

ADSORCION DE ORO Y PLATA SOBRE CARBON ACTIVADO PARTIENDO DE LAS SOLUCIONES DEL PROCESO DE CIANURACION

ALFONSO MALDONADO C. *
Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.

CUSTODIO VASQUEZ Q. *
Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.

VIANNEY SARRIA PALACIOS **
Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.

RESUMEN

La influencia del contenido de oro en la solución inicial, el contenido de arcilla, los sistemas de agitación, la cantidad de carbón, la temperatura y el tiempo, son analizados en este trabajo.

El comportamiento del proceso, expresado por la ecuación:
 $A_d = C^2 t^3$ describe el proceso de adsorción.

INTRODUCCION

Las técnicas actuales, contemplan la recuperación del oro y de la plata de las soluciones cianuradas, mediante la sustitución del zinc por el carbón activado, aplicando los sistemas de carbón en lixiviación y carbón en columnas en contracorriente.

El carbón activado es fabricado a partir de conchas de coco por un proceso térmico y normalmente tiene una capacidad de carga de 12 kg de oro por tonelada de carbón, dejando las soluciones estériles con concentraciones inferiores a 0.005 p.p.m en tiempos de contacto entre una y cuatro horas, dependiendo de parámetros como la temperatura, el pH y la fuerza iónica (2).

* Profesor Titular, Universidad Industrial de Santander

** Profesor Asistente, Universidad Tecnológica del chocó

El objetivo de este estudio es recuperar el oro y la plata de las soluciones cianuradas del mineral de San Celestino (Distrito minero de California, Santander, Colombia), mediante la adsorción sobre carbón activado, resultados que se expresan en porcentajes de adsorción. Para lograr este objetivo, se utilizan sistemas de adsorción en SHAKER, adsorción en columnas y carbón en pulpa.

Las variables que se tienen en cuenta son: El tiempo de adsorción, el flujo de la solución, la concentración de oro de la solución rica, los sistemas de agitación, la temperatura, la cantidad de carbón, la densidad de la pulpa, el contenido de cinc en la solución y la influencia de los lodos.

ASPECTOS TEORICOS

MECANISMOS DE ADSORCION

Es necesario puntualizar dos hechos importantes que han sido confirmados por varios trabajos sobre la adsorción del cianuro de oro y plata sobre el carbón.

- La extracción de $Au(CN)_2^-$ y $Ag(CN)_2^-$ es fuertemente incrementada por la presencia de electrolitos como KCN y $CaCl_2$ en medio de la adsorción.

- La adsorción es fuertemente realizada por un incremento en la acidez del medio de adsorción (3,4).

El estado real de reflexión sobre el mecanismo de la adsorción de aurocianuro sobre carbón activado puede ser resumido en tres categorías (3,5).

Primero. Las propuestas que afirman que el oro está presente como un ión aurocianuro.

Segundo. Aquellos que sugieren que el oro está presente como un compuesto diferente del aurocianuro.

Tercero. Los que proponen que el aurocianuro es reducido a oro metálico.

En términos generales se presenta según G. J. McDougall y otros, tres hipótesis (3,5):

- La teoría de adsorción física que contempla enlaces debido a fuerzas de Van Der Waals.

- La teoría del complejo químico contempla la existencia de grupos fenólicos.

- El mecanismo electroquímico que contempla la reacción:



en donde los electrones son suministrados por el carbón.

Factores que modifican la velocidad de adsorción. El pH tiene gran influencia en las propiedades y velocidad de adsorción en el rango de uno a seis, pero entre seis y doce su efecto es prácticamente despreciable (4,1).

La variación de entalpía que acompaña la adsorción de un mol de adsorbato está relacionado con la carga de equilibrio como una función de la temperatura, de acuerdo a la ecuación matemática siguiente:

$$\ln C = [-q/RT] + \text{constante}$$

Donde:

- C : Concentración de equilibrio en solución a carga constante
q : Variación de entalpía
T : Temperatura (K).

MATERIALES Y REACTIVOS

Carbón activado

El carbón activado utilizado es del tipo NORIT PK 1-3 granular fabricado en Netherland (Holanda). La casa NORIT reporta las características presentadas en la Tabla 1.

Descripción mineralógica

El contenido mineralógico del mineral de San Celestino se presenta en la Tabla 2.

Solución Cianurada

Para efectuar la cianuración el mineral de San Celestino se llevó a un grado de molienda de 90-95% -200 mallas. Obteniéndose una solución cianurada de composición como se presenta en la Tabla 3.

Columnas de adsorción

Se utiliza columnas de PVC de una y cuatro pulgadas (1", 4") de diámetro y longitudes de 25 y 80 cm respectivamente. Se conectan tres columnas en serie aplicándose un flujo ascendente. Las pruebas de carbón en pulpa se realizan en vasos de precipitado de dos litros. Las pruebas cinéticas se desarrollan por el sistema de agitación en Shaker.

TABLA 1. Características del Carbón Activado

Análisis Típico		Método de análisis
Densidad aparente	[g/l]	260 ASTM 2854-70
Humedad al empacar	[%]	2 ASTM 2864-70
Contenido de cenizas	[%]	6 ASTM 2688-70
Número Molasses		525 Método NORIT
Adsorción phenol	[%]	5 DIN 19603
Número	[mg/g]	800 AWWA B 604-74
Volumen de poros total	[cc/g]	1.2
Volumen de desclorinación	[cm]	8 DIN 19603
Dureza	[%]	80 ASTM proposa
pH	alcalino	Método NORIT
Tamaño de partícula	[%]	ASTM 2862-70
-> 2.4 mm (malla 8 estandar)		22
-> 1.4 mm (malla 14 estandar)		45
-> 1.0 mm (malla 18 estandar)		87
coeficiente de uniformidad [60/10]		1.9

TABLA 2. Descripción mineralógica

Muestra	Bulk + 100		Bulk + 200		Bulk + 300		Bulk - 400	
	Número de partículas	% de partíc.	Número de partíc.	% de partículas	Número de partículas	% de partíc.	Número de partículas	% de partículas
Minerales								
Pirita (py)	68	78.16	99	86.94	212	89.83	361	93.52
Estalerita (ef)	2	2.90	-	-	2	0.85	3	0.78
Calcopirita (cp)	-	-	-	-	-	-	-	-
Bornita (bn)	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcoocita (cc)	1	1.15	1	0.88	4	1.69	5	1.30
Covelita (cv)	-	-	-	-	-	-	-	-
Hematita (he)	-	-	2	1.75	3	1.27	4	1.30
Ganga (g)	3	3.45	-	-	3	1.27	2	0.51
Total partículas libres	74	85.06	102	89.47	226	95.76	380	98.44
py - cp	1	1.15	-	-	-	-	1	0.26
g - py	4	4.59	2	1.75	1	0.42	-	-
py - ef	3	3.59	2	1.75	1	0.42	1	0.26
cy - ha	3	3.45	-	-	-	-	-	-
cp - cc	1	1.15	1	0.88	1	0.42	1	0.26
cp - cf	-	-	1	0.88	-	-	-	-
cy - py	-	-	1	0.88	-	-	-	-
cy - ef	-	-	-	-	2	0.86	-	-
py - bn	-	-	-	-	1	0.42	-	-
py - ha	-	-	-	-	1	0.42	-	-
bn - cp	-	-	-	-	1	0.42	-	-
cc - bn	-	-	-	-	-	-	1	0.26
py - ha - ef	-	-	1	0.88	-	-	-	-
py - cv - ha	-	-	1	0.88	-	-	-	-
py - cp - cc	-	-	1	0.88	-	-	-	-
bn - cc - cp - cy	1	1.15	-	-	-	-	1	0.26
Total particulares entrelazadas	13	14.94	12	10.53	10	4.24	6	0.26
TOTALES	87	100.00	114	100.00	236	100.00	386	100.00

TABLA 3. Análisis químico de la solución cianurada

Constituyentes		
As	g/ton	10.30
Ag	g/ton	90.30
Fe	%	4.80
S	%	4.40
Cu	%	0.16
Zn	%	0.08
Pb	%	0.13
Insolubles	%	80.54
Sales solubles	lb/ton	3.40

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La parte experimental constó de las siguientes etapas:

Ensayos previos

Los ensayos previos realizados fueron: Pruebas en Shaker y pruebas en columnas. En las pruebas en Shaker el parámetro variable fué la cantidad de carbón expresada en gramos por litro de solución con el propósito de obtener la mayor recuperación posible en un tiempo aceptable. Las pruebas en columnas se efectuaron en una, dos y tres columnas utilizando flujo ascendente y descendente tomando constante el valor de 10 g de Carbón activado por litro. Se utilizaron columnas de vidrio y PVC de una pulgada de diámetro y 25 cm de longitud. Los datos se tomaron a los 30 minutos de iniciada la prueba, suspendiendo el flujo y tomando las muestras respectivas para tres columnas.

Pruebas finales

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos previos, se determinó el rango de trabajo de las variables principales, como son: el tiempo, cantidad de carbón activado por litro de solución y flujo, para posteriormente analizar el efecto de otras variables en el proceso de adsorción.

Las pruebas se efectuaron en Shaker, columnas y por el sistema de carbón en pulpa. La variable respuesta fué en todos los caso la adsorción.

Pruebas en Shaker

Este tipo de experimento se realizó en erlenmeyer de 500 ml, conteniendo 250 ml de solución cianurada con una relación de 17 g de carbón activado por litro.

Isoterma de adsorción

Los parámetros para construir esta isoterma son el porcentaje de adsorción y el tiempo, tomando a intervalos de 15, 30, 45, 90 y 150 minutos.

Contenido de arcilla

Para analizar el efecto de las lamas en el proceso de adsorción, se adicionó sílice en cantidades de dos y cuatro per

ciento con una granulometría de -80 micrones, y así comparar su comportamiento con la solución clarificada.

Diseño factorial

Este tipo de diseño se aplicó para ensayos en Shaker con tres y cinco variables; en el sistema de columnas con tres variables y en el sistema de carbón en pulpa con cuatro variables independientes.

RESULTADOS

Los ensayos se realizaron por los sistemas de pruebas en Shaker, pruebas en columnas y carbón en pulpa.

La Figura 1, muestra la variación de la isoterma de adsorción en función del tiempo para varias relaciones de carbón activado por litro de solución.

Las Tablas 4, 5, 6, y 7 reportan los datos obtenidos para adsorción en columnas con una, dos y tres columnas.

La influencia de las variables tales como: concentración de oro en el proceso de adsorción, el contenido de arcilla en la solución, el sistema de agitación, la velocidad de agitación, la temperatura y el tipo de solución, se observan en las Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 para la adsorción de oro y de la plata.

Para conocer la interacción de las variables consideradas en el proceso, se aplicó un diseño factorial y los resultados se presentan en las Tablas 8, 9 y 10.

TABLA 4. Isoterma de adsorción en una columna con flujo ascendente de 2.5 l/h.

Ensayo	tiempo min	Ag en sln [ppm]	Ag adsorbida [ppm]	adsorción [%]
12-1	0	16.5	-	-
12-2	1	0.0	16.0	100.00
12-3	10	0.5	16.0	96.97
12-4	35	1.5	15.0	90.91
12-5	60	2.6	13.9	84.24

TABLA 5. Isoterma de adsorción en una columna con flujo descendente de 2.5 l/h.

Ensayo	tiempo min	Ag en sln [ppm]	Ag adsorbida [ppm]	adsorción [%]
13-1	0	16.5	-	-
13-2	1	0.0	16.5	100.00
13-3	15	3.8	12.7	76.79
13-4	30	4.2	12.3	74.54
13-5	60	4.4	12.1	73.33

TABLA 6. Isoterma de adsorción en dos columnas con flujo ascendente de 0.66 l/h.

Ensayo	tiempo min	Ag en sln [ppm]	Ag adsorbida [ppm]	adsorción [%]
14-1	0	13.0	-	-
14-2	10	0.7	12.30	94.61
14-3	20	1.3	11.70	90.00
14-4	25	1.4	16.50	89.23
14-5	35	1.41	11.59	89.15

TABLA 7. Adsorción en tres columnas con flujo ascendente de 0.66 L/H.

	Columnas		
	1	2	3
Adsorción de plata (%):			
1. Individual	59.93	26.31	30.0
2. Global	53.93	87.88	96.3

TABLA 8. Diseño factorial de la adsorción en columnas de tres variables.

Ensayo	Carbón [g/l]	Flujo [l/h]	Cinc [ppm]	Adsorción de Ag		Adsorción de Au	
				x ₁ [%]	x ₂ [%]	y ₁ [%]	y ₂ [%]
34-1	12	4	18.6	>99.50	>99.50	>99.50	>99.50
34-2	17	4	18.6	>99.50	>99.50	>99.50	>99.50
34-3	12	7	18.6	>99.50	78.37	>99.50	>99.50
34-4	17	7	18.6	81.10	81.00	>99.50	>99.50
34-5	12	4	24.0	>99.50	>99.60	>99.50	>99.50
34-6	17	4	24.0	86.48	>99.50	>99.50	>99.50
34-7	12	7	24.0	78.37	56.75	>99.50	>99.50
34-8	17	17	24.0	90.62	86.48	76.00	>99.50

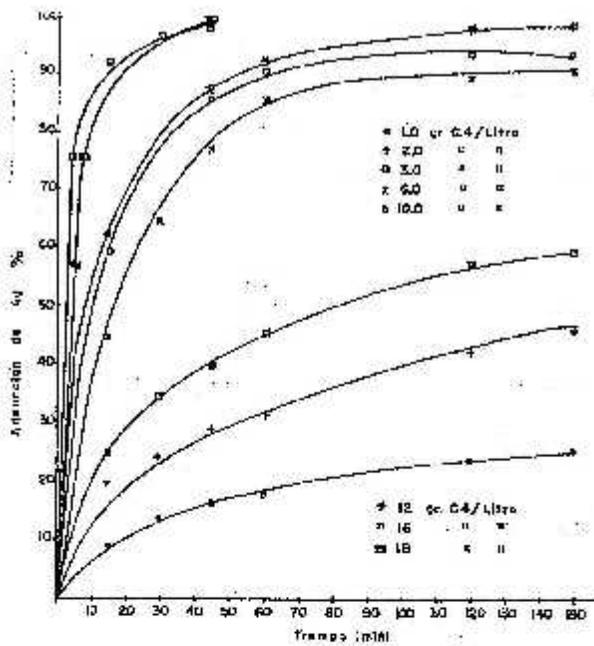


FIGURA 1. Adorción de plata en ensayos previos.

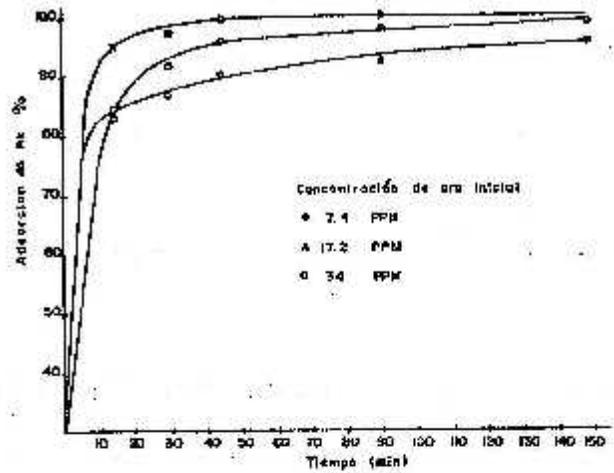


FIGURA 2. Influencia de la concentración de oro en el proceso de adorción.

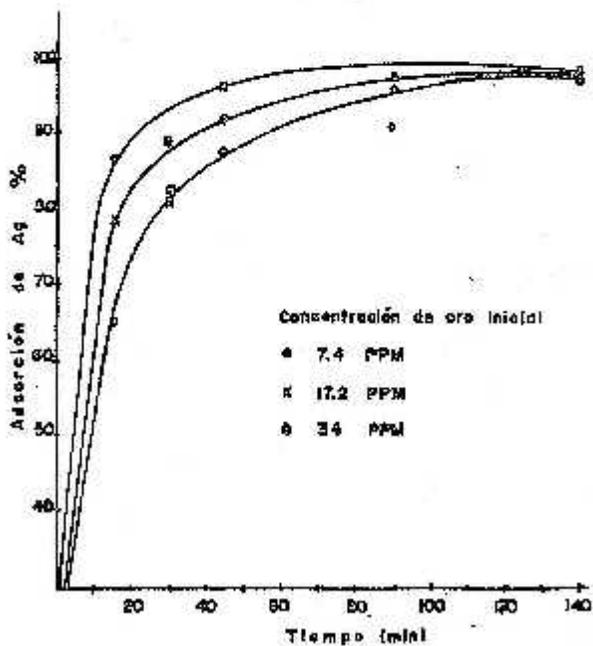


FIGURA 3. Influencia de la concentración de oro en la adorción de plata

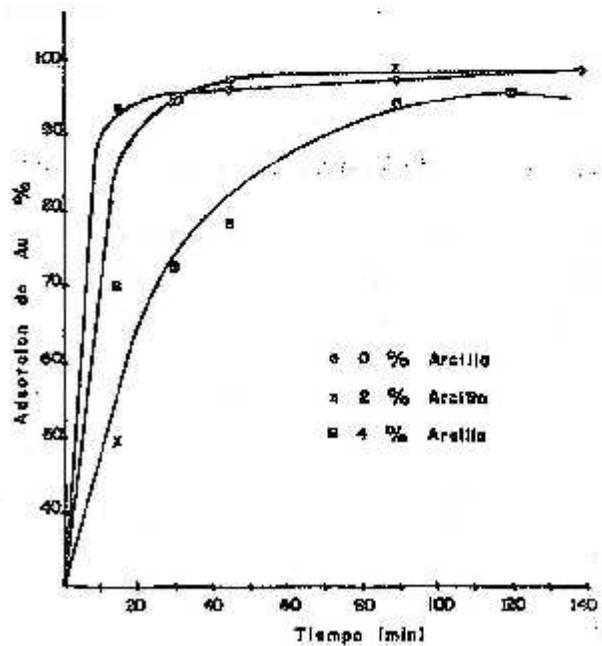


FIGURA 4. Influencia del contenido de arcilla en la adorción del oro.

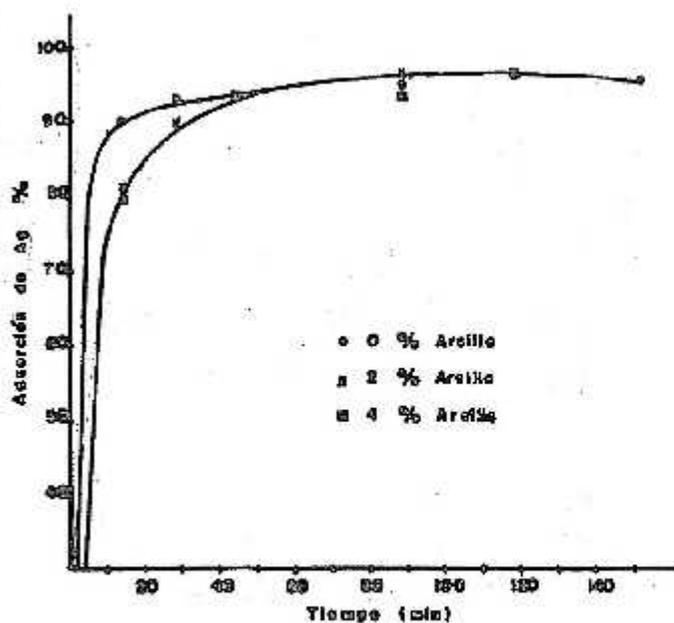


FIGURA 5. Influencia del contenido de arena en la adsorción de plata.

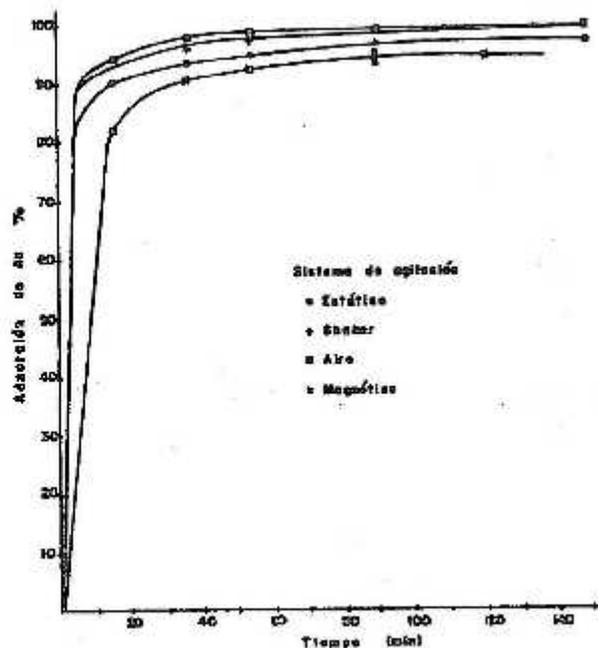


FIGURA 6. Influencia del sistema de agitación en la adsorción del oro.

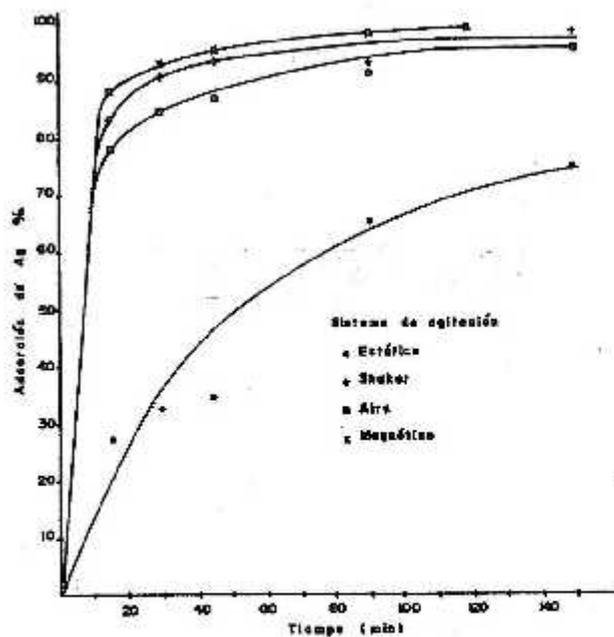


FIGURA 7. Influencia del sistema de agitación en la adsorción de la plata.

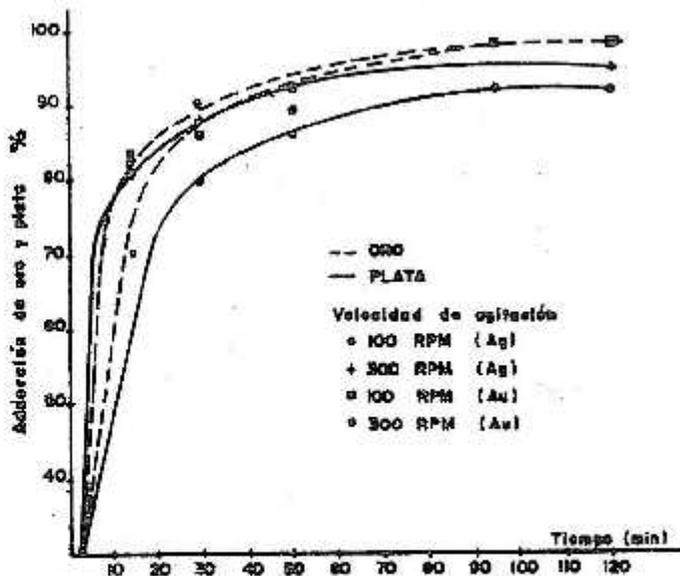


FIGURA 8. Influencia de la velocidad de agitación en el proceso de adsorción.

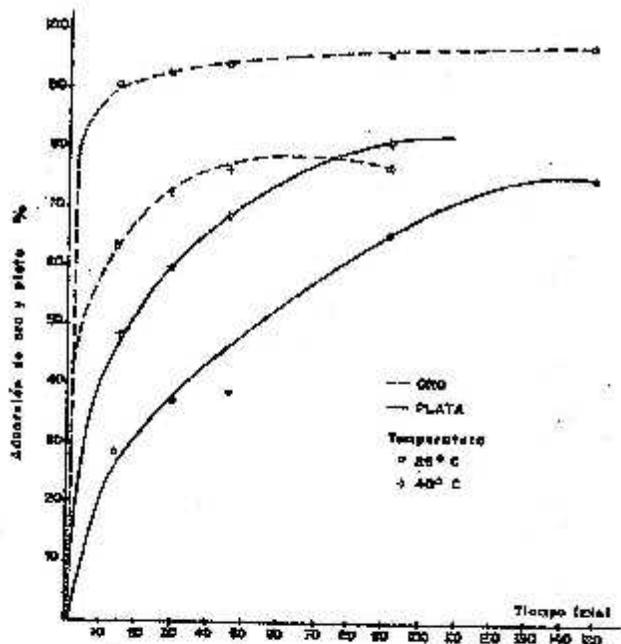


FIGURA 9. Influencia de la temperatura en el proceso de adscripción.

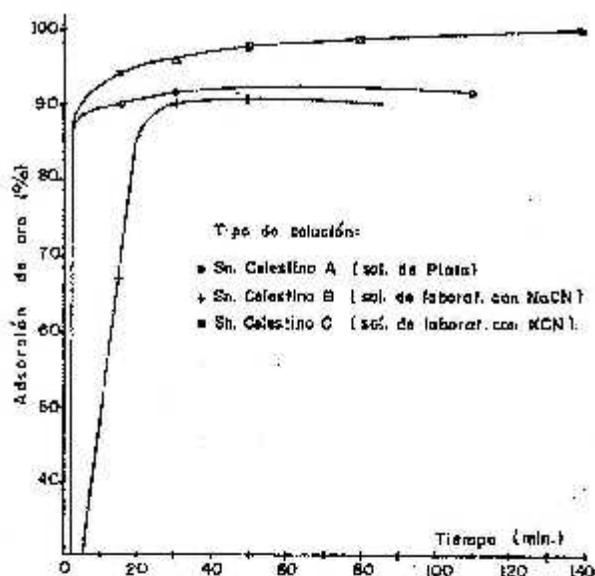


FIGURA 10. Cinética de adscripción de oro para diferentes soluciones.

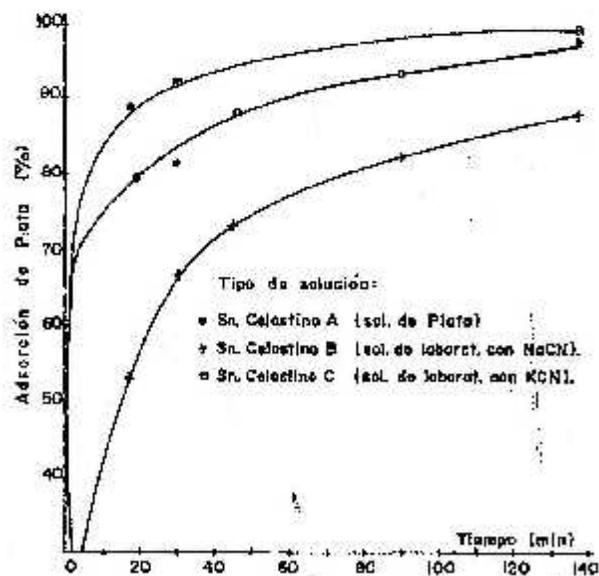


FIGURA 11. Cinética de adscripción de la plata para diferentes soluciones.

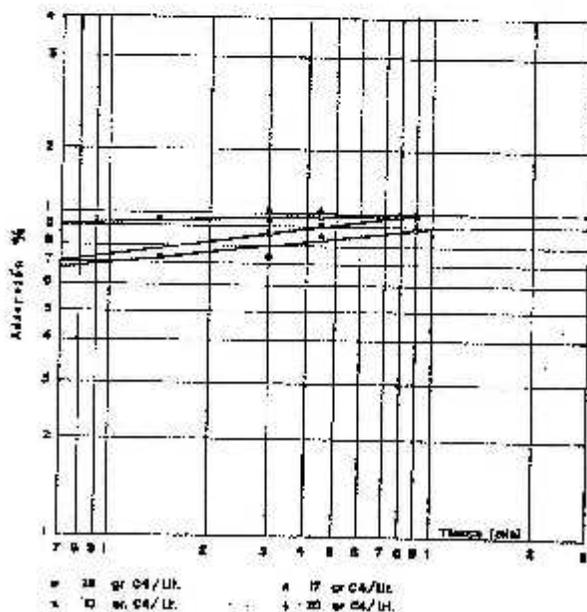


FIGURA 12. Cinética de adscripción de oro.

TABLA 9. Diseño factorial de la adsorción en Shaker con cinco variables.

Ensayo	Carbón [g/l]	S ₂ O ₃ [%]	Cinc [ppm]	Oro [ppm]	Tiempo Adsorción de Ag		Adsorción de Au		
					x ₁	x ₂	y ₁	y ₂	
					[min]	[%]	[%]	[%]	
35-1	8	2	5.6	3.8	60	94.0	90.0	94.74	95.21
35-2	12	2	5.6	3.8	60	94.0	92.5	97.37	98.32
35-3	8	4	5.6	3.8	60	94.0	91.6	97.37	94.90
35-4	12	4	5.6	3.8	60	95.0	93.5	97.40	97.66
35-5	8	2	9.0	3.8	60	92.8	88.7	97.50	96.53
35-6	12	2	9.0	3.8	60	95.0	92.4	97.40	99.14
35-7	8	4	9.0	3.8	60	92.0	90.9	97.30	98.66
35-8	12	4	9.0	3.8	60	89.6	93.0	97.60	98.77
35-9	8	2	5.6	16.3	60	85.0	93.2	98.77	99.36
35-10	12	2	5.6	16.3	60	90.0	94.8	97.54	99.54
35-11	8	4	5.6	16.3	60	85.2	94.4	99.38	96.96
35-12	12	4	5.6	16.3	60	87.6	96.1	99.40	99.94
35-13	8	2	9.0	16.3	60	84.0	91.3	99.38	99.33
35-14	12	2	9.0	16.3	60	89.6	93.8	99.50	98.66
35-15	8	4	9.0	16.3	60	88.0	95.1	99.38	97.77
35-16	12	4	9.0	16.3	60	90.0	97.0	99.20	98.55
35-17	8	2	5.6	3.8	90	94.0	93.7	100.00	98.26
35-18	12	2	5.6	3.8	90	93.6	96.0	97.37	96.76
35-19	8	4	5.6	3.8	90	94.0	89.6	97.37	99.43
35-20	12	4	5.6	3.8	90	96.0	90.0	90.00	100.00
35-21	8	2	9.0	3.8	90	94.6	86.6	100.00	99.74
35-22	12	2	9.0	3.8	90	96.6	95.7	100.00	100.00
35-23	8	4	9.0	3.8	90	93.4	90.6	100.00	100.00
35-24	12	4	9.0	3.8	90	97.0	97.2	94.74	98.25
35-25	8	2	5.6	16.3	90	88.0	89.3	98.77	99.92
35-26	12	2	5.6	16.3	90	91.2	94.9	100.00	98.63
35-27	8	4	5.6	16.3	90	85.8	87.8	99.38	99.18
35-28	12	4	5.6	16.3	90	93.0	92.2	99.40	100.00
35-29	8	2	9.0	16.3	90	86.0	90.1	100.00	100.00
35-30	12	2	9.0	16.3	90	66.0	93.1	99.41	99.12
35-31	8	4	9.0	16.3	90	88.0	89.5	99.41	99.90
35-32	12	4	9.0	16.3	90	84.0	94.2	100.00	100.00

La evaluación cinética del proceso de adsorción con carbón activado para el mineral de San Celestino, describe un comportamiento exponencial, que se expresa por la ecuación siguiente:

$$A_d = C^a t^b$$

$$b = 1.3E-02$$

$$1.5 < n < 2.5$$

Donde:

A_d = Expresa la adsorción (%)

C = Cantidad de Carbón (g/l)

t = Tiempo (min)

EVALUACION DE LOS RESULTADOS

La Figura 1., que relaciona la adsorción de la Plata en función del tiempo, muestra que en el rango de 12 a 18 g de

TABLA 10. Diseño factorial de adsorción en Carbón en pulpa

Ensayo	Sólido		Tiempo Carbón		Flujo Aire		Adsorción de Au		Adsorción de Ag	
	[%]	[h]	[%]	[h]	X ₁ [%]	X ₂ [%]	Y ₁ [%]	Y ₂ [%]		
36-1	20	2	6	116.9	93.36	98.57	90.63	85.42		
36-2	25	2	6	116.9	80.64	75.80	39.90	78.32		
36-3	20	4	6	116.9	78.57	84.52	72.96	82.03		
36-4	25	4	6	116.9	92.74	100.00	82.28	90.22		
36-5	20	2	10	116.9	64.60	73.45	86.45	86.07		
36-6	25	2	10	116.9	73.45	98.23	89.52	90.00		
36-7	20	4	10	116.9	69.76	76.76	90.65	95.79		
36-8	25	4	10	116.9	41.17	98.04	93.75	95.68		
36-9	20	2	6	177.4	100.00	100.00	90.21	87.50		
36-10	25	2	6	177.4	70.96	75.80	82.26	84.23		
36-11	20	4	6	177.4	77.38	80.95	80.46	79.68		
36-12	25	4	6	177.4	85.48	91.93	42.39	87.39		
36-13	20	2	10	177.4	92.03	73.45	86.58	84.30		
36-14	25	2	10	177.4	92.04	98.23	90.46	74.42		
36-15	20	4	10	177.4	84.88	95.35	87.10	95.79		
36-16	25	4	10	177.4	99.90	98.04	95.17	96.43		

Carbón activado por litro de solución, se obtiene una adsorción de Plata superior a 92% con un tiempo de una hora. También se aprecia en este gráfico para relaciones de Carbón superiores a 10 g/l, que el proceso presenta tres etapas cinéticas: rápida, intermedia, y lenta. De las Tablas 4 y 5 se puede concluir que un flujo ascendente para la adsorción en columnas es más efectivo que un flujo descendente. De las Tablas 6 y 7 se ve la necesidad de trabajar con un sistema de tres columnas.

Las Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 que presentan la influencia de las variables independientes en el proceso de adsorción para el oro y la Plata se evalúan por correlación, analizando la variación del porcentaje de adsorción con los cambios en el parámetro considerado.

El análisis estadístico de la Tabla 8, para niveles de significancia de uno y cinco por ciento, indica que la variable principal, flujo de solución, modifica notoriamente el resultado del proceso. Similar situación se encuentra en la interacción entre el Carbón y el Cinc en los rangos de trabajo que se están considerando.

Las variables presentadas en la Tabla 9, se encuentran en una zona óptima, dado que no existe influencia en el proceso al modificar las variables en los rangos considerados. Idéntica situación se presenta para las variables principales en la Tabla 10, siendo significativa la interacción entre la cantidad de Carbón y el flujo, al igual que la interacción entre el porcentaje de sólidos, el tiempo y la cantidad de carbón.

CONCLUSIONES

El carbón activado utilizado en los experimentos (NORIT PK 1- 3) para recuperar los metales preciosos Au y Ag del mineral de San Celestino, dió buenos resultados con un tiempo de adsorción de tres horas, tiempo que se considera suficiente para este proceso.

La cantidad de Carbón empleada en el proceso de adsorción :13-17 g/l, para el Carbón en pulpa y soluciones clarificadas es suficiente y dió resultados en los cuatro sistemas de agitación descritos.

La presencia de iones extraños (Fe, Cu, Zn,...) en la solución rica, influye sólamente en la cinética inicial del proceso, con un tiempo superior a una hora, esta influencia deja de percibirse.

Los lodos presentes, a partir de un dos por ciento en el proceso de Carbón de pulpa, disminuyen la cinética de adsorción en la fase final.

El análisis de los resultados obtenidos permite afirmar que el índice de recuperación de Au y Ag en Carbón activado fué de 99.5% para el proceso de adsorción en columnas, mayor que para los otros sistemas utilizados.

Para el proceso de adsorción en columnas se observa la necesidad de trabajar en un sistema de cuatro columnas para obtener una mayor recuperación de los metales preciosos.

De la comparación de datos de la Literatura de los índices de recuperación del proceso tradicional Merrill-Crowe y el proceso de adsorción en columnas, se desprende que éste último es más económico, debido a la reutilización del Carbón activado luego de la desorción y al tiempo empleado en este proceso que es menor en un porcentaje considerable, el utilizado en el proceso Merrill-Crowe.

Las curvas obtenidas de Tiempo Vs % de Adsorción y cantidad de Carbón Vs % de Adsorción permitieron observar que los parámetros de tiempo y cantidad de Carbón se comportan exponencialmente, esta situación permitió la formulación de la ecuación cinética:

$$A_d = C^n t^b$$

$$b = 1.3E-02 \quad 1.5 < n < 2.5$$

BIBLIOGRAFIA

1. DAVIDSON, R.J., VERONESSE, V. Y NKOSI, M. V. The use of activated carbon for the recovery of gold and silver from gold-plant solution. Johannesburg Journal of de South Africa Institute of Mining and Metallurgy. Vol 78, No. 6, May 1979, pp 281-297.
2. FLEMING C. A. Recent developments in carbon pulp technology in South Africa. En: hidrometallurgy. Research, Development and practice. New York, Met. Soc.A.I.M.E., 1983. pp 839- 857.
3. LAXEN, P.A. , BECKER, G.S.M. Y RUBIN, R. Developments in the application of carbon in pulp to the recovery of gold from South African ores Johannesburg: Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 79, No. 11, Jun 1979. pp 315-325.
4. McDOUGAL, G.J y Otros. The mechanism of the adsorption of gold cyanide on activated carbon. Johannesburg: Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Sep 1980. pp 334-356.
5. MUIR, D.M. Recovery of gold from cyanide solutions using activated carbon. En: Seminario carbon in pulp The Aus. I.M.M Perth and Kalgoorlie Braches and Murdoch University. Jul 1982. pp 7-22.