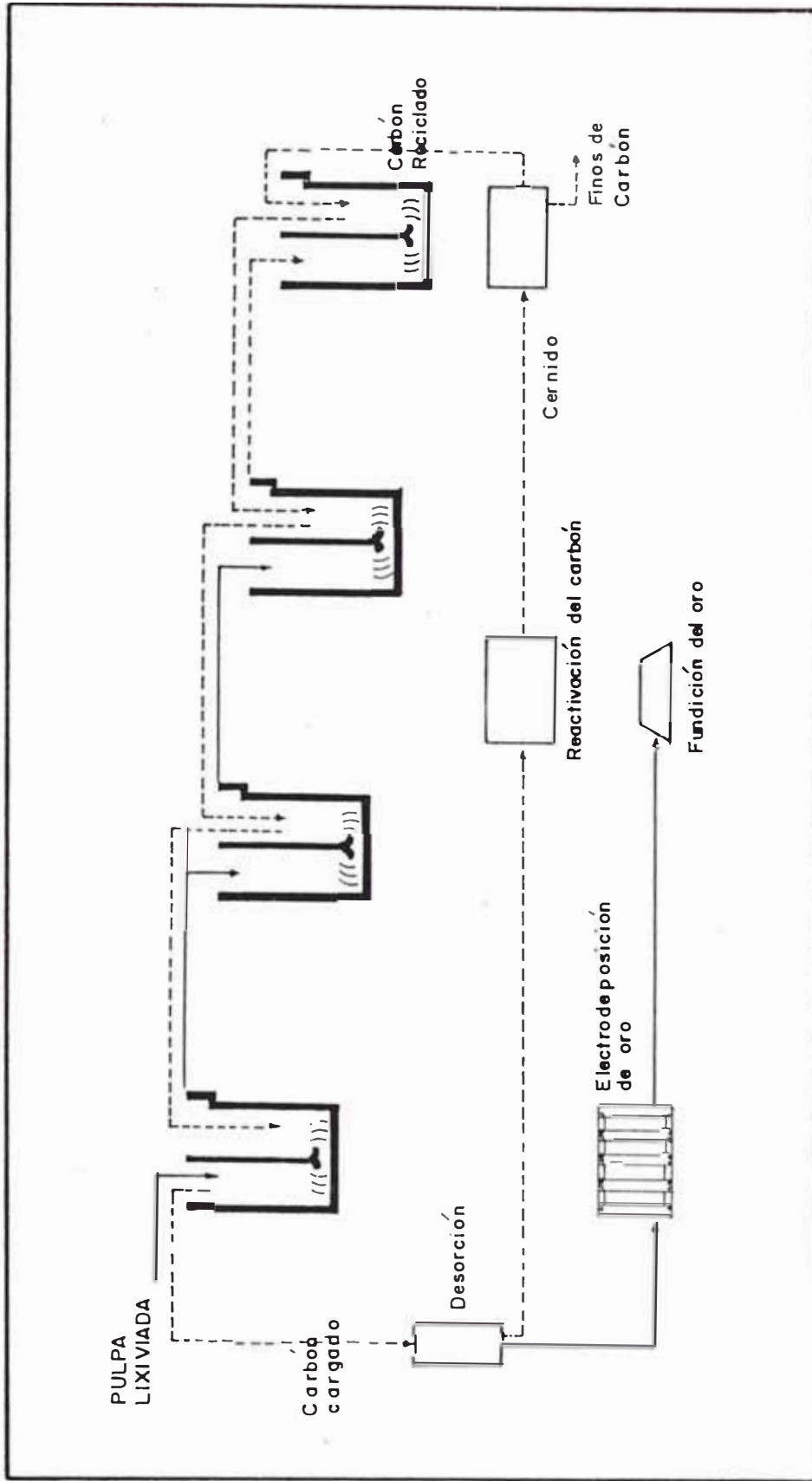
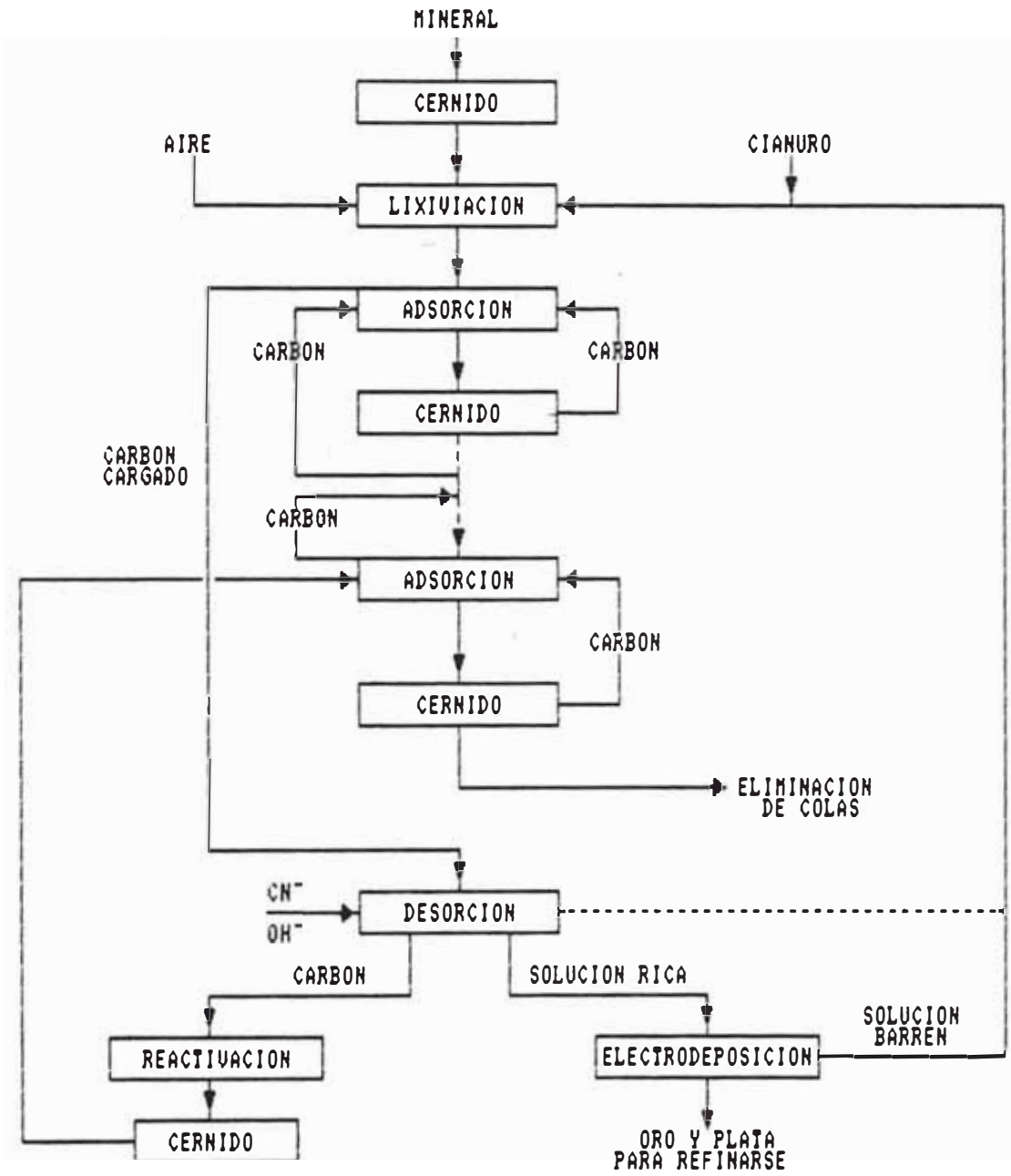


FIG. 2.5 CIRCUITO DE CARBON EN PULPA (CIP)

FIGURA 2.6

DIAGRAMA DE FLUJO TIPICO DE UNA PLANTA CIP PARA RECUPERACION DE ORO Y PLATA



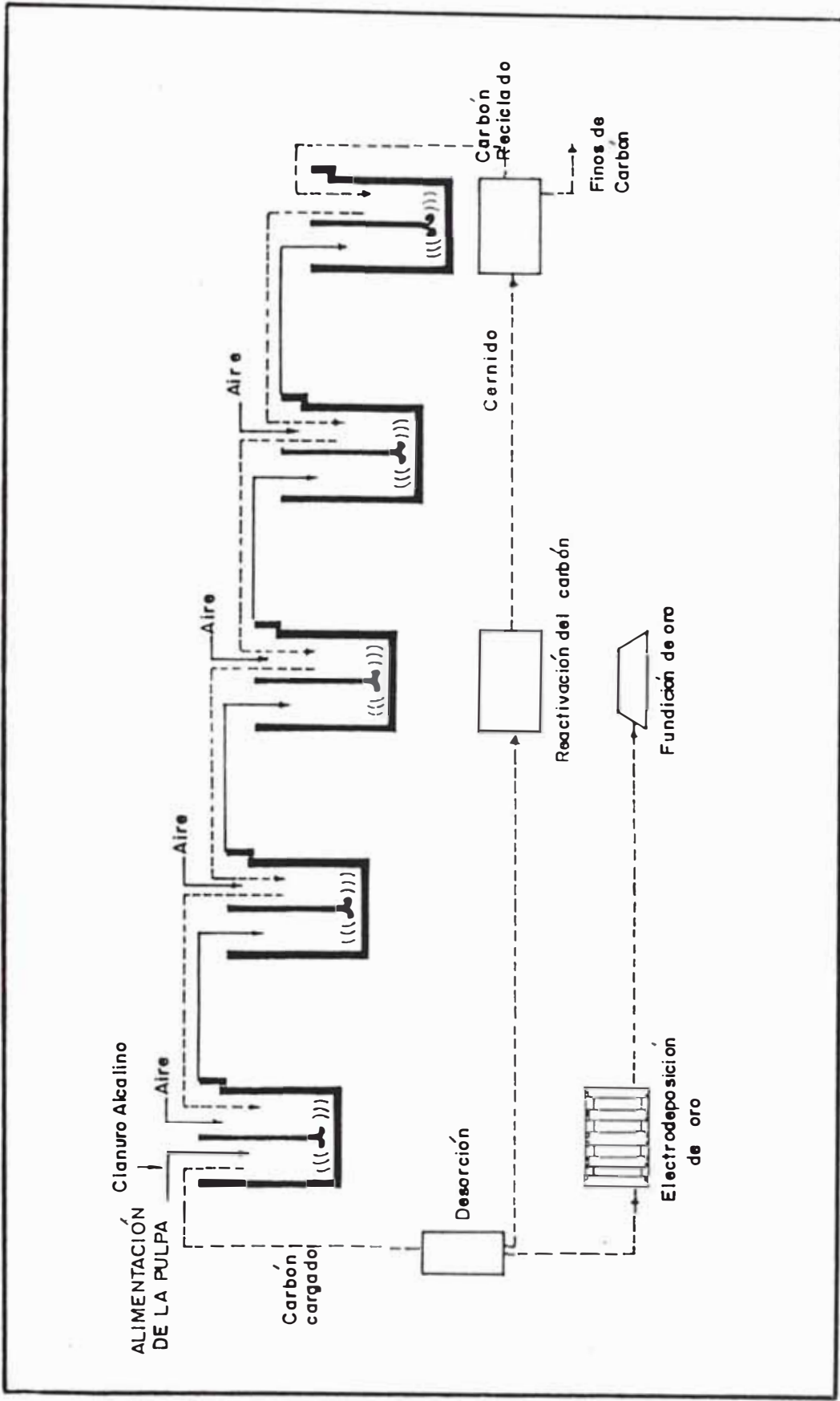


FIG. 2.7 CIRCUITO DE CARBON EN LEACH (CIL)

aparte de aquéllos que demandan el circuito CIL. Combinando los circuitos de filtración y adsorción en uno solo, se podría ahorrar cerca de 25% del capital en esta sección de la planta. En términos simples, se debe entender que las características del mineral desempeñan un papel determinante en la selección del mejor proceso de recuperación. (22, 8, 34)

2.4.3 Intercambio iónico

Inicialmente las resinas de intercambio iónico (i-i) fueron usadas comercialmente para la purificación de agua. Los óptimos resultados obtenidos incentivó a los metaluroistas a investigar su posible uso en la recuperación de soluciones diluidas.

Se demostró que la recuperación era técnicamente factible y que la gran ventaja del proceso sería la eliminación de la filtración requerida en el proceso Merrill-Crowe. (33, 24)

Las resinas de intercambio iónico fuertemente básicas tienen una alta capacidad de adsorción, pero una baja selectividad para el oro, haciendo posible no sólo la recuperación del oro, sino también la del cianuro alcalino el cual puede ser reciclado a la lixiviación. Empleando una mezcla

de ácido clorhídrico y thiourea se obtiene una total desorción de los metales preciosos y del cianuro. La desorción o elutición del fierro se puede llevar a cabo por medio de soluciones de cianuro de sodio 2N. El ácido cianhídrico resultante de la desorción y de la descomposición de los cianuros, es totalmente convertido en cianuro de sodio poniéndolo en contacto con una solución de hidróxido de sodio. (35. 30)

Mientras la tecnología CIP dominaba las actividades en el mundo de la industria del oro empezó un cierto interés en la tecnología de intercambio iónico, con dos ventajas sobre la tecnología CIP.

- 1) La desorción y el proceso de regeneración para las resinas son más simples que para el carbón activado (por lo que es preferido en plantas de queñas).
- 2) El proceso (i-i) puede mantener su eficiencia aún cuando materias orgánicas (agentes de flotación, cenizas de carbón, etc.) están presentes en la pulpa. (54. 33)

Etapas del proceso:

El proceso de recuperación de oro con resinas de intercambio iónico tiene las siguientes operaciones

básicas:

Adsorción o carga

Desorción

Regeneración

Recuperación

Adsorción o carga.- Consiste en la captación de moléculas de la fase líquida mediante el uso de aniones (resinas de intercambio iónico). El metal precioso (Au) contenido en las soluciones cianuradas es adsorbido por la resina de intercambio iónico mediante la siguiente reacción:

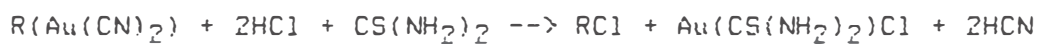


donde R es la estructura catiónica fija de la resina inicialmente cargada con el ión cloro intercambiable.

Desorción.- Consiste en separar el adsorbato (cianuros complejos de oro) del adsorbente (resina de intercambio iónico). En algunos casos las resinas son simplemente quemadas para recuperar el oro. Este hecho sólo es aplicable en procesos pequeños (el costo de la resina es de \$ 150 - 200 dólares por pie cúbico) y en donde las soluciones lixiviadas tengan altas concentraciones de oro por lo dificultoso que resulta el quemado de las resinas y por el

alto grado de contaminación. A nivel industrial se emplea generalmente una mezcla de ácido clorhídrico y thiourea, para obtener con ello una total desorción de oro y de cianuro. (30)

La desorción con thiourea y ácido clorhídrico se efectúa de acuerdo a la siguiente reacción:



Regeneración.-Al poner en contacto la resina saturada con el ácido desorbente se permite el reemplazo de los iones cloro:



El ácido cianhídrico desprendido es adsorbido en una solución de hidróxido de sodio y transformado en cianuro de sodio que se puede devolver al circuito de lixiviación:



Recuperación.- En esta etapa el oro presente en la solución es recuperado electrolíticamente, la operación puede ser hecha simultáneamente con la desorción. (33)

Tipos de proceso:

Existen 2 procesos para la recuperación del oro por el método de intercambio iónico a partir de soluciones cianuradas de oro y plata:

Proceso de solución clarificada-resina.

Proceso pulpa-resina

En el proceso solución clarificada-resina, la solución cargada clarificada y con los complejos cianurados de metales preciosos pasa a la etapa de adsorción con resinas de intercambio iónico.

El proceso pulpa-resina, (RIP) difiere del anterior en que la adsorción por medio de la resina se realiza directamente en la pulpa sin separar, clarificar previamente la solución pregnant. (33)

El diagrama del proceso con resinas de intercambio iónico (RIP) se muestra en la Figura 2.8.

2.4.4 Electrodeposición

La electrodeposición es una forma de recuperación del oro de soluciones cianuradas por vía electroquímica aprovechando la nobleza de éste metal para su fácil reducción. Este proceso conocido desde hace 100 años decayó en su aplicación inicial por su poca eficiencia con soluciones de baja con-

centración en oro. Posteriormente, el diseño de celdas con áreas cátodicas de superficie extendidas y dotadas de agitación, permitieron tratar soluciones con concentraciones bajas de oro (80 ppm). En la década del 50, la electrodeposición vuelve a tomar interés por su inclusión en la etapa de recuperación de los procesos de carbón activado e intercambio iónico. (33, 49)

Las celdas más usadas para la electrodeposición pueden ser clasificadas por su forma en celdas cilíndricas y rectangulares. La diferencia existente entre ambas es el sentido del flujo de la solución. En la celda cilíndrica (Fig. 2.9) la solución fluye en ángulo recto al flujo de la corriente, mientras que en la celda rectangular (Fig. 2.10) la solución fluye en paralelo al flujo de la corriente. Las celdas rectangulares han probado ser más eficientes que las celdas cilíndricas. (53)

La popularidad de la electrodeposición se basa en sus ventajas en comparación con la precipitación química:

Los electrones son usados para reducir el oro sin introducir otros compuestos en la solución, la cual es reciclada a la etapa de desorción.

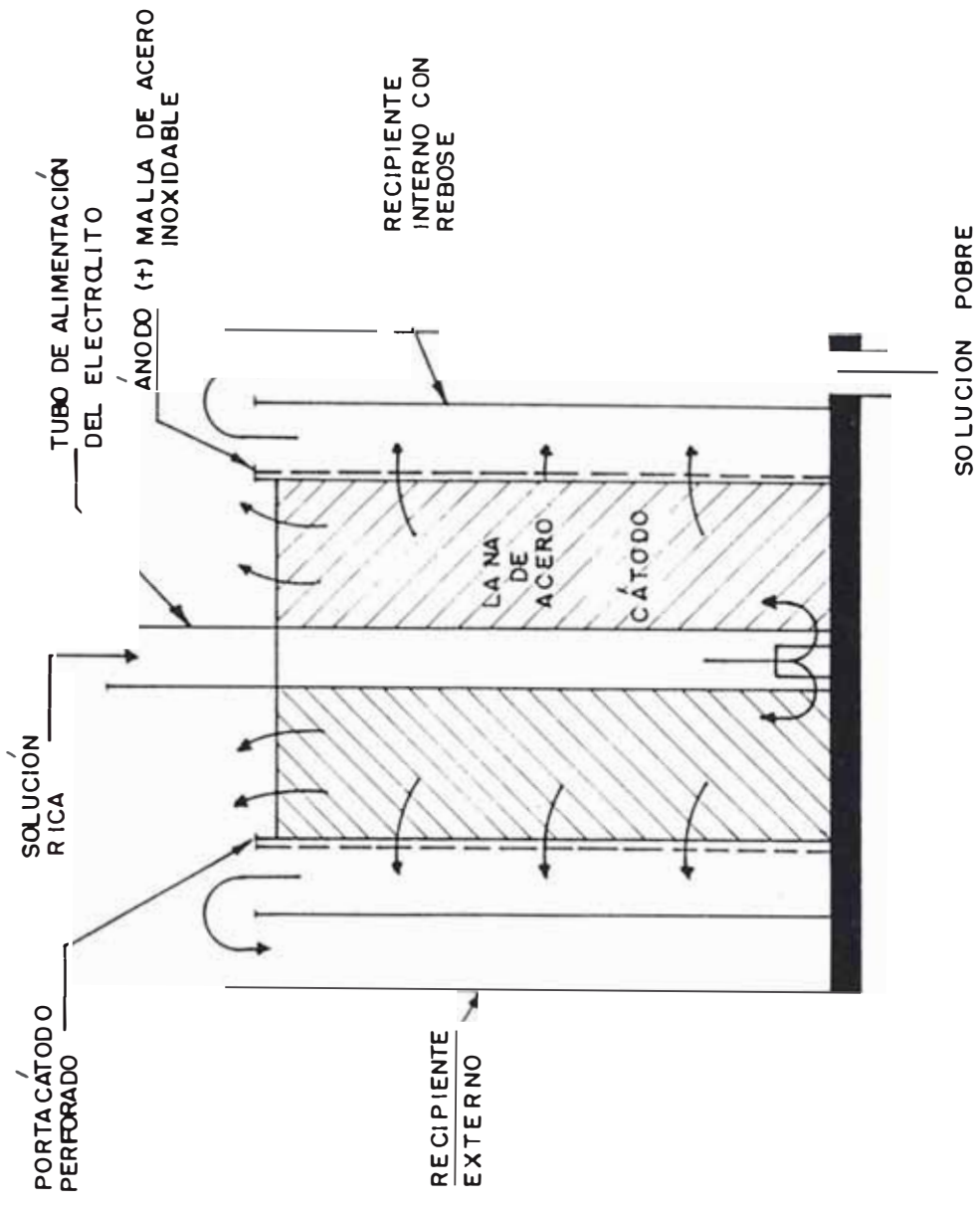


FIG. 2.9 ESQUEMA DE UNA CELDA ELECTROLITICA CILINDRICA

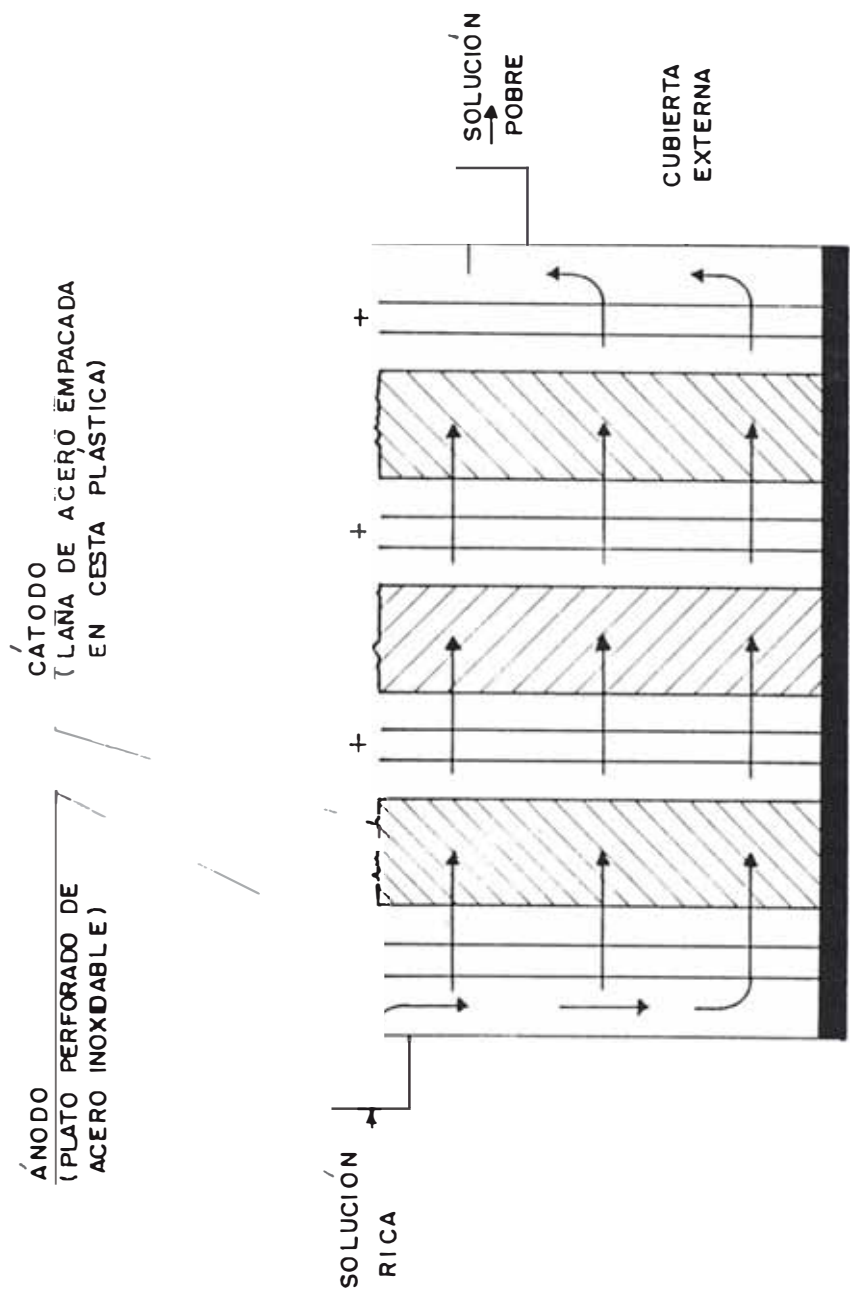


FIG. 2.10 ESQUEMA DE UNA CELDA ELECTROLITICA RECTANGULAR

Una gran selectividad y por lo tanto mayor pureza del depósito, simplifica la fundición y refinación del bullón. (54. 60)

EFFECTOS DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

EFFECTO DE LA TEMPERATURA :

La temperatura del electrolito no es crítica mientras que la solución sea enfriada debajo de su punto de ebullición para ser pasada a través de la celda de electrodeposición.

Es predecible que a una temperatura mayor se obtendrá una mayor eficiencia, debido a que, la conductividad de la solución aumenta, hay mayor difusión de los iones aurocianurados y baja la solubilidad del oxígeno. Por tanto, la solución resultante de la desorción no debe sufrir gran enfriamiento antes de la electrodeposición.

Con soluciones de mayor concentración (148.3 ppm) producto de una purificación con carbón activado, las densidades de corriente pueden ascender a un rango entre 3.2 y 7.7 A/m² y la temperatura puede ser incrementada hasta 60°C mejorando la deposición del oro. (54. 33)

EFEECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO DE LA SOLUCION ;

Al aumentar la velocidad del flujo de la solución, la eficiencia de la deposición de un solo paso disminuye.

Es importante controlar la velocidad del flujo de acuerdo a la forma de la celda: por ejemplo en la celda cilíndrica tipo Zadra, la alimentación de la solución es de abajo hacia arriba. Al disminuir la velocidad se evita el levantamiento hacia arriba de los sólidos suspendidos en la superficie del cátodo. (53)

RAZON DE LA MASA DE ORO A LA LANA DE ACERO :

La razón de la masa de oro a la lana de acero afecta la eficiencia de deposición de paso simple. A medida que aumenta la cantidad de oro depositado sobre la lana de acero, la eficiencia disminuye. La lana de acero puede ser cargada de oro hasta 20 veces su propio peso, pero en la práctica los cátodos son retirados mucho antes. (33)

INFLUENCIA DE LA CONCENTRACION DE ORO EN EL ELECTROLITO :

A una mayor concentración de oro se incremen-

ta la eficiencia de corriente y las recuperaciones.

Para soluciones a baja o moderada concentración se manifiesta el efecto adverso con una baja eficiencia de corriente y un mayor consumo de energía con una profusión de gases de los electrodos. La elevada densidad de corriente produce una deficiencia de iones aurocianuro en las cercanías del cátodo originando depósitos quemados (negruscos). La emanación de gases hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo, son los causantes del consumo adicional de energía. La producción de este último es aún más nocivo, puesto que destruye cianuro libre tan necesario para evitar la formación de la película de aurocianuro en el ánodo. (5)

QUIMICA Y MECANISMO DEL PROCESO :

Como en cualquier otro proceso de electrodeposición, las reacciones de oxidación tienen lugar en el ánodo y generan electrones, los cuales son consumidos en el cátodo para depositar el metal.



Las reacciones paralelas involucran la deposición de metales como plata, cobre y desprendimiento de hidrógeno en el cátodo. Las reacciones anódicas pueden producir la oxidación de iones cianurados.

Estudios de galvanotecnia confirman que el aumento del área catódica por unidad de volumen del electrolito, aumenta la velocidad de deposición, mejorándose más aún con agitación.

La electrodeposición en su estado presente de desarrollo no puede ser aplicado a soluciones lixiviadas, pues éstas suelen ser muy diluidas (bajas concentraciones de oro) bastante sucias, haciéndola poco competitiva con otros procesos de recuperación en razón su baja eficiencia. (33, 5)

RECUPERACION DE ORO CON CARBON ACTIVADO

3.1 Introducción

La aplicación del carbón activado como un método moderno para la recuperación del oro y la plata ha impulsado el desarrollo de numerosas técnicas.

La nueva tendencia es recuperar metales preciosos mediante la cianuración, combinando éste proceso con la adsorción con carbón activado. Subsecuentemente el carbón cargado es desorbido y la solución pasa a celdas de electrodeposición. Luego de recuperar el oro, el carbón es regenerado para devolverle sus propiedades adsorbivas y retornarlo al circuito. Esto permite el diseño de circuitos sencillos de bajo costo de operación y mayor flexibilidad. (22, 50)

El desarrollo de estos métodos son alternativas tecnológicas de probada aplicación industrial. Lo que se ha experimentado en la última década es un gran avance en los conocimientos del proceso de adsorción y las especificaciones del carbón relacionadas con la recuperación del oro. Las innovaciones en el

área mecánica determinan costos más bajos de energía, agitación más eficiente y flexible, técnicas de separación pulpa/carbón a un costo más bajo y costos menores de capital para la regeneración del carbón. (50)

3.2 Carbón activado

El carbón activado ha sido conocido a través de la historia como un adsorbente.

Una de sus aplicaciones empezó en Inglaterra a mediados del siglo XIX con el tratamiento de agua para beber, quitándole olores y sabores indeseados. Esto se amplió a diversos procesos industriales, como en la industria del vino, cerveza, papel pulpa, farmacéutica, alimenticia, petróleo y petroquímica. Por otro lado el carbón activado adsorbe gases y vapores, siendo usado para el control de la contaminación ambiental operaciones de recuperación de vapores (filtros de cigarrillos, máscaras de gases, recuperación de solventes, soportes catalíticos). (42, 44)

El uso de carbón activado para la recuperación de metales preciosos constituye una pequeña parte del vasto campo de aplicaciones.

El oro y la plata son los metales que se están re-

cuperando de soluciones cianuradas con carbón activado a gran escala.

El carbón activado es un término genérico para una familia de materiales carbonáceos altamente porosos, ninguna de las cuales puede ser caracterizada por una fórmula estructural o por análisis químico. (44)

3.2.1 Estructura y caracterización

El carbón activado es una sustancia extraña e interesante. El hecho que tenga el poder de extraer oro y plata de soluciones cianuradas al punto de 7% de su peso en oro y de su peso en plata, sin mostrar el más mínimo cambio en su apariencia, aún con el microscopio, encierra un misterio que ha interesado grandemente a los metalurgistas. Aún ahora con la cantidad de datos a la mano dados por los investigadores, queda mucho por aprender.

Esta aseveración fue hecha por Gross y Scott en 1927, pero puede aplicarse en el presente debido a las complejas características físicas y químicas del carbón activado. (44)

El carbón activado estructuralmente está constituido por cadenas de hidrocarburos, similar a la estructura del grafito. El carbón

activado es un microcristalino, de forma no grafitica del carbón que ha sido procesado para desarrollar su porosidad interna, permitiendo que por efectos de la temperatura se rompan las cadenas simples y aromáticas, creando lugares vacíos. (42)

La estructura ideal del grafito se muestra en la fig. 3.1. Los círculos denotan las posiciones de los átomos de carbono, mientras que las líneas horizontales representan los enlaces C-C. (33)

La representación esquemática de la estructura propuesta para el carbón activado contiene grupos funcionales ubicados al final de cadenas grafiticas rotas (Fig. 3.2). Parece que la naturaleza de estos grupos superficiales depende de las condiciones durante y después de su manufactura.

Las propiedades físicas y químicas del carbón activado están definidas por la naturaleza del material base y las condiciones de activación.

Los distintos tipos de carbón activado pueden ser diferenciados unos de otros en base a referencias de sus propiedades físicas y químicas.

El tamaño de los poros del carbón activado están en el rango de 3 a muchos miles de angstroms, los cuales son clasificados en términos de su diámetro

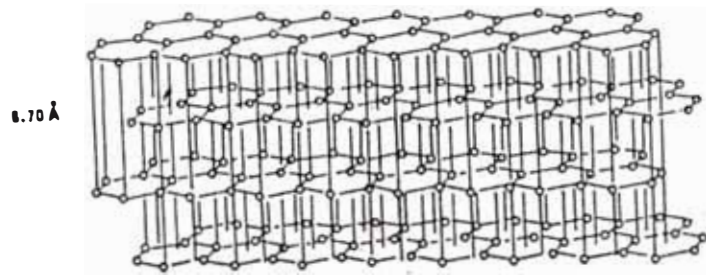


FIG. 3.1 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA ESTRUCTURA DEL GRAFITO.

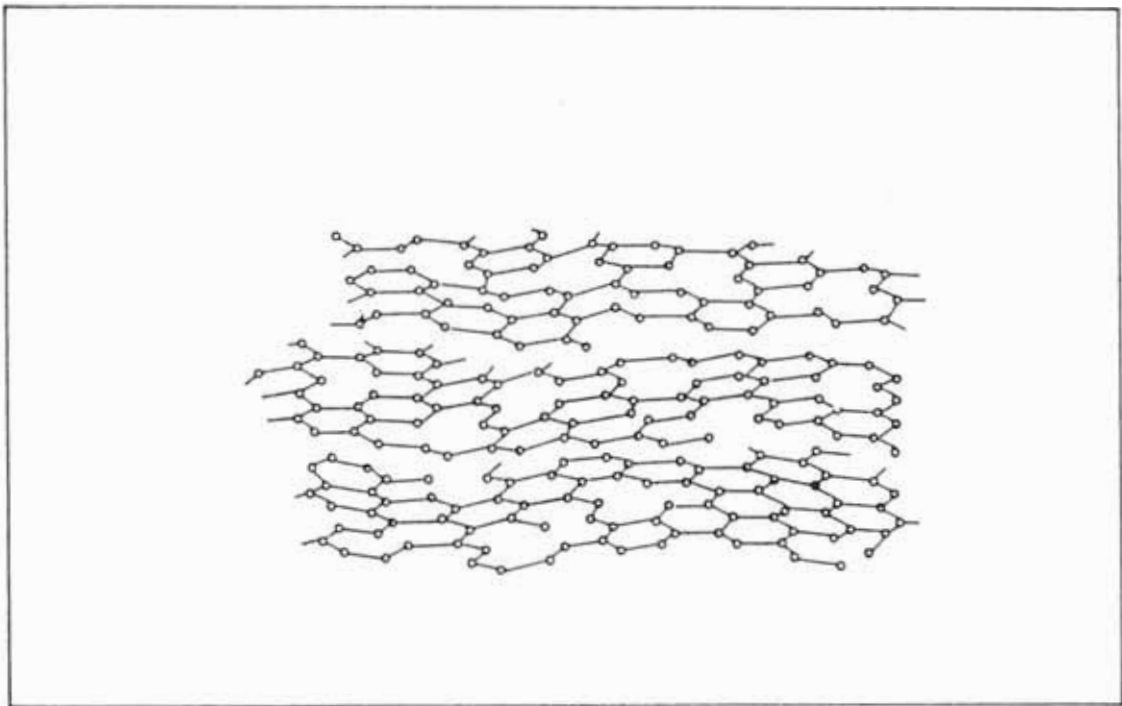


FIG. 3.2 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA ESTRUCTURA PROPUESTA DEL CARBON ACTIVADO.

por conveniencia.

TABLA 3.1
CLASIFICACION DE LOS POROS Y SU CONTRIBUCION
SUPERFICIAL

	Radio en A°	Contribución Superficial (%)
Macroporos	500-20000	Muy poca
Mesoporos	100- 500	5
Microporos	3- 100	95

El volumen de los poros es mayor de 0.2 ml/g el área superficial interna es generalmente mayor de 400 m²/g medido por el método de nitrógeno BET. (47. 44)

La sección transversal de los poros puede ser circular, cuadrada o de formas irregulares. Los poros también pueden tener constricciones o cuellos de botella.

Los macroporos dependen mayormente de la naturaleza de la materia prima carbonácea empleada y de los procesos preliminares de su manufactura: es decir, la molienda y aglomeración de la materia prima. Su función más importante es la de servir como arterias de transporte que hacen accesibles a las

partes internas de los gránulos del carbón, a las moléculas adsorbidas. Los microporos y los mesoporos juegan un papel principal en la adsorción. Los microporos son producto del proceso de activación del carbón. La Fig. 3.3 representa un concepto tentativo de la estructura molecular en microporos para el caso de dos moléculas adsorbidas en un solvente, que compiten unos con otros por los sitios.

(44)

El carbón activado se encuentra disponible comercialmente en diversas formas: polvo, granular de diversas formas y tamaños, y en pequeños cilindros de 0.8 a 6 mm de diámetro por 3 a 10 mm de largo.

Desde el punto de vista químico, las comparaciones se basan en su habilidad de adsorber varias sustancias seleccionadas de la fase gaseosa, por ejemplo, benceno, tetracloruro de carbono y nitrógeno; tanto como de la fase acuosa, por ejemplo, yodo, fenol azul de metileno, molasses y tannin.

(50, 47)

Por ejemplo el valor NBET expresa el área superficial en m^2/g de adsorbente que puede ser cubierta por nitrógeno en una plancha monomolecular. Los carbones activados tienen valores de NBET entre los 400 y 1500 m^2/g , denotando carbones de baja y

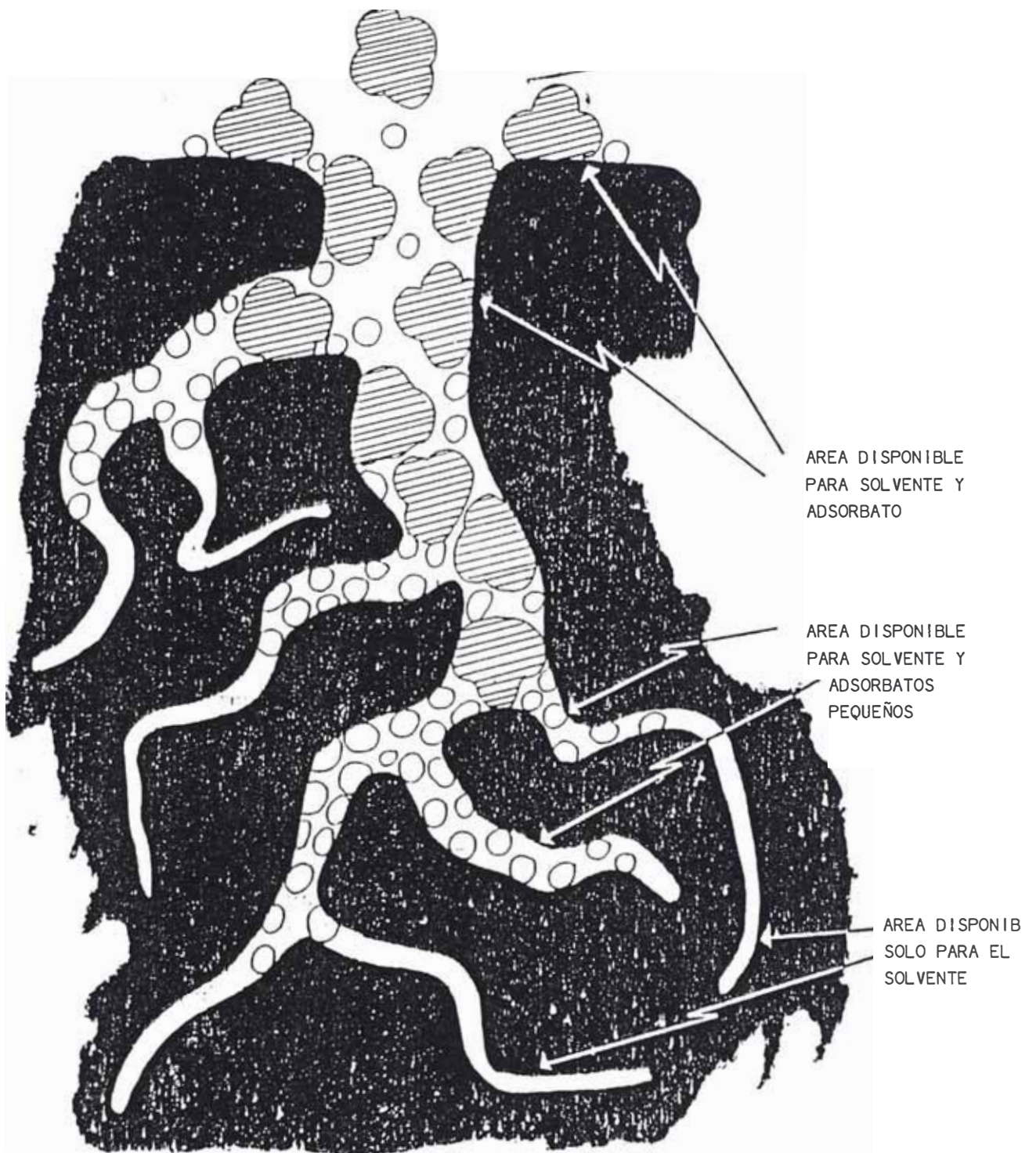


FIG. 3.3 CONCEPTO DE LA ESTRUCTURA MOLECULAR DEL CARBON ACTIVADO

alta actividad correspondientemente. Sólo el valor de su área superficial es insuficiente para caracterizar el carbón. ya que la molécula de nitrógeno es muy pequeña y puede penetrar en poros que no son accesibles para otras moléculas más grandes. por eso se dan otros números determinados en base a moléculas más grandes y bajo condiciones experimentales standard. (44)

El número IODINE indica la masa de iodine adsorbido de una solución acuosa bajo condiciones experimentales standards por 1 g de carbón activado.

El número de CCl_4 indica la masa de vapor de CCl_4 adsorbido bajo condiciones experimentales standards por 1 gr de carbón activado expresado en porcentaje.

El hecho que los carbones activados adsorban moléculas de diferentes tamaños indica la diversa distribución del volumen interno accesible debido a los poros de diferentes tamaños.

molécula IODINE es adsorbida en poros de menos de 10 Å de diámetro así que este número es buen indicador de área superficial para poros de ese tamaño. Por el contrario el número molasses, moléculas grandes de polisacáridos que se adsorben sólo en poros grandes de cerca de 30 Å de diámetro.

dará un indicador del número de poros de ese tamaño.

Estas propiedades son usadas por los fabricantes de carbón activado para caracterizar sus productos. Algunos fabricantes proporcionan además los valores de K como índice de capacidad para oro y el de R como índice para la velocidad de adsorción.

En la tabla 3.2 se muestran los valores típicos para un carbón activado térmicamente, usando vapor, hecho de cáscara de coco y usado generalmente en aplicaciones de fase gaseosa y en procesos para recuperación de oro de soluciones cianuradas.

{44}

3.2.2 Propiedades adsorbitivas

El carbón activado posee propiedades adsorbitivas debido a su gran área superficial interna y a la distribución del tamaño de sus poros.

Hay 2 tipos de procesos en la adsorción, físico y químico.

La adsorción física involucra las fuerzas de Van der Waals, interacciones dipolo-dipolo y enlaces hidrógeno, estos procesos son generalmente reversi-

TABLA 3.2

PROPIEDADES FISICAS Y CARACTERISTICAS ADSORBITIVAS
QUIMICAS DEL CARBON ACTIVADO DE CASCARA DE COCO

Propiedades Físicas	
Densidad de la partícula (desplazamiento de Hg)	0.80 a 0.85 g/ml
Densidad bulk	0.48 a 0.54 g/ml
Volumen de poro	0.70 a 0.80 ml/g
Dureza Ball-pen	97 a 99%
Distribución del tamaño de la partícula	1.18 a 2.36 mm
Contenido de cenizas	2 a 4%
Humedad	1 a 4%
Características Adsorbitivas Químicas	
Área superficial (NBET)	1050 a 1200 m ² /g
Número yodine	1000 a 1150 mg/g
Número CCl ₄	60 a 70%
Número benceno	36 a 40%

bles. La adsorción química se presenta en procesos que involucran fuerzas homopolares, como enlaces iónicos o covalentes y son generalmente irreversibles. Sin embargo en la mayoría de los casos la adsorción se considera física en naturaleza. (16, 42, 44)

Las moléculas adsorbidas deben alcanzar las superficies internas de los macroporos por difusión, por lo tanto el tiempo de reacción será influenciado por la longitud a recorrer y la cinética de la adsorción se incrementará al disminuir el tamaño de la partícula.

El carbón activado es una sustancia versátil con respecto a su interacción con varios compuestos orgánicos e inorgánicos. Es capaz de actuar como un simple adsorbente polimérico sintético, adsorbiendo físicamente en su gran área superficial interna diversos componentes moleculares, reteniéndolas allí por fuerzas del tipo Van der Waals. También puede actuar como agente reductor, o en presencia de exceso de oxígeno como un catalizador oxidante.

(44)

Ya que el carbón activado es caro, su aplicación es económicamente viable sólo si el carbón puede ser regenerado y reciclado al proceso.

3.2.3 Manufactura del carbón activado

El paso más importante en la producción de carbón activado es la activación. Esto es el proceso en el cual la materia prima carbonizada es convertida en una forma cristalina del carbón, que perm-

te un gran número de poros de diversos tamaños formas. Estos poros incrementan el área superficial interna.

El producto de una simple carbonización no encuentra standards. esto se puede atribuir al hecho que el área superficial disponible del carbón pulverizado es básicamente el área superficial externa. es decir de sólo 2-4 m²/g contra el típico 1000 m²/g para el carbón activado granular medido por el método NBET. (42)

- Materias Primas

El carbón activado puede ser manufacturado de cualquier materia prima carbonácea y se han concedido muchas patentes para procesos usando diversos materiales como varios tipos de carbón (lignito, carbón bituminoso, antracita), cáscara de coco, pepas de duraznos, madera, aserrín, celulosa, aceite desado de petróleo, azúcar, huesos, corontas de maíz, etc. (35, 42, 44)

Todas estas materias primas son fácilmente accesibles y económicas.

Ya que el proceso de manufactura requiere remover la materia volátil de la materia prima, es importante el precio, la disponibilidad y la cali

dad de la materia prima por un lado y su contenido volátil por el otro.

En la Tabla 3.3 (44) se ve que la antracita y el carbón bituminoso tienen la ventaja de un bajo contenido de materia volátil. Sin embargo la gran disponibilidad de materia de desecho como cáscara de arroz o coco, a pesar de su alto contenido volátil, los hace económicamente favorables.

TABLA 3.3

CONTENIDO DE CARBON EN MATERIAS PRIMAS USADAS
COMUNMENTE PARA LA MANUFACTURA DE CARBON
ACTIVADO

MATERIAL	CONTENIDO APROX. DE CARBON (%)
Madera	40
Madera dura	40
Cáscara de coco	40
Lignito	60
Carbón bituminoso	75
Antracita	90

Aunque el proceso de activación determina mayormente la naturaleza química de las superficies oxidadas y el área superficial total del producto final, la estructura de los poros y la distribución de sus tamaños son determinados por la naturaleza del material base.

(44)

- Procesos de manufactura del carbón activado

A pesar que los aspectos generales de los diferentes procesos de manufactura son bien conocidos, los detalles exactos de los procedimientos seguidos están celosamente guardados por los fabricantes.

Los métodos más empleados para la fabricación del carbón activado son de dos tipos: el proceso químico (básicamente de 1 sola etapa) y el proceso físico o gas térmico (proceso de 2 etapas).

Como es de suponer los métodos químicos usan productos químicos para la activación, mientras que los procesos térmicos usan gases (dióxido de carbono aire), vapores (vapor de agua), o mezclas de gases y vapores.

. Activación Química.

Este proceso es usado para convertir material celulósico en carbón activado (básicamente madera). El agente activante más usado es el ácido fosfórico, aunque también se usa el cloruro de zinc y el ácido

sulfúrico. Otros compuestos químicos menos empleados son el carbonato de sodio, hidróxido de sodio, de calcio, y los cloruros de Mo, Ca, Al y Fe. Estos agentes tienen en común su fuerza como agentes deshidratantes. (47, 32)

El proceso se inicia haciendo una pasta de aserrín del material con el agente deshidratante. Esta pasta es secada y carbonizada en un horno rotativo a 200-650°C, dando lugar a la aromatización del compuesto y la creación de una estructura porosa con gran área superficial.

Luego de la carbonización de la pasta, los agentes activantes son recuperados. (42, 47)

. Activación Física o Térmica

El primer paso para la producción de carbón activado por activación térmica es la carbonización (reducir el contenido volátil del material base).

El paso de la activación se lleva a cabo a temperaturas entre 800 y 1000°C en presencia de un agente oxidante como vapor, aire, CO₂ o cualquier mezcla de estos gases. (42)

El oxígeno activo en el agente oxidante reacciona con los componentes más reactivos del esqueleto del carbón creando nuevos poros. El mecanismo de

este proceso no está claramente entendido.

El arte del fabricante de carbón activado está en llevar el proceso de activación de tal manera que la combustión del material base carbonizado ocurra internamente y no en el exterior de los gránulos. El término quemado es usado para denotar el grado de activación que es la pérdida de masa en porcentaje.

La nueva tendencia es la de realizar la carbonización y la activación en el mismo horno.

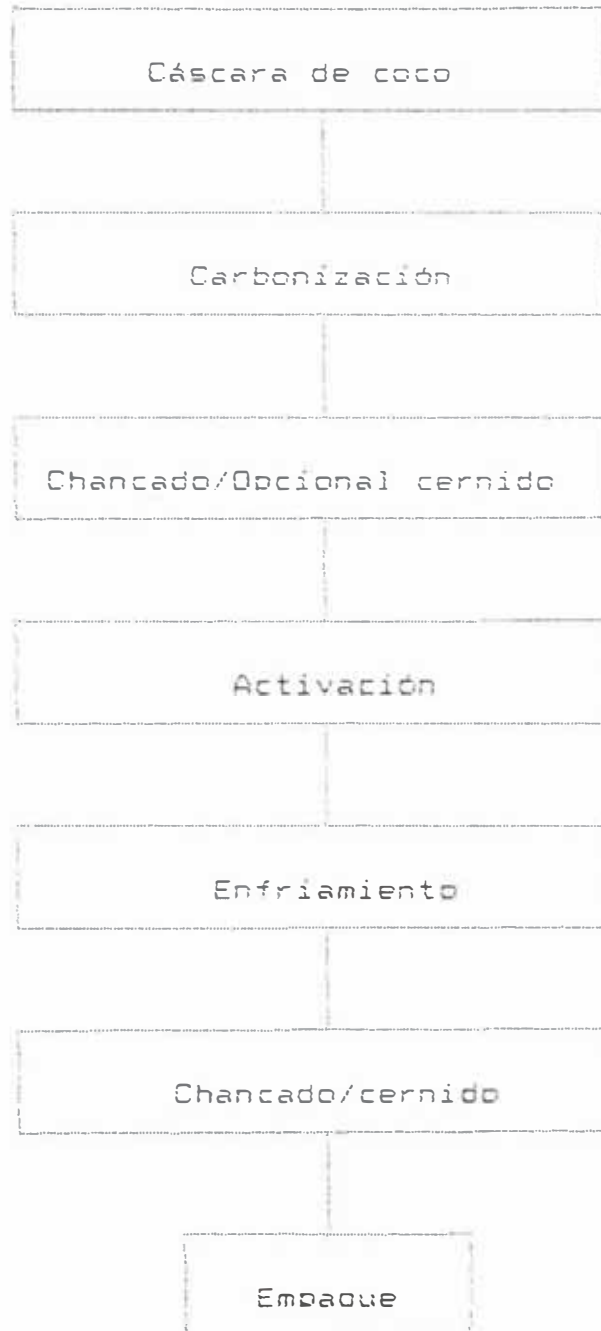
Si se tiene en cuenta las numerosas combinaciones de material base y condiciones de carbonización y activación que se puedan emplear en la manufactura del carbón activado, es de esperar un gran número de productos diferentes. Así, no se puede determinar una fórmula química definida para estos productos. La única forma de diferenciarse es en referencia a sus propiedades físicas y químicas. (42, 47, 44)

Proceso de fabricación de carbón activado usando cáscara de coco.

El diagrama de flujo típico se muestra en la fig. 3.4. Este proceso es también aplicado para la fabricación de carbón activado de pepas de durazno, o de madera dura y resistente a la abrasión; con la suficiente porosidad para permitir penetrar al agente activante

FIG. 3.4

Diagrama de flujo para la manufactura de carbón
activado de cáscara de coco.



al interior del gránulo y también el escape de los productos de la reacción oxidación-gasificación.

. Carbonización

La carbonización se realiza mayormente a pequeña escala y en forma primitiva. La hacen los agricultores en sus plantaciones y en barriles de 100 lt cortados en 2.

Colocan copra al fondo, lo llenan con cáscara de coco y lo queman. El barril es cubierto con una hoja de metal y se deja que el material se haga carbón, más o menos por 2 horas en una atmósfera casi exenta de aire.

Como ya se mencionó, la carbonización es básicamente un paso de desvolatización, dando un producto con alto contenido de carbón (entre 70 y 80%). (50, 44)

. Activación

Antes de la activación el material carbonizado es chancado, clasificado por tamaño de orano y limpiado de materias extrañas.

La activación se lleva a cabo en un horno rotativo una temperatura entre 800 y 1000°C en presencia de vapor, aire, gas combustible o mezclas de éstos.

La interrelación entre los diferentes parámetros de activación es compleja. y por lo tanto las representaciones cualitativas dadas en las Figuras 3.5 y 3.6 son representaciones cualitativas simples. Los datos presentados. que no son exactos. sirven sólo para indicar la tendencia relativa y son igualmente aplicables para cualquier tipo de materia prima carbonacea.

La Fig. 3.6 representa la relación entre el porcentaje de rendimiento y el tiempo de residencia en el horno. como una función en la velocidad de alimentación del vapor. en este caso parece que una mayor velocidad mejora la velocidad de quemado disminuyendo el rendimiento del producto final.

naturaleza del material base tiene un marcado efecto en cuanto a las propiedades del producto final. por ejemplo la distribución de tamaño de poros y la dureza.

La Figura 3.5 indica que el rendimiento del producto final que es inversamente proporcional al grado de quemado. disminuye cuando el tiempo de residencia en el horno aumenta y es dependiente de la temperatura de activación que obviamente afecta la velocidad de quemado o gasificación. (50, 44)

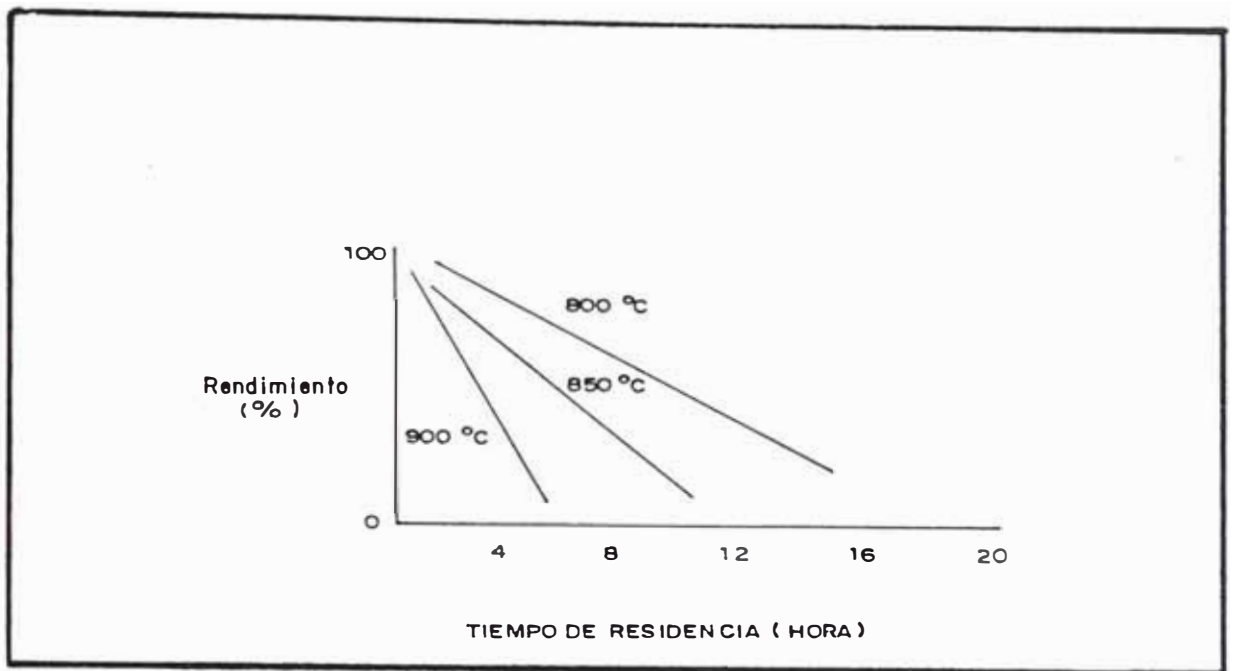


FIG. 3.5 RELACION CUALITATIVA ENTRE EL RENDIMIENTO DE CARBON ACTIVADO Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL HORNO.

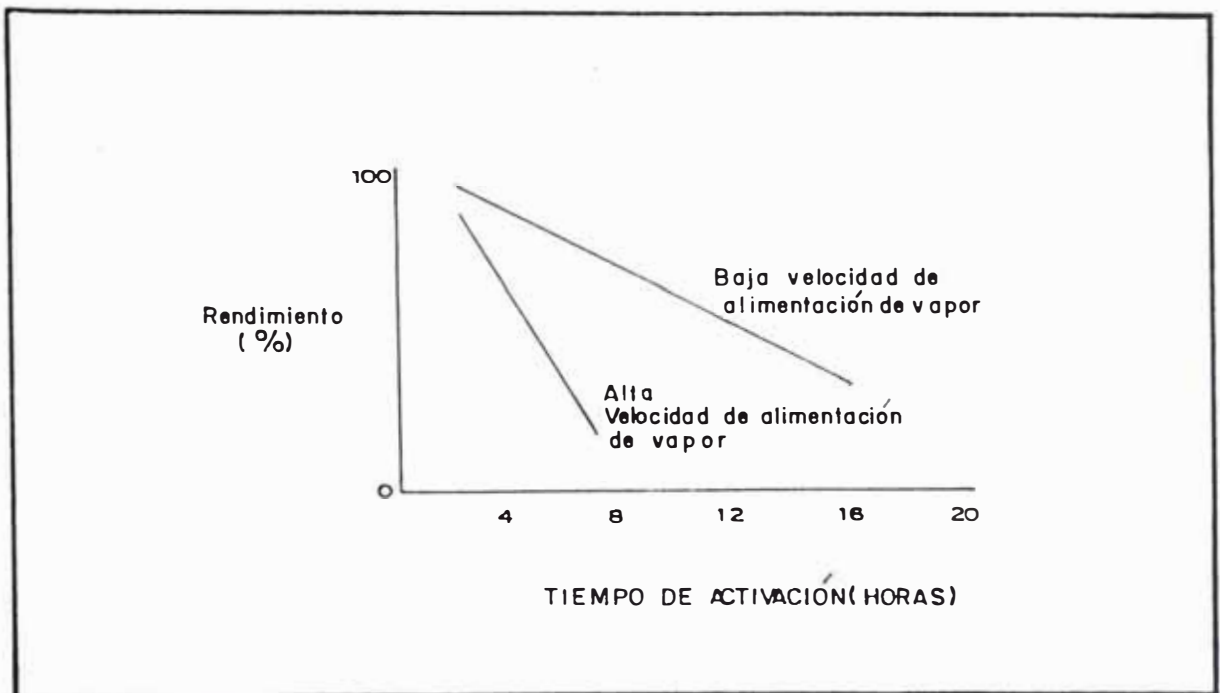


FIG. 3.6 RELACION CUALITATIVA ENTRE EL RENDIMIENTO DEL CARBON ACTIVADO Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL HORNO A ALTA Y BAJA VELOCIDAD DE ALIMENTACION DE VAPOR.

En la Fig. 3.7 se muestra como la actividad del producto medido por el método de nitrógeno BET es aproximadamente proporcional al grado de quemado hasta un punto y corresponde a la formación de la microporosidad del producto. Sin embargo, se alcanza un punto donde el aumento del quemado da una reducción en la superficie del nitrógeno BET y este fenómeno se debe a la conversión de microporos en mesoporos y macroporos por el quemado en las paredes de los poros.

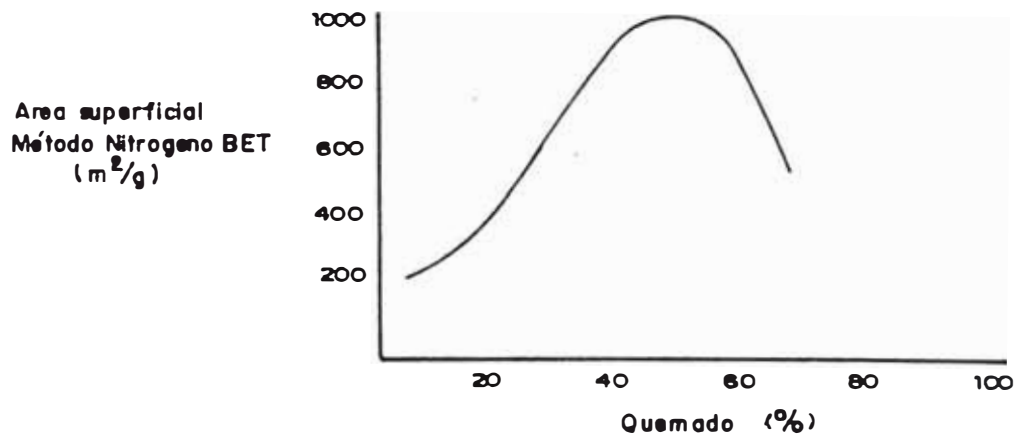


FIG. 3.7 RELACION CUALITATIVA ENTRE EL AREA SUPERFICIAL NBET Y LA PERDIDA DE MASA DE CARBON DURANTE LA ACTIVACION.

Una vez que se ha alcanzado el nivel deseado de actividad, el producto se enfría a una temperatura bajo el punto de ignición del carbón en el aire (bajo 400°C generalmente). Luego se efectúa el empaque directamente o luego de una molienda y clasificación por mallas.

Debido a las propiedades adsorbitivas del carbón activado es importante que el producto esté sellado de la atmósfera, por lo que se usan bolsas de polietileno se sellan para luego volver a embolsar en otra bolsa más gruesa (como polipropileno). (50. 44)

Características del carbón activado de cáscara de coco

Una de las características más importantes de este carbón activado es que es extremadamente microporoso. La mayor proporción del volumen de sus poros corresponden poros con radios de 10 Å, como se puede ver en la Fig. 3.8. se muestra también una curva típica de la distribución de tamaño de poros de un carbón de madera activado químicamente con propósitos comparativos. esta curva indica la presencia de un alto contenido de mesoporos y macroporos. Así mismo se muestra en la Fig. 3.9 la distribución de tamaño de poros de carbón de leña caracterizándose por una distribución de tres tamaños macroporos, microporos y mesoporos, motivo por el cual constituye un rango versátil de productos y se usa en una amplia varie-

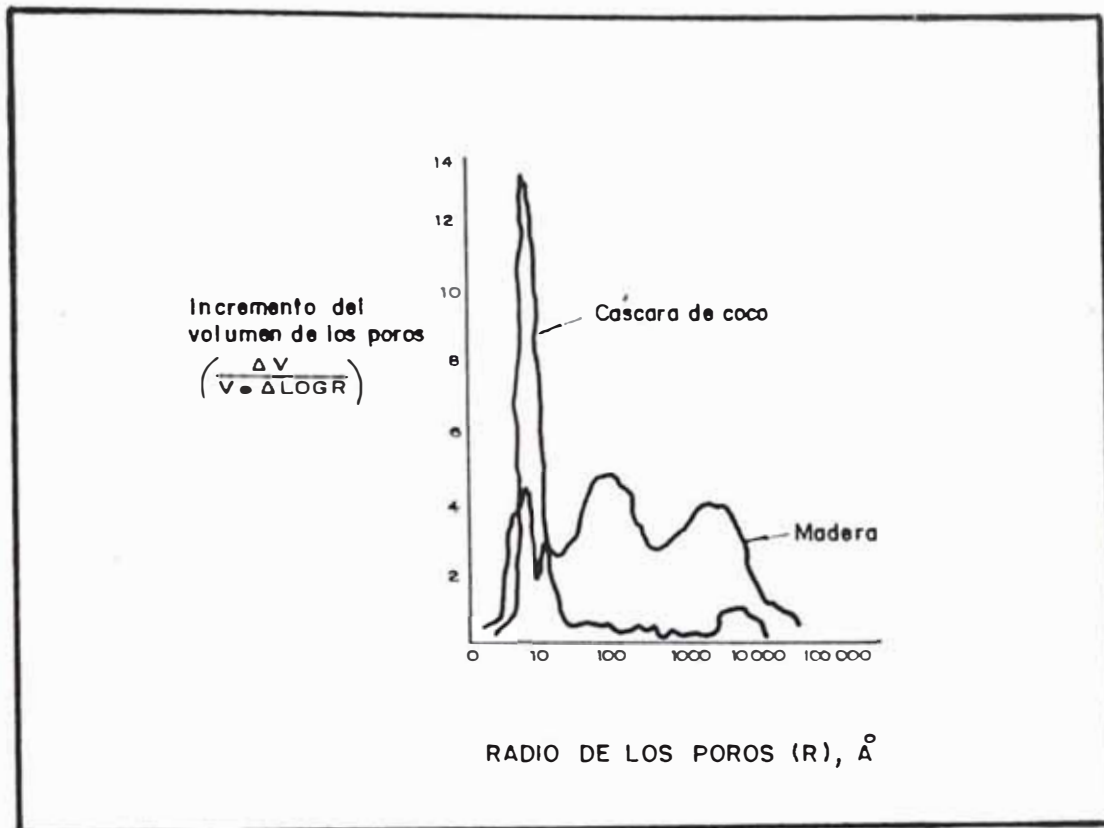


FIG. 3.8 DISTRIBUCION DE LOS TAMAÑOS DE LOS POROS EN UN TIPICO CARBON ACTIVADO TERMICAMENTE DE CASCARA DE COCO Y DE MADERA.

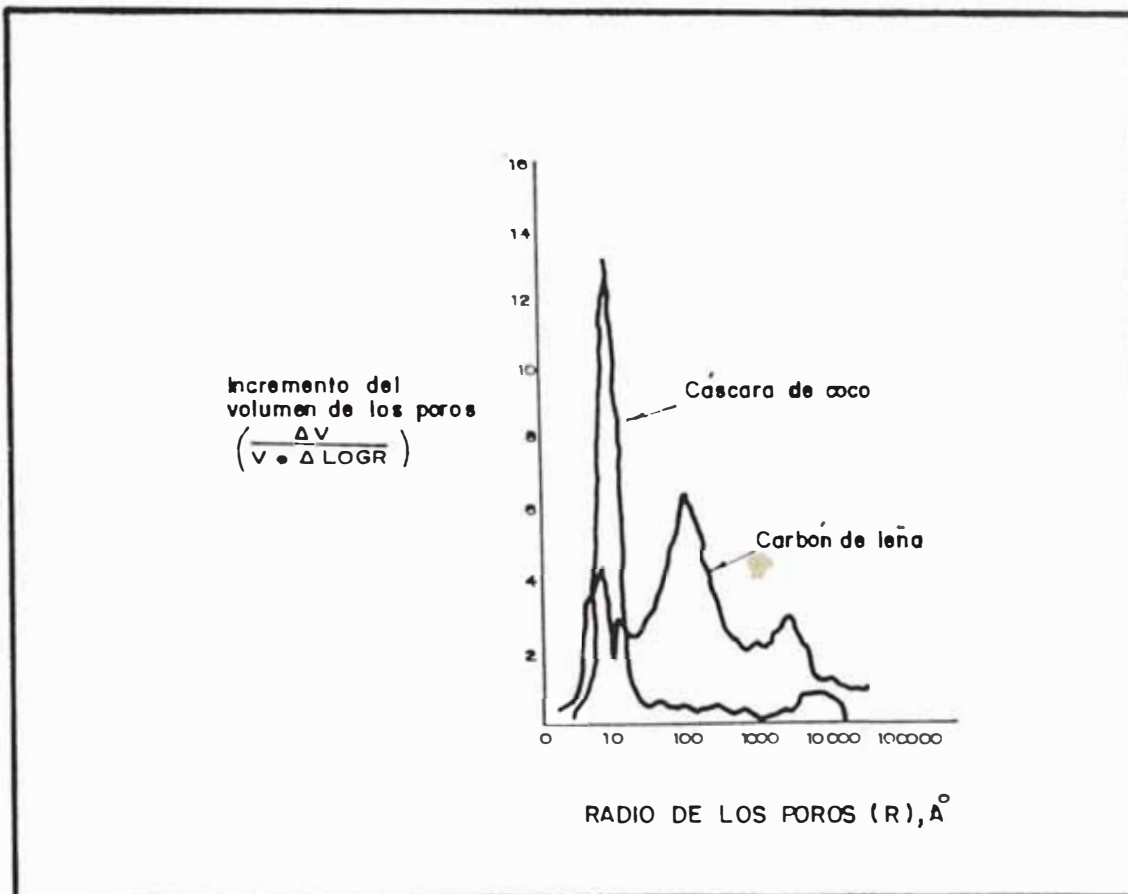


FIG. 3.9 DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE POROS EN UN TIPICO CARBON ACTIVADO TERMICAMENTE DE CARBON DE LEÑA Y DE CASCARA DE COCO.

dad de aplicaciones.

Por esta razón el carbón de cáscara de coco activado es ideal para la adsorción de moléculas gaseosas pequeñas que encajan en los microporos y son usados en aplicaciones de recuperación de solventes y en fase gaseosa.

Los productos de cáscara de coco son usados muy poco en el tratamiento de efluentes industriales ya que sus moléculas son demasiado grandes para penetrar en los microporos. (50. 47)

La muy buena dureza al impacto y resistencia a la abrasión en húmedo del carbón activado de cáscara de coco, combinado con su capacidad altamente adsorptiva para los complejos aurocianurados, hace ideal el uso de estos carbones para la recuperación de oro particularmente en procesos CIP y CIL. En la Fig. 3.10 podemos apreciar las características y ventajas del carbón de cáscara de coco activado.

Usos y Aplicaciones

Además de la aplicación del carbón activado para la recuperación de metales preciosos, existen otras aplicaciones como las siguientes:

CARBON ACTIVADO PARA RECUPERACIÓN DE ORO

Características

Ventajas

Tamaños precisos del carbon

Bajos finos de carbon (ahorro en costos)

Alta dureza

Bajas pérdidas de carbon y oro
(mayores ganancias)

Malla interna standard

Tamaño consistente de la partícula para
operaciones estables

Específico para adsorción de oro

Performance consistente para una operación
estable y recuperación

Capacidad para oro uniforme

Performance consistente para una operación
estable y recuperación

Alta velocidad de Adsorción

Contrarresta pérdidas. Bajas pérdidas de oro di-
suelto. Fácil ajuste para mayores cantidades
o leyes de minerales.

Fácil de desorber

Bajas pérdidas en las colas. Fácil ajuste
para mayores cantidades o leyes.

Bolsas a granel

Menos caro. De fácil manejo y
almacenaje

Diversidad de grados y tamaños

Un producto para cada situación
y proporciona flexibilidad en cambios
durante el proceso.

FIG. 3.10 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DEL CARBON ACTIVADO DE CASCARA DE COC

CARBÓN ACTIVADO PARA RECUPERACIÓN DE ORO

Características	Ventajas
Tamaños precisos del carbón	Bajos fines de carbón (ahorro en costos)
Alto dureza	Bajas pérdidas de carbón y oro (mayores ganancias)
Molla interna standard	Tamaño consistente de la partícula para operaciones estables
Específico para adsorción de oro	Performance consistente para una operación estable y recuperación
Capacidad para oro uniforme	Performance consistente para una operación estable y recuperación
Alta velocidad de Adsorción	Contrarresta pérdidas. Bajas pérdidas de oro disuelto. Fácil ajuste para mayores cantidades o leyes de minerales.
Fácil de desorber	Bajas pérdidas en las colas. Fácil ajuste para mayores cantidades o leyes.
Bolsas o granel	Menos caro. De fácil manejo y almacenaje
Diversidad de grados y tamaños	Un producto para cada situación y proporciona flexibilidad en cambios durante el proceso.

FIG. 3.10 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DEL CARBÓN ACTIVADO DE CASCARA DE COCO.

- La industria del cigarrillo

La industria de cigarrillos es un gran consumidor de carbón activado. En el Japón la ley requiere que finos granos de carbón activado sean usados en los filtros de los cigarrillos para adsorber los compuestos orgánicos volátiles que se emanan durante la quema del tabaco. (42. 50)

- Tratamientos de agua

Que cubre la preparación de agua potable y la purificación de aguas en general. los carbones activados son usados más y más para surtir etapas de tratamiento adicional en ríos y plantas de tratamiento de aguas residuales. por lo que empresas fabricantes de carbón activado están en continua evaluación del mismo para optimizar este fin. (42. 47)

Desinfección de Aceites y Grasas

Se realiza con carbón activado granular y en polvo. También ha sido puesto en práctica en el procesamiento de alimentos. manufactura de cosméticos. también en la desinfección o lavado en seco de solventes.

Refinación de azúcar

La industria del azúcar es una de las mayores consu-

midoras de carbón activado. utilizándose en la decoloración de soluciones de azúcar de remolacha. donde los componentes tóxicos conocidos como saporinas tienden a ser extraídas.

Refinación de Glucosa

En algunos aspectos es similar a la refinación de azúcar. dando preferencia al uso de carbones activados en polvo y se adicionan en forma de pulpa a la glucosa. agitando hasta que la adsorción sea completa. Los carbones activados preferidos son los producidos a partir de antracitas. (42. 47)

Recuperación de Solventes

El procedimiento usual con carbón es de extraer un solvente cargado de vapor de aire a través de una cama de pellets de carbón que adsorben el solvente. permitiendo la desinfección. El solvente adsorbido es luego recuperado por inyección de vapor. Luego el carbón es secado con aire.

Purificación de Aire

En este campo las aplicaciones son diversas. empezando por sistemas de aire acondicionado. campanas extractoras de cocina. máscaras antigases. hasta filtros

de cigarrillos y pequeños contenedores de plástico perforado, que se ubican dentro de las refrigeradoras para prevenir el olor de ciertos comestibles, que pueden ser absorbidos por otros alimentos. (9, 42)

Aplicaciones en Metalurgia

El uso del carbón activado se ha visto favorecido en los últimos años, así tenemos la aplicación en flotación, como catalizador y en la adsorción de iones metálicos, como en el caso del oro y la plata ya mencionado.

En flotación se utiliza el carbón activado como adsorbente de reactivos de flotación, principalmente los espumantes, permitiendo una selección en el desplazamiento de los finos de la ganga, también se usa para adsorber el colector, permitiendo una mejora en la selectividad y por consiguiente el ahorro de depresivos y etapas de limpieza del concentrado. Se usa en la separación cobre-plomo, al deprimir la galena con dicromato y carbón activado, en la flotación inversa de concentrados de zinc usando SO_2 y carbón activado. (42,9,16)

También se está usando recientemente como catalizador en la cementación de cobre, ya que el carbón aumenta la velocidad de reducción del Fe^{+3} a Fe^{+2} , bajo la presencia de un reductor como el SO_2 ; esto permite el

ahorro de chatarra en el proceso de cementación.

Además de estas aplicaciones, existen muchas más como: la separación de vapor de aceite, adsorción en los componentes sulfurados y otros agentes contaminantes de gases industriales, tales como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno y acetileno. Los carbones adsorbentes de gases y decolorantes se usan como catalizadores en diversas reacciones químicas de la industria orgánica, entre las cuales podemos mencionar la hidrogenación y la síntesis de cloruro de vinilo.

En la industria del petróleo se utiliza el carbón activado para la separación de los hidrocarburos por adsorción fraccionada. (42, 47, 9)

3.3 Adsorción de oro en carbón activado

Una buena recuperación de oro usando carbón activado se centra en la etapa de adsorción que se espera extraiga más del 99.6% del oro presente en la solución.

La adsorción es dependiente de numerosos factores interrelacionados entre sí. Puede llevarse a cabo por cualquiera de los métodos citados en el capítulo II (CIP, CIL, CIC).

3.3.1 Mecanismos de adsorción

Los mecanismos de la adsorción de oro en el carbón activado de las soluciones cianuradas, pueden resumirse como sigue:

Reducción de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ a Au metal.

Adsorción de pares iónicos $\text{Ca}(\text{Au}(\text{CN})_2)_2$.

La adsorción inicial de iones seguidos por una reducción parcial a $\text{Au}(\text{CN})_x$ especies en racimos.

La adsorción inicial de pares iónicos seguidos por una oxidación en la cual el $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ es pasado a $\text{Au}(\text{CN})$. (47, 45, 46)

Existen en la actualidad muchas teorías para explicar el fenómeno de la adsorción del oro y plata en carbón activado, sin haber llegado hasta ahora ningún acuerdo: esto se debe a que el carbón activado ofrece un campo muy reducido para la investigación por difracción de rayos X o espectrometría infrarroja, quedando en el campo de la especulación científica. (33, 39)

Existen dos hechos importantes que han sido observados y confirmados en la práctica: en primer lugar la adsorción de los iones $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ es fuertemente favorecida por la presencia de electrolitos

como KCl ó CaCl₂: en segundo lugar la adsorción se incrementa fuertemente con el incremento de la acidez del medio. (74. 42)

Davidson en 1974 investigó cómo afectan los electrolitos "espectadores" en el medio de adsorción el cianuro aúrico. Observó que en ausencia de cationes estabilizadores como Na⁺ y Ca⁺⁺, el cianuro aúrico no puede ser adsorbido en el carbón. El adelantó un mecanismo que involucra la adsorción de oro como un complejo metálico dicianurado Mⁿ⁺(Au(CN)₂)_n. Si el catión Mⁿ⁺ del complejo es un alcalino térreo divalente, el complejo es sujeto más fuertemente en el carbón que cuando Mⁿ⁺ es un metal alcalino monovalente.

Mostró que la fuerza de adsorción del Mⁿ⁺(Au(CN)₂)_n aumenta con el incremento de la concentración de cationes en soluciones en el siguiente orden (47):



A pesar de todos los estudios efectuados hay poca coincidencia en si el carbón actúa como reductor u oxidante y qué papel juegan el aire o el oxígeno en el proceso. (47. 4)

Mucha de la controversia en relación al mecanismo de adsorción indudablemente se debe al hecho que el carbón no está listo para una investigación física por técnicas como espectroscopia infrarroja, por tanto se tiene muy poca información a la mano acerca de los grupos funcionales presentes en la superficie del carbón y acerca de la naturaleza de la adsorción de oro y plata de las especies cianuradas. (46, 61)

3.3.2 Factores que afectan la capacidad de adsorción

El estudio e investigación química del proceso de adsorción tiene por objeto el desarrollo de modelos que permitan un control fácil de la operación de la planta, junto con una pérdida mínima de oro, ya sea en las soluciones pobres o en los finos de carbón.

Los resultados son presentados en términos de variables que afectan la adsorción de oro en carbón activado de soluciones cianuradas. (36)

Efecto de las características del carbón

En la práctica casi todo el carbón activado usado para la recuperación de oro y plata es de cáscara de coco.

El tamaño de la partícula del carbón tiene un efecto significativo en la velocidad de adsorción de oro (índice R). (12)

Según los estudios hechos por Cho, Dixon y Pitt el tamaño de los gránulos de carbón afecta la velocidad de adsorción, observándose mayor velocidad para gránulos más pequeños. Esto no afecta el valor en equilibrio del oro adsorbido.

Las partículas más finas dan una cinética más rápida y causan una caída de presión en las columnas de adsorción y desorción. Estas partículas también incrementan la pérdida de oro en las colas. El tamaño más usado para la recuperación de oro es de malla 10 a 20. (56)

Efecto de la concentración de oro

Estudios realizados en el United States Bureau of Mines y el Anglo American Research Lab confirmaron que el valor de K estaba relacionado con la concentración de oro en la solución. (31)

En la Fig. 3.11 se ve que las isoterms son casi lineales en concentraciones en equilibrio de 10 a 0.1 ppm de oro, pero empiezan a curvarse a concentraciones más bajas. (33. 5)

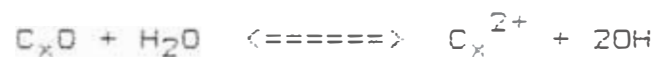
Soluciones con altas concentraciones de oro dan lugar a altos valores de adsorción.

Efecto de pH

Como vemos en la Fig. 3.12 la capacidad de adsorción aumenta con el decremento en el valor del pH del medio.

Cho, Dixon y Pitt encontraron que la carga de oro en equilibrio es dependiente del valor del pH del medio de adsorción. La cantidad de oro adsorbido a pH entre 4 y 7 es casi el doble que la adsorbida a pH entre 8 y 11. (5)

Frumkin propuso en su teoría que el oxígeno molecular reacciona con la superficie del carbón para formar grupos funcionales del tipo C_xO ó C_xO_2 , que reacciona con el agua según:



Cho explica que se obtienen valores más altos de capacidad de adsorción de oro en soluciones ácidas. Según la ecuación anterior, a menor valor de pH, el equilibrio tiende a la derecha y se producirá un mayor número de C_x^{2+} que captarán un número equivalente de aniones $Au(CN)_2^-$. (33, 12)

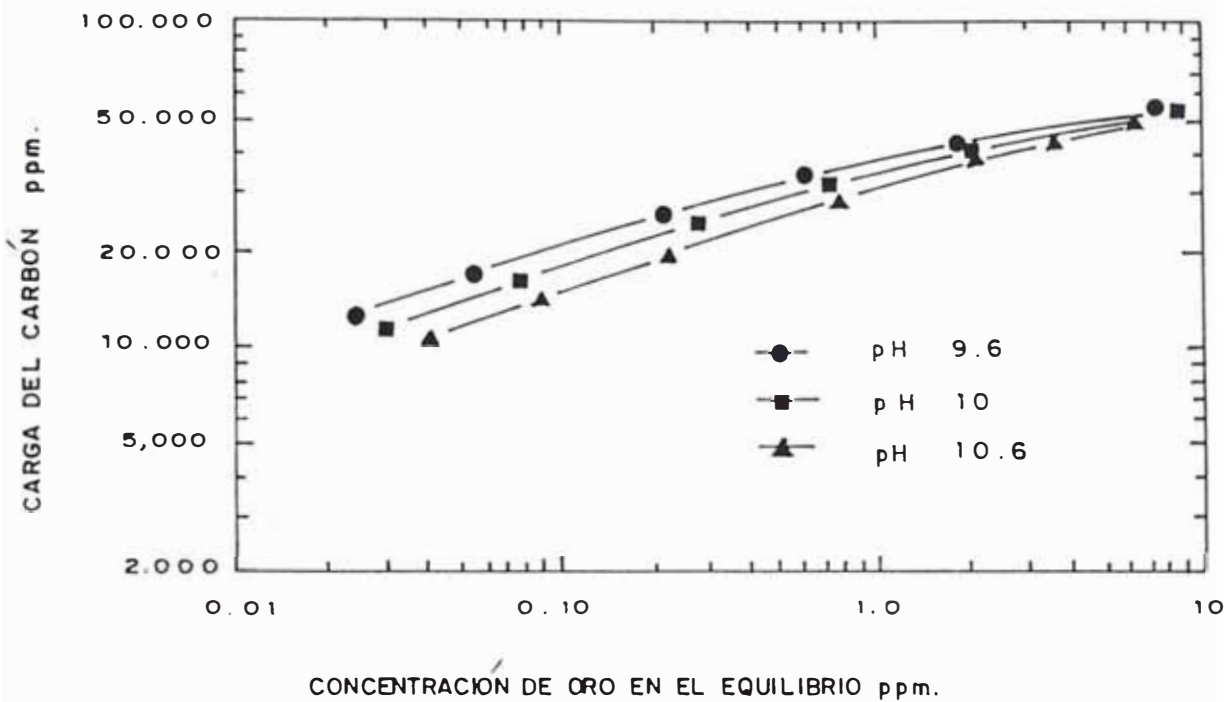


FIG. 3.11 EFECTO DEL pH EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE ORO EN EL CARBON EN EL EQUILIBRIO.

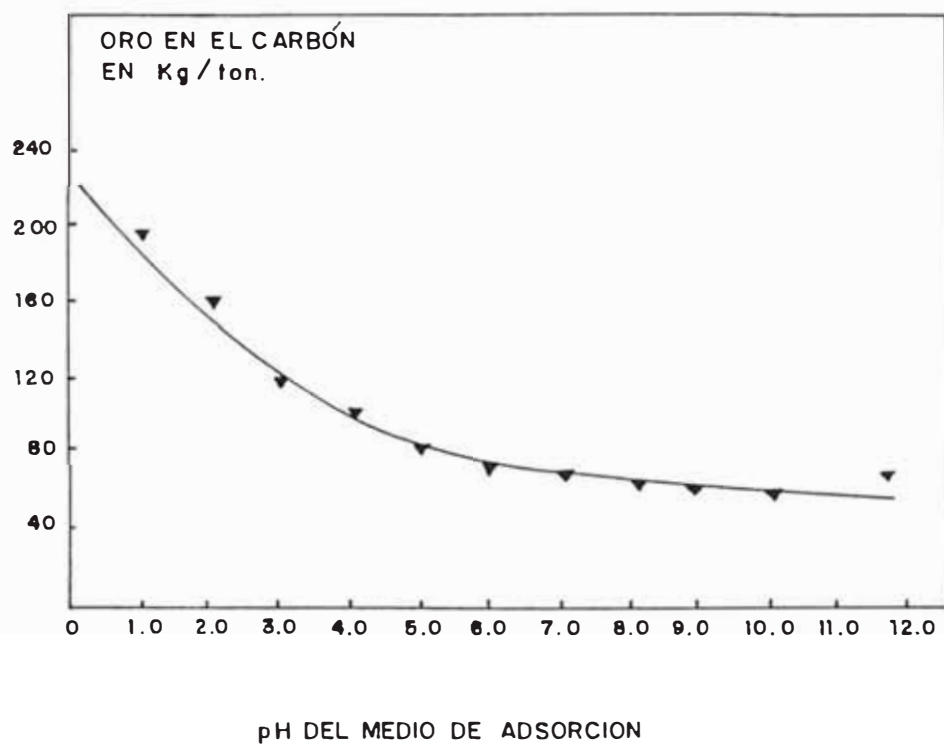


FIG. 3.12 EFECTO DEL pH DEL MEDIO DE ADSORCION EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE ORO EN EL CARBON.

Efecto de la concentración de Cianuro libre

Davidson, Douglas y Tumilty estudiaron el efecto de la concentración del cianuro libre en la adsorción.

A mayores concentraciones de CN libre ocurre una disminución de la capacidad de adsorción (Fig. 3.13). Este efecto se cree que está relacionado con la adsorción competitiva de los aniones, cianuro y complejos aurocianurados por los sitios cargados positivamente, esto se acentúa a temperaturas mayores. (33. 2)

Efecto de la temperatura

El incremento de la temperatura ocasiona la caída de la capacidad de adsorción, como se ve en la Fig. 3.13.

La Fig. 3.14 muestra la cantidad de oro adsorbido en el carbón en el equilibrio versus la concentración de oro en la solución a varias temperaturas en el rango de 22 a 79°C.

Las isotermas muestran que la adsorción de oro disminuye marcadamente con el incremento de la temperatura del medio. (33. 36)

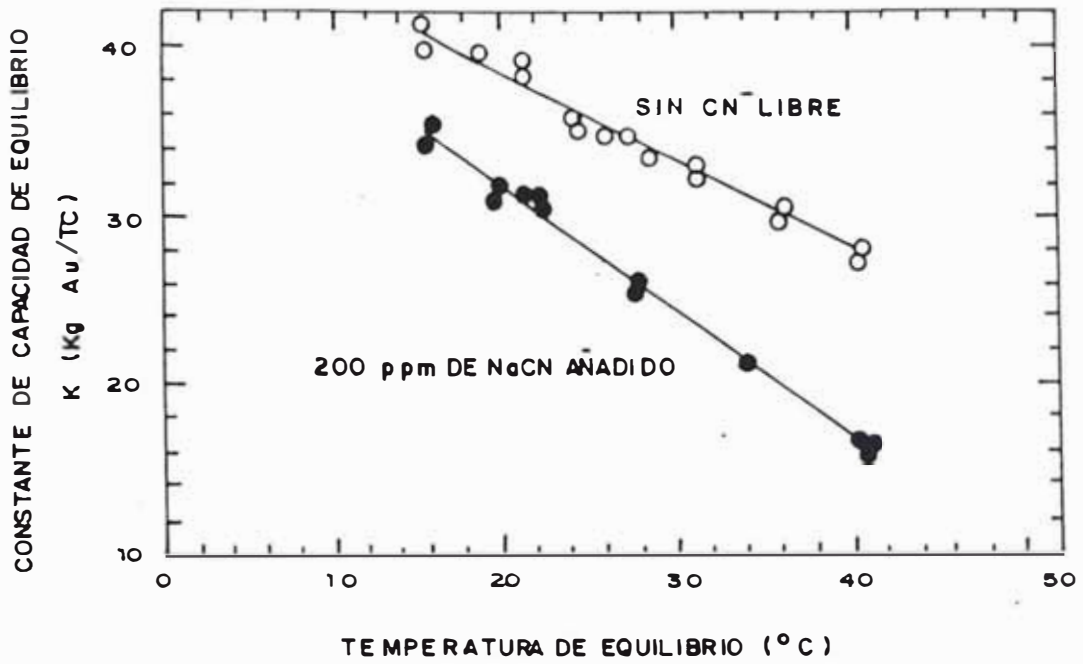


FIG. 3.13 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y CONCENTRACION DE CIANURO LIBRE EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE ORO EN EL CARBON EN EL EQUILIBRIO.

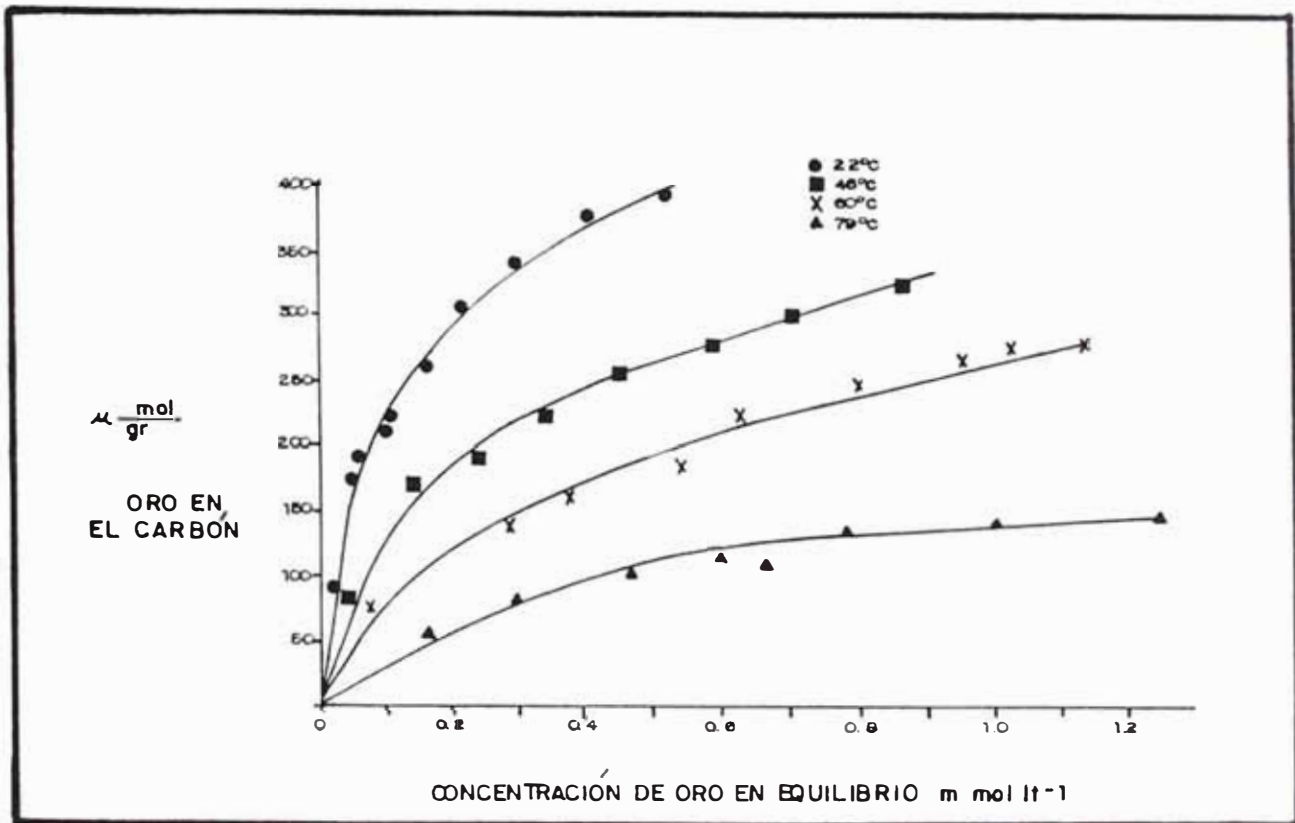


FIG. 3.14 ISOTERMAS DE ADSORCION DE ORO EN EL CARBON ACTIVADO (VOL. SOL. 50 ml, CARBON 0.25 g, SOLUCION CON 2.8 g de CaCl_2 y 0.5 g de KCN por litro).

Efecto de la Composición de la Solución

La capacidad de adsorción de oro en el carbón activado se incrementa o decrece en función de la presencia de ciertos elementos metálicos disueltos en la solución cianurada, dentro de los que se pueden mencionar :

- Efecto de la plata

Muchos de los minerales de oro contienen plata, presencia en la solución cianurada resta al carbón capacidad de adsorción (disminuye su superficie libre) y satura la superficie activa del carbón, debiendo usarse mayor cantidad de carbón activado y por lo tanto se incrementa el costo del proceso.

Debido a esto, los minerales que son muy ricos en plata son tratados por el método Merrill-Crowe en vez de adsorción con carbón activado.

- Efecto de Metales Base

El cobre se comporta de manera similar a la plata. Este es cargado en el carbón como un complejo cianurado pero es luego desplazado por el oro. Este desplazamiento tiene lugar a altos pH ≈ 10 pero no a pH ≈ 5 . (12)

La concentración de níquel reduce la capacidad de carga del carbón activado. La cantidad adsorbida en el carbón está en función a la concentración de níquel

en la solución.

Es difícil no encontrar nada de Zn o Fe adsorbidos en el carbón. (12)

Efecto del calcio

Los iones calcio están presentes en la mayoría de las soluciones cianuradas ricas. Esto se debe al uso de cal para mantener el pH durante cianuración. Como ya se dijo, altos valores de pH disminuyen la capacidad de carga de oro en el carbón.

Es por esto que se aconseja el uso de sólo la cantidad necesaria de cal para evitar la hidrólisis del cianuro (pH \approx 10). (33)

El calcio adsorbido en el carbón se incrementará al aumentar la concentración de calcio en la solución, también aumentará con el tiempo de contacto. En la Fig. 3.15 se muestra el efecto del ión calcio en la capacidad de carga de la adsorción. (5)

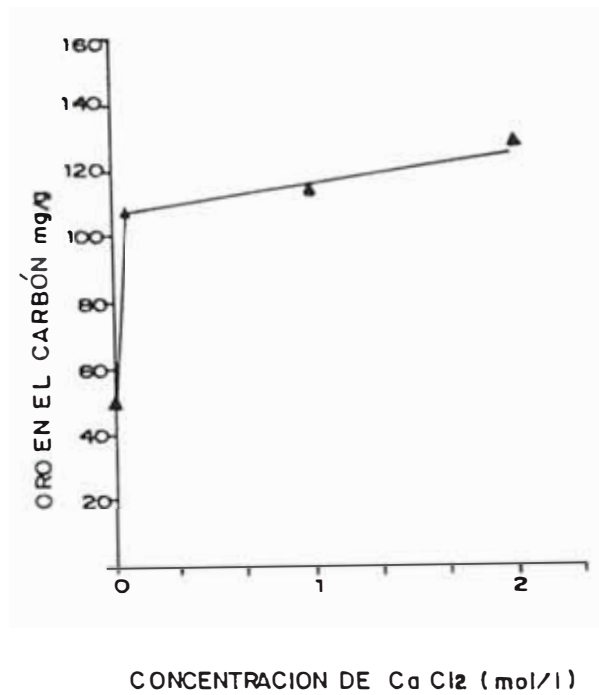


FIG. 3.15 EFECTO DE LA FUERZA IONICA DEL MEDIO DE ADSORCION EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE ORO EN EL CARBON (VOL. SOL. 300 ml, CARBON 0.25 gr, pH 10, Au 192 mg/ lt.).

3.4 Desorción

La dificultad en desorber el oro adsorbido en el carbón y restaurar a éste su capacidad de carga fueron los principales factores que interfirieron en el uso de este método a escala comercial.

Gross y Scott (1924) investigaron el uso de una variedad de compuestos inorgánicos para la desorción de los compuestos aurocianurados cargados en el carbón. Los que mostraron mayor poder solvente para el

oro fueron el cianuro de potasio y el sulfuro de sodio. Sin embargo para la desorción de carbón cargado con oro y plata, pero mayor proporción de plata, el sulfuro de sodio no dió buenos resultados debido a que el sulfuro de plata era precipitado en los poros del carbón. (5)

El proceso Zadra, en 1950, propuesto para recuperar el oro del carbón, dió un gran impulso al uso y desarrollo de este método. En este proceso se usa una solución alcalina caliente (93°C) de sulfuro de sodio. En 1954, Zadra, Engel y Heinen modificaron este proceso y utilizaron una solución cianurada alcalina (1% NaOH + 0.1% NaCN) a 90-93°C.

En 1973 la Homestake Mining Co. puso en marcha la primera instalación a nivel industrial de carbón en pulpa usando el método Zadra modificado.

A partir de ese entonces se han desarrollado otros métodos alternativos para la desorción del carbón activado. (47)

3.4.1 Efectos físicos y químicos

El éxito de la desorción de oro del carbón activado por cualquier método usado, se basa en el control de las condiciones que reducen la capacidad de carga del carbón.

Entre ellos podemos citar a los siguientes :

- Temperatura

Es probablemente la variable que tiene el mayor efecto en la velocidad de desorción. La disminución en la constante de capacidad para el carbón sobre el rango de temperatura de 15 a 40°C se ve en la Fig.3.16 (Davidson, Douglas y Tumilty 1982)

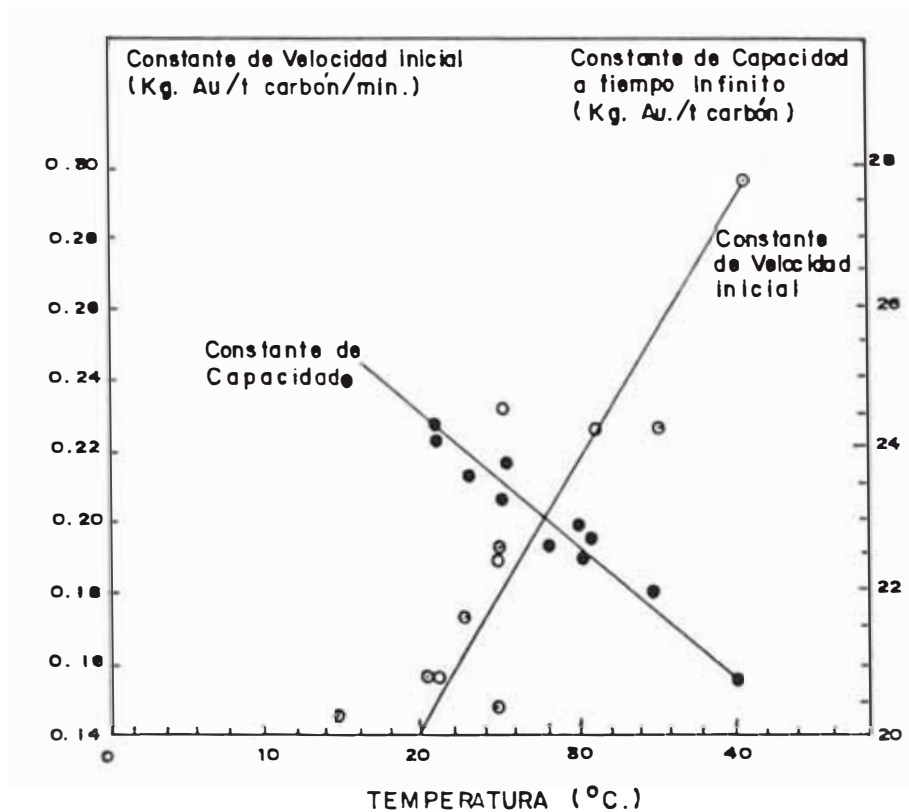


FIG. 3.16 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA VELOCIDAD DE ADSORCIÓN DE ORO (pH 10).

efecto de la temperatura sobre los 85°C en la capacidad relativa del carbón activado para el aurocianuro ha sido dado en dos estudios independientes (Nicol 1985) Fig. 3.17. Es aparente que un incremento en la T° de 100°C tiene el efecto de disminuir la capacidad de carga del carbón en casi un orden de magnitud. La data de operación de la Beatrix Mine (Balley. 1985) mostró que la desorción aumentó significativamente cuando la T° se incrementó encima de 115°C pero no en una relación lineal (Fig. 3.18). Otras investigaciones mostraron una curva similar excepto que el cambio ocurría a 120 125°C (Holtum. Rubin Laxen 1981). (15. U. 33)

- Fuerza Iónica

La presencia de sólidos disueltos en la solución de adsorción generalmente ocasiona un incremento en la capacidad de carga del carbón. Así, ésta se incrementa con el incremento de la concentración de cationes en la solución en el siguiente orden :



Por lo tanto la desorción es favorecida por condiciones de fuerzas iónicas bajas y la ausencia de iones tales como Ca^{2+} y Mg^{2+} . (5)

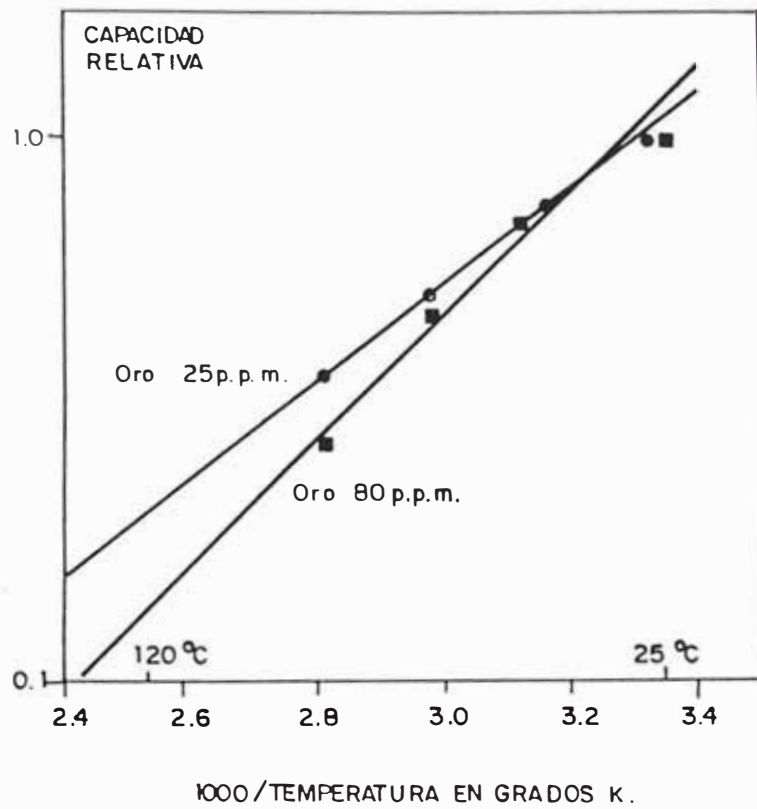


FIG. 3.17 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE ORO EN EL CARBON ACTIVADO.

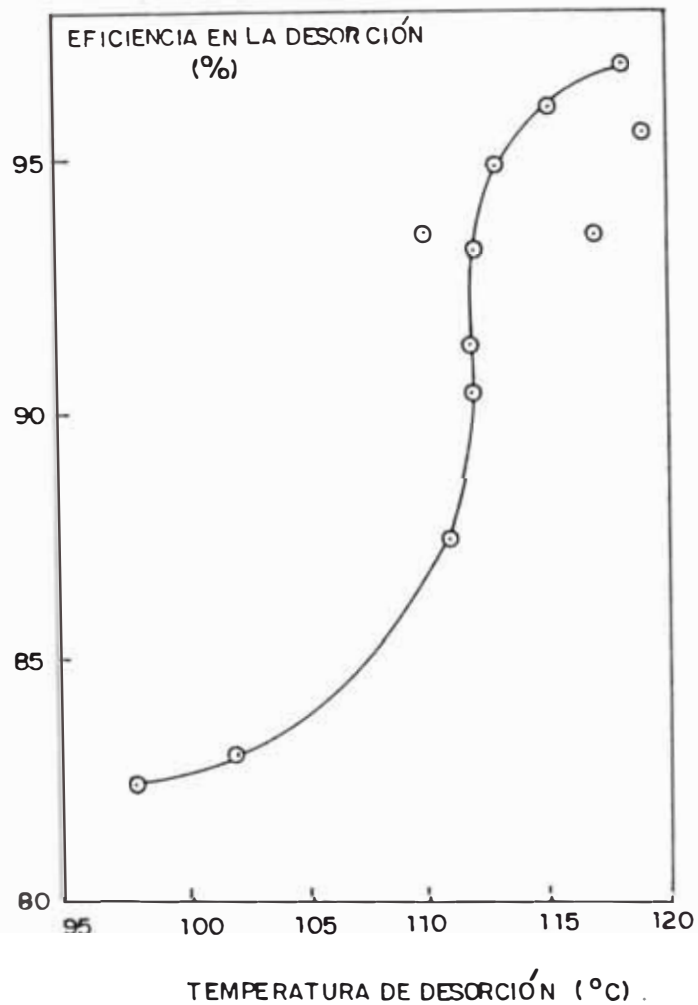


FIG. 3.18 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EFICIENCIA DE LA DESORCIÓN (MINA BEATRIX).

El pretratamiento con cianuro caustico caliente convierte el par iónico $\text{Ca}^{2+} \text{[Au(CN)}_2\text{]}$ en el menos fuertemente adsorbido $\text{Na}^+ \text{Au(CN)}_2^-$ que es entonces desorbido bajo condiciones de baja fuerza ionica producida por el uso de agua blanda o desmineralizada. (5. 35)

- Concentración de cianuro

Como ya se dijo la capacidad de carga de oro aumenta con el incremento de concentración de sales a no ser que el anión sea el cianuro (Fig. 3.19).

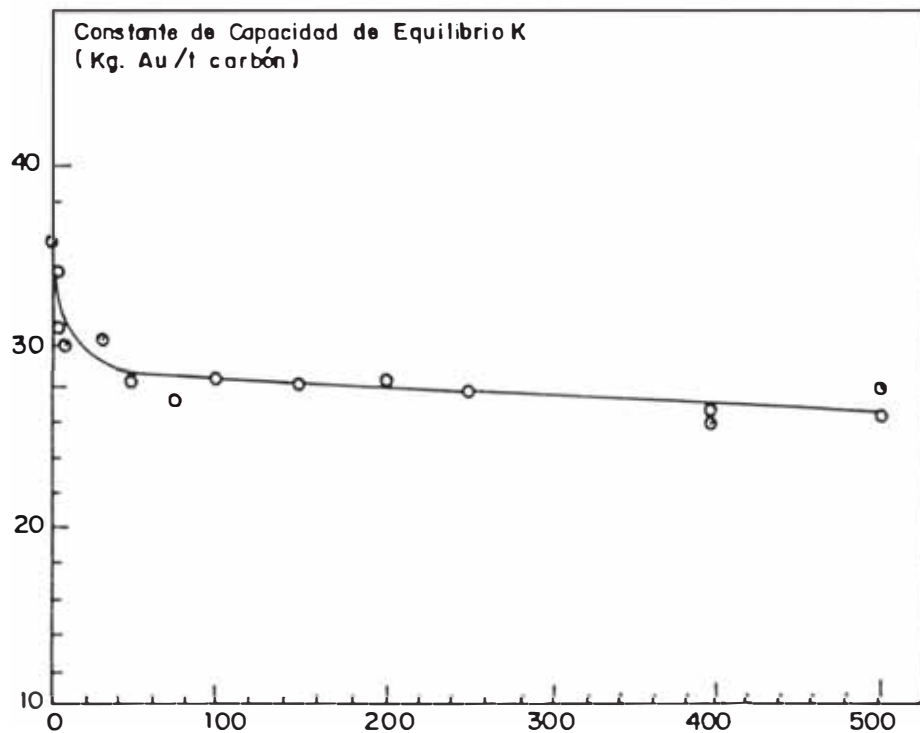


FIGURA 3.19 EFECTO DE LA CONCENTRACION DE CIANURO EN LA CAPACIDAD DE ADSORCION (25°C, pH 10).

La reducción de la capacidad de carga de oro del carbón a altas concentraciones de cianuro es usada en el proceso de desorción. El mecanismo de la acción del ión cianuro se piensa que involucre la adsorción competitiva en los sitios activos del carbón. (53, 2)

- Solventes Orgánicos

Se han efectuado varios estudios con diversos solventes orgánicos añadidos a la solución desorbedora con el fin de lograr una desorción de oro más eficiente.

Aún a bajas temperaturas el oro puede ser desorbido en presencia de altas concentraciones de ciertos solventes. (Tabla 3.4). (5, 37)

TABLA 3.4

EFFECTO DE ALGUNOS SOLVENTES ORGANICOS EN LA VELOCIDAD DE DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO A 25°C

Solvente (40% V/V)	NaCN (g/l)	Oro cargado (kg/ton)	% desorción	
			1 hora	24 horas
Etanol	10	5.5	5	12
Acetona	10	5.5	25	70
Acetonitrilo	10	5.5	25	75
Acetonitrilo	20	5.5	50	95

Los solventes orgánicos incrementan sustancialmente la actividad de pequeños aniones como el CN⁻ mientras que aniones grandes como el Au(CN)₂⁻ son afectados muy poco. Solventes dipolares como el acetonitrilo tienen un mayor efecto en la actividad aniónica que otros solventes como el etanol y el agua. (54. 5)

- Descomposición del CN⁻

La pérdida de cianuro por descomposición a las temperaturas altas usadas en los procesos de desorción tiene una consideración importante.

Aparte de la reacción normal de hidrólisis :



muchas reacciones son responsables de la destrucción del cianuro durante la desorción. Las más importantes son :



La Fig. 3.20 presenta datos de la descomposición de cianuro en una solución conteniendo 0.2M NaOH y 0.2M NaCN a diferentes temperaturas con y sin carbón.

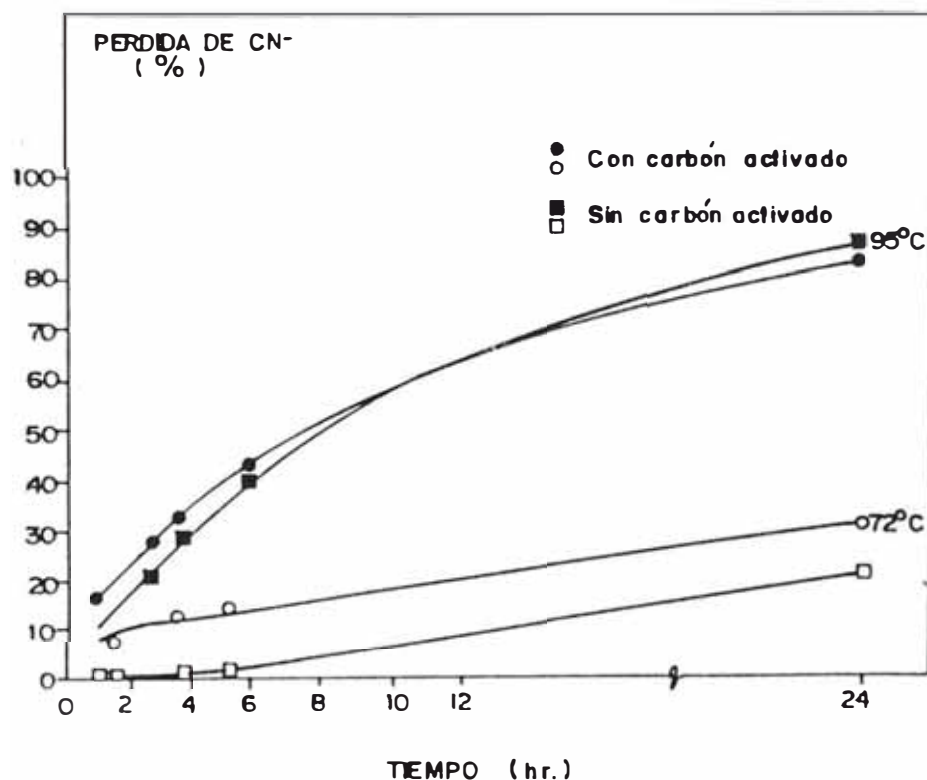


FIG. 3.20 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y DEL CARBON ACTIVADO EN LA DESCOMPOSICION DEL CIANURO.

La temperatura es claramente un factor muy importante. A temperaturas altas se agrava la descomposición y pérdida de CN. La presencia de carbón tiene un mayor efecto en la temperaturas más bajas pero esto casi no se nota a 95°C. (5. 25)

3.4.2 Métodos de desorción

Se han desarrollado diversos métodos de desorción para la recuperación de oro del carbón activado.

Todos los métodos usan una solución de NaOH y NaCN para disolver el oro y plata como complejos : $Au(CN)_2^-$ $Ag(CN)_2^-$. Se diferencian en el uso de diferentes temperaturas (o presiones) y aditivos que afectan la cinética de la desorción y por lo tanto el tamaño de la planta de desorción.

Entre los métodos más usados podemos citar :

- Proceso Zadra
- Proceso AARL
- Desorción Oroánica.

3.4.2.1 Proceso Zadra

En el proceso Zadra se hace circular una solución caústica cianurada, generalmente de 0.2 - 0.5% de NaCN y 1 - 2% de NaOH, a través de un circuito cerrado compuesto de una columna de desorción y una celda de electrodeposición. La Fig. 3.21 muestra un diagrama convencional del proceso Zadra.

Los circuitos Zadra operan a presión atmosférica y a una temperatura de 95 a 100°C. Esta temperatura se logra usando un intercambiador de calor con vapor. El tiempo requerido para una desorción completa es de aproximadamente 72 horas.

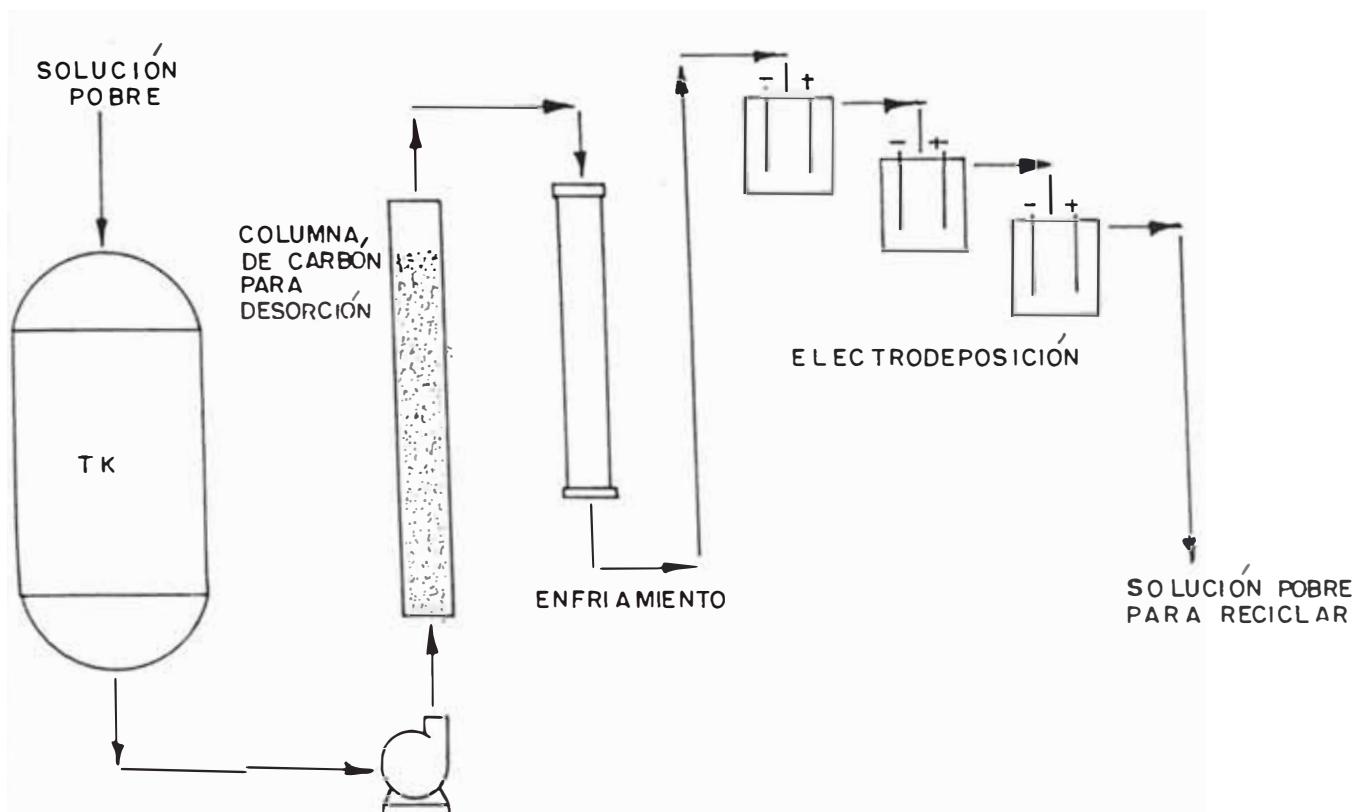


FIGURA 3.21 ESQUEMA DEL PROCESO DE DESORCIÓN ZADRA.

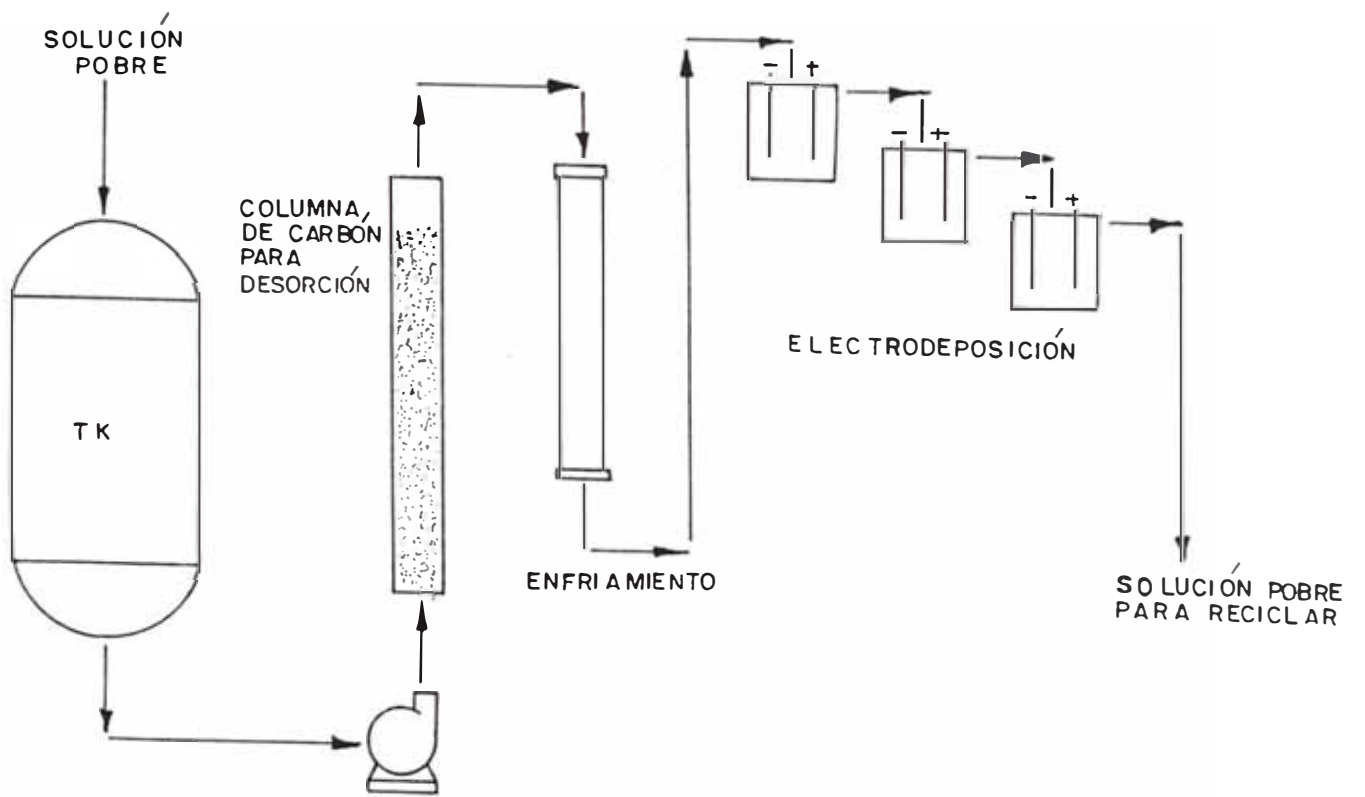


FIGURA 3.21 ESQUEMA DEL PROCESO DE DESORCIÓN ZADRA.

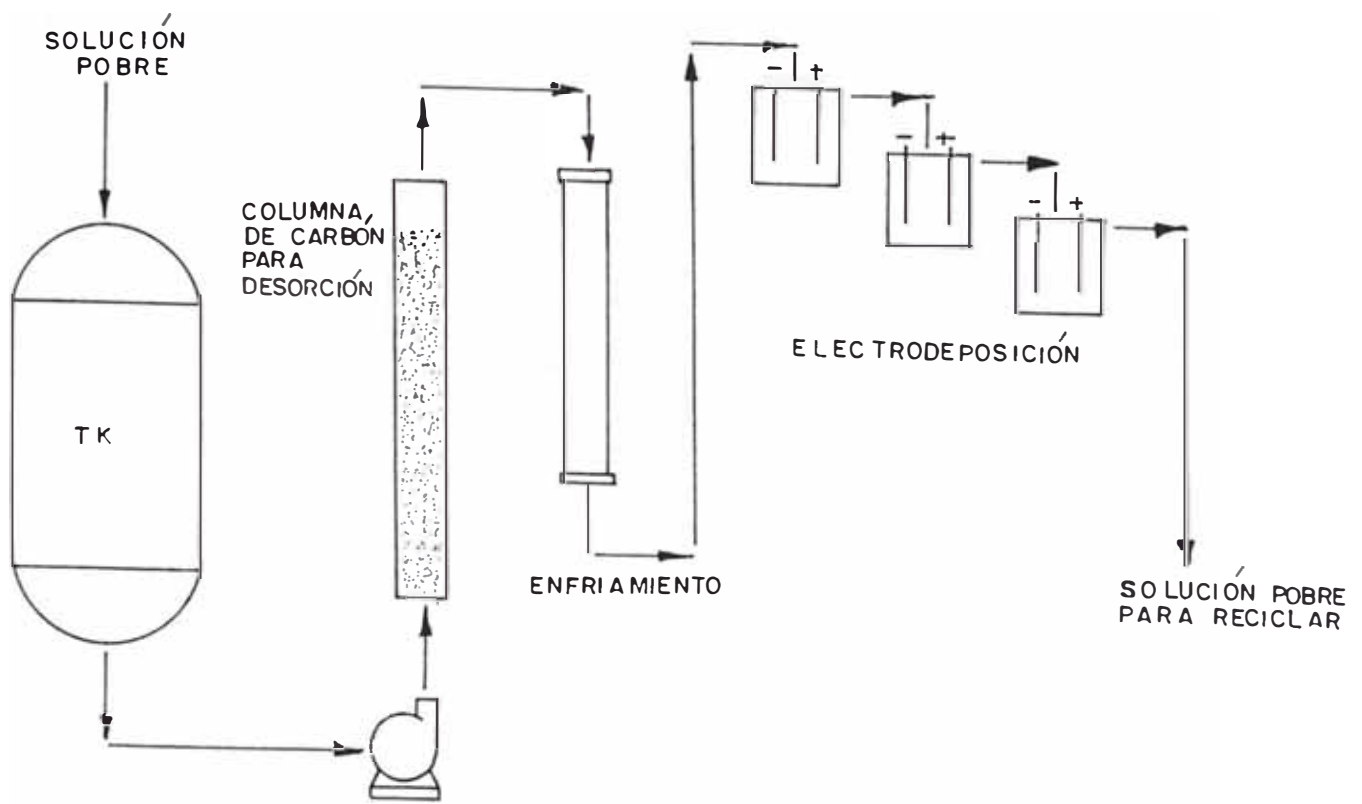


FIGURA 3.21 ESQUEMA DEL PROCESO DE DESORCIÓN ZADRA.

Luego de desorber el oro del carbón, la solución es parcialmente enfriada en un intercambiador de calor fluyendo por gravedad a las celdas donde se recuperará el oro electrolíticamente. (i. 53)

Los parámetros críticos en el proceso Zadra son la temperatura, la velocidad de flujo y la composición de la solución desorbedora.

Una modificación del proceso Zadra consiste en elevar la presión a aproximadamente 100 psig (la temperatura es usualmente 148°C).

requiere una velocidad de flujo de más de 2 volúmenes de lecho por hora para asegurar una transferencia adecuada en la columna y más críticamente un flujo adecuado en las celdas de electrodeposición. (33, 1)

La composición de la solución desorbedora es importante debido a que si no se mantiene el balance de agua, la fuerza iónica se incrementa y la velocidad de desorción disminuye. El ión cloruro es problemático debido a que afecta el perfor-

manera de la electrodeposición y ocasiona corrosión en los componentes de la celda. (1. 5. 76)

Las ventajas del uso del proceso Zadra son :

Los sistemas toleran el uso de agua de baja calidad (altas concentraciones de iones Ca y Mg).

La desorción puede continuarse hasta recuperar casi todo el metal precioso del carbón.

La temperatura del sistema es mantenida fácilmente debido a que la solución desorbedora es reciclada.

El volumen de la solución desorbedora es relativamente pequeño, por lo tanto hay poco consumo de reactivos.

Las desventajas de este proceso son :

Requerimiento de altas presiones para procesos más rápidos.

Se acumulan las impurezas y al ser recicladas producen una electrodeposición pobre. El oro que es reciclado disminuye la desorción. (53. 33. 72)

3.4.2.2 Proceso AARL

El proceso de desorción de la Anolo American

Research Laboratory (AARL) ha sufrido una serie de modificaciones desde las publicaciones de Davidson en 1974. Este proceso fue usado por primera vez a escala industrial en 1980 en President Brand y ahora se usa comúnmente en Sudáfrica casi en un 70% de las plantas de desorción. (5)

La Fig. 3.22 muestra un diaorama simplificado de este proceso. Después de cargar la columna, el carbón, se lava con ácido clorhídrico al (V/V) aproximadamente 1 vol. de lecho. luego se lava con 1 ó 2 volúmenes de lecho de agua. Durante este periodo se eleva la temperatura del sistema a 110 - 120°C. (5)

Las investigaciones han mostrado que mientras el ácido frío diluido quita efectivamente el calcio y el zinc del carbón, el ácido caliente (90°C) quita el calcio, zinc y níquel junto con fierro y silica. El oro, la plata y el cobre no son desorbidos del carbón ni con ácido frío, ni caliente. (33. 1. 38)

El carbón lavado es ahora pretratado con una solución con 2% de NaCN + 2% de NaOH, remojándose en ella durante 30 minutos aproximadamente.

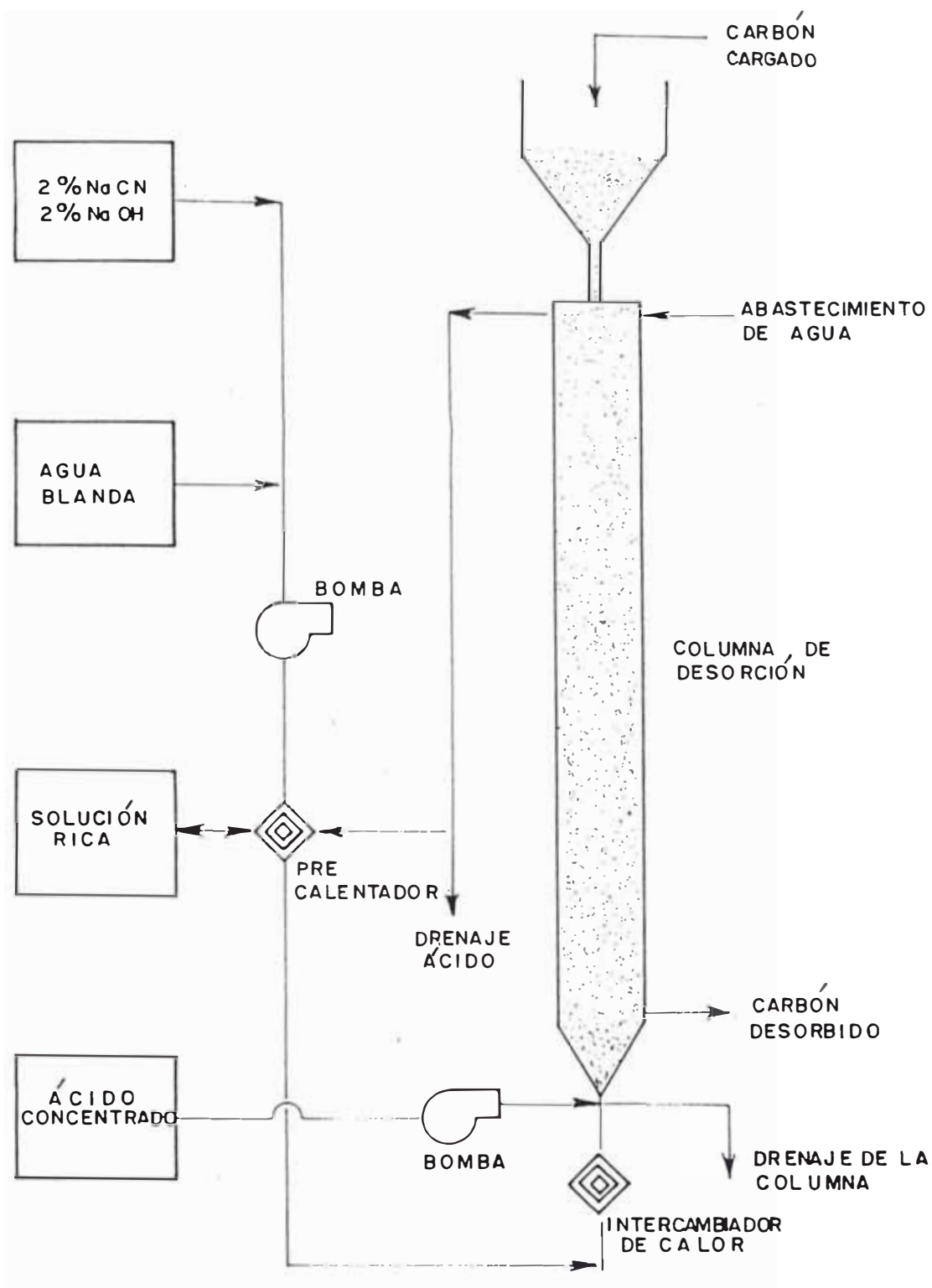


FIGURA 3.22 ESQUEMA DEL PROCESO AARL PARA DESORCIÓN DE ORO.

El oro es entonces desorbido del carbón con 5 a 6 volúmenes de lecho de agua de alta pureza a 120°C y una razón de flujo equivalente a 2 volúmenes de lecho por hora, para su posterior recuperación por precipitación con zinc o por electrodeposición.

Las ventajas del proceso AARL son :

El sistema es muy flexible operacionalmente debido a que tiene un tiempo de desorción corto (aprox. 10 horas).

Limita la degradación del carbón en la regeneración de éste debido a que el carbón queda menos contaminado al final del proceso (siempre se desorbe con solución fresca).

Trabaja a 120°C, temperatura menor que la usada en el proceso Zadra a presión.

Algunas desventajas del proceso son :

Requiere una buena calidad de agua : menos de 1.500 ppm de TDS. lo que también es bajo en calcio y magnesio ($Ca + Mg < 200$ ppm). (53.14)

La cantidad de electrolitos generados en este proceso para la posterior electrodeposición, es mucho mayor que para el proceso Zadra (5:1). Esto incrementa el costo operativo en términos de consumo de energía. (5. 53, 33)

3.4.2.3 Desorción Orgánica

La desorción de oro del carbón es mucho más favorable en presencia de solventes orgánicos.

Se han hecho numerosos trabajos usando alcohol, cetonas y nitrilos orgánicos siendo el acetonitrilo el solvente evaluado como el más efectivo (ver Tabla 3.4). El primer proceso usado comercialmente con solventes orgánicos fue el tipo Zadra con 10-20% de etanol (Proceso Zadra-Heinen), reduciendo el tiempo de operación de 30 a 8 horas. (1)

Los circuitos convencionales de la desorción orgánica, consta de uno o más reactores en circuito cerrado con electrodeposición. la solución típica consiste de 10-20% de alcohol (etanol o metanol), 1% de NaOH y 0.1% de cianuro de sodio, manteniéndose a una temperatura de 70-90°C.

Los solventes orgánicos permiten una cinética más rápida. Estos son posteriormente recuperados debido a sus altos costos.

La electrodeposición directa de soluciones orgánicas ricas implican una alta toxicidad y riesgo de incendio, por lo que se recomienda aislamiento de los equipos para evitar estos inconven-

nientes. (1, 33, 5)

Hoy se usa una variedad de procedimientos para la recuperación de oro a partir de carbón activado. la desorción del carbón con glycol es actualmente una modificación del proceso con alcohol. Una solución típica de desorción con glycol contiene 20-25% de glycol etileno y 2% (peso) de NaOH. la solución es calentada a 105°C. el procedimiento de operación es igual a la desorción con alcohol. La desorción con glycol comparándola con el proceso Zadra a presión atmosférica resulta en una reducción 50% en el tiempo de operación. (5, 54)

Las ventajas de este proceso son:

Tiempos cortos de reextracción y leyes altas en la solución eluyente, facilitando la electrodeposición.

Baja temperatura de operación, por consiguiente requerimiento bajo de calor.

Bajo costo de capital.

Las desventajas de este proceso son:

Riesgo de incendio.

Costo de operación alto, si el alcohol no

es cuidadosamente recuperado, ya que el glycol cuesta 2 veces el precio del etanol.

3.4.3 Equipos

- Elutriator

El elutriator es necesario para separar materiales extraños, como pedazos de madera, que están presentes continuamente en el carbón cargado, ocasionando el cambio de características de manejo del carbón causando el bloqueo de tuberías en los tanques. El elutriator quitará también lodo adherido al carbón y dará un producto de desorción más limpio.

El elutriator es un envase cilíndrico de base cónica con un ángulo de 60° , el agua es introducida justo encima de la sección cónica, creando un remolino que levanta las astillas de madera. El carbón se ubica en la porción más baja del envase y es periódicamente descargado con una válvula de bola operada a tiempo. (25, 53, 5)

- Columna de desorción

La capacidad volumétrica de la columna de desorción es dependiente de la cantidad de carbón

que se trata diariamente. Esto es dependiente del valor escogido para el contenido de oro del carbón agregado. Un volumen extra debe ser agregado para suplir materiales extraños como maderas, y por la expansión de la cama en sistemas en contracorriente para desorción.

Los ingresos y salidas para carbón y soluciones deben ser arregladas tal que la solución sea convenientemente distribuida evitando áreas muertas. El carbón debe ser fácil completamente descargado. Las instalaciones modernas toman en cuenta estos requerimientos y mantienen una buena distribución tanto del carbón como de la solución. La Fig. 3.23 muestra un esquema detallado de una columna de desorción.

La columna debe estar aislada para conservar el calor. el aislamiento debe estar cubierto para evitar la entrada de la humedad. Para escoger el material de la columna, debe tomarse en cuenta los pasos del proceso. Algunos procesos dan un tratamiento ácido al carbón previo a la desorción. un tanque común para el tratamiento ácido y la desorción simplifica el diagrama de flujo pero crea serios problemas de corrosión. Instalaciones más recientes tratan por separado las dos etapas en dos tanques separados.

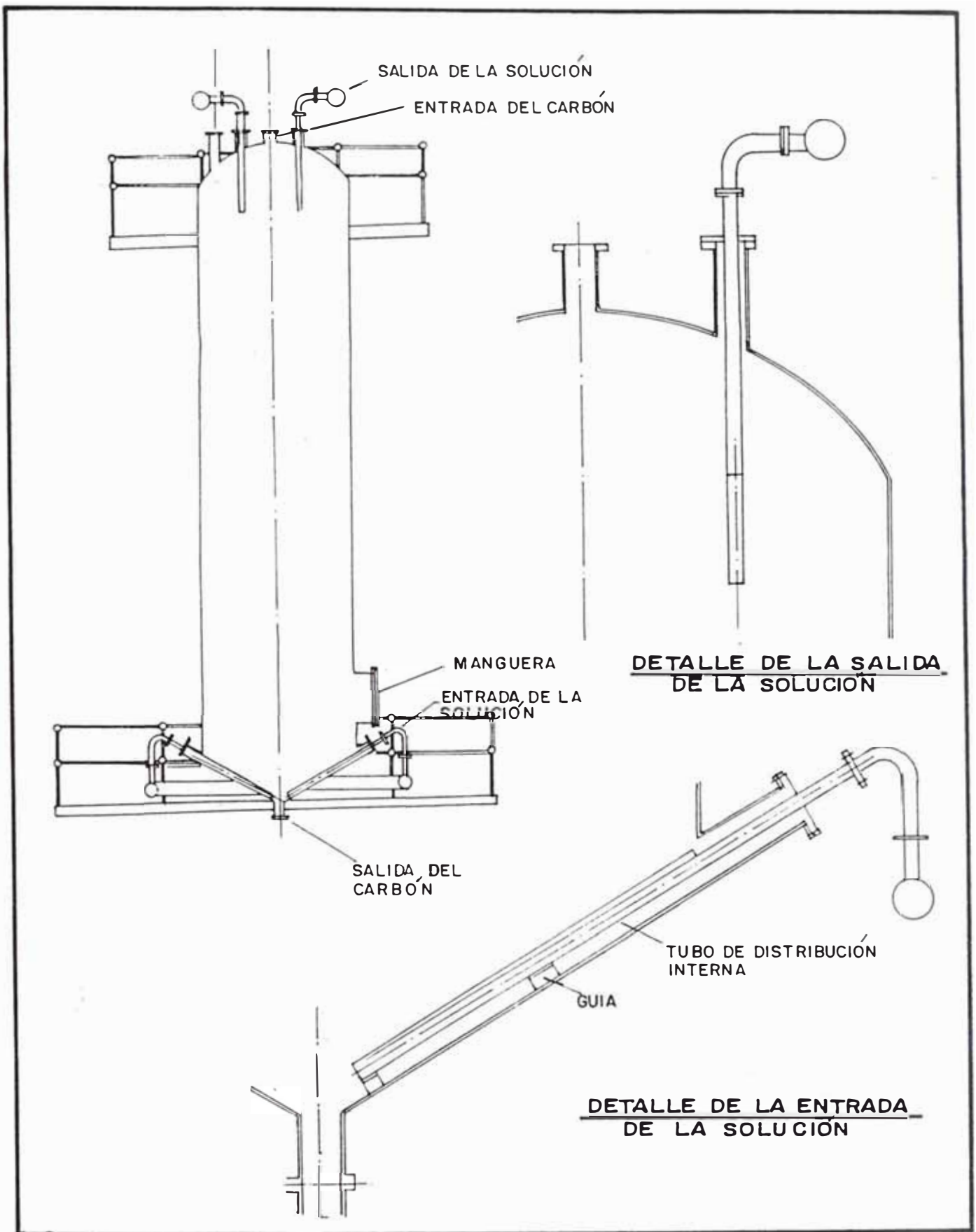


FIGURA 3.23 DIAGRAMA DE UNA COLUMNA DE DESORCIÓN

En el caso de realizar el tratamiento ácido en la columna de desorción. las columnas de acero blando revestido con goma de butil o ebonita han dado buenos resultados. (5, 14)

Intercambiador de calor

El intercambiador de calor. es un enfriador cuyo objetivo es asegurar que la solución desorbente sea enfriada bajo su punto de ebullición.

Las más usadas son de plato y marco o carcasa tubos. los primeros son usados porque son más baratos. compactos. fáciles de sacar y añadir nuevos: pero son susceptibles a escamarse y tapo-arse con fibras finas, plástico y carbón. (5, 14)

Instrumentación y Control

Los requerimientos de instrumentación pueden señalarse en tres categorías : secuencia operativa, medida y control.

Secuencia operativa : Las válvulas son usadas para controlar todas las operaciones de la desorción y es esencial que estas sean operadas en la combinación y secuencia correcta. Muchas operaciones están provistas de facilidades, normalmen-

te con un controlador programable para que las válvulas sean automáticamente reguladas. La mayoría de los sistemas provee facilidades para operar el sistema manualmente en caso de fallas, también facilidades para habilitar el chequeo de la operación de las válvulas como ocurre con la válvula de alivio en un sistema con un tanque presión, aunque no es necesario, si la columna fue diseñada para la máxima presión generada por la bomba de alimentación. (5. 14)

Medidas : Las temperaturas a través de cada intercambiador de calor son medidas y registradas. La medida de las presiones no son imprescindibles exceptuando la **presión** del vapor subyacente que es registrada. El flujo debe ser **medido y registrado** tal que los cambios con respecto al **equilibrio** puedan ser controlados **fácilmente**. (5)

Control : Son limitados los lazos de control necesarios para el circuito de desorción. éstos **comprenden (5. 14) :**

- 1) Control de la velocidad de alimentación de la solución desorbente con una válvula de control o usando un motor de velocidad variable en la bomba de alimentación.

- 2) Control de la temperatura de la solución desorbedora, añadiendo vapor al calentador.
- 3) Control de la temperatura de la alimentación a las celdas electrolíticas para evitar la ebullición de la solución cuando la presión cae.
- 4) Control de la presión en el circuito para evitar la ebullición.

3.5 Electrodeposición

La **electrodeposición** es práctica conveniente para la recuperación de los metales preciosos contenidos en la solución cianurada proveniente de la etapa de desorción.

El diseño usado generalmente en este **circuito** es el de celdas electrolíticas rectangulares. **Estas** consisten en uno o varios tanques en serie de acero inoxidable (el cual actúa como ánodo) o de fibra de vidrio o polipropileno (que son las **más** usadas).
Fig. 3.24.

En ella están suspendidos verticalmente varios pares de ánodo-cátodos de acero inoxidable y lana de acero. (33. 5. 53)

El electrolito agotado se recircula al circuito de desorción. Los metales electrodepositados en los cátodos de lana de acero son retirados (cosechados) y

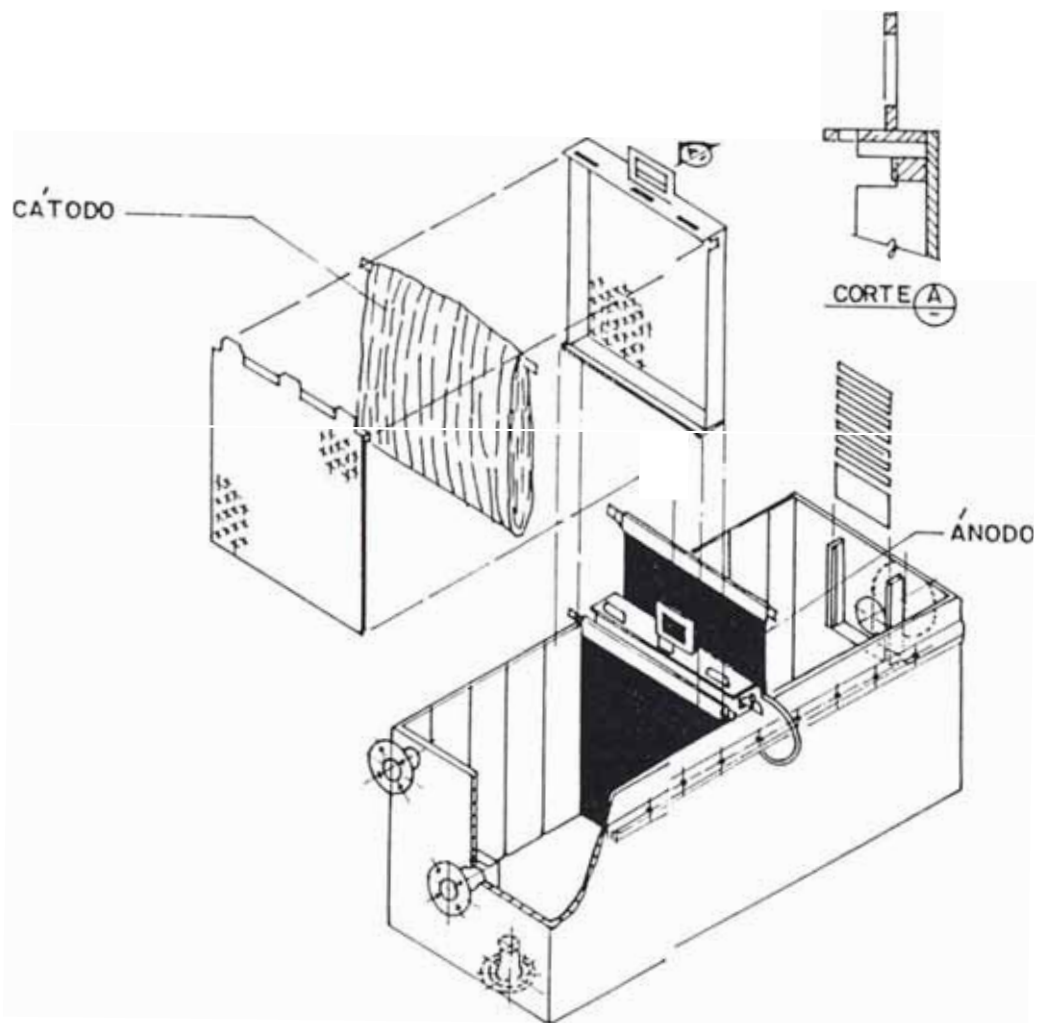


FIGURA 3.24 CELDA ELECTROLITICA CONVENCIONAL PARA UN CIRCUITO DE DESORCION.

llevados a retinar. (14. 5. 53)

3.6 Envenenamiento orgánico (Desactivación)

Durante la adsorción, gran número de moléculas orgánicas e inorgánicas se pueden acumular en la estructura de los poros del carbón activado. La consiguiente pérdida de porosidad da como resultado la caída de la actividad del carbón observada en la práctica.

Una de las clases de iones adsorbidos que desactivan el carbón son los materiales orgánicos en la línea del proceso. Estos son quitados selectivamente durante la regeneración térmica recobrándose así la actividad y estructura porosa del carbón activado. (5. 1)

han identificado un número de estos compuestos orgánicos como agentes de flotación, aceites lubricantes kerosene que comúnmente son encontrados en los circuitos de estas plantas.

La velocidad de adsorción del oro y la capacidad de carga del carbón son seriamente disminuidas por dichas sustancias.

Un posible mecanismo de "desactivación" que afecta la velocidad de carga pero no la capacidad de carga

uede ser la adsorción de un film de solvente sobre la superficie del orano del carbón (que por lo tanto crea una barrera de transferencia de masa): sin una penetración significativa del solvente en los poros del mismo. (5)

3.7 Regeneración o reactivación del carbón activado

La velocidad a la que el carbón adsorbe el oro es el criterio usado para determinar el momento de la regeneración o reactivación del mismo.

La eficiencia de un proceso con carbón activado depende de su actividad. Es por esto que luego de la desorción se debe restaurar la actividad del carbón o reemplazarlo cuando se llegue al punto en que las pérdidas de metales preciosos superan el valor del carbón activado nuevo. (38, 14, 1)

El lavado ácido es una forma de restituir la actividad del carbón activado. Se usa ácido clorhídrico o ácido nítrico diluido para este fin. Esto es importante para eliminar los carbonatos que precipitan en la superficie del carbón disminuyendo el área de contacto entre el carbón y la pulpa y por lo tanto afectando la actividad del carbón. (37, 1)

La actividad química y térmica han sido tratados anteriormente. Varios productos químicos se usan

para restaurar la actividad del carbón. La reactivación química permitirá sólo una restauración parcial de la actividad del carbón saturado con diferentes adsorbatos.

La reactivación térmica elimina fundamentalmente los materiales orgánicos del carbón. Esta se hace alrededor de los 600 - 700°C en diferentes tipos en hornos **en ausencia de aire**. Los más usados son los hornos verticales. El enfriamiento se hace en el horno o por inmersión en agua. (47. 37. 5)

El tipo de enfriamiento aplicable al carbón después de la regeneración depende principalmente del tipo de carbón: el enfriamiento por inmersión en agua es rápido y barato pero puede tornar al carbón frágil y deshacerlo. El enfriamiento normal en el horno con gases inertes (N_2 , CO_2 , etc) restituye completamente las propiedades mecánicas del carbón evitando su degradación: pero es más lento e incrementa los costos de tratamiento.

El carbón ya regenerado es tamizado para eliminar los finos. éstos se incineran y se agregan nuevamente al proceso de cianuración para extraer los valores de oro que puedan contener.

Para determinar la eficiencia de la regeneración, se mide la constante K de capacidad de carga, que

para carbones nuevos es normalmente de 30 a 31 kg Au/ton.

Siempre hay pérdidas de carbón fino en el circuito. por atrición y desgaste por lo que tiene que ser reemplazado periódicamente por carbón nuevo. Es importante considerar un stock adecuado en almacén. El almacenamiento del carbón requiere un área ventilada ya que es ávido de oxígeno. (5. 37. 14)

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO CARGADO CON ORO

4.1 Generalidades

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de las variables más importantes que intervienen en la desorción: la temperatura del proceso, la composición de la solución desorbedora y la razón de flujo.

Estas variables afectan la capacidad de carga del carbón, razón por la que este estudio experimental está dirigido a encontrar valores adecuados de estos parámetros tal que se disminuya la capacidad de carga, favoreciéndose así a la desorción. El proceso debe ser además viable en nuestro medio: sin requerimiento de equipos sofisticados ni extremas medidas de seguridad.

Según la bibliografía citada, en base a una desorción orgánica usando como solvente al etanol se logra un gran incremento en la velocidad de extracción de oro del carbón activado, al usar como solución

desorbedora soluciones alcohólicas alcalinas a altas temperaturas.

4.2 Procedimiento experimental

4.2.1 Descripción

Para la realización de este estudio podemos diferenciar tres etapas:

- Adsorción

Siendo la desorción un procedimiento posterior a la adsorción, fue necesario cargar el carbón con oro, a partir de una solución aurocianurada. La importancia de este proceso es poder contar con el carbón necesario para las pruebas de desorción con una misma ley real.

La solución aurocianurada se obtuvo atacando el oro finamente laminado con una solución (2% de NaCN + 35% H₂O₂) en un recipiente de vidrio (Pirex) bajo una campana extractora.

El ataque se llevó a cabo varias veces lográndose una solución aurocianurada con una concentración de 6.25 grs de Au/lit.

La adsorción se llevó a cabo en un reci-

oiente plástico donde se colocó el carbón activado (50 kgs) y la solución aurocianurada (80 lts). Este proceso se realizó a temperatura ambiente y con agitación (aire), durante 24 hrs. Se comprobó que el proceso había terminado analizando la solución (Anexo B).

El carbón activado cargado fue secado en una cancha a temperatura ambiente y muestreado para su análisis reportándonos una ley de 9.48 gr de Au/kg de carbón. Luego se almacenó en bolsas plásticas selladas.

- Desorción

Es en esta etapa que se han realizado diferentes pruebas con el propósito de estudiar los efectos de las variaciones de los parámetros de la desorción.

Para la desorción se realizaron los siguientes pasos para cada prueba:

1. Montaje de la planta piloto según la figura 4.1.
2. Muestreo del carbón para la determinación de la humedad (Anexo A).
3. Cargado del carbón a la columna de desorción.
4. Preparación de la solución desorbedora según la composición requerida y adición de dicha solución

al TK1. El agua usada para la preparación de la solución, fue agua corriente.

5. Iniciación del proceso, para lo cual se abre la válvula 1 permitiendo el llamado de la unidad de calentamiento.
6. Calentamiento de la solución desorbedora hasta la temperatura requerida.
7. Se abre la válvula 2 y se permite el paso de la solución desorbedora a través del lecho del carbón en la columna de desorción.

El nivel de la solución desorbedora en el TK1 se mantuvo en un mismo rango para que la energía potencial durante el proceso de desorción sea la misma y por lo tanto la razón de flujo también.

8. Recepción de la solución rica en oro en un recipiente graduado para luego ser trasbasado al TK2.
9. Se detiene el proceso a 25 número de lecho, basados en el análisis cualitativo de la solución eluyente (Anexo B).

- Muestreo y análisis

Se muestreo la solución del TK2 en intervalos de 10 litros hasta los 40 litros y luego en intervalos de 5 litros hasta terminar el proceso; esto se hizo para visualizar mejor el comportamiento de la variable estudiada en porcentajes cercanos a la finaliza-

ción del proceso. El muestreo de la solución se hizo inmediatamente después de una rápida homogenización.

Se tomaron muestras del carbón y de la solución en forma simultánea durante el proceso, manteniendo el mismo criterio de muestreo para todas las pruebas. El análisis del carbón para determinar su ley se realizó según el método de Fire Assay, el mismo que se describe en el Anexo C.

Se denomina ley de oro a la relación en peso del oro y la muestra, expresada en porcentaje:

$$\text{Ley de oro} = \left(W_{\text{oro}} / W_{\text{muestra}} \right) \times 100$$

El análisis de la solución se realizó por el método descrito en el Anexo D.

4.2.2 Equipo experimental

Para la realización de las pruebas experimentales se montó una pequeña planta piloto mostrada en la Fig. 4.1.

La unidad de calentamiento y la columna de desorción fueron fabricadas para este fin tomando en consideración datos de diseño de la bibliografía (21). Estos equipos fueron construidos con acero inoxidable para evitar cualquier contaminación del

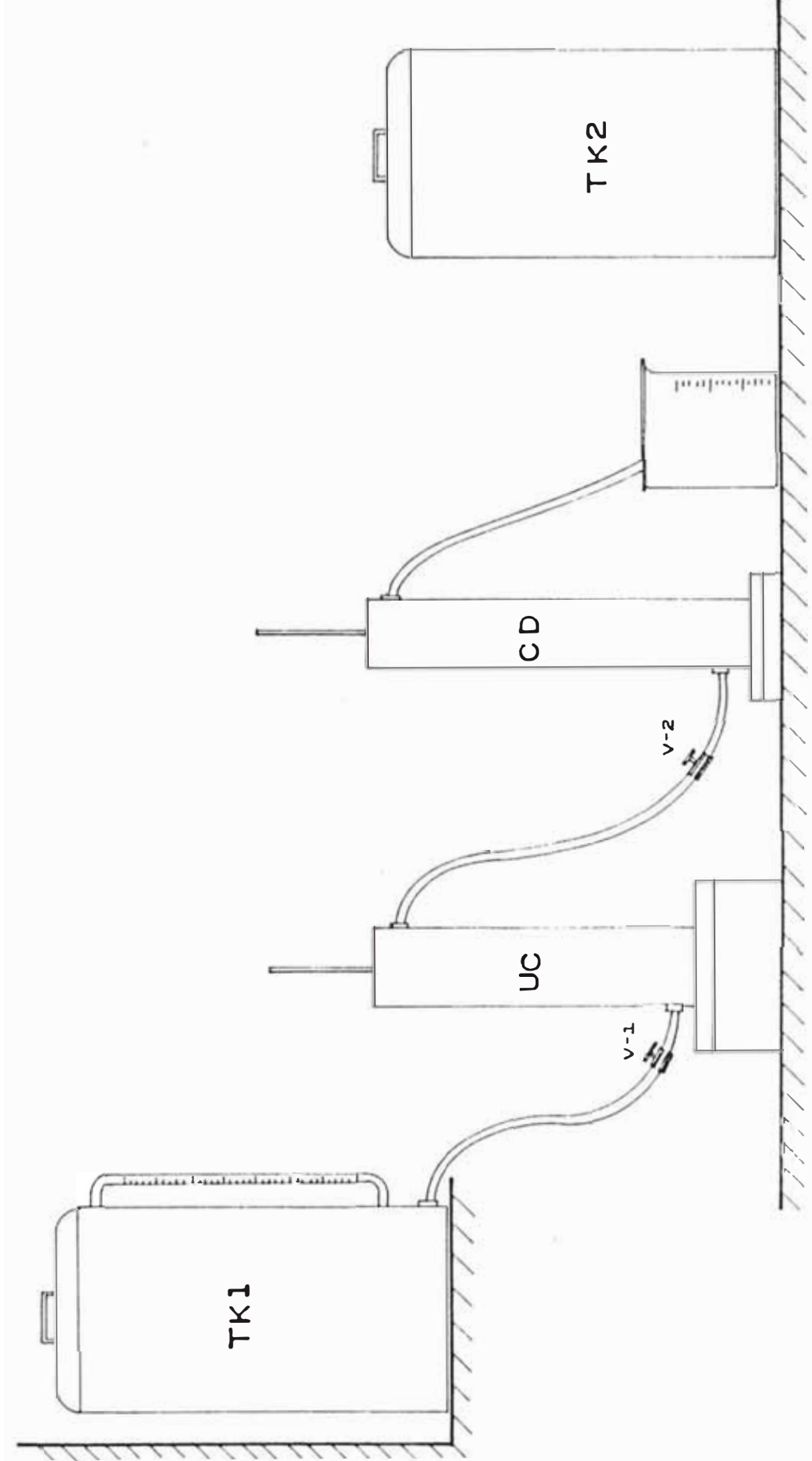


FIG. 4.1 ESQUEMA DE LA PLANTA PILOTO UTILIZADO EN LA PARTE EXPERIMENTAL DEL ESTUDIO DE LA DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO.

carbón.

Las características de estos equipos se detallan a continuación.

Tanque de alimentación de la solución desorbedora (TK1)

Material : Plástico

Capacidad : 50 lt.

Características :

* Forma cilíndrica y con tapa.

* Provisto de un visualizador de nivel.

• - **Unidad de Calentamiento (UC). Fig. 4.2**

Material : Acero inoxidable.

Dimensiones :
$$\frac{\text{Diámetro}}{\text{Altura}} = \frac{D}{H} = \frac{10.2 \text{ cm}}{51 \text{ cm}} = \frac{1}{5}$$

Características :

* Forma cilíndrica con revestimiento de fibra de vidrio forrado con papel aluminio.

* Tapa hermética.

* Resistencia de alambre de micrón (con protección de asbesto).

* Termómetro acoplado.

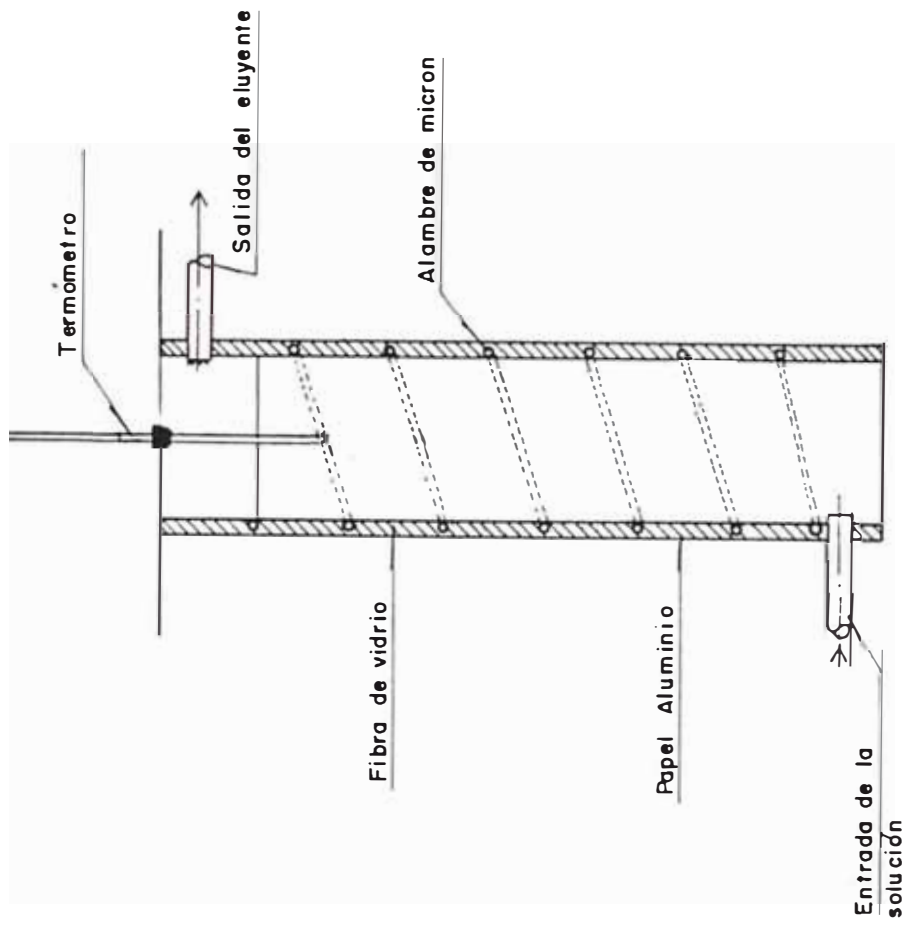


FIG. 4.2 CORTE TRANSVERSAL DE LA UNIDAD DE CALENTAMIENTO.

- Columna de Desorción (CD). Fio. 4.3.

Material : Acero inoxidable.

Dimensiones :	Diámetro	D	9.8 cm	1			
	-----	=	---	=	-----	=	---
	Altura	H	52.8 cm	6			

Características :

- * Forma cilíndrica con revestimiento de fibra de vidrio forrado con papel aluminio.
- * Tapa hermética.
- * Malla de acero inoxidable en la parte inferior interna en la columna y en la salida de la solución.

- Tanque de almacenamiento del eluyente (TK2)

Material : Plástico.

Capacidad : 100 lts.

Características :

- * Cilíndrico y con tapa.
- * Graduación para la lectura del volumen.

- Accesorios

Suministro de Calor

- * Resistencia de alambre de micrón.

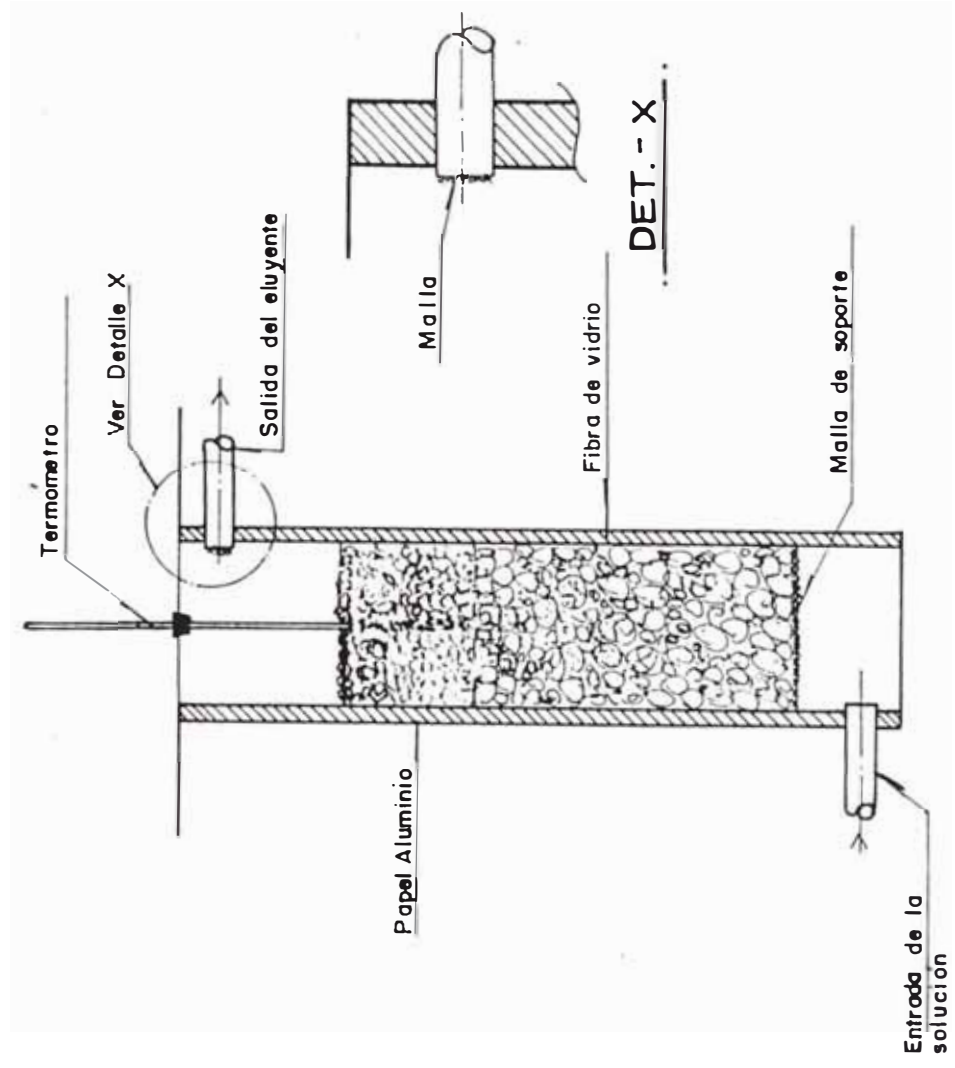


FIG. 4.3 CORTE TRANSVERSAL DE LA COLUMNA DE DESORCIÓN.

Válvulas

La ubicación de las válvulas se muestra en la Fig. 4.1.

Tipo de válvula : ditch.

Mangueras

Las mangueras usadas fueron de jebe resistente al calor.

Instrumentos de Medición

* Termómetro

Se usaron termómetros de graduación de 0 - 150 °C.

La UC y CD tenían acoplados termómetro cada uno para la respectiva medición de la temperatura.

* Cronómetro

Utilizado para la medición de razón de flujo.

4.2.3 Materiales y productos usados

Carbón activado ;

El carbón usado fue el carbón activado granular marca Calgon del tipo GRC-II. Este carbón es hecho a base de cáscara de coco y especial para procesos de recuperación de oro.

Las características físicas están dadas por la Caloon Carbon Corporation. Estos se presentan en la Tabla 4.1. (26)

Este tipo de carbón con un alto valor de R, como índice de la velocidad de adsorción y un alto valor de K, como índice de capacidad de oro, proporciona una buena productividad al usuario.

Su alta dureza y resistencia a la abrasión, minimiza la formación de finos de carbón y la pérdida del mismo, junto con los respectivos valores metálicos, como resultado de la agitación vigorosa involucrada en los diferentes procesos de adsorción.

Su bajo porcentaje de finos de carbón bajo la malla especificada, asegura una pérdida mínima carbón nuevo en el cernido previo a la adición de

carbón circuito.

Este tipo de carbón puede ser fácilmente desorbido regenerado para retornar nuevamente al circuito de adsorción.

TABLA 4.1

Propiedades físicas del carbón GRC-II

Valor de R. mínimo	0.050
Valor de K. mínimo	30
% Humedad (al empaque)	3
Densidad aparente	0.48
Dureza. número	98
Contenido de cenizas (% máx.)	4.0
Tamaño bajo la malla (% máx.)	3
Malla	6 x 12

Hidróxido de Sodio

En la Tabla 4.2 (63) se muestran las características del hidróxido de sodio usado en las pruebas.

TABLA 4.2

Características físicas y químicas del
hidróxido de sodio

Aspecto	: Sólido blanco.
Fórmula	: NaOH
Densidad específica	: 2.13
Punto de fusión	: 318.4°C
Punto de ebullición	: 1.390.0°C
Peso Molecular	: 40.0
Concentración	: 98%

Cianuro de Sodio

En la Tabla 4.3 (63) se muestran las características del cianuro de sodio usado en las pruebas.

TABLA 4.3

Características físicas y químicas del
cianuro de sodio

Aspecto	: Sólido blanco.
Fórmula	. NaCN
Punto de fusión	: 563.7°C
Punto de ebullición	: 1.496.0°C
Peso Molecular	: 49.02
Concentración	: 99%

Etanol

En la Tabla 4.4 (63) se muestran las características del etanol usado en las pruebas.

TABLA 4.4

Características físicas y químicas del
etanol

Aspecto	: líquido incoloro
Fórmula	: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$
Densidad específica	: 0.789
Punto de fusión	: -112°C
Punto ebullición	: 78.40°C
Peso Molecular	: 46.07
Concentración	: 99%

4.3 Efecto de las principales variables en la desorción

El método usado para realizar las pruebas experimentales fue el método tradicional, en el cual se varía un solo factor por vez, manteniendo constante todos los demás, para determinar el efecto del factor que se varía. En seguida se repite el experimento modificando sucesivamente cada uno de los factores, manteniendo constantes a los demás en cada caso.

Para visualizar los efectos de las variables estudiadas se han presentado gráficas del porcentaje de recuperación de oro del carbón versus el número de lechos.

El número de lechos es un valor adimensional aplicable a cualquier proceso. El número de lechos se ha definido como la relación entre el volumen de solución desorbedora que pasa por el lecho del carbón durante el proceso de desorción y el volumen del lecho del carbón.

El porcentaje de recuperación es el cociente expresado en porcentaje de la diferencia entre la ley del carbón activado cargado inicialmente y la ley del carbón activado desorbido sobre la ley del carbón activado cargado inicialmente.

$$\% \text{ Recuperación} = (L_i - L_f) \times 100 / L_i$$

La nomenclatura usada es la siguiente:

V_{sol}	Volumen de la solución desorbedora que ha pasado a través del lecho de carbón en litros.
NL	- Número de lechos.
L_f	Ley de oro del carbón activado desorbido.
% Recup	Porcentaje de recuperación.
t_{op}	Tiempo de operación en horas.
C_s	Ley de oro del eluyente en gramos de oro por litro de solución.

Durante las pruebas realizadas se ha mantenido el caudal constante, asegurando así un tiempo de contacto (t_{op}) entre la solución y el carbón igual para todas ellas. Excepto la razón de flujo las pruebas se han realizado hasta un número de lechos de 25.

4.3.1 Efecto de la temperatura

Las condiciones operativas para el estudio de la temperatura fueron las siguientes:

Ley inicial del carbón = 9.948 gr Au/Kg C.

Peso de carbón = 1.300 gr (húmedo)

Humedad = 23%.

- Composición de la solución desorbedora :

% NaOH = 2

% CN = 0.1

% Etanol = 20

Razón de flujo = 100 ml/min

Volumen de lecho 2.6 litros

- N° de lechos 25

Para el estudio del efecto de la temperatura en este proceso, se realizaron pruebas a 50°C, 75°C, 80°C, 90°C y 100°C, con las condiciones operativas antes mencionadas, para cada valor de temperatura estudiada. Hemos tomado estos valores porque son temperaturas factibles en equipos sencillos y sin requerimientos de alto consumo de energía.

Los resultados de estas pruebas se reportan en la Tabla 4.5 y un resumen en la Tabla 4.6.

El comportamiento de la temperatura se muestra en la Fig. 4.4 y 4.5.

4.3.2 Efecto de la composición de la solución desorbedora

4.3.2.1 Efecto de la concentración de cianuro en la solución desorbedora

Las condiciones operativas para cada valor estudiado fueron las siguientes:

TABLA 4.5

Efecto de la Temperatura en la desorción de oro
del carbón activado

Tabla 4.5.1: Resultados de la desorción a T = 50°C

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	8.915	0.10	1h 40'	10.38
20	7.69	7.528	0.12	3h 20'	24.33
30	11.54	5.751	0.14	5h 00'	42.17
40	15.38	4.662	0.13	6h 40'	53.14
45	17.31	3.693	0.14	7h 30'	62.88
50	19.23	2.763	0.14	8h 20'	72.23
55	21.15	2.119	0.14	9h 10'	78.70
60	23.08	1.997	0.13	10h 00'	79.93
65	25.00	1.996	0.12	10h 50'	79.94

Tabla 4.5.2: Resultados de la desorción a T = 75°C

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	7.751	0.22	1h 40'	22.08
20	7.69	5.927	0.20	3h 20'	40.42
30	11.54	3.624	0.21	5h 00'	63.57
40	15.38	2.182	0.19	6h 40'	78.07
45	17.31	1.747	0.18	7h 30'	82.44
50	19.23	1.242	0.17	8h 20'	87.52
55	21.15	0.944	0.16	9h 10'	90.51
60	23.08	0.637	0.16	10h 00'	93.60
65	25.00	0.591	0.14	10h 50'	94.06

Tabla 4.5.3: Resultados de la desorción a T = 80°C

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	7.499	0.24	1h 40'	24.62
20	7.69	4.782	0.28	3h 20'	55.95
30	11.54	2.582	0.25	5h 00'	74.05
40	15.38	1.160	0.22	6h 40'	88.24
45	17.31	0.626	0.21	7h 30'	93.71
50	19.23	0.237	0.19	8h 20'	97.40
55	21.15	0.188	0.18	9h 10'	98.11
60	23.08	0.160	0.16	10h 00'	98.39
65	25.00	0.159	0.15	10h 50'	98.40

Tabla 4.5.4: Resultados de la desorción a T = 90°C

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	6.877	0.34	1h 40'	34.88
20	7.69	4.067	0.29	3h 20'	68.12
30	11.54	1.912	0.27	5h 00'	78.78
40	15.38	0.806	0.25	6h 40'	91.90
45	17.31	0.585	0.21	7h 30'	94.12
50	19.23	0.273	0.19	8h 20'	97.26
55	21.15	0.151	0.18	9h 10'	98.48
60	23.08	0.136	0.16	10h 00'	98.63
65	25.00	0.132	0.15	10h 50'	98.67

Tabla 4.5.5: Resultados de la desorción a T = 100°C

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	5.498	0.43	1h 40'	42.72
20	7.69	3.362	0.33	3h 20'	66.20
30	11.54	1.415	0.28	5h 00'	85.78
40	15.38	0.806	0.23	6h 40'	91.90
45	17.31	0.684	0.21	7h 30'	93.12
50	19.23	0.309	0.19	8h 20'	96.89
55	21.15	0.100	0.18	9h 10'	98.99
60	23.08	0.097	0.16	10h 00'	99.02
65	25.00	0.094	0.15	10h 50'	99.06

TABLA 4.6

Resumen del efecto de la temperatura en la desorción de oro del carbón activado

V SOL. (lt)	N° L	T E M P E R A T U R A											
		T = 50°C		T = 75°C		T = 80°C		T = 90°C		T = 100%			
		Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP		
0.00	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00
10.00	3.35	8.915	10.38	7.751	22.06	7.449	24.62	6.533	34.33	5.698	42.72		
20.00	7.69	7.528	24.33	5.927	40.42	4.382	55.95	4.067	59.12	3.362	66.20		
30.00	11.54	5.751	42.19	3.624	63.57	2.582	74.05	1.912	80.76	1.415	85.78		
40.00	15.38	4.662	53.14	2.182	78.07	1.160	88.34	0.806	91.90	0.806	91.90		
45.00	17.31	3.693	62.88	1.747	82.44	0.626	93.71	0.585	94.12	0.684	93.12		
50.00	19.23	2.763	72.23	1.242	87.52	0.259	97.40	0.273	97.26	0.309	96.89		
55.00	21.15	2.119	78.70	0.944	90.51	0.188	98.11	0.151	98.48	0.100	98.99		
60.00	23.08	1.797	79.93	0.637	93.60	0.160	98.39	0.136	98.63	0.097	99.02		
65.00	25.00	1.996	79.94	0.591	94.06	0.159	98.40	0.132	98.67	0.094	99.06		

FIGURA 4.4

EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA
DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO

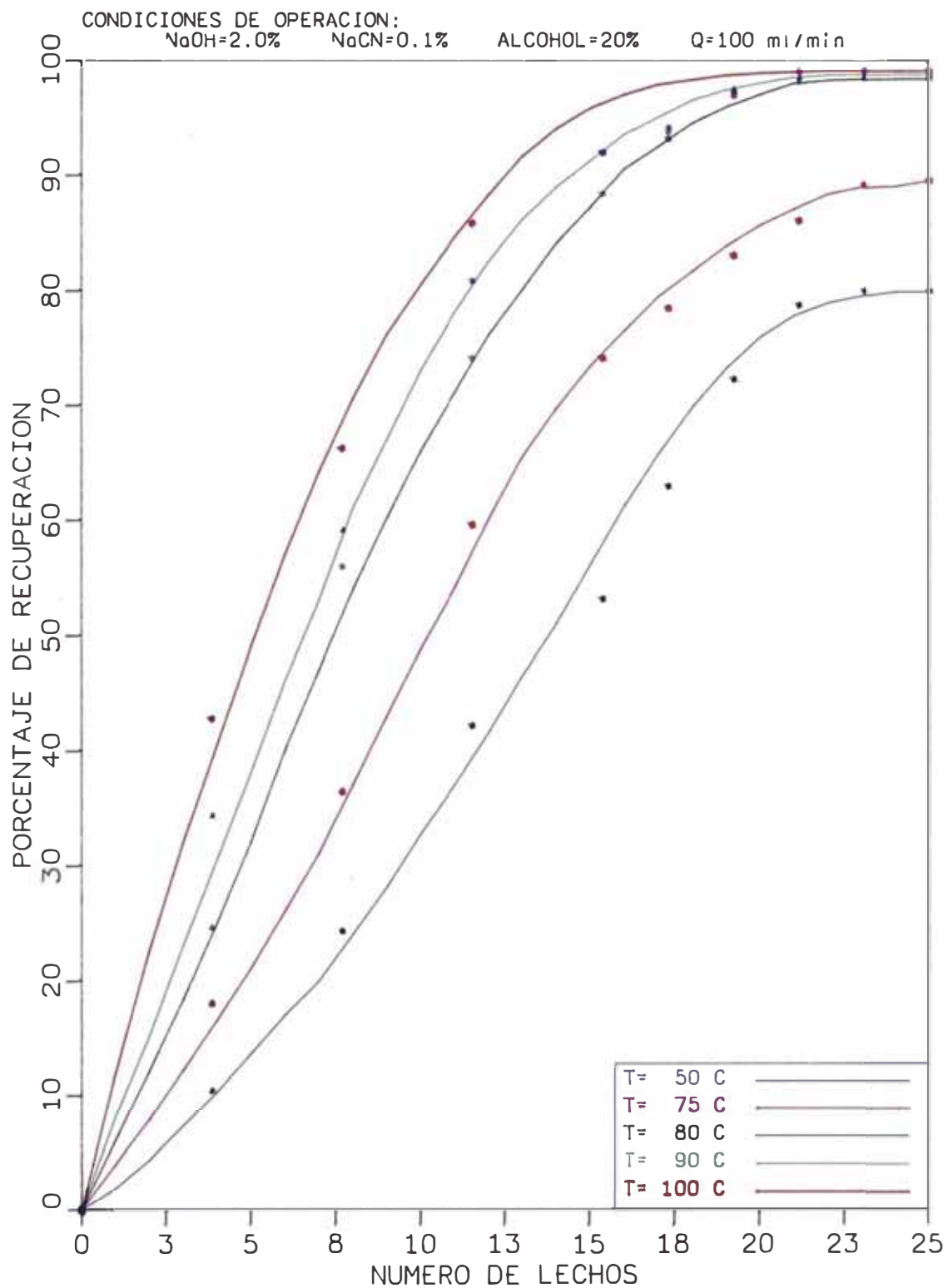
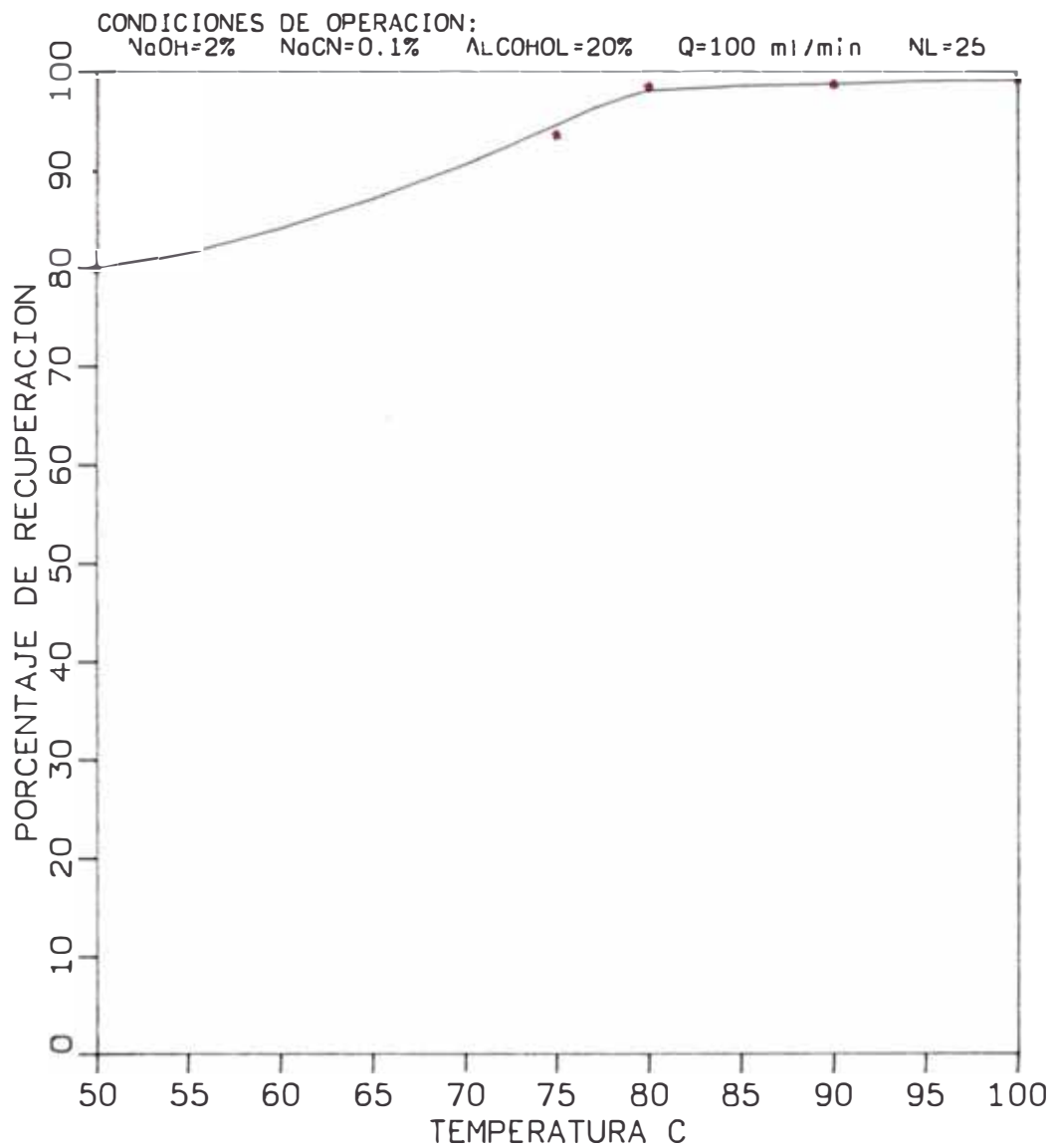


FIGURA 4.5

EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA
DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO



- Ley inicial del carbón = 9.948 gr Au/Kg.C
- Peso del carbón = 1388.5 gr (húmedo).
- Humedad = 27.98%
- Composición de la solución desorbedora:
 - % NaOH = 2
 - % Etanol = 20
- Razón de flujo = 100 ml/min
- Volumen de lecho = 2.6 litros.
- N° de lechos = 25

En estas pruebas se usaron concentraciones de cianuro de 0.0, 0.05, 0.1 y 0.2%.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 4.7 y 4.8. el comportamiento de esta variable se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7.

4.3.2.2 Efecto de la concentración del hidróxido de sodio

Las condiciones operativas para cada valor estudiado fueron:

- Ley inicial del carbón = 9.948 gr Au/Kg C.
- Peso del carbón = 1365.0 gr. (húmedo).
- Humedad = 26.24%
- Composición de la solución desorbedora :
 - % CN⁻ = 0.1
 - % Etanol = 20

TABLA 4.7

Efecto de la Concentración de Cianuro en la
desorción de oro del carbón activado

Tabla 4.7.1: Resultados de la desorción con NaCN=0.0%

V SOL lt	Nº L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	8.608	0.13	1h 40'	13.47
20	7.69	5.764	0.21	3h 20'	42.06
30	11.54	3.889	0.20	5h 00'	60.91
40	15.38	2.201	0.19	6h 40'	77.87
45	17.31	1.588	0.19	7h 30'	84.04
50	19.23	1.206	0.17	8h 20'	87.88
55	21.15	0.851	0.17	9h 10'	91.45
60	23.08	0.713	0.15	10h 00'	92.83
65	25.00	0.711	0.14	10h 50'	92.85

Tabla 4.7.2: Resultados de la desorción con NaCN=0.05%

V SOL lt	Nº L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	8.221	0.17	1h 40'	17.36
20	7.69	5.316	0.23	3h 20'	46.56
30	11.54	3.345	0.22	5h 00'	66.38
40	15.38	1.837	0.20	6h 40'	81.53
45	17.31	1.273	0.19	7h 30'	87.20
50	19.23	0.880	0.18	8h 20'	91.15
55	21.15	0.629	0.17	9h 10'	93.68
60	23.08	0.589	0.16	10h 00'	94.08
65	25.00	0.562	0.14	10h 50'	94.35

Tabla 4.7.3: Resultados de la desorción con NaCN=0.1%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	7.499	0.25	1h 40'	24.62
20	7.69	4.382	0.28	3h 20'	55.95
30	11.54	2.582	0.25	5h 00'	74.05
40	15.38	1.160	0.22	6h 40'	88.24
45	17.31	0.626	0.21	7h 30'	93.71
50	19.23	0.259	0.19	8h 20'	97.40
55	21.15	0.188	0.18	9h 10'	98.11
60	23.08	0.160	0.16	10h 00'	98.39
65	25.00	0.159	0.15	10h 50'	98.40

Tabla 4.7.4: Resultados de la desorción con NaCN=0.2%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	7.239	0.27	1h 40'	27.23
20	7.69	4.228	0.29	3h 20'	57.50
30	11.54	2.397	0.25	5h 00'	75.90
40	15.38	1.090	0.22	6h 40'	89.04
45	17.31	0.552	0.21	7h 30'	94.45
50	19.23	0.187	0.20	8h 20'	98.12
55	21.15	0.149	0.18	9h 10'	98.50
60	23.08	0.131	0.16	10h 00'	98.68
65	25.00	0.122	0.15	10h 50'	98.77

TABLA 4.8

Resumen del efecto de la concentración de cianuro de sodio en la desorción de oro del carbón activado

V SOL. (lt)	N° L	% DE NaCN							
		NaCN = 0.0%		NaCN = 0.05%		NaCN = 0.1%		NaCN = 0.2%	
		Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP
0.00	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00
10.00	3.85	8.600	13.47	8.221	17.36	7.449	24.62	7.239	27.23
20.00	7.69	5.764	42.06	5.316	46.56	4.382	55.95	4.228	57.50
30.00	11.54	3.889	60.91	3.345	66.38	2.582	74.05	2.397	75.90
40.00	15.38	2.201	77.87	1.837	81.53	1.160	88.34	1.090	89.04
45.00	17.31	1.588	84.04	1.273	87.20	0.626	93.71	0.552	94.45
50.00	19.23	1.206	87.88	0.880	91.15	0.259	97.40	0.187	98.12
55.00	21.15	0.851	91.45	0.629	93.68	0.188	98.11	0.149	98.50
60.00	23.08	0.713	91.83	0.589	94.88	0.160	98.39	0.131	98.68
65.00	25.00	0.711	91.85	0.562	94.35	0.159	98.40	0.122	98.77

FIGURA 4.6

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE CIANURO DE SODIO
EN LA DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO

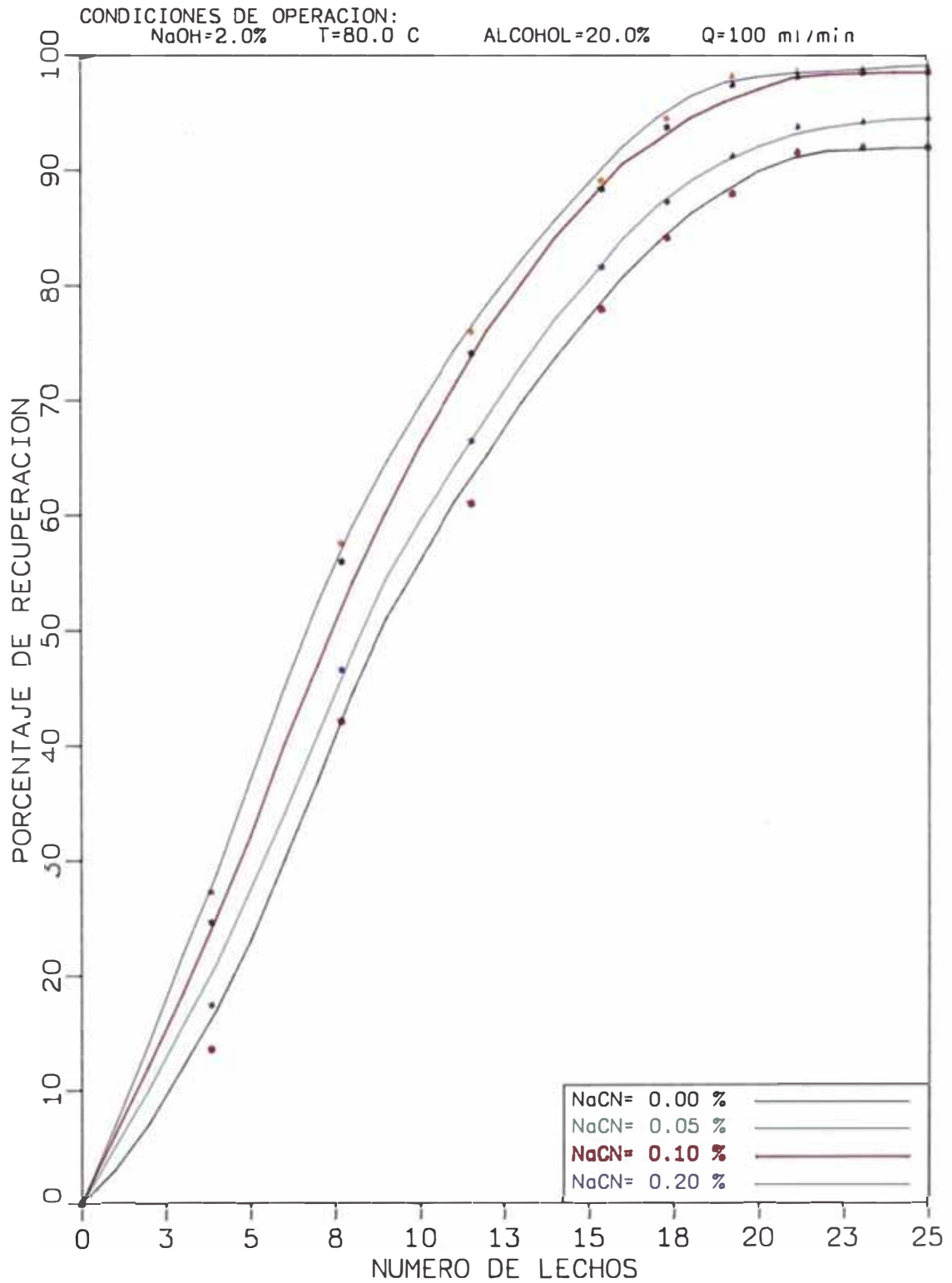
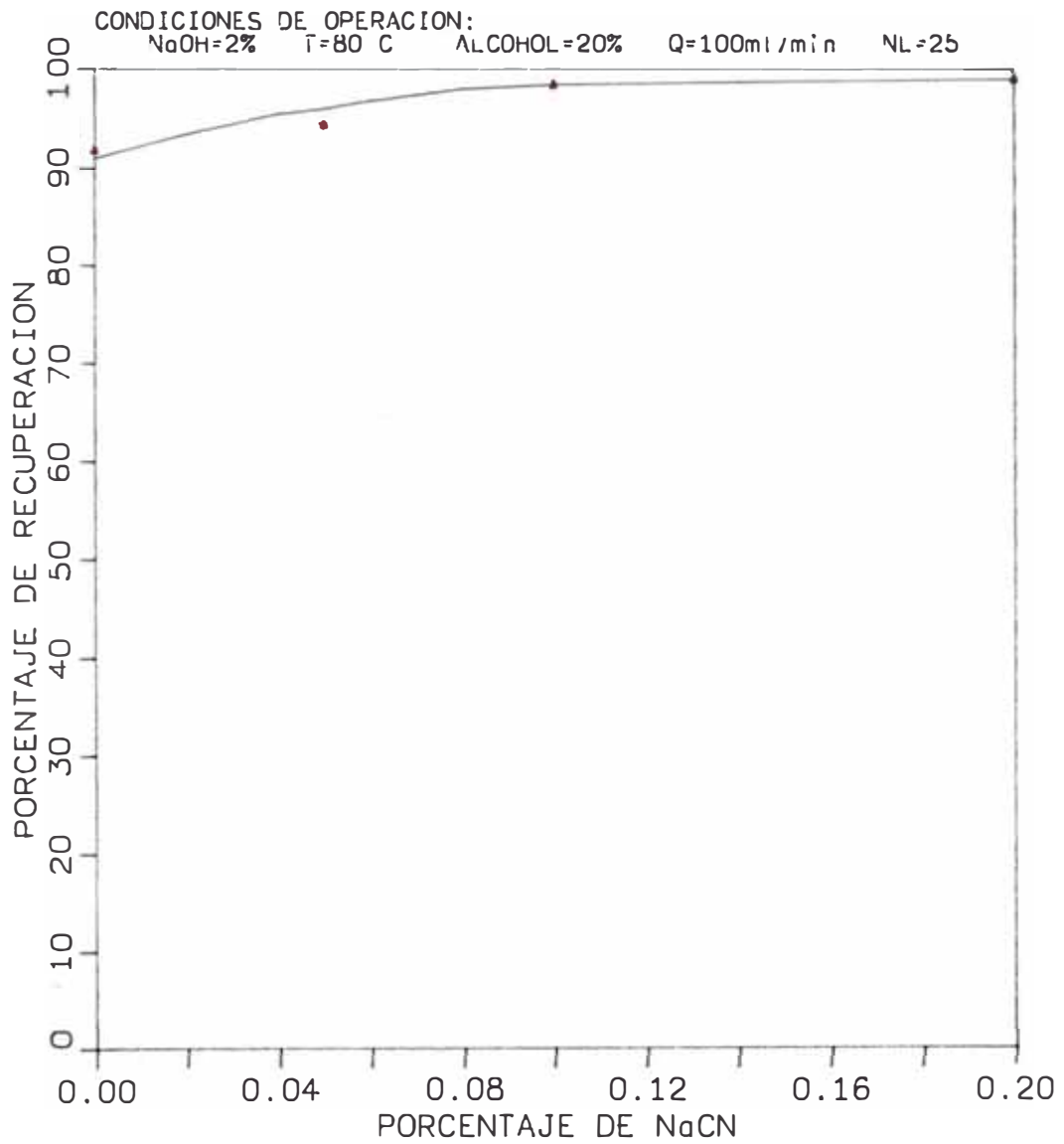


FIGURA 4.7

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE CIANURO DE SODIO
EN LA DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO



Razón de flujo = 100 ml/min

Volumen de lecho = 2.6 litros

- N° de lechos 25

Para estudiar el efecto de la concentración del hidróxido de sodio se usaron las siguientes concentraciones : 0.0, 1.0, 2.0 y 4.0%.

Los resultados de estas pruebas están presentados en las Tablas 4.9 y 4.10 pudiendo visualizarse el comportamiento en las Figuras 4.8 y 4.9.

4.3.2.3 Efecto de la concentración de alcohol

Las condiciones de operación para cada valor estudiado fueron :

Lev inicial del carbón = 9.948 gr Au/Kg C.

Peso del carbón = 1.332.9 grs. (húmedo).

Humedad = 24.97%

- Composición de la solución desorbedora :

% NaCN 0.1

% NaOH 2

Razón de flujo 100 ml/min

Volumen de lecho = 2.6 litros

- N° de lechos 25

TABLA 4.9

Efecto de la Concentración de hidróxido de sodio
en la desorción de oro del carbón activado

Tabla 4.9.1: Resultados de la desorción con NaOH=0.0%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	8.759	0.12	1h 40'	11.95
20	7.69	7.366	0.13	3h 20'	25.95
30	11.54	5.798	0.14	5h 00'	41.72
40	15.38	3.604	0.16	6h 40'	63.77
45	17.31	3.001	0.15	7h 30'	69.83
50	19.23	2.017	0.16	8h 20'	79.72
55	21.15	1.689	0.15	9h 10'	83.02
60	23.08	1.646	0.14	10h 00'	83.45
65	25.00	1.640	0.13	10h 50'	83.51

Tabla 4.9.2: Resultados de la desorción con NaOH=1.0%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	8.463	0.15	1h 40'	14.93
20	7.69	6.374	0.18	3h 20'	35.93
30	11.54	4.762	0.17	5h 00'	52.13
40	15.38	2.939	0.18	6h 40'	70.46
45	17.31	1.944	0.18	7h 30'	80.46
50	19.23	1.096	0.18	8h 20'	88.98
55	21.15	0.686	0.17	9h 10'	93.10
60	23.08	0.682	0.15	10h 00'	93.14
65	25.00	0.677	0.14	10h 50'	93.19

Tabla 4.9.3: Resultados de la desorción con NaOH=2.0%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	7.499	0.24	1h 40'	24.62
20	7.69	4.382	0.28	3h 20'	55.95
30	11.54	2.582	0.25	5h 00'	74.05
40	15.38	1.160	0.22	6h 40'	88.24
45	17.31	0.626	0.21	7h 30'	93.71
50	19.23	0.259	0.19	8h 20'	97.40
55	21.15	0.188	0.18	9h 10'	98.11
60	23.08	0.160	0.16	10h 00'	98.39
65	25.00	0.159	0.15	10h 50'	98.40

Tabla 4.9.4: Resultados de la desorción con NaOH=4.0%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	6.564	0.34	1h 40'	34.02
20	7.69	3.393	0.33	3h 20'	65.89
30	11.54	1.590	0.28	5h 00'	84.02
40	15.38	0.522	0.24	6h 40'	94.75
45	17.31	0.359	0.21	7h 30'	96.39
50	19.23	0.212	0.19	8h 20'	97.87
55	21.15	0.148	0.18	9h 10'	98.51
60	23.08	0.140	0.16	10h 00'	98.59
65	25.00	0.133	0.15	10h 50'	98.66

TABLE 4.10

Resumen del efecto de la concentración de hidróxido de sodio en la desorción de oro del carbón activado

V SOL. (lt)	N° L	% DE NaOH							
		NaOH = 0.0%		NaOH = 1.0%		NaOH = 2.0%		NaOH = 4.0%	
		Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP
0.00	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00
10.00	3.85	8.759	11.95	8.463	14.93	7.499	24.62	6.564	34.02
20.00	7.69	7.366	25.95	6.374	35.93	4.382	55.95	3.393	65.89
30.00	11.54	5.798	41.72	4.762	52.13	2.582	74.85	1.590	84.02
40.00	15.38	3.684	63.77	2.939	70.46	1.160	88.34	0.522	94.75
45.00	17.31	3.001	69.83	1.944	80.46	0.626	93.71	0.359	96.39
50.00	19.23	2.017	79.72	1.096	88.98	0.259	97.40	0.212	97.87
55.00	21.15	1.689	83.02	0.686	93.10	0.188	98.11	0.148	98.51
60.00	23.08	1.646	83.45	0.682	93.14	0.160	98.39	0.140	98.59
65.00	25.00	1.640	83.51	0.677	93.19	0.159	98.40	0.133	98.66

FIGURA 4.8

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE HIDROXIDO DE SODIO
EN LA DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO

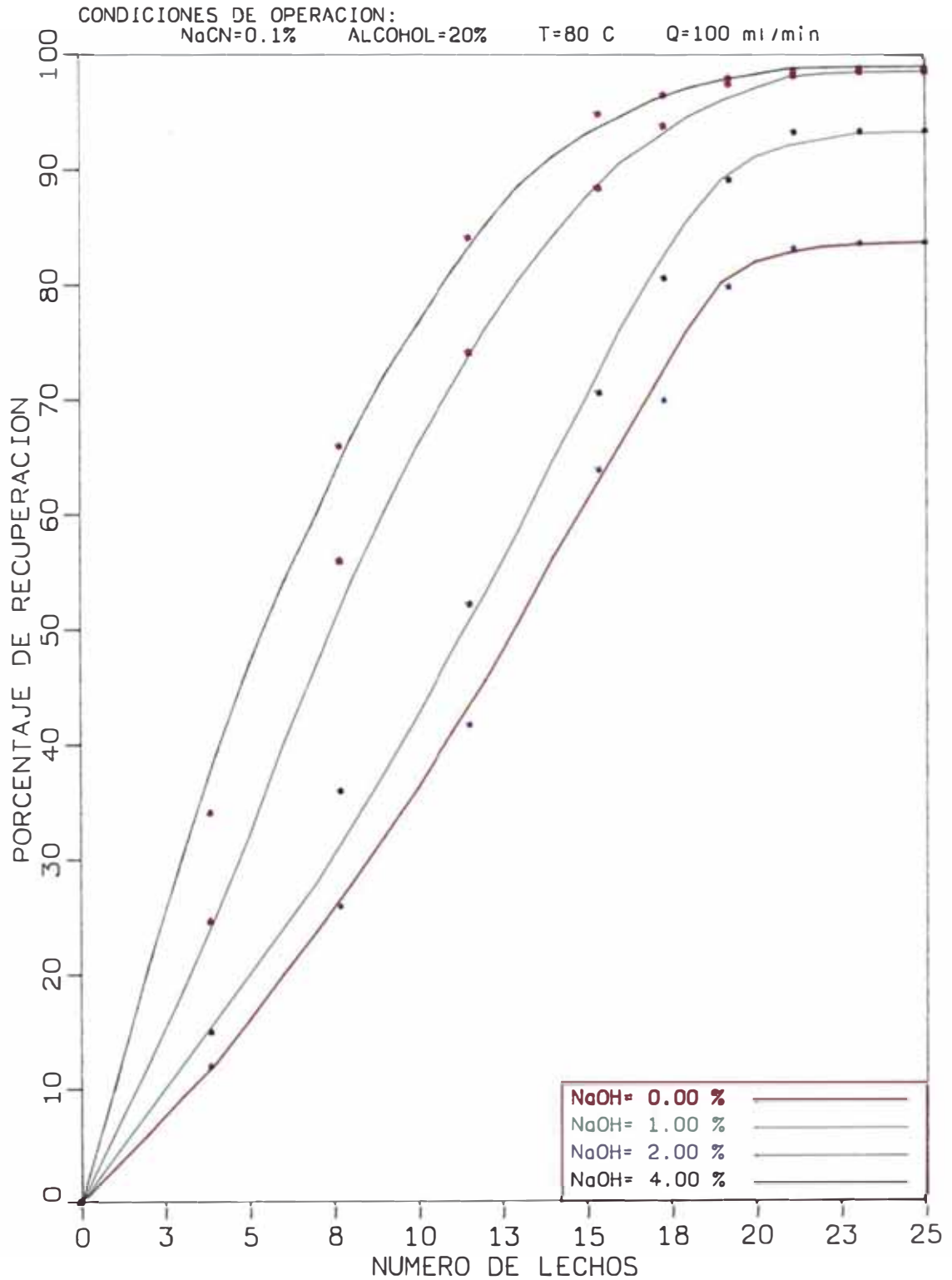


FIGURA 4.9

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE HIDROXIDO DE SODIO
EN LA DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO

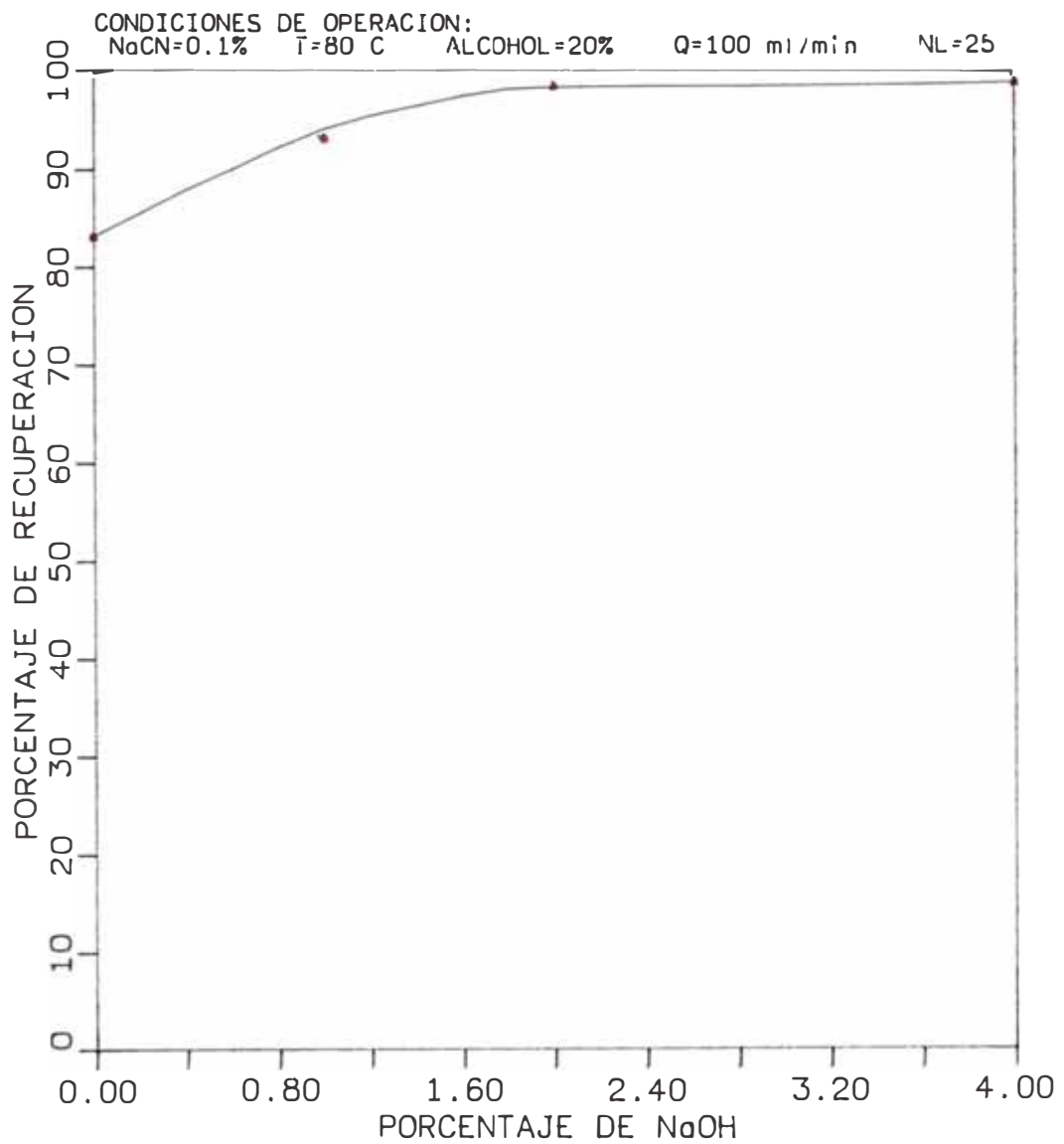


TABLA 4.11

Efecto de la Concentración del etanol
en la desorción de oro del carbón activado

Tabla 4.11.1: Resultados de la desorción con etanol=0.0%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	9.234	0.07	1h 40'	7.18
20	7.69	7.725	0.11	3h 20'	22.35
30	11.54	6.149	0.13	5h 00'	38.19
40	15.38	4.332	0.14	6h 40'	56.45
45	17.31	3.958	0.13	7h 30'	60.21
50	19.23	3.643	0.13	8h 20'	63.38
55	21.15	3.499	0.12	9h 10'	64.83
60	23.08	3.471	0.11	10h 00'	65.11
65	25.00	3.468	0.10	10h 50'	65.14

Tabla 4.11.2: Resultados de la desorción con etanol=10%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	8.921	0.10	1h 40'	10.32
20	7.69	6.219	0.19	3h 20'	37.48
30	11.54	4.305	0.19	5h 00'	56.72
40	15.38	3.166	0.17	6h 40'	68.23
45	17.31	2.307	0.17	7h 30'	76.81
50	19.23	1.450	0.17	8h 20'	85.42
55	21.15	1.181	0.16	9h 10'	88.13
60	23.08	0.994	0.15	10h 00'	90.01
65	25.00	0.987	0.14	10h 50'	90.08

Tabla 4.11.3: Resultados de la desorción con etanol=20%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	7.499	0.24	1h 40'	24.62
20	7.69	4.382	0.28	3h 20'	55.95
30	11.54	2.582	0.25	5h 00'	74.05
40	15.38	1.160	0.22	6h 40'	88.24
45	17.31	0.626	0.21	7h 30'	93.71
50	19.23	0.259	0.19	8h 20'	97.40
55	21.15	0.188	0.18	9h 10'	98.11
60	23.08	0.160	0.16	10h 00'	98.39
65	25.00	0.159	0.15	10h 50'	98.40

Tabla 4.11.4: Resultados de la desorción con etanol=30%

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	6.366	0.36	1h 40'	36.01
20	7.69	3.559	0.32	3h 20'	64.22
30	11.54	2.068	0.26	5h 00'	79.21
40	15.38	0.984	0.22	6h 40'	90.11
45	17.31	0.496	0.21	7h 30'	95.01
50	19.23	0.217	0.19	8h 20'	97.82
55	21.15	0.098	0.18	9h 10'	99.01
60	23.08	0.089	0.16	10h 00'	99.11
65	25.00	0.081	0.15	10h 50'	99.19

TABLA 4.12

Resumen del efecto de la concentración de alcohol en la desorción de oro del carbón activado

V SOL. (lt)	N° L	% DE ALCOHOL											
		ALCOHOL = 0%		ALCOHOL = 10%		ALCOHOL = 20%		ALCOHOL = 30%					
		Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP	Lf	% RECUP				
0.00	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00	9.948	0.00		
10.00	3.85	9.234	7.18	8.921	10.32	7.499	24.62	6.366	36.01	6.366	36.01		
20.00	7.69	7.725	22.35	6.219	37.48	4.382	55.95	3.558	64.23	3.558	64.23		
30.00	11.54	6.199	38.19	4.305	56.72	2.582	74.05	2.068	79.21	2.068	79.21		
40.00	15.38	4.332	56.45	3.160	68.23	1.160	88.34	0.984	90.11	0.984	90.11		
45.00	17.31	3.958	60.21	2.307	76.81	0.626	93.71	0.496	95.01	0.496	95.01		
50.00	19.23	3.643	63.38	1.450	85.42	0.259	97.40	0.217	97.82	0.217	97.82		
55.00	21.15	3.499	64.83	1.181	88.13	0.188	98.11	0.099	99.01	0.099	99.01		
60.00	23.08	3.471	65.11	0.994	90.01	0.160	98.39	0.089	99.11	0.089	99.11		
65.00	25.00	3.468	65.14	0.987	90.08	0.159	98.40	0.081	99.19	0.081	99.19		

FIGURA 4.10

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE ALCOHOL EN LA
DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO

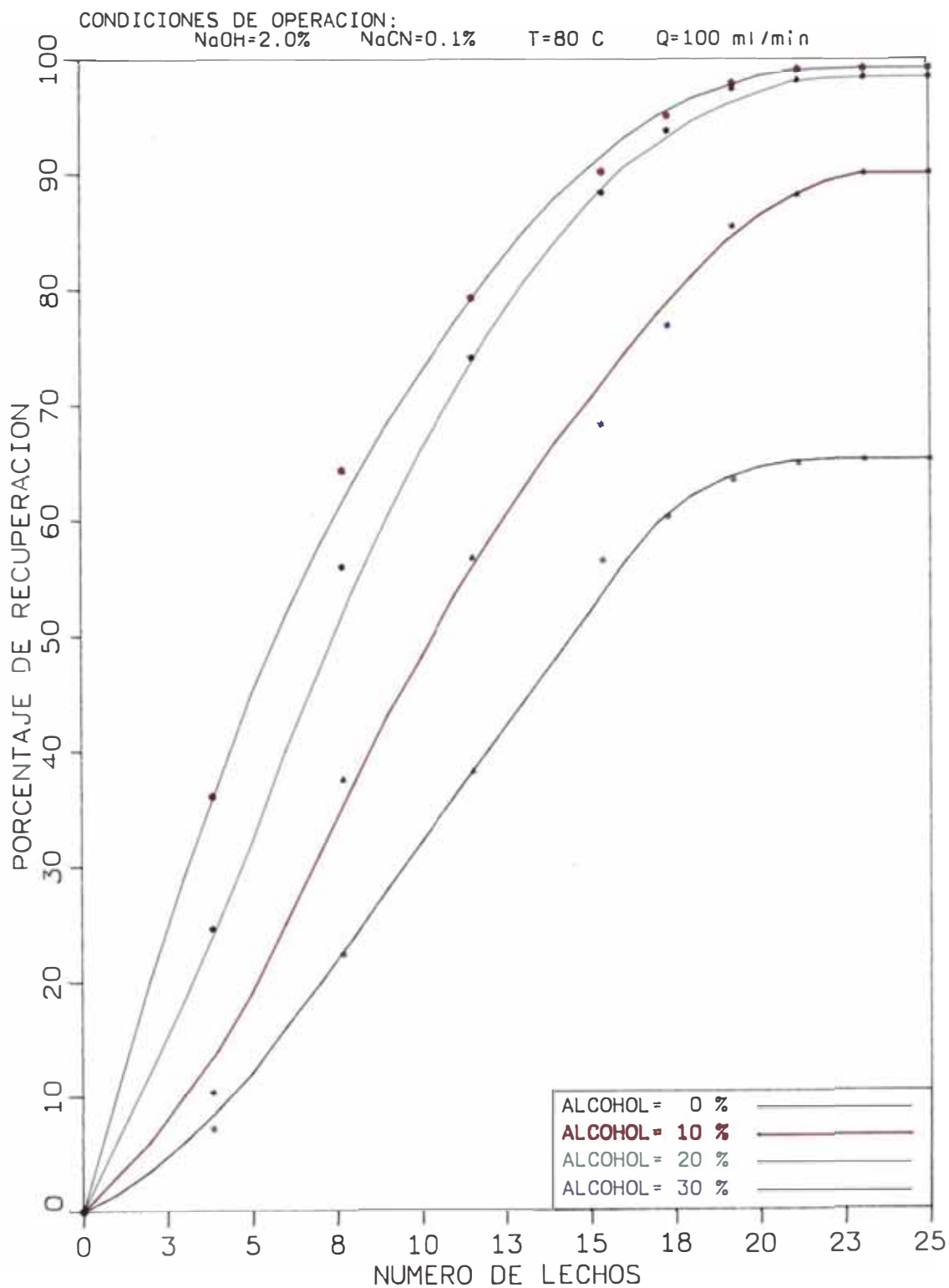
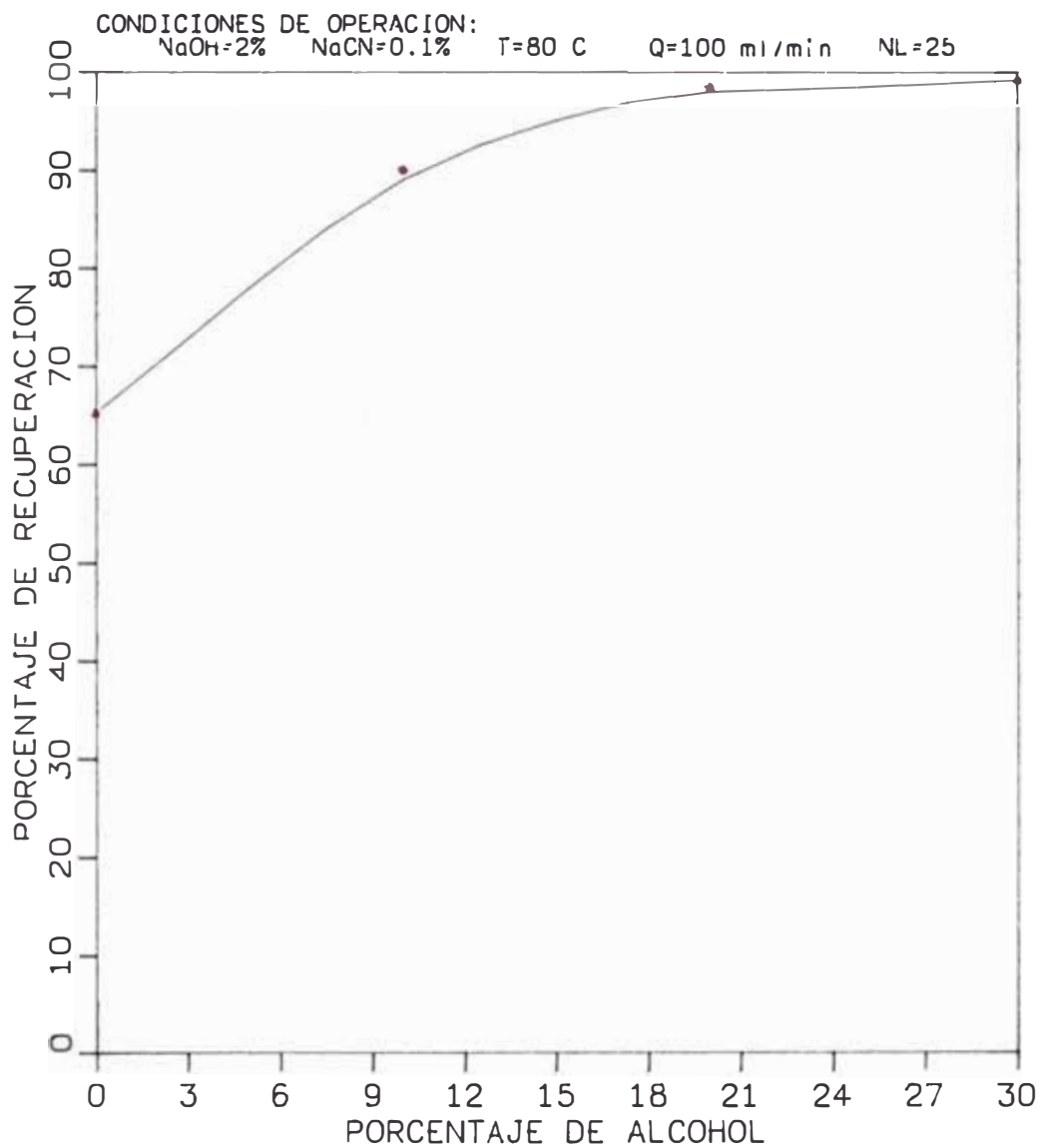


FIGURA 4.11

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE ALCOHOL EN LA
DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO



En el estudio de esta variable se tomaron las siguientes concentraciones de alcohol (etanol) : 0.0, 10, 20 y 30%.

Podemos observar los resultados del comportamiento de esta variable en las Tablas 4.11 y 4.12 y en las Figuras 4.10 y 4.11.

4.3.3 Efecto de la razón de flujo en el proceso

Las condiciones operativas para el estudio de la razón de flujo fueron :

Ley inicial del carbón = 9.948 gr Au/Kg. C.

Peso del carbón 1.324.1 grs (húmedo).

Humedad = 24.47%

- Composición de la solución desorbedora:

% NaOH = 2.0

% NaCN = 0.1

% Etanol = 20

- Volumen de lecho = 2.6 litros

- N° de lechos = 25

Los valores estudiados para la razón de flujo fueron: 50, 100 y 200 ml/min.

Durante el estudio de la temperatura y la composición de la solución desorbedora, se mantu-

el caudal constante: esto nos aseguraba mismo tiempo de contacto entre el carbón y la solución desorbedora para poder comparar los efectos bajo un mismo patrón (tiempo de operación). Esto no es posible en el estudio de la razón de flujo, ya que el tiempo de contacto varía con él.

Para este estudio presentamos los efectos de la variación de la razón de flujo en el gráfico del porcentaje de recuperación versus el tiempo de operación.

Se muestran los resultados y el comportamiento de la razón de flujo en la Tabla 4.13 en las figuras 4.12 y 4.13.

4.4 Discusión de los resultados

Temperatura

De la Fig. 4.4 se observa que la desorción se ve favorecida con el incremento de la temperatura: el porcentaje de recuperación es mayor a mayor temperatura y el tiempo de operación es menor a mayor temperatura.

De la Fig. 4.5 podemos decir que a partir de 80°C. el incremento de la temperatura no incide considerablemente en el porcentaje de recuperación. Así, el

TABLA 4.13

Efecto de la razón de flujo en la desorción de oro
del carbón activado

Tabla 4.13.1: Resultados de la desorción a Q=50 ml/min

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	4.881	0.51	3h 20'	50.93
20	7.69	3.213	0.34	6h 40'	67.70
30	11.54	1.186	0.29	10h 00'	88.08
40	15.38	0.211	0.24	13h 20'	97.88
45	17.31	0.203	0.22	15h 00'	97.96
50	19.23	0.168	0.20	16h 40'	98.31
55	21.15	0.147	0.18	18h 20'	98.52
60	23.08	0.123	0.16	20h 00'	98.76
65	25.00	0.111	0.15	21h 40'	98.88

Tabla 4.13.2: Resultados de la desorción a Q=100 ml/min

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t op	% RECUP
0	0.00	9.948	0.00	0h 00'	0.00
10	3.85	7.499	0.24	1h 40'	24.62
20	7.69	4.382	0.28	3h 20'	55.95
30	11.54	2.582	0.25	5h 00'	74.05
40	15.38	1.160	0.22	6h 40'	88.34
45	17.31	0.626	0.21	7h 30'	93.71
50	19.23	0.259	0.19	8h 20'	97.40
55	21.15	0.188	0.18	9h 10'	98.11
60	23.08	0.160	0.16	10h 00'	98.39
65	25.00	0.159	0.15	10h 50'	98.40

Tabla 4.13.3: Resultados de la desorción a Q=200 ml/min

V SOL lt	N° L	Lf grAu/kgC	Csol gr/lt	t ad	% RECUP
0	0.00	9.948	0.000	0h 00'	0.00
10	3.85	9.156	0.079	0h 50'	7.96
20	7.69	8.555	0.070	1h 40'	14.00
30	11.54	7.761	0.073	2h 30'	21.98
40	15.38	6.973	0.074	3h 20'	29.91
45	17.31	6.452	0.078	3h 45'	35.14
50	19.23	5.768	0.084	4h 10'	42.02
55	21.15	5.521	0.080	4h 35'	44.50
60	23.08	4.573	0.090	5h 00'	54.03
65	25.00	3.879	0.093	5h 25'	61.01
70	26.92	3.283	0.095	5h 50'	67.00
80	30.77	2.481	0.093	6h 40'	75.06
90	34.62	1.846	0.090	7h 30'	81.44
100	38.46	1.080	0.089	8h 20'	89.14

FIGURA 4.12

EFFECTO DE LA RAZON DE FLUJO EN LA
DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO

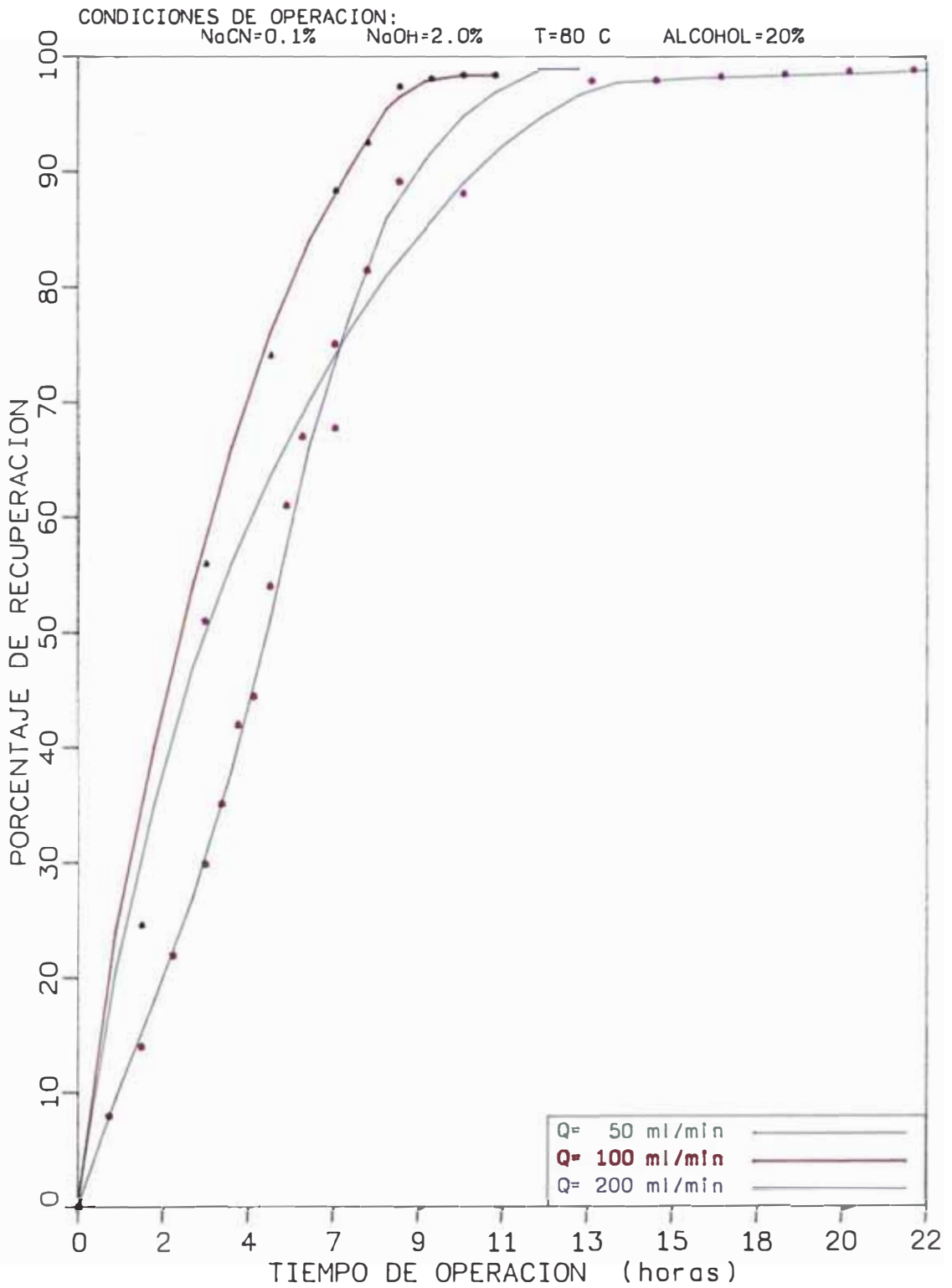
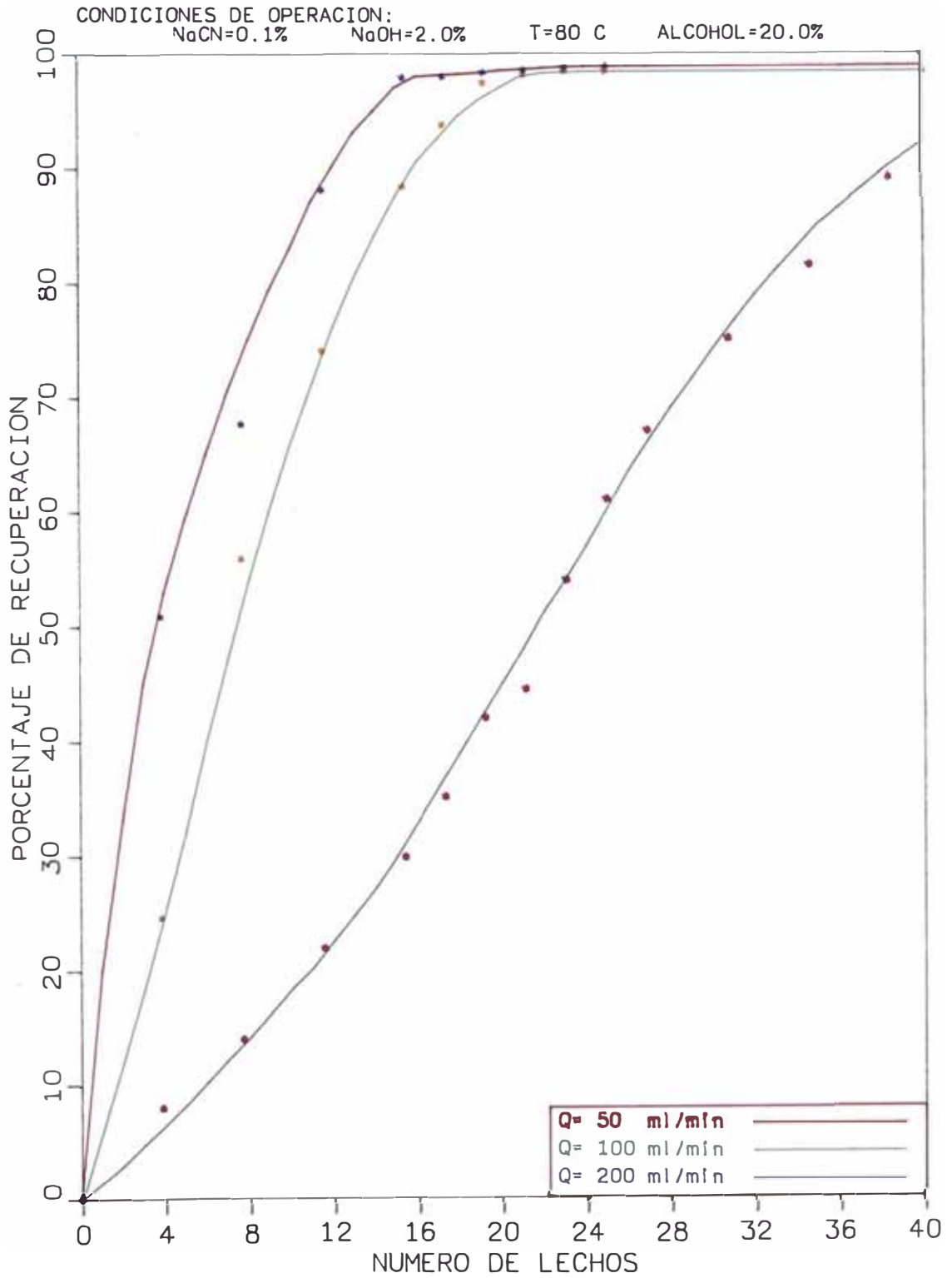


FIGURA 4.13

EFFECTO DE LA RAZON DE FLUJO EN LA
DESORCION DE ORO DEL CARBON ACTIVADO



porcentaje de recuperación a temperaturas de 80, 90 y 100°C. es casi el mismo a partir de 20 número de lechos aproximadamente.

De la Fig. 4.4 vemos que trabajando a 50°C. 25 números de lechos. alcanzamos un porcentaje de recuperación del 79.90% (desorción incompleta). Para una temperatura de 75°C (25°C más que el anterior), vemos que el incremento en el porcentaje de recuperación a igual número de lechos es de 93.90% (14% más que a 50°C) Si comparamos el porcentaje de recuperación a 75°C 80°C veremos que el incremento logrado con estos 5°C más. es de 4.4% alcanzando una desorción completa a menos de 25 número de lechos. Para el porcentaje de recuperación de 98.67 trabajado a 90°C y 25 número de lechos. el incremento de temperatura con respecto a 80°C es de 10°C. sin embargo el incremento en el porcentaje de recuperación es de sólo 0.27.

De los resultados obtenidos. una temperatura adecuada para realizar la desorción es 80°C. claro está. que una temperatura mayor significa una mayor eficiencia y menor tiempo de operación: sin embargo debe evaluarse los inconvenientes que implican condiciones más severas para los equipos y accesorios (principalmente las válvulas), así como también mayor consumo de energía e insumos (el alcohol se evapora fácilmente

te a temperaturas altas) y por lo tanto el costo de operación es mayor.

Concentración de cianuro

Del gráfico 4.6 vemos que a pesar que la solución desorbedora no contiene cianuro, la desorción se lleva a cabo. Esto se debe a que el carbón cargado con oro tiene cianuro proveniente de la adsorción de los complejos aurocianurados. Con esta condición se logra un porcentaje de recuperación de 98% a 20 número de lechos aproximadamente. A partir de este valor el porcentaje se mantiene casi constante debido que el consumo del cianuro proveniente de la adsorción es prácticamente total.

De la figura 4.7 podemos apreciar que la eficiencia de la desorción aumenta considerablemente con el incremento de la concentración del NaCN en el rango de 0.0 a 0.1%, esto probablemente sea por la codesorción del NaCN del carbón cargado.

Para concentraciones de NaCN de 0.1 y 0.2%, no existe una diferencia apreciable en el porcentaje de recuperación, concentraciones mayores a éstas, implican un mayor costo de operación innecesaria.

Concentración de hidróxido de sodio

Analizando las curvas obtenidas vemos que el porcentaje de operación obtenido con una concentración de 2% de NaOH, es casi el mismo para una concentración del 4% a 25 número de lechos, sin embargo se llega al porcentaje de recuperación requerido con el 2% de NaOH a 20 número de lechos.

Para una solución desorbedora con NaOH igual a 0.0% y 25 número de lechos se llega a un porcentaje de recuperación de 80 aproximadamente (figura 4.8 y 4.9). Con NaOH igual a 1.0% y 25 número de lechos obtenemos 93.19% de recuperación, 10% más que con NaOH igual a 0.0%; con un incremento del 1% en la concentración de NaOH (2%), se alcanza una recuperación de 98.40%, incrementándose la recuperación en un 5% aproximadamente, sin embargo con NaOH igual a 4.0% el porcentaje de recuperación sólo se incrementa en 0.26% (98.66%). Es aconsejable tener concentraciones de NaOH en la solución desorbedora de por lo menos 1% con un máximo de 4%.

El hidróxido de sodio además de favorecer la recuperación de oro, sirve para mantener un pH tal que no se formará el ácido cianhídrico, también provee a los equipos protección ante la corrosión, por estar la solución desorbedora en el rango de pasivación. Un

exceso de soda tendrá como consecuencia la formación de costras que obstruyen las mallas y tubos del equipo.

Contenido de alcohol

De las figuras 4.10. 4.11 observamos que la eficiencia de la desorción se incrementa rápidamente con el incremento del contenido de alcohol en la solución desorbedora.

Si analizamos los resultados obtenidos a 25 número de lechos, vemos que con etanol igual a 0.0% la recuperación es de 65.14%. incrementándose la concentración de etanol a 10% se alcanza una recuperación de 90.08%. 25% más que la anterior. Esta diferencia se minimiza cuando trabajamos con concentraciones mayores de etanol: así, con etanol igual a 20%, la recuperación se incrementa en 8.32% (porcentaje de recuperación igual a 98.40%) y con etanol igual a 30% el porcentaje de recuperación es de 99.19. apenas 0.81% más que con 20% de etanol.

Según los resultados obtenidos, una concentración adecuada de etanol es 20%. Incrementar el contenido de etanol afecta considerablemente los costos de operación, el etanol es el insumo más caro del proceso, sin embargo el etanol es el solvente orgánico más

usado en el proceso de desorción por ser una de los más económicos y de menor toxicidad. si lo comparamos con el metanol, acetonitrilo, glycol, etc.

Siendo el alcohol un producto inflamable y trabajando a altas temperaturas, el riesgo de incendio es mayor a mayores porcentajes de alcohol.

Razón de flujo

Debemos recordar que para el estudio de las variables anteriores hemos mantenido la razón de flujo constante, para garantizar el mismo tiempo de contacto en todas las pruebas. sin embargo para el estudio de la razón de flujo, esto no es posible, ya que el tiempo de contacto y el número de lecho será diferente para cada valor de razón de flujo: por lo que se graficó el porcentaje de recuperación versus el tiempo de operación (figura 4.12) para obtener conclusiones acertadas. presentamos también la figura 4.13 (razón de flujo versus número de lecho) para efectos comparativos.

Es obvio que a nivel industrial no se usa una razón de flujo de 100 ml por minuto por lo que definimos para este proceso, el tiempo espacial bajo condiciones específicas, así el tiempo espacial es el cociente entre volumen de solución desorbedora neces-

rio para desorber un lote de carbón y la razón de flujo.

Todos los valores de los parámetros estudiados son útiles a nivel industrial. bajo condiciones específicas. por ejemplo, según nuestros resultados (tabla 4.5.3, figura 4.4) a $T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{NaOH} = 2.0\%$, $\text{NaCN} = 0.1\%$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 20\%$. tiempo espacial 500 min. obtendremos en 8 horas 20 minutos (tiempo de operación) un porcentaje de recuperación de 97.40 (a nivel industrial 97% es un porcentaje aceptado como desorción completa).

Resumen de las condiciones de operación recomendables

$T = 80^{\circ}\text{C}$

Composición de la solución desorbedora :

$\text{NaCN} = 0.1\%$

$\text{NaOH} = 2\%$

Etanol = 20%

Tiempo espacial = 500 minutos

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para incrementar la producción aurífera en nuestro país, es necesario que se cree incentivos sociales, económicos y financieros. La información científica y técnica referente a los puntos auríferos existentes y la comunicación entre las entidades promotoras es básica. Esta actividad económica puede usarse como promoción personal para los pobladores del lugar: debe haber una labor de promoción y fomento aurífero con políticas delineadas y metas para incrementar la producción con el empleo de tecnologías modernas.

La selección para el uso del carbón activado, intercambio iónico y Merrill-Crowe dependerá de las características de la alimentación y del tamaño de la planta. Factores operacionales y económicos tienden a favorecer la aplicación de procesos continuos en lugar de procesos batch, en la mayoría de casos de procesamiento de mineral.

El proceso Merrill-Crowe es favorable cuando el mineral contiene una cantidad significativa de plata respecto del oro. En la práctica se elige este método cuando la relación de leyes Ag/Au es 1/1 y con mayor ventaja si la relación es mayor. Si se usara la tec-

nología de recuperación con carbón activado. se incrementaría los costos de operación (en carbón activado, adsorción, desorción y regeneración), que puede no estar justificados con los márgenes de ganancia de la plata. Este proceso no es recomendable si el mineral es lamoso o arcilloso.

En la tecnología de recuperación de oro con carbón activado, los procesos de desorción y regeneración son los más caros y pueden ser prohibitivos para operaciones muy pequeñas, prefiriéndose en estos casos vender el carbón cargado con oro.

Dada su versatilidad cada día se incrementa el uso de carbón activado para recuperación de oro, sobre todo para el tratamiento de minerales carbonaceos.

El proceso CIP generalmente es recomendable para operaciones de recuperación de oro de minerales de baja ley, con características pobres de sedimentación o filtración **también** para los que contienen porcentajes altos de cobre o fierro.

La recuperación de oro con carbón activado tienen como ventaja que la baja concentración de cianuro, reduce el efecto de los cianicidas y se tiene menor contaminación ambiental.

Los equipos y accesorios usados en la recuperación de oro con carbón activado no deben tener partes y/o accesorios de cobre o bronce que puedan estar en contacto con la solución cianurada.

En el circuito convencional de recuperación de oro con carbón activado (adsorción-desorción-electrodeposición), el lavado ácido antes de rehusar el carbón en la adsorción, cumple un papel importante ya que a través de él se eliminan los carbonatos que precipitan en la superficie del carbón, disminuyendo el área de contacto entre el carbón y la pulpa, afectando la actividad del carbón. Es recomendable usar ácido nítrico diluido seguido de varias lavadas con agua: el ácido clorhídrico sería corrosivo al horno de reactivación.

Se recomienda cernir el carbón luego de la reactivación para eliminar los finos del carbón ya que esto evitaría posibles pérdidas de oro.

El proceso de intercambio iónico con resina, muestra un mejor comportamiento que el carbón activado cuando el mineral es arcilloso o los concentrados tienen agentes de flotación o finos de fierro en las calcinas.

La electrodeposición en su presente grado de desarrollo no puede ser aplicado a soluciones de los procesos de lixiviación, ya que son soluciones demasiado sucias

y diluidas. En cambio si se usa para recuperar el oro y la plata de las soluciones generadas del proceso de desorción de carbón activado o de resinas.

Los procesos convencionales de flotación-tostación, para recuperación del oro atrapado en la pirita o de residuos de plantas metalúrgicas, tienen una eficiencia del 40%. Actualmente con el uso de la bacteria *thiobacillus ferrooxidans*, que obtiene energía para su crecimiento oxidando la pirita de fierro, se logra recuperar el 81% del metal precioso. El proceso biobacterial *situ* es una alternativa atractiva para la recuperación de oro de montones residuales, por su simplicidad y economía; además la contaminación ambiental es casi nula. Aún no existe suficiente conocimiento de la bioquímica de los microorganismos para identificar los pasos biológicos que determinen los límites de velocidad de crecimiento y de su genética para discutir una forma de mejorarlos una vez identificados.

El objetivo más importante de la desorción es recuperar la mayor cantidad de valores metálicos cargados en el carbón activado en el menor tiempo posible, generando una solución con leyes altas que favorecen la electrodeposición inmediata; esto operando con seguridad y en forma económica en un desarrollo industrial.

Tomando como base los diferentes métodos de desorción

se están aplicando diversas modificaciones para mejorarlos. Estas modificaciones incluyen la variación de la composición desorbedora, el uso de diferentes solventes y las diferentes condiciones de operación.

El propósito de este trabajo experimental ha sido presentar el efecto de la temperatura, composición de la solución desorbedora y el caudal en la desorción, para brindar la oportunidad a los profesionales del campo a su evaluación e incidencia en sus condiciones específicas. La toma de decisiones se podrá hacer dependiendo de diversos factores, como el material a tratar, disponibilidad de insumos, urgencia de resultados, restricciones económicas, etc.; pudiendo predecirse la eficiencia y el tiempo de operación del proceso basados en los datos que presentamos en este trabajo.

El incremento de la temperatura de la desorción mejora la eficiencia total, sin estar definido si este aumento es debido al cambio en el equilibrio o al mejoramiento del coeficiente de transporte de masa.

En base a los datos experimentales recomendamos temperaturas sobre los 75°C, recordando que debe evaluarse los inconvenientes que implican condiciones más severas para los equipos y accesorios, así como también mayor consumo de energía y por lo tanto mayor costo de operación.

El uso de un solvente orgánico como el etanol en el proceso de desorción tiene un efecto importante, mejorando la eficiencia del proceso en términos de tiempo de operación.

Dado que el costo del alcohol es elevado se recomienda usar equipos de recuperación de este producto (depuración de gas para recuperación de solventes orgánicos vaporizados), siendo indispensable una evaluación de costos.

El efecto de las concentraciones de cianuro y hidróxido de sodio en la solución desorbedora se muestran en las figuras 4.7 y 4.9, siendo los rangos operativos mínimos recomendables de 0.1% y 1% respectivamente.

En el trabajo de la industria una vez que el sistema llega a las condiciones requeridas, se puede mantener la temperatura y la razón de flujo de la solución fácilmente, no así la composición de la solución desorbedora que va cambiando con el tiempo, por lo que se debe controlar el contenido de cianuro, hidróxido de sodio y alcohol compensando las cantidades necesarias.

La columna de desorción de la planta piloto posee un soporte de malla en la parte inferior interna, esta malla cumple varias funciones, evita que el carbón obstruya el ingreso de la solución desorbedora a la columna desorción y a la vez sirve como un plato distri-

buidor, necesario para un flujo homogéneo a través de todo el lecho de carbón, evitando así las canalizaciones. La salida de la columna posee también una malla para evitar la pérdida de carbón por arrastre en el tope de la columna. este principio debe usarse en las plantas industriales.

Las columnas de desorción a nivel industrial tienen la parte inferior cónica para facilitar la descarga del carbón. En algunas plantas se usa un eductor hidráulico para mover el carbón entre etapas.

La manipulación y el uso de cianuro pueden ser peligrosos para la salud sinó se tiene los cuidados necesarios. Los trabajadores que manipulen cianuro deben de familiarizarse con los peligros. la ingestión de 0.2 grs de cianuro puede ser mortal para el ser humano. El límite de concentración de ácido cianhídrico en el aire, establecido por la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) es de 10 ppm.

El método más usado para la eliminación de cianuro libre en las corrientes de desecho es el uso del cloro o hipoclorito adicionándole luego cal para remover los metales pesados. Las limitaciones de descarga de cianuro en soluciones de desecho es de 0.02 ppm. de CN . dada por la U.S. Enviromental Protection Agency (EPLA).

BIBLIOGRAFIA

1. "A review of plant practice and recent developments in the carbon in pulp process for the recovery of gold". Report of investigation 4523. United States Bureau of Mines. 1988.
2. Adams M. D.. "The chemical behaviour of cyanide in the extraction of gold. 1. Kinetics of cyanide loss in the presence and absence of activated carbon". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 90. N° 2. febrero. P.P. 37-44.
3. Adams M. D.. "The chemical behaviour of cyanide in the extraction of gold. 2. Mechanisms of cyanide loss in the carbon in pulp process". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 90. N°3. Marzo 1990. P.P. 67-73.
4. Adams. M. D., Fleming C. A.. "The mechanism of adsorption of aurocyanide onto activated carbon". Metallurgical Transactions B. Vol. 20B. Junio 1989.
5. Baitey P. R.. "The extractive Metallurgy of gold in South Africa". The South African Institute of Mining and Metallurgy. Johannesburg, 1987.
6. Barin I., Barth H. and Yamari A.. "Electrochemical Investigation of the kinetics of gold cementation by zinc from cyanide solutions". Erzmetall. Vol. 33 N° 7/8. 1980.
7. Bernstein Merwin and Ly Pedro. "Peru's precious and base metals status and prospects". Mining Engineering. julio 1993. P.P. 705-709.
8. Cabrera Melendez. "Aplicación industrial del carbón activado en la moderna metalurgia del oro". XVI Convención de Ingenieros de Minas del Perú. Lima 1982.
9. Cabrera Melendez. "Tecnología del carbón activado al alcance de la minería peruana". XVIII Convención de Ingenieros de Minas del Perú, 24-28 Noviembre. Lima 1986.

10. Chirinos Morales. "Planta de procesamiento aurífero en Algamarca". Seminario Regional del Norte. mayo. Trujillo 1989.
11. Chirinos Morales y Hernandez Castillo. "Procesamiento aurífero con polvo de zinc y carbón activado en Algamarca". XX Convención de Ingenieros de Minas del Perú. Abril 1991.
12. Davidson R. J., Veronese V. and Nkosi M.. "The use of activated carbon for the recovery of gold and silver from gold-plant solutions". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, mayo 1979.
13. Davidson R. J., Douglas W. D. and Tumilty S.A.. "The selection of granular activated carbon for use in a carbon in pulp operation". Carbon in pulp technology for extraction of gold. Australian Institute of Mining and Metallurgy. Parkville. Australia 1982.
14. Davidson R. J. and Schoeman N.. "The management of carbon in a high tonnage CIP operation". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 91. N° 6, junio 1991. P.P. 195-208.
15. Davidson R. J. and Duncanson D.. "The elution of gold from activated carbon using eionized water". Journal of the African Institute of mining and metallurgy. julio 1977.
16. Dement E. R. and King N. D.. "Merrill crowe/carbon in pulp technology for the extraction of gold. Australian Institute of mining and metallurgy. Parkville, Australia. 1982.
17. De Montreuil Diaz. "Centrales mineralógicas en algunos yacimientos auríferos peruanos". I Simposium sobre Geología, Minería y Metalurgia del oro. 16-19 setiembre. Lima 1986.
18. De Montreuil D.. "Mineralogía del oro y su relación con el tratamiento metalúrgico". Revista Minera 1985.
19. De Montreuil D.. "La investigación mineragráfica, una importante arma de apoyo en el beneficio de los minerales de oro". Revista el MUKI del Banco Minero del Perú. N° 3. 1975.
20. El Shall H.. "Biotechnology". Mining Engineering, mayo 1992.

21. "El oro". Ed. CEPECT Lima 1990.
22. Faulkner D.. "Carbón activado granulado para la recuperación de metales preciosos". Revista Minera N° 186. Enero-febrero. 1985.
23. Filmer A.O.. "The electrowinning of gold from carbon in pulp eluates". The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Diciembre 1982.
24. Fleming C. A.. "Some aspects of the chemistry of carbon in pulp and resin in pulp processes". Carbon in pulp technology for the extraction of gold. the Australasian Institute of Mining and Metallurgy 1982.
25. Griffin A. F. and Costello M. C.. "Carbon desorption process development at micron research. (western Australia)". Carbon in pulp. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Parkville. Australia. 1982.
26. "Granular carbon for gold recovery". Caloon carbon corporation.
27. Hall K. B.. "Homestake uses carbon in pulp to recover gold from slimes". World Mining, noviembre 1974.
28. Herkenhoff E.C. and Dean J. G.. "Heap Leaching: Agglomerate or deslime?". Engineering and Mining Journal. June 1987.
29. Holmes D. S.. "Biotechnology in the mining and metal processing industries: challenges and opportunities". Minerals and metallurgical processing, mayo 1988.
30. Hussey S. J.. "Application of ion exchange resins in the cyanidation of a gold and silver ores". Report of investigation N° 4374. United States Bureau of Mines 1949.
31. Hussey S. J., Salisbury H. B. and Potter G. M.. "Carbon in pulp gold adsorption from cyanide leach slurries. Report of investigation 8368, United States Bureau of Mines. 1979.
32. Ibrado A. S. and Fuerstenau. "Adsorption of the cyano complexes of Ag(I), Cu(I), Hg(II), Cd(II) and Zn(II) on activated carbon. Minerals & Metallurgical Processing, february 1989.

33. Jha Mahesh C., "Recovery of gold and silver from cyanide solutions: A comparative study of various processes". First International Symposium on precious metals recovery, 10-14 junio Reno Nevada USA, 1984.
34. Johns M. W. and Matthews I. D., "Recovery of gold from ashed woodchips". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 90, N° 1, Junio 1990, P.P. 1-10.
35. Jarufe Karim y Mucha Nabor, "Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales auríferos". Trabajos técnicos del Instituto de Geología, Minas y Metalúrgica del Perú, 1990.
36. Ladeira A. C., Figueira M. L., Ciminelly V. S., "Estudio de la adsorción de oro en el carbón activado". Primer Congreso Intenacional de Ingeniería Metalúrgica, Lima, 1991.
37. Laxen Peter A., "Carbon in pulp processes in South Africa". Seminar on carbon in pulp technology for the extraction of gold at Kalgoorlie, Australia, julio, 1982.
38. Laxen Peter A., Becker G. S., and Rubin R., "Developments in the application of CIP to the recovery of gold from South African ores". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, junio 1979.
39. Le Roux J. D., Bryson A. W. and Young B. D., "A comparison of several kinetic models for the adsorption of gold cyanide onto activated carbon". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 91, N° 3: Marzo 1991, P.P. 95-103.
40. Ley Emilio, "Perspectivos de precios de los metales para 1991". Revista Minera N° 213, 1991.
41. Libaude J. y Movizot G., "Técnicas empleadas en la metalurgia del más codiciado de los metales: oro". Suplemento de la Revista Mundo Minero, octubre 1992.
42. Lobato Flores A., "Activación de carbones peruanos". Primer Symposium Nacional del carbón, del 10 al 14 de junio, Lima, Perú, 1985.
43. Lucio F., "El oro: Metal Precioso". Revista Minería N° 186, enero-febrero, 1985.

44. Mc Dougall G. J.. "The physical nature and manufacture of activated carbon". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 91. N° 4. abril 1991. P.P. 109-120.
45. Mc Dougall G. J.. "The Mechanism of gold adsorption on activated carbon". Proceedings of the international gold and silver conference. Australia. octubre-noviembre. 1988.
46. Mc Dougall G. J.. Hancock R. D., Nicol M. J., Wellington O. L. and Copperthwaite R. G.. "The mechanism of adsorption of gold cyanide on activated carbon". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 80. 1980. P.P. 344-356.
47. Mc Dougall G. J. and Hancock R. D., "Activated carbons and gold. a literature survey". Minerals science engineering, Vol. 12. N° 2. abril 1980.
48. Malvett R.. "Fundamentos de la oferta y de la demanda del oro en el mundo". Minería N° 216, julio-agosto 1991.
49. Marsden J. O., Mansanti J. G. and Sass S. A.. "Innovative methods for precious metals recovery in North America". Mining Engineering, september 1993.
50. Mattson J. S. and Mark H. B.. "Activated carbon". New York Marcel Dekker. 1971.
51. Matthews D. C. and Hensen M. S.. "Pressure oxidation at first miss gold's getchell mine". Mining Engineering, september 1991.
52. Meneses Diaz A.. "Las monedas bullion". Minería N° 207. setiembre-octubre 1989.
53. Milligan A. D., Muhtadi A. O. and Bruce Thorndy-craft. "Metal production". Introduction to evaluation, design and operation, design and operation of precious metal heap leaching projects. Ed. Dirk J. A. Van Zyl AIME. Colorado 1988.
54. Misari Sergio F.. "Metalurgia del oro". Ed. CEPECT, 1era. edición, noviembre 1993.
55. Muhtadi A. O.. "Metal extraction (Recovery systems)". Society of Mining Engineers INC., Littleton Colorado 1988.

56. Muir D. M.. "Recovery of gold from cyanide solutions using activated carbon: A review". Carbon in pulp technology for the extraction of gold Australian Institute of Mining and Metallurgy, Parkville, Australia 1982.
57. Nicol M. J., Schalch E., Balestra P. and Hegedus H., "A modern study of the kinetics and mechanism of the cementation of gold". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Febrero 1979, P.P. 191-198.
58. Nullaquine W. A. and Huimiller D. L.. "Gold recovery from blue spec gold antimony ore". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, september 1980.
59. "Oro y cobre siouen muy fuertes". Periódico teoría y acción del mundo minero. N° 151. julio 1994.
60. Pacheco L. B. y Milos B. A.. "Procesamiento de minerales en altura. planta de lixiviación en pilas Tambo y planta CIP El Indio". 43° Convención anual de Ingenieros de Minas de Chile. del 27 al 31 de octubre 1992.
61. Peel R. G. and Benedek A.. "Dual rate kinetic model of fixed bed adsorber". J. Environmental Engineering Div.. A.S.C.E.. Vol. 106. N° EE4. agosto 1980: P.P. 797-813.
62. "Perú". Suplemento de la Revista Mining Journal. Vol. 320. London. junio 1993.
63. Perry H.. "Biblioteca del Ingeniero Químico". Mc Graw-Hill. México. 5ta. edición 1986.
64. "Precio de los metales". Periódico teoría y acción del mundo minero. N° 150. junio 1994.
65. Quiroz Nuñez I.. "Procesos de disolución de oro y plata". XX Convención de Ingenieros de Minas. abril. Lima 1991.
66. Randall P. and Allard S. G.. "Consideration in the choice of carbon adsorption systems for gold heap leaching". First International Symposium on precious metals recovery, 10-14 junio, Reno Nevada USA 1984.
67. Rivera G. N.. "Como incrementar la producción aurífera del Perú". Minería N° 191. Noviembre-diciembre 1985.

68. Rodriguez Avello A., "Tratamiento de los minerales de oro". Minería N° 187. marzo-abril. 1985.
69. Stange W., King R. P. and Woollacott L., "Toward more effective simulation of CIP and CIL processes. 2. A population-balance based simulation approach". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 90. N° 11. noviembre 1990. P.P. 307-314.
70. Stange W., "The economics and marketing of gold". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 86. diciembre 1986.
71. Stewart L. A., "Procesamiento actual del oro - 1". International Mining N° 18. 1985.
72. Stone A. M. and Mc Donald D. C., "Continuous carbon elution at ok tedi". Australian Institute of Mining and Metallurgy. Parkville 1982.
73. Taylor J. L., Hulse G. A. and Lawson E. N., "Biological pre-treatment for the recovery of gold from slimes dams". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 90. N° 2. febrero 1990. P.P. 45-49.
74. Van Deventer J. S. J., "Modelling of the adsorption of gold on activated carbon in batch and continuous systems". Report of investigation. Department of Chemical and Metallurgical Engineering University of Stellenbosch South Africa. 1984.
75. Woollacott L. C., Stange W. and King R. P., "Towards more effective simulation of CIP and CIL processes. 1. The modelling of adsorption and leaching". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 90. N° 10. octubre 1990, P.P. 275-282.