

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE SALES DE COBRE EN LA
OXIDACIÓN DEL ION CIANURO CON AIRE Y CARBÓN
ACTIVADO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

DANIEL EDUARDO PESÁNTEZ ANGULO
depas25@gmail.com

DIRECTOR: ING. ERNESTO DE LA TORRE CH.
edelatorre@epn.edu.ec

Quito, marzo de 2010

© Escuela Politécnica Nacional 2010

Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Daniel Eduardo Pesántez Angulo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Daniel Eduardo Pesántez Angulo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Eduardo Pesántez Angulo, bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre Ch
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto Semilla – EPN PIS 08-01 “Desarrollo de nuevos materiales con base en carbón activado, para aplicaciones en el tratamiento de efluentes cianurados y en la desodorización de emisiones gaseosas”, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva, de la Facultad e Ingeniería Química y Agroindustria.

AGRADECIMIENTOS

Siempre recordaré a mi familia (Criss y Sammy) que son la fuerza de voluntad, el motor que impulsa mi vida, por ellos soy y seré una persona que destina todo su esfuerzo a lograr ser alguien confiable y capaz para cualquier tipo de trabajo que me proponga alcanzar.

A mis padres que después de todo este trajín, a través de estos años en la universidad, he comprendido que siempre serán un gran apoyo y que esperan que su hijo se desarrolle a cabalidad, no esperando un gracias, sino que llegue a ser algo mejor de lo que ellos son; por eso les digo un dios les pague y esperen muchas más cosas de mi.

A mis hermanos que aunque su ayuda no fue directa en la culminación de mi carrera, siempre entendieron lo que necesitaba, son muy pocas las personas con las que me siento realmente bien y siempre tendrán una mano para lo que necesiten.

A todos y cada uno de los integrantes del Departamento de Metalurgia Extractiva, que pusieron su granito de arena para enriquecer esta investigación, en especial al Ing. Ernesto de la Torre quien supo guiar y mejorar este trabajo y tenga su merecido reconocimiento a nivel internacional.

A mis panas, quienes siempre serán recordados en esta carrera como los Guaraperos por hacerme abrir los ojos ante ciertas cosas y mejorar mi vida en la universidad con un sin numero de anécdotas, nos veremos en la vida profesional.

DEDICATORIA

Este trabajo lo hice con una gran dedicación para mis dos grandes amores, mi mamacita y mi nena, para quienes soy alguien muy especial y espero serlo para toda la vida, siempre me apoyaron y espero ser para ellas todo lo que necesiten.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	xii
1. PARTE TEÓRICA	1
1.1 La oxidación del ion cianuro	1
1.1.1 Reacción de hidrólisis	1
1.1.2 Reacción de oxidación	3
1.1.3 Química del cianuro y sus complejos con metales	6
1.2 Influencia del cobre y carbón activado en la oxidación del ion cianuro	9
1.2.1 Comportamiento electroquímico del cobre en soluciones cianuradas	9
1.2.2 Distribución de especies de cianuro de Cu^{+1}	10
1.2.3 Efecto de la presencia del carbón activado en las soluciones de cianuro	12
1.2.3.1 Efecto de la concentración de oxígeno	15
1.2.3.2 Adsorción con carbón activado	17
1.2.3.3 Isotermas de adsorción	18
1.2.4 Efecto de la presencia del carbón activado impregnado en las soluciones de cianuro	19
1.2.5 Caracterización de la cinética de reacción catalizada por sólidos	23
1.2.5.1 Resistencia a la difusión en los poros	23
1.2.5.2 Modulo de Thiele	24
1.2.5.3 Factor de efectividad interno	25
1.3 Tratamiento de efluentes cianurados mineros	27
1.3.1 Impacto ambiental de la industria minera	27
1.3.2 Métodos de Tratamiento de efluentes cianurados	28
1.3.2.1 Degradación y volatilización natural	29
1.3.2.2 Formación de complejos de hierro	30
1.3.2.3 Oxidación con peróxido de hidrógeno	30
1.3.2.4 Oxidación con ácido de caro	31
1.3.2.5 Oxidación biológica	32
1.3.2.6 Oxidaciones no habituales	32

2.	METODOLOGÍA	34
2.1	Ensayos con soluciones de cianuro de sodio	38
2.1.1	Caracterización de carbón activado virgen y carbón activado modificado	38
2.1.1.1	Carbón activado virgen	38
2.1.1.2	Carbón activado modificado	38
2.1.2	Proceso de oxidación del ion cianuro con aire y carbón activado	39
2.1.2.1	Control y medida de la concentración de cianuro libre y cianuro Wad	40
2.1.2.2	Control de pH	43
2.1.2.3	Control de la aireación	44
2.1.2.4	Acondicionamiento de carbón activado	44
2.1.3	Ensayos de oxidación con aire, carbón activado y sales de cobre solubles	45
2.1.4	Ensayos de oxidación con aire carbón activado impregnado y reducido	46
2.1.4.1	Proceso general de impregnación de sales de cobre en la superficie del carbón activado	46
2.1.4.2	Reducción de las sales de cobre impregnadas en atmósfera reductora	46
2.1.4.3	Ensayos de oxidación del cianuro libre con carbón activado impregnado y carbón activado impregnado y reducido	47
2.1.5	Ensayos de oxidación del cianuro libre con pulpas de andesita, aire, carbón activado y agitación mecánica	47
2.2	Ensayos con pulpas provenientes de un proceso de cianuración	49
2.2.1	Oxidación del cianuro con agitación mecánica en efluentes del proceso de cianuración – carbón en pulpa (CIP)	49
2.2.1.1	Condiciones experimentales del proceso de cianuración a nivel laboratorio	49
2.2.1.2	Proceso de oxidación de efluentes de un proceso de cianuración – carbón en pulpa de laboratorio e industrial	50
2.2.2	Ensayos en procesos con alimentación continua del efluente	51

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1	Oxidación de cianuro libre CN^- en soluciones sintéticas	53
3.1.1	Efecto de la concentración de carbón activado en la remoción de cianuro	53
3.1.2	Influencia de la variación del pH	55
3.1.3	Adición de cobre como sales solubles	57
3.1.4	Carbón impregnado con sales de cobre	61
3.1.4.1	Carbón impregnado con sulfato de cobre (1,7% Cu)	61
3.1.4.2	Carbón impregnado con nitrato de cobre 2,05% Cu	63
3.1.4.3	Reciclos del carbón impregnado con $Cu(NO_3)_2$	66
3.1.5	Carbón impregnado con nitrato de cobre y reducido	68
3.1.6	Oxidación de cianuro libre con pulpas de andesita, aire, carbón activado	75
3.1.6.1	Variación de la cantidad de sólidos en la solución cianurada	75
3.1.6.2	Oxidación de cianuro libre con pulpa de 33% sólidos con agitación	76
3.1.6.3	Oxidación de efluentes de cianuración de laboratorio	77
3.2	Oxidación del cianuro libre en soluciones de la Industria	79
3.2.1	Remoción de cianuro libre en procesos en columna y empleando carbón activado impregnado	79
3.2.2	Reciclos de carbón impregnado y reducido en el tratamiento de efluentes cianurados mineros	80
3.2.3	Oxidación en procesos de alimentación continúa de soluciones cianuradas	82
3.3	Cinéticas de remoción de cianuro	85
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
4.1	Conclusiones	88
4.2	Recomendaciones	90
	BIBLIOGRAFÍA	91
	ANEXOS	95

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1:	Toxicidad de varios compuestos de cianuro	5
Tabla 2:	Estabilidad relativa de los complejos de cianuro en agua	6
Tabla 3:	Propiedades de compuestos simples de cianuro	7
Tabla 4:	Solubilidad de minerales de cobre en soluciones de 0,1% de NaCN	9
Tabla 5:	Efecto de la concentración de oxígeno en la pérdida de cianuro en solución acuosa a 20 °C. <i>Condiciones:</i> concentración cianuro 0,01M; pH 10,2; No. Iodo 1000 mg I ₂ /g CA	16
Tabla 6:	Velocidad específica de descomposición del cianuro de sodio en solución acuosa 20 °C. <i>Condiciones:</i> concentración inicial cianuro 500 mg/L NaCN; inyección aire [O ₂ disuelto] 8,1 mg/L, No. Iodo 300 mg I ₂ /g CA, Carbón activado en polvo d ₈₀ < 38 μm	16
Tabla 7:	Carbones impregnados con metales, capacidad de remoción del NaCN en solución acuosa a 20 °C. <i>Condiciones:</i> [NaCN] inicial 1.100 mg/L, [Carbón activado] 15 g/L, Tiempo 72 horas	20
Tabla 8:	Parámetros de adsorción de la isoterma de Langmuir, para la remoción de cianuro por carbón impregnado con cobre	22
Tabla 9:	Resultados de la oxidación de cianuro con aire, dióxido de carbono y sulfato de cobre	33
Tabla 10:	Resultados de los ensayos realizados con carbón activado virgen en pH 12, 11 y 10,5, en soluciones sintéticas de NaCN, Condiciones [CN ⁻] ₀ =265 mg/L	57
Tabla 11:	Resultados de los tratamientos realizados con sales de cobre solubles en soluciones sintéticas de NaCN, <i>Condiciones</i> [CN ⁻] ₀ =265 mg/L;300 g/L CA; pH 10,5	60
Tabla 12:	Contenido de Cobre en el Carbón Activado al emplear Cu(SO ₄) y Cu(NO ₃) ₂	65
Tabla 13:	Resultados de los tratamientos realizados con carbón	

	activado impregnado con CuSO_4 y $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ en soluciones sintéticas de NaCN, Condiciones $[\text{CN}^-]_0=265$ mg/L; pH 10,5	65
Tabla 14:	Resultados de los tratamientos realizados al reutilizar carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ en sintéticas de NaCN, Condiciones $[\text{CN}^-]_0=265$ mg/L; pH 10,5	67
Tabla 15:	Pérdida de Cobre de la superficie del catalizador	68
Tabla 16:	Resultados obtenidos del análisis de difracción de rayos X, para muestras de carbón impregnado y carbón impregnado y reducido	70
Tabla 17:	Resultados de los tratamientos realizados al reutilizar carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y reducido en soluciones sintéticas de NaCN, Condiciones $[\text{CN}^-]_0=265$ mg/L; pH 10,5	73
Tabla 18:	Pérdida de Cobre de la superficie del catalizador reducido	73
Tabla 19:	Características del efluente del proceso carbón en pulpa de laboratorio	78
Tabla 20:	Características del efluente de la Mina Agro Industrial Corazón, antes y después del tratamiento	79
Tabla 21:	Resultados de los tratamientos realizados al reutilizar carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y reducido en soluciones sintéticas de NaCN, Condiciones $[\text{CN}^-]_0=265$ mg/L; pH 10,5	81
Tabla 22:	Resultados de la oxidación en proceso continuo en columna empacada con 1200 g de CA. Impregnado	84
Tabla 23:	Resultados de la cinética de primer orden para la oxidación catalizada del ion CN^-	85
Tabla 24:	Parámetros de la obtención de la cinética de primer orden para la oxidación del ion CN^-	86

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1: Diagrama de equilibrio y distribución para el cianuro libre en función del pH a 25 °C	2
Figura 2: Ejemplo de degradación del cianuro	3
Figura 3: Diagrama de equilibrio del potencial y del pH para sistema CN-H ₂ O a 25 °C y P _{(CN)₂} = 1 atm	5
Figura 4: Diagramas de distribución de las especies cianuradas de cobre vs la relación molar CN:Cu para una concentración total de (a) Cu(I) = 10 ⁻³ M y (b) Cu(I) = 10 ⁻² M a 25°C, pH = 10 (____) y pH = 12 (.....)	11
Figura 5: Representación de la cinética de primer orden de la oxidación del cianuro con Carbón Activado	12
Figura 6: Influencia de la agitación de carbón activado en polvo. <i>Condiciones:</i> pH=12; agitación: 500 rpm; aireación: 48,3 (N L/h); CA: 300 mg I ₂ /g; d ₈₀ <38 μm	14
Figura 7: Influencia del tipo de porosidad del carbón activado en polvo, <i>Condiciones:</i> pH=12; agitación: 500 rpm; aireación: 48,3 (N L/H); CA: 150 g/L; d ₈₀ <38 μm	15
Figura 8: Pasos de la transferencia de masa y de reacción en una partícula de catalizador	23
Figura 9: Grafica de efectividad para cinética de primer orden y partículas de catalizador esférico	25
Figura 10: Diagrama del proceso aplicado a la oxidación de cianuro libre con soluciones sintéticas	35
Figura 11: Diagrama de procesos aplicado a la Oxidación de cianuro libre con efluentes de proceso de carbón en pulpa en soluciones reales	36
Figura 12: Esquema gráfico del proceso experimental de la oxidación en columnas	37
Figura 13: Equipo de destilación de cianuro WAD	43
Figura 14: Fotos del procedimiento de re-utilización del carbón	

	activado	45
Figura 15:	Horno Nicholls piloto utilizado para la reducción de las sales de cobre	47
Figura 16:	Agitación de soluciones con contenidos de sólidos entre 6 a 33%	48
Figura 17:	Proceso de oxidación en continuo mediante la utilización de columnas empacadas de carbón activado impregnado	51
Figura 18:	Influencia del Carbón Activado en la oxidación de cianuro libre. <i>Condiciones:</i> pH = 10.5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm, No. Iodo 530mgI ₂ /g CA	53
Figura 19:	Influencia de la concentración de carbón activado en la oxidación de cianuro libre. <i>Condiciones:</i> pH = 12; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 mgI ₂ /g CA; tiempo 480 min	55
Figura 20:	Influencia de la variación de pH de la solución en la oxidación de cianuro. <i>Condiciones:</i> 300 g/L CA; Aire 140 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 530mgI ₂ /g CA	56
Figura 21:	Influencia de la adición de sales de cobre a la oxidación del cianuro. <i>Condiciones:</i> pH 10,5; Aire 180N L/h; 300 g/L CA; Tamaño 0,8x2,3 mm, No. Iodo 550 mgI ₂ /g CA	58
Figura 22:	Figura 21 a escala ampliada. Influencia de la adición de sales de cobre a la oxidación del cianuro. <i>Condiciones:</i> pH 10,5; Aire 180 N L/h; 300 g/L CA; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 mgI ₂ /g CA	59
Figura 23:	Influencia de la adición de cantidades variables de carbón impregnado con CuSO ₄ . <i>Condiciones:</i> pH 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo550 mgI ₂ /g CA	62
Figura 24:	Figura 23 a escala ampliada. Influencia de la adición de cantidades variables de carbón impregnado con CuSO ₄ . <i>Condiciones:</i> pH 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo550 mgI ₂ /g CA	62
Figura 25:	Influencia de la adición de cantidades variables de carbón impregnado con Cu[NO ₃] ₂ . <i>Condiciones:</i> pH 10,5, Aire	

	180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 mgI ₂ /g CA	64
Figura 26:	Influencia de la adición a una solución de Cu[NO ₃] ₂ como sal soluble, impregnada en carbón activado (2,05% Cu) e impregnada y reducida. <i>Condiciones:</i> pH = 10,5; Aire 180 NL/h; Tamaño CA 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 mg I ₂ /g CA	66
Figura 27:	Variación de la cinética de remoción del ion cianuro a través del empleo de aire, CA virgen, cobre metálico y CA Impregnado-Reducido Cu[NO ₃] ₂ (2,05% Cu), <i>Condiciones:</i> pH = 10,5, Aire 180 NL/h, tamaño 0,8x2,3 mm, No. Iodo 550–570 mgI ₂ /g CA	69
Figura 28:	Reciclo de carbón activado impregnado <i>Condiciones:</i> 80 g CA imp./L, pH:10,5 Aire 190 N L/h, Tamaño 0.8x2.3 mm, No. Iodo 570 mgI ₂ /g CA	71
Figura 29:	Reciclo de Carbón Activado impregnado y reducido. <i>Condiciones:</i> 80 g CA imp./L, pH=10,5; Aire 190 N L/h; Tamaño 0.8x2.3 mm; No. Iodo 570 mgI ₂ /g CA	72
Figura 30:	Influencia de la adición de cobre a la oxidación del cianuro. <i>Condiciones:</i> pH 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm, No. Iodo 550-570 mgI ₂ /g CA	74
Figura 31:	Influencia de la adición de sólidos en la oxidación de soluciones cianuradas. <i>Condiciones:</i> 80 g CA imp./L; pH:10,5; Aire 200 NL/h; Tamaño 0.8x2.3 mm; No. Iodo 570 mgI ₂ /g CA	75
Figura 32:	Oxidación del cianuro en solución al 33 % sólidos. <i>Condiciones:</i> 70 g CA/L impregnado Cu(NO ₃) ₂ ; pH=10,5; Aire 200 NL/h; 400 rpm	77
Figura 33:	Oxidación del cianuro en efluentes de laboratorio. <i>Condiciones</i> 80 g CA/L impregnado Cu(NO ₃) ₂ ; pH=10,5; Aire 200 NL/h; 33 % sólidos; 400 rpm	78
Figura 34:	Oxidación del cianuro en efluentes industriales. <i>Condiciones</i> 80 g CA/L impregnado Cu(NO ₃) ₂ ; pH=10,5; Aire 200 N L/h; 400 rpm	80
Figura 35:	Oxidación del cianuro libre en efluentes industriales	

reutilizando carbón activado impregnado y reducido.

Condiciones: 80 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y reducido;
pH=10,5; Aire 200 N L/h; 400 rpm

81

Figura 36: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando columna empacada con 270 g CA impregnado $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$, *Condiciones:* pH=10,5; 0,5 g/L NaCN

83

Figura 37: Logaritmo natural de $[\text{CN}^-]$ versus el tiempo de oxidación a diferentes condiciones de catalizador

87

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Determinación del índice de iodo	95
ANEXO II	
Calibración del Electrodo Específico de Cianuro	97
ANEXO III	
Determinación de Cianuro Total por Destilación	99
ANEXO IV	
Calibración del rotámetro	102
ANEXO V	
Ejemplo de Cálculo de la Cinética de Oxidación de Cianuro	103

RESUMEN

Se han desarrollado carbones activados modificados (CAM) por la presencia de cobre metálico y sales de cobre (CuSO_4 , CuCl_2 , $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$) impregnadas en la estructura microporosa de un carbón activado con una superficie específica de $550 \text{ m}^2/\text{g}$. Se estudia la influencia del ion cúprico y del cobre metálico en la oxidación del ion cianuro con aire y CAM mediante *soluciones sintéticas* de cianuro de sodio, en lechos fluidizados agitados, la cual emplea 80 g/L de CAM, a un pH de 10,5 y 190 N L/h de aire. Se logra una oxidación del 99% de ion cianuro en 180 minutos, pudiéndose reutilizar el CAM por varias veces. Se logró reducir la pérdida de cobre de su superficie del catalizador mediante la reducción de la sal a cobre metálico que es menos soluble. Ensayos realizados con el CAM y efluentes industriales del proceso de cianuración – carbón en pulpa de minerales polisulfurados, presentan una oxidación de cianuro libre del 99,5%, lo que incrementa en 26 veces su velocidad de oxidación.

INTRODUCCIÓN

La industria minera, en particular la industria minera del oro, ha estado utilizando el cianuro en sus procesos productivos durante muchas décadas. El cianuro es una sustancia tóxica que puede ser letal si se la ingiere o se la inhala en cantidades suficientes. Dada su naturaleza tóxica, el cianuro en las aguas de desecho de las industrias mineras y galvánicas, debe ser gestionado adecuadamente para la protección del medio ambiente.

La contaminación se genera por el uso inadecuado de cianuro de sodio en concentraciones entre 5 y 15 g/L que se emplean en el proceso artesanal de cianuración, es inevitable un severo desprendimiento de ácido cianhídrico a la atmósfera ya que el pH no se controla en varias plantas mineras del país. Se ha estimado que se desechan al ambiente alrededor de 1400 toneladas de cianuro por año para una producción de 5 toneladas de oro. (de la Torre y Guevara, 1999) La concentración de cianuro en el agua residual de los efluentes mineros es aproximadamente de 700 mg/L de cianuro complejado con cobre y 300 mg/L de cianuro libre, para lo cual, la concentración máxima tolerada en un vertido a un sistema de agua dulce de 0,2 mg/l. (TULAS, 2002)

Dado que actualmente existen algunos métodos de tratamiento del cianuro, este proyecto pretende proveer de un tratamiento de efluentes cianurados que sea física, química y económicamente viable, para su aplicación directa en la industria minera del país.

El uso de carbón activado en la adsorción de cianuro se ha desarrollado, ya que mejora las condiciones naturales de oxidación del cianuro a cianato. (Smith y Mudder, 1991). Existen investigaciones en las que el uso carbón activado granular permite la remoción de cianuro, pero dada aún a su baja cinética de oxidación, se le debe añadir iones de cobre o níquel y requiere además de un tiempo de complejación y otro de adsorción. (Chen y Wang, 2000) Dado que la

remoción de los metales e inorgánicos no es efectiva al ciento por ciento, existen autores que indican también, que la remoción de cianuro puede ser mejorada por el empleo de carbón modificado al impregnarlo con sales de metales tales como: plata, cobre y níquel (Adhoum y Monser, 2002; Deveci *et al.*, 2006).

Estos carbones presentan niveles de remoción de cianuro de las soluciones de 26,5, 22,4 y 15,4 mg CN^- /g Carbón Activado impregnado con sales de plata, cobre y níquel respectivamente, y la capacidad de adsorción de carbón virgen de 5 mg CN^- /g (Marsden y House 2006), muestra un aumento de hasta 5 veces en la remoción de cianuro. Sin embargo estos estudios en la mayoría de los casos no indican la concentración de oxígeno y los efectos de la aereación sobre la remoción de CN^- , y que en el presente trabajo será una condición para mejorar la oxidación del cianuro.

El objetivo principal de esta investigación es por lo tanto “Estudiar la influencia de las sales de cobre en la oxidación catalítica de cianuro libre con aire y carbón activado”, para lo cual se modifica al carbón activado para que su estructura posea una cantidad de cobre que logre mejorar la cinética de remoción del ion cianuro, también se evalúa el comportamiento de las distintas sales de cobre y la reducción de éstas, para la obtención de cobre metálico en la superficie del carbón activado.

1. PARTE TEÓRICA

1.1 LA OXIDACIÓN DEL ION CIANURO

Las normas ambientales vigentes, estipulan una concentración de cianuro total de 0,2 mg/L en un vertido para un sistema de agua dulce superficial y de 1 mg/L en las alcantarillas, valores que contrastan con los contenidos medios de los efluentes de los procesos de carbón en pulpa (CIP), que reportan valores superiores a 500 mg/L de cianuro libre. [Gaviria y Meza, 2006; Kuhn, 1971; Tulas, 2002]

Los mecanismos de descomposición del ion cianuro soluble son complejos y ocurren por reacciones de hidrólisis y oxidación que dependen de los valores de pH y potencial redox (Eh) de las soluciones.

1.1.1 REACCIÓN DE HIDRÓLISIS

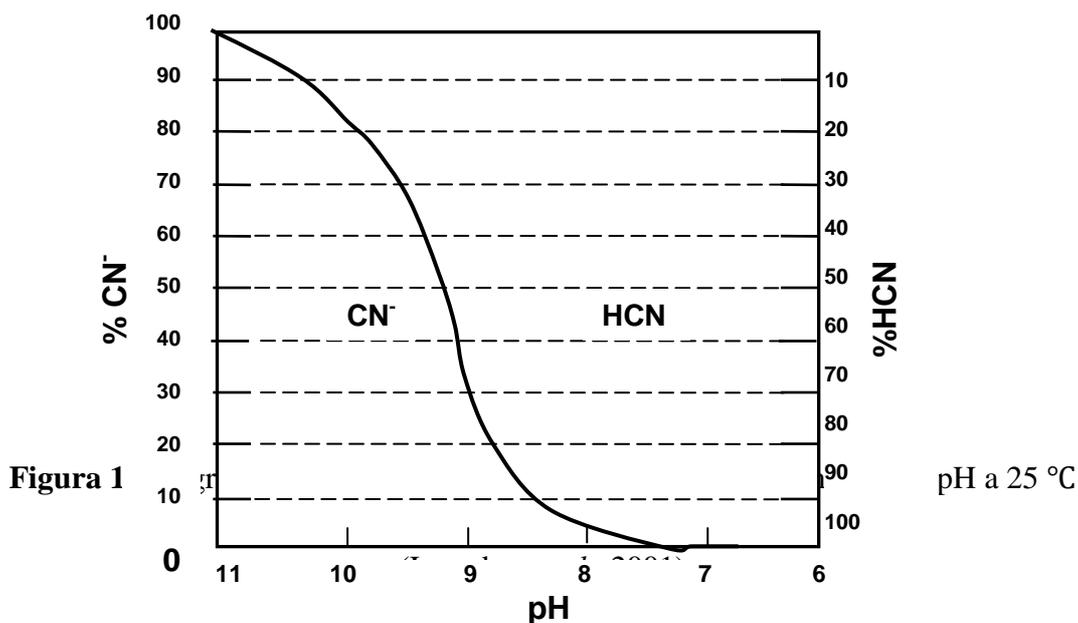
Una de las reacciones más importantes que afectan a la concentración de cianuro libre es la volatilización de HCN, que al igual a la mayoría de los gases se separa del agua y escapa al aire. En la figura 1 se observa el sistema es un equilibrio el cual es función de la temperatura y el pH, además las cantidades relativas de cada uno puede ser determinada de la siguiente expresión: [Smith y Mudder, 1991; Logsdon et al., 2001; Misra *et al.*, 2003]

$$K_a = \frac{(H^+)(CN^-)}{(HCN)} = 2,03E - 10; \quad pK_a = 9,31 \text{ a } 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad [1]$$

Donde:

K_a = contante de disociación del acido cianhídrico

pK_a = pH en el equilibrio, en el cual existe igual cantidad de H^+ y CN^-



La hidrólisis del cianuro a cianuro de hidrógeno volátil (reacción 2), se produce a valores de pH menores que 10,5 siendo crítica a pH menores que el pK_a del cianuro = 9,39 (Adams, 1990).



A valores de pH mayores que 10,5 se produce otra reacción de hidrólisis, aunque con una cinética muy lenta a temperatura ambiente, ésta provoca la gradual descomposición del cianuro de soluciones alcalinas.



El cianuro libre no es persistente en la mayoría de las aguas superficiales porque el pH de dichas aguas generalmente es de 8, de modo que el HCN se volatiliza y en contacto con aire se transforma en compuestos de menor toxicidad, este punto es importante ya que estos procesos actúan como un mecanismo natural que controla las concentraciones de cianuro libre en los efluentes residuales de las minas. (Logsdon *et al.*, 2001)

La figura 2 ilustra una situación típica en la cual la mitad del cianuro total se degradó naturalmente en menos de tres semanas a partir de la concentración

inicial de 20 mg/L. El cianuro total desaparece casi por completo en aproximadamente 100 días.

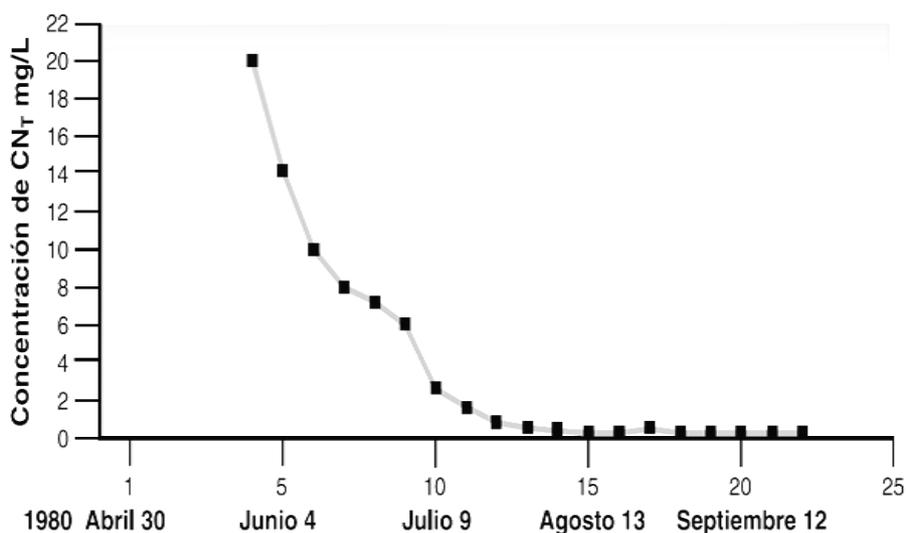


Figura 2: Ejemplo de degradación del cianuro
(Logsdon *et al.*, 2001)

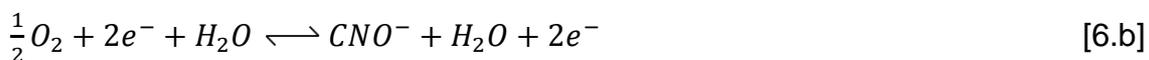
Dos factores influyen en la razón de disociación de los iones complejados a una temperatura dada y son: el pH del medio y la concentración de estos iones. En general, la disociación se incrementa con la disminución del pH o el decrecimiento total de la concentración de cianuro. A pH ácido los porcentajes de cianuro libre son altos y decrece tanto como el pH se incrementa a neutro y valores alcalinos. [Misra *et al.*, 2003; Young y Jordan, 1995]

1.1.2 REACCIÓN DE OXIDACIÓN

Las reacciones de oxidación, son responsables de la mayor pérdida de cianuro de las soluciones acuosas, el cianuro es fácilmente oxidable a cianato o cianógeno en soluciones alcalinas, estas reacciones son: (Adams, 1990)



La oxidación de cianuro a cianato es termodinámicamente favorable a temperatura ambiente, pero la cinética de esta reacción es sumamente lenta en ausencia de un catalizador. Los ensayos realizados por Adams, 1990 con oxígeno o nitrógeno puros burbujeados a través de una solución cianurada a diferentes velocidades, demuestran que a concentración de oxígeno en la solución no tiene efecto por sí sola en la velocidad de descomposición del cianuro. Las reacciones de media celda de la oxidación de cianuro con oxígeno se presentan seguidamente.



Los iones cianato de hidrógeno y cianato son significativamente menos tóxicos que el HCN (alrededor de 100 veces menos tóxico (Tiwari *et al.*, 2007)). El cianuro de hidrógeno líquido o gaseoso y las sales alcalinas del cianuro pueden ingresar al cuerpo por inhalación, ingestión o absorción a través de los ojos y la piel. El nivel de absorción de la piel aumenta cuando ésta se encuentra cortada, deteriorada o húmeda.

En toxicología, LD50 es la abreviatura de "Dosis Letal, 50%" de la dosis de una sustancia que resulta mortal para la mitad de un conjunto de animales de prueba. Los valores de la LD50 son usados con frecuencia como un indicador general de la toxicidad aguda de una sustancia. Generalmente se expresa en mg de sustancia tóxica por kg de peso del animal, y lo más común es que el dato sea acompañado del animal en el que se probó (ratas, conejos, etc.), de esta forma, puede extrapolarse a los seres humanos.

La tabla 1 presenta los datos de la toxicidad de distintas especies de cianuro.

Tabla 1: Toxicidad de varios compuestos de cianuro

Compuesto	Fórmula	Forma Física	LD ₅₀
Cianuro de Hidrogeno	HCN	Gas	1 mg/kg en humanos
Cianuro de sodio	NaCN	solido	10 mg/kg en rata, 2,85 mg/kg en humanos
Cianato de potasio	KCNO	sólido	320 mg/Kg en ratones 850 mg/Kg en ratas
Cianato de sodio	NaCNO	solido	260 mg/Kg en ratones

*Linares, 2008

La oxidación de CN^- a CNO^- ocurre en soluciones básicas y con muchos oxidantes, en particular con aquellos que son de interés para la destrucción del cianuro. La termodinámica de la reacción de cianuro y cianato indica que el cianato puede ser la especie predominante en condiciones naturales, como se puede ver en la figura 3. [Young y Jordan, 1995; Smith y Mudder, 1991]

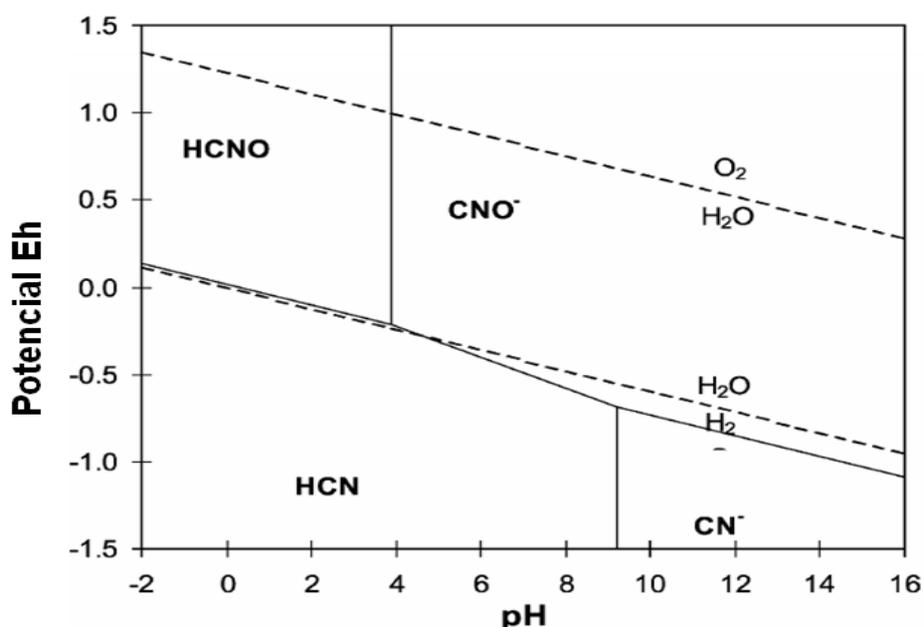


Figura 3: Diagrama de equilibrio del potencial y del pH para el sistema CNH_2O a 25°C y $P_{(\text{CN})_2} = 1 \text{ atm}$ (Lu *et al.*, 2002)

1.1.3 QUÍMICA DEL CIANURO Y SUS COMPLEJOS CON METALES

La categorización de compuestos de cianuro que son importantes desde el punto de vista de la toxicidad incluye a: cianuro libre, disociable en ácidos débiles (WAD) y compuestos cianurados. (Misra *et al.*, 2003) Los efluentes que resultan de la cianuración y de la degradación natural o del tratamiento químico de estos, se forman diversos compuestos solubles relacionados con el cianuro, entre los que figuran además de los ya mencionados: sales alcalinas propias del suelo, complejos cianurados metálicos formados con oro, mercurio, zinc, cadmio, plata, cobre, níquel, hierro y cobalto, que pueden clasificarse como se muestra en la tabla 2 (Smith y Mudder, 1999) y además el tiocianato, cianato y amoníaco. (Nava *et al.*, 2007)

Tabla 2: Estabilidad relativa de los complejos de cianuro en agua

Cianuro Total	Cianuro libre	CN ⁻ , HCN
	Compuestos simples	NaCN, KCN, Ca(CN) ₂ , Hg(CN)
	a. Rápidamente solubles	Zn(CN) ₂ , Cd(CN) ₂ , CuCN, Ni(CN) ₂ ,
	b. Sales neutras insolubles	Ag(CN)
	Complejos débiles	Zn(CN) ₄ ⁻² , Cd(CN) ₃ ⁻² , Cd(CN) ₄ ⁻²
Complejos moderadamente fuertes	Cu(CN) ₂ ⁻¹ , CuZn(CN) ₃ ⁻² , Ni(CN) ₄ ⁻² , Ag(CN) ₂ ⁻¹ , Sn(CN) ₄ ⁻² , Sn(CN) ₃ ⁻²	
Complejos fuertes	Fe(CN) ₆ ⁻⁴ , Co(CN) ₆ ⁻⁴ , Au(CN) ₂ ⁻¹ , Fe(CN) ₆ ⁻³ , Hg(CN) ₄ ⁻²	

*Marsden y House, 2006

a. Cianuro Libre

Esta definido como el cianuro no complejado, que comprende el ácido cianhídrico HCN y el ion Cianuro (CN⁻) y las formas molecular y iónica del

cianuro en medio de una solución acuosa, por la disolución y disociación de compuestos y complejos de cianuro. (Gaviria y Meza, 2006)

Estas formas de cianuro son muy importantes porque se consideran como los más tóxicos y sin embargo, también son las formas que se eliminan más fácilmente de las soluciones mediante procesos de tratamiento y mecanismos naturales de atenuación. [Moran, 1998; Logsdon *et al.*, 2001; Nava *et al.*, 2007]

b. Compuestos simples cianurados

Se denominan a las sales que se forman con el ácido cianhídrico, los cuales se disuelven completamente en solución y produce cationes libres alcalinos e iones cianuros CN^- . Los cianuros simples están representados por la fórmula $A(CN)_x$, donde A es un álcali (sodio, potasio, amonio) y x es el valencia de A, representa el número de grupos cianuro presentes en la molécula. Los compuestos solubles son particularmente los cianuros alcalinos. La solubilidad es influenciada por el pH y la temperatura y un ejemplo de la disociación de un compuesto simple cianurado es el cianuro de sodio: [Misra *et al.*, 2003; Smith y Mudder, 1991; Moran, 1998]



Los cianuros simples son eléctricamente neutros, las cargas positivas de los cationes se balancean exactamente con las cargas negativas de los iones cianuro. La solubilidad y la disponibilidad de cianuro de los compuestos simples de cianuro más comunes, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3: Propiedades de compuestos simples de cianuro

COMPONENTE	CIANURO DISPONIBLE	Solubilidad en H_2O a $25^\circ C$ ($g/100cm^3$)
NaCN	53,1	48
KCN	40,0	50
$Ca(CN)_2$	56,5	Descompuesto

* Higuera *et al.*, 2007

c. Complejos cianurados débiles y moderadamente fuertes

Incluye complejos cianurados que contienen cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. La formación de los complejos se forma rápidamente de acuerdo a la concentración de cianuro en la solución. La estabilidad de estos cianuros varía de acuerdo al metal envuelto. El pH, la luz, la temperatura del agua influyen en la total disolución de sólidos y la concentración de los complejos. (Smith y Mudder, 1991)

Los complejos metálicos cianurados han sido clasificados en dos grupos de acuerdo a su actividad o la reacción que presentan frente a los ácidos. El primer grupo de complejos metálicos cianurados son rápida y completamente descompuestos en presencia ácidos con la formación de HCN. Estos complejos reciben el nombre de cianuros “disociables en ácidos débiles” DAD (WAD por sus siglas en ingles) [Moran, 1998; Logsdon *et al.*, 2001; Nava *et al.*, 2001; Marsden y House, 2006]

El segundo grupo de complejos metálicos cianurados son resistentes a la descomposición con ácidos, por lo que reciben el nombre de cianuros no DAD (non WAD) o simplemente complejos fuertes de cianuro. [Moran, 1998]

d. Cianato

Muchos oxidantes como cloruros, ozono, oxígeno y peróxido de hidrógeno, convierte al cianuro a cianato. También Enzimas de bacterias o superficies catalíticas de dióxido de titanio, sulfuro de zinc y carbón se han reportado como promotores de la oxidación. En condiciones ácidas el cianato lentamente se hidroliza a amoniaco y carbonato. Como resultado la disminución de la toxicidad del cianato en su rompimiento es importante. [Smith y Mudder, 1991; Misra *et al.*, 2003]

Existe dificultad para oxidar cianuro a cianato en condiciones ambientales, ésta es una reacción extremadamente lenta en ausencia de algún catalizador. En algunas investigaciones se indica que el cianuro puede ser oxidado en la superficie de sólidos orgánicos e inorgánicos y que puede ser catalizada por la presencia o la adición de iones de cobre, níquel, zinc o plata en la solución [Adhoum y Monser, 2002; Deveci *et al.*, 2006; Misra *et al.*, 2003; Smith y Mudder, 1991; Solís *et al.*, 1996; Young y Jordan, 1995]

1.2 INFLUENCIA DEL COBRE Y CARBÓN ACTIVADO EN LA OXIDACIÓN DEL ION CIANURO

1.2.1 COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL COBRE EN SOLUCIONES CIANURADAS

Los minerales oxidados de cobre (azurita, malaquita y cuprita), los sulfuros y el cobre metálico, se solubilizan en condiciones normales de cianuración, lo que genera un excesivo consumo de cianuro, por la posibilidad de que el cobre sea complejoado, por el cianuro mediante la formación de $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$, $\text{Cu}(\text{CN})_3^{3-}$ y $\text{Cu}(\text{CN})_4^{4-}$. (Rojas y Bustamante, 2007)

La tabla 4 indica la solubilidad de diferentes especies de minerales de cobre para muestras sometidas a lixiviación en soluciones de NaCN.

Tabla 4: Solubilidad de minerales de cobre en soluciones de 0,1% de NaCN

Mineral	Formula Química	Porcentaje total de cobre disuelto	
		T = 23 °C	T = 45 °C
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	94,5	100
Cobre Metálico	Cu	90,0	100
Cuprita	Cu_2O	85,5	100
Calcopirita	CuFeS_2	5,6	8,2

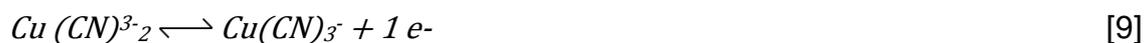
*Rojas, y Bustamante, 2007

El cobre forma compuestos en dos estados de oxidación +1, +2. El estado de oxidación +3 es también conocido, pero el cobre trivalente tiende a ser inestable en soluciones acuosas. El cobre forma aniones complejos solubles, con valores de n de 2 a 4, la disolución anódica del cobre en cianuro esta resumida en la siguiente formula. (Higuera *et al.*, 2007)



1.2.2 DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES DE CIANURO DE CU⁺¹

El mecanismo para la oxidación del cianuro en presencia de cobre se ha sugerido en la literatura y se resume a continuación: [Higuera *et al.*, 2007; Pérez e Higuera, 2008; Lu *et al.*, 2002]



El complejo de cobre (II), $Cu_2(CN)_6^{2-}$, no es estable ya que se descompone en cianógeno y $Cu(CN)_2^-$ según la reacción:



El $Cu(CN)_2^-$ es el primer complejo formado por el cobre al entrar en contacto con el cianuro libre, posteriormente este complejo se combina con cianuro libre en exceso y forma $Cu(CN)_3^{2-}$ y $Cu(CN)_4^{3-}$. Las especies de cianuro de cobre establecen un modelo de equilibrio donde el cianuro de cobre puede disolverse en presencia de cianuro en exceso para formar iones cianocupratos $Cu(CN)_2^-$, $Cu(CN)_3^{2-}$, y $Cu(CN)_4^{3-}$ en solución acuosa. Dichas especies experimentan los siguientes pasos de equilibrio sucesivos en reacción con el cianuro libre y el ácido cianhídrico no disociado, con sus correspondientes constantes de equilibrio a 25 °C:





De este modo, se considera los balances de masa correspondientes pueden obtenerse los diagramas de distribución, Concentración molar Cu total vs relación CN:Cu a las condiciones dadas de precipitación, que se muestran en la figura 4, al tener en cuenta las concentraciones presentes y los valores extremos del rango de pH 10 y 12. a relaciones menores a 3 la distribución de las especies depende en su mayoría de la concentración de cobre y las especies dominantes son dicianato y tricicianato de cobre. [Pérez e Higuera, 2008; Lu *et al.*, 2002]

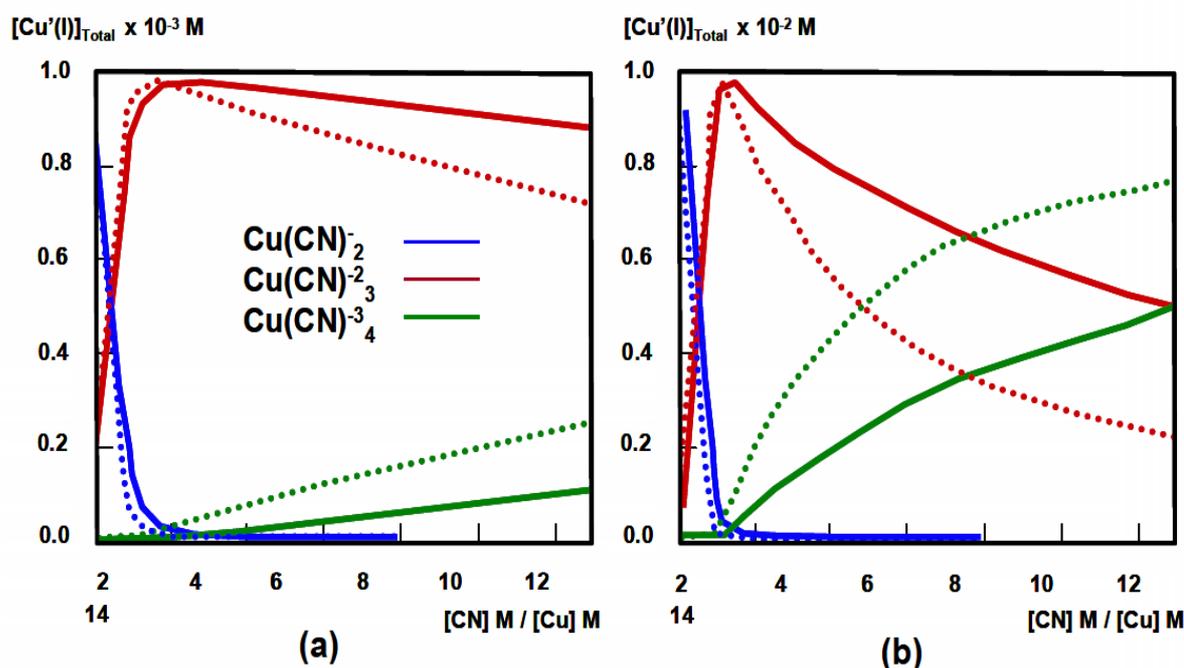


Figura 4: Diagramas de distribución de las especies cianuradas de cobre vs la relación molar CN:Cu para una concentración total de (a) $\text{Cu}(\text{I}) = 10^{-3} \text{ M}$ y (b) $\text{Cu}(\text{I}) = 10^{-2} \text{ M}$; Temperatura 25°C , $\text{pH} = 10$ (—) y $\text{pH} = 12$ (.....)

(Lu *et al.*, 2002, Pérez e Higuera, 2008)

Al tener en cuenta el comportamiento a diferentes pH se observa que con un decrecimiento del pH desde 12 hasta 10, la distribución y dominio del cianuro de cobre tendrá la tendencia a cambiar desde complejos altamente coordinados hacia complejos bajamente coordinados debido a que más iones hidrógeno competirán con los iones cianuro libre a bajo pH. De este modo, el efecto del pH sobre la distribución decrecerá con el incremento de las concentraciones de cobre puesto que habrán menos iones cianuro libres para competir.

1.2.3 EFECTO DE LA PRESENCIA DEL CARBÓN ACTIVADO EN LAS SOLUCIONES DE CIANURO

Los resultados para un experimento típico de oxidación del cianuro con carbón activado en un sistema semi logarítmico, se muestra en la figura 5 y en la cual se ha encontrado que presenta una relación lineal.

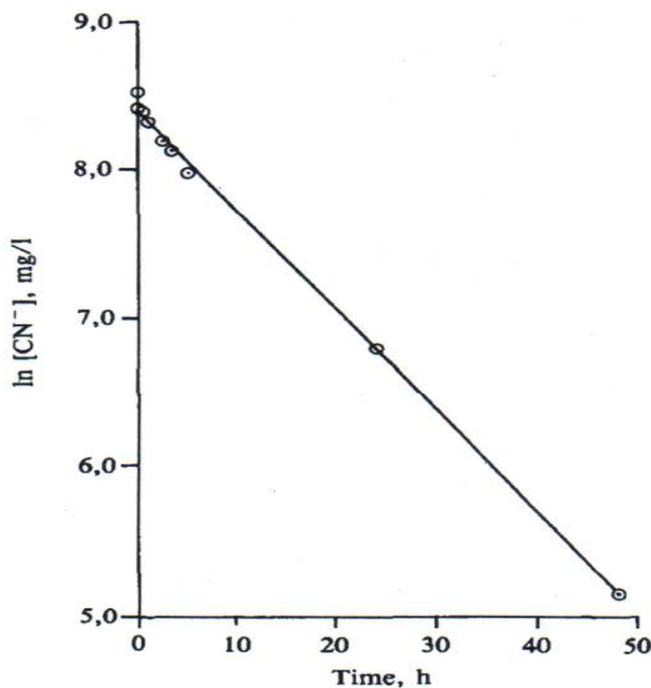


Figura 5: Representación de la cinética de primer orden de la oxidación del cianuro con Carbón Activado (Adams, 1990)

Esto sugiere que la cinética de reacción se describe por la ley de una reacción de primer orden:

$$-\frac{d[CN^-]}{dt} = k_1[CN^-] \quad [17]$$

Donde k_1 es la constante de velocidad de la reacción de primer orden y se integra la ecuación 17 se tiene la ecuación normalizada 18, cuya cinética se representó en la figura 6: (Adams, 1990)

$$\ln[CN^-]_t = \ln[CN^-]_o - k_1 t$$

[18]

Donde:

k_1 = constante de velocidad específica de la reacción global

$[CN^-]_o$ = la concentración de cianuro inicial.

$[CN^-]_t$ = la concentración de cianuro al cualquier tiempo.

El carbón activado ha sido usado para remover el cianuro de soluciones acuosas y se lo identifica como un catalizador para la oxidación de ion cianuro a cianato, no ha sido posible determinar si la oxidación procede directamente o vía cianógeno intermedio; las dos reacciones son termodinámicamente posibles. [Adams, 1990; Roshan, 2008]

Adams empleo un carbón activado (Le Carbone G210, microporoso de 1200 m^2/g) y cuando está presente en la solución se tiene mayores valores de la constante de velocidad de reacción k_1 , ya que proporciona una mejor oxidación, y además, dado que ambas curvas son paralelas, se demuestra una dependencia del pH para ambos casos.

Los ensayos realizados por Pilco, 2008, presentados en las figuras 6 y 7, presentan una reducción de la concentración del cianuro de sodio en presencia de aire y carbón activado ($d_{80} < 38 \mu m$ y capacidad de adsorción de 300 $mg I_2/g$) estos resultados son comparables a los obtenidos cuando se utilizó peróxido de hidrógeno (0,06 M), se demuestra que existe un sustancial

incremento de la cinética del proceso, al incrementar la concentración de carbón activado en suspensión.

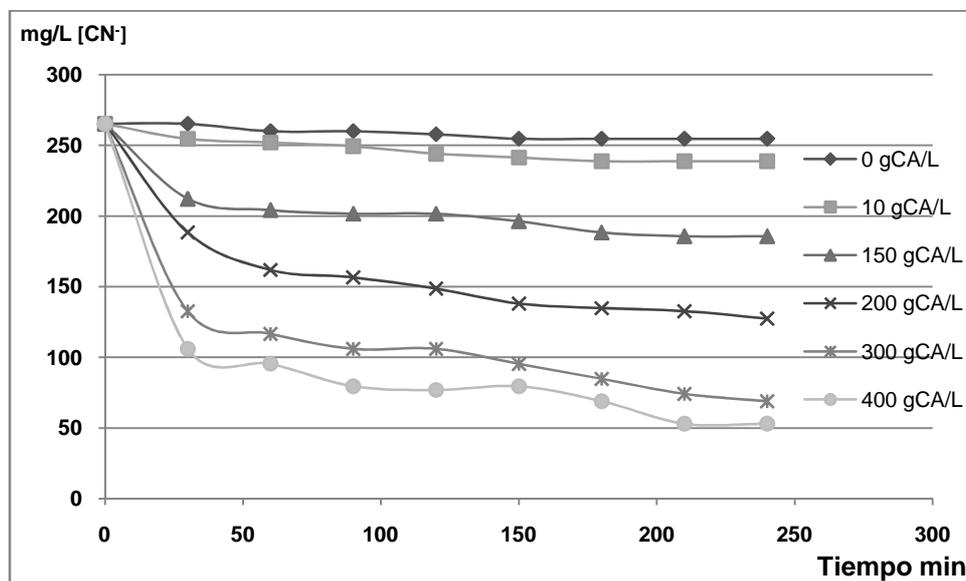


Figura 6: Influencia de la agitación de carbón activado en polvo. *Condiciones:* pH=12; agitación: 500 rpm; aireación: 48,3 (N L/h); CA: 300 mg I₂/g; d₈₀ <38 μm (Pilco, 2008)

En la figura 9, la oxidación de cianuro se ve favorecida por la presencia de carbón activado respecto a la utilización de carbón sin activar. Además Pilco encontró que la acción de carbón activado microporoso activado con vapor de agua de 300 mg I₂/g CA favorece la cinética de oxidación, sin embargo su acción es inferior a la obtenida con carbón macroporoso activado con ácido fosfórico de 518 mg I₂/g CA y es evidente el incremento de la cinética al utilizar un carbón macroporoso activado con vapor de agua de 600 mg I₂/g CA.

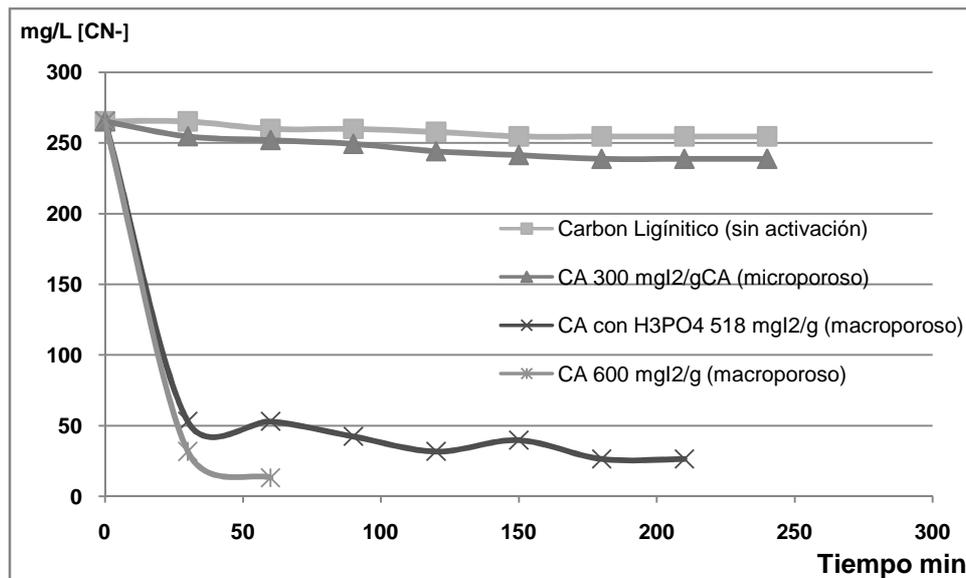


Figura 7: Influencia del tipo de porosidad del carbón activado en polvo, Condiciones: pH=12; agitación: 500 rpm; aireación: 48,3 (N L/H); CA: 150 g/L; $d_{80} < 38 \mu\text{m}$ (Pilco, 2008)

Finalmente se llegó a la conclusión que la naturaleza, superficie específica, granulometría y grupos funcionales del carbón activado, son factores claves para favorecer la cinética y por lo tanto la eficiencia de la oxidación del cianuro. El incremento de la agitación y de la aireación tienen poca influencia en el proceso.

1.2.3.1 Efecto de la concentración de oxígeno

La presencia de distintos niveles de oxígeno en la solución debido al burbujeo de este, representa una mayor pérdida de cianuro por efectos físicos. Mas aun, en ausencia de carbón activado, la concentración de oxígeno no tiene efecto sobre la pérdida de cianuro. Después de 20 horas de trabajo del carbón activado, se observa una disminución de la velocidad de reacción dado que la actividad catalítica del carbón decrece lentamente aun en presencia del oxígeno burbujeante. (Adams, 1990)

En la Tabla 5 y Tabla 6 se puede observar que la presencia de carbón activado en una solución cianurada con inyección de nitrógeno, oxígeno, o aire tiene un

marcado efecto en la velocidad de descomposición de cianuro, evidenciado por el incremento de los valores de k_1 de la ecuación 18.

Tabla 5: Efecto de la concentración de oxígeno en la pérdida de cianuro en solución acuosa a 20 °C. *Condiciones:* concentración cianuro 0,01M; pH 10,2; No. Iodo 1000 mg I₂/g CA

Gas	Oxígeno en solución (mg/L)	$k_1[h^{-1}]$	
		Carbón activado (25 g/L)	Sin carbón activado
Ninguno	6,5	0,0214	0,00104
Nitrógeno	2,5	0,0473	0,00267
Oxígeno	> 20	0,0512	0,00252

*Adams, 1990

Tabla 6: Velocidad específica de descomposición del cianuro de sodio en solución acuosa 20 °C. *Condiciones:* concentración inicial cianuro 500 mg/L NaCN; inyección aire [O₂ disuelto] 8,1 mg/L, No. Iodo 300 mg I₂/g CA, Carbón activado en polvo $d_{80} < 38 \mu\text{m}$

Concentración carbón activado (g/L)	$k_1[h^{-1}]$	Concentración carbón activado (g/L)	$k_1[h^{-1}]$
10	0,0024	200	0,0140
30	0,0041	300	0,0299
150	0,0066	400	0,0307

*de la Torre *et al.*, 2008

La utilización de carbón activado granular en la oxidación del ion cianuro, facilita su recuperación y reutilización, con tecnologías similares a los procesos de carbón en pulpa (CIP), su naturaleza, superficie específica, porosidad, granulometría y grupos funcionales son factores importantes que influyen en la cinética de la oxidación del CN⁻, estos últimos la incrementan, debido a la oxidación de compuestos de tipo cromene (C₉H₈O) en la superficie del carbón

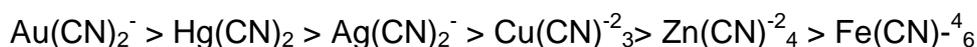
activado que propicia la formación de peróxido de hidrogeno. (Deveci *et al.*, 2006; de la Torre *et al.*, 2008).



Al introducir el carbón en la solución con cianuro, los potenciales de reducción de las reacciones cambian $E^0 = -0,182 \text{ V}$ con carbón $E^0 = 0,40 \text{ V}$ y $E^0 = -0,97 \text{ V}$ con carbón $E^0 = 0,08 \text{ V}$, se nota que ambos procesos de oxidación son termodinámicamente favorables. [Adams, 1990; Pilco, 2008]

La presencia del carbón activado en la solución de cianuro presenta un marcado efecto por la velocidad de pérdida de cianuro, algunos autores indican que la presencia de carbón activado en solución de cianato provoca una mayor remoción de este con respecto a su sola presencia en la solución, los análisis realizados al carbón activado demuestran que algo del cianato queda adsorbido. Por lo tanto se sugiere que el carbón activado actúa como un catalizador en la reacción de descomposición del cianato. [Adhoum y Monser, 2002; Smith y Mudder, 1991; Misra *et al.*, 2003; Young y Jordan, 1995;]

El carbón activado tiene una selectividad alta respecto al oro y la plata, respecto a otros metales, con excepción del mercurio. El orden general de preferencia a la adsorción de los diferentes complejos metálicos es el siguiente: (Romero, 1997)



1.2.3.2 Adsorción con carbón activado

El uso de carbón activado en la adsorción de cianuro se ha desarrollado hasta emplearlo en la catálisis de la oxidación de cianuro con oxígeno. Se ha observado que el cianuro es primeramente adsorbido y luego catalíticamente oxidado, (Misra *et al.*, 2003) un ejemplo proporcionado por la patente de Kuhn, 1971, es el tratamiento de una solución de 1,5 g/L CN^- a condiciones de pH

11,3 y con un flujo de aire de 52 litros de aire a temperatura ambientales, por 11,2 horas con lo que se alcanza el 99,99 % de oxidación.

La presencia de iones metálicos, particularmente cobre mejora notablemente la remoción de cianuro por la formación de complejos cianurados. Se ha demostrado que al emplear lechos empacados de carbón activado se remueve efectivamente cobre, zinc y hierro de soluciones sintéticas. (Chen y Wang, 2000)

Se ha investigado la remoción de cianuro usó carbón en polvo, que se llevo a cabo exhaustivamente para su utilización en la industria petrolera, sin embargo el oxígeno y el cobre deben ser suministrados para promover una remoción del cianuro como complejo. [Smith y Mudder, 1991; Roshan *et al.*, 2008; Marsden y House, 2008; Deveci *et al.*, 2002]

1.2.3.3 Isotermas de adsorción

La adsorción es un proceso de separación en la que ciertos componentes de una fase fluida se transfieren hacia la superficie de un sólido adsorbente. La isoterma de adsorción es la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente a la concentración en el equilibrio y a una temperatura constante.

En los casos de quimisorción, sólo se presentan isotermas del tipo I, la cantidad de adsorbato para una cantidad de adsorbente se incrementa con relativa rapidez con la concentración y luego mas lentamente, conforme la superficie comienza a cubrirse con moléculas de adsorbato.

Para representar la cantidad de adsorción por unidad de área o de masa, Freundlich propuso la ecuación:

$$q_c = KC_{eq}^{1/n} \quad [20]$$

Donde

- q_c : es el peso o volumen de la sustancia adsorbida
 C_{eq} : la concentración de la sustancia en el equilibrio
 K y n : son constantes empíricas relacionadas con la capacidad y la intensidad de adsorción, respectivamente.

La isoterma de Langmuir es mucho mas exacta para isotermas de tipo I, en este caso se postuló que las sustancias adsorbidas por la superficie del sólido, el cual posee un infinito número de sitios activos idénticos, donde es posible que se realice la adsorción; con la formación de únicamente una capa de espesor monomolecular en la superficie. [Marron y Prutton, 1978; Deveci *et al.*, 2006]

$$q_{eq} = \frac{QbC_{eq}}{1+bC_{eq}} \quad [21]$$

Donde:

- q_{eq} : es la concentración de sustancia adsorbida en equilibrio por gramo de carbón activado (mg/g).
 C_{eq} : la concentración de la sustancia en el equilibrio en solución. (mg/L)
 Q : la máxima capacidad de remover cianuro libre con el carbón impregnado.
 b : constante de Langmuir, que esta relacionada con las características del sistema y depende de la temperatura.

1.2.4 EFECTO DE LA PRESENCIA DEL CARBÓN ACTIVADO IMPREGNADO EN LAS SOLUCIONES DE CIANURO

Dada que la remoción de los metales e inorgánicos no es efectiva al ciento por ciento, existen autores que indican también que la remoción de cianuro puede ser mejorada por el empleo de carbón modificado al impregnarlo con sales de metales tales como: plata, cobre y níquel [Adhoum y Monser, 2002; Deveci *et al.*, 2005, Smith y Mudder, 1991; Yan, 1993, Cho y Pitt, 1979].

Los metales como plata, cobre, níquel presentes en la porosidad del carbón activado, favorece la adsorción de determinadas especies iónicas y propician diversas reacciones catalíticas. En la Tabla 7 se reporta la influencia de la impregnación de varios metales en el carbón activado, respecto a la remoción de cianuro en soluciones sintéticas de NaCN.

Tabla 7: Carbones impregnados con metales, capacidad de remoción del NaCN en solución acuosa a 20 °C. *Condiciones:* [NaCN] inicial 1.100 mg/L, [Carbón activado] 15 g/L, Tiempo 72 horas

Carbón Activado Impregnado	[NaCN] Residual (mg/L)	Carbón Activado Impregnado	[NaCN] Residual (mg/L)
CA –Ag 0,4%	50	CA –Ni 0,3%	630
CA –Cu 0,4%	100	CA –Fe 0,4%	700
CA –Zn 0,5%	530	CA –Cr 0,2%	950
CA –Cd 0,5%	550	CA –virgen	980

*de la Torre *et al.*, 2007

Dash *et al.*, 2009, muestra el comportamiento de la adsorción de cianuro de sodio con carbón activado granular (2-4 mm) para una concentración 20 g CA/L, y alcanza una remoción de 4,85 mg CN⁻/g CA a las 72 horas, semejante a lo obtenido por Marsden 2006, este valor se incrementa al emplear carbones modificados con sales de plata y cobre que presentan niveles la adsorción de cianuro en solución de 26,5 y 22,4 mg CN⁻/g CA respectivamente. Estos resultados muestran un aumento en la remoción de cianuro de cerca de cuatro veces respecto al carbón virgen. [Adhoum y Monser, 2003; Deveci *et al.*, 2006]

El incremento de la capacidad de remoción de cianuro en los carbones activados impregnados con metales puede ser atribuido a la

formación/adsorción de complejos cianurados $[\text{Me}(\text{CN})_n]^{-(n-1)}$. En el caso de las especies de cianuro de cobre, éstas pueden disolverse en exceso de cianuro para formar iones cianocupratos $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$, $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$, y $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$, de tal forma que las especies dominantes el dicianato y tricicianato de cobre. [Deveci *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2002]

Un trabajo de singular importancia es el presentado en la patente Yan, 1993 en la cual el método de remoción de cianuro, se da por medio de la impregnación de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, la patente indica que es la sal de mayor porcentaje de impregnación sobre el carbón y al cual se le sometió a procesos de reducción del cobre hasta el óxido (CuO) y la posterior sulfurización obteniendo CuS , no soluble en agua para de esta forma disminuir las pérdidas por solubilización de la sal. Este proceso obtiene remociones de casi 100%.

Adhoum y Monser, 2002, presenta la remoción de cianuro al emplear carbón impregnado con níquel y plata, los resultados demuestran que columnas empacadas con estos carbones presentan gran efectividad en la eliminación de cianuro, pero la mayor remoción se alcanzó al emplear carbón impregnado con plata, con 26,5 mg CN^-/L . en una solución de 40 mg CN^-/L . la relación molar de CN^-/Ag cianuro removido y la carga de plata en el carbón dan 1,8, lo que indica que el ion más estable que se forma en la solución con la plata es el complejo $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, caso similar ocurre con níquel cuya relación molar CN^-/Ni es de 4.3 indicando que el complejo formado es $\text{Ni}(\text{CN})_2^{4-}$.

Deveci *et al.*, 2006, reporta la adsorción de cianuro en carbón impregnado con cobre y plata, que alcanza 22,4 y 29,6 mg CN^-/g respectivamente, los datos que se obtuvieron al realizar las isotermas de adsorción se presentan a en la tabla 8.

Tabla 8: Parámetros de adsorción de la isoterma de Langmuir, para la remoción de cianuro por carbón impregnado con cobre

Absorbente	Langmuir		
	Q (mg/g)	B (L/mg)	ΔG (Kcal/mol)
CA imp. Cu	23,95	0,06	-4,40

*Deveci *et al.*, 2006

Las isotermas de Langmuir describen mejor la adsorción al tener altos correlaciones R^2 , el parámetro Q indica la máxima capacidad de remover cianuro con el carbón impregnado y esta relacionado con la distribución de la energía libre de los sitios. La energía de adsorción es negativa ya que ocurre espontáneamente debido a la elevada afinidad del CN^- por el carbón impregnado con cobre.

La impregnación de cobre en la superficie del carbón activado es fuertemente dependiente del pH y de la concentración de la solución impregnante, al igual que de la naturaleza del anión de la sal empleada (tamaño de la molécula), dado que los mecanismos de adsorción de cobre no están únicamente relacionados con las fuerzas de Van der Waals, sino también a procesos de quimisorción que involucran mecanismos tipo ion par, debe considerarse la precipitación del cobre en la porosidad del carbón activado. (Romero, 1997)

Un método para la conversión de cianuro en efluentes a cianato, es presentado en la patente US Pat. No. 4.537 686, (D'Ozario *et al.*, 1991) el proceso comprende el contacto del cianuro con dióxido de azufre y oxígeno en presencia de un catalizador de cobre, como sulfato de cobre $CuSO_4$. El proceso es efectivo, sin embargo es costoso ya que envuelve el uso del dióxido de azufre que es tóxico y difícil de manipular, además del equipamiento y la formación de especies no deseadas.

1.2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN CATALIZADA POR SÓLIDOS

1.2.5.1 Resistencia a la difusión en los poros

La velocidad global de reacción esta limitada por la velocidad de transferencia de masa de reactivos y productos entre el seno del fluido y la superficie catalítica.

Los efectos de la difusión = efectos de la transferencia de masa

Resistencia externa. Difusión de los reactivos o productos, entre el seno del fluido y la superficie externa del catalizador.

Resistencia interna. Difusión de los reactivos o productos, desde la superficie exterior del granulo (boca del poro) al interior del granulo.

Los reactivos que se difunden al interior de los poros del granulo del catalizador, generan que la concentración en la boca del poro sea más alta que en el interior del poro, este fenómeno se ilustra en la figura 8. Para considerar las variaciones de concentraciones dentro del granulo se introduce el factor de efectividad. [Fogler *et al.*, 2001; Levenspiel, 2004]

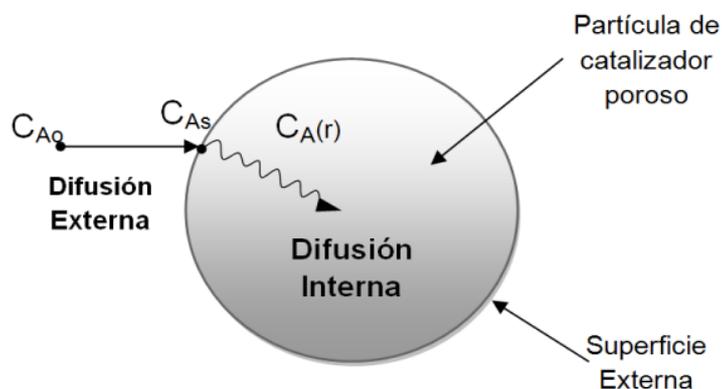


Figura 8: Pasos de la transferencia de masa y de reacción en una partícula de catalizador (Fogler *et al.*, 2001)

1.2.5.2 Modulo de Thiele

M_T es la medida del cociente entre “una velocidad de reacción superficial y una velocidad de difusión a través de los gránulos del catalizador. Valores pequeños del modulo de Thiele, M_T indica que la reacción superficial y valores grandes del modulo de Thiele indica que la reacción en la superficie es rápida y que el reactivo se consume muy cerca de de la superficie exterior del granulo, y que muy poca cantidad penetra en el interior de la partícula. [Levenspiel, 2004; Smith, 1991; Fogler *et al.*, 2001]

Si la reacción es $A \rightarrow B$ y es de primer orden, la reacción superficial limitará la velocidad respecto a la adsorción de A y la desorción de B, y si las especies A y B se adsorbieran débilmente y estuvieran presentes en concentraciones muy diluidas, podríamos escribir la ley de velocidad de primer orden aparente. (Fogler *et al.*, 2001)

$$-r_A'' \approx K_1 C_A \quad [22]$$

Modulo de Thiele queda expresado de la siguiente manera:

$$M_T = R \sqrt{\frac{k_1 \rho_c S_a}{D_e}} = m \left(\frac{1}{m^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 1$$

[23]

Donde ρ_c = densidad del catalizador.

S_a = es el área superficial del catalizador.

La solución de la ecuación diferencial para una reacción de primer orden esta dado por:

$$\varphi = \frac{A_1}{\lambda} \cosh \phi_1 \lambda + \frac{B_1}{\lambda} \sinh \phi_1 \lambda \quad [24]$$

Las constantes arbitrarias A_1 y B_1 se evalúan fácilmente con las condiciones de frontera y el perfil adimensional es

$$M_T = \frac{C_A}{C_{As}} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\sinh \phi_1 \lambda}{\cosh \phi_1} \right) \quad [25]$$

Donde:

C_{AS} = Concentración del reactivo en la superficie del catalizador sin difusión.

1.2.5.3 Factor de efectividad interno

La efectividad que varía entre 0 y 1, indica la importancia relativa de las limitaciones de difusión y reacción. El factor de efectividad interno se define como la relación entre la velocidad de reacción global real y la velocidad que se observaría, si toda la superficie interior estuviera expuesta a las condiciones de la superficie exterior, C_{AS} , T_s . (Levenspiel, 2004)

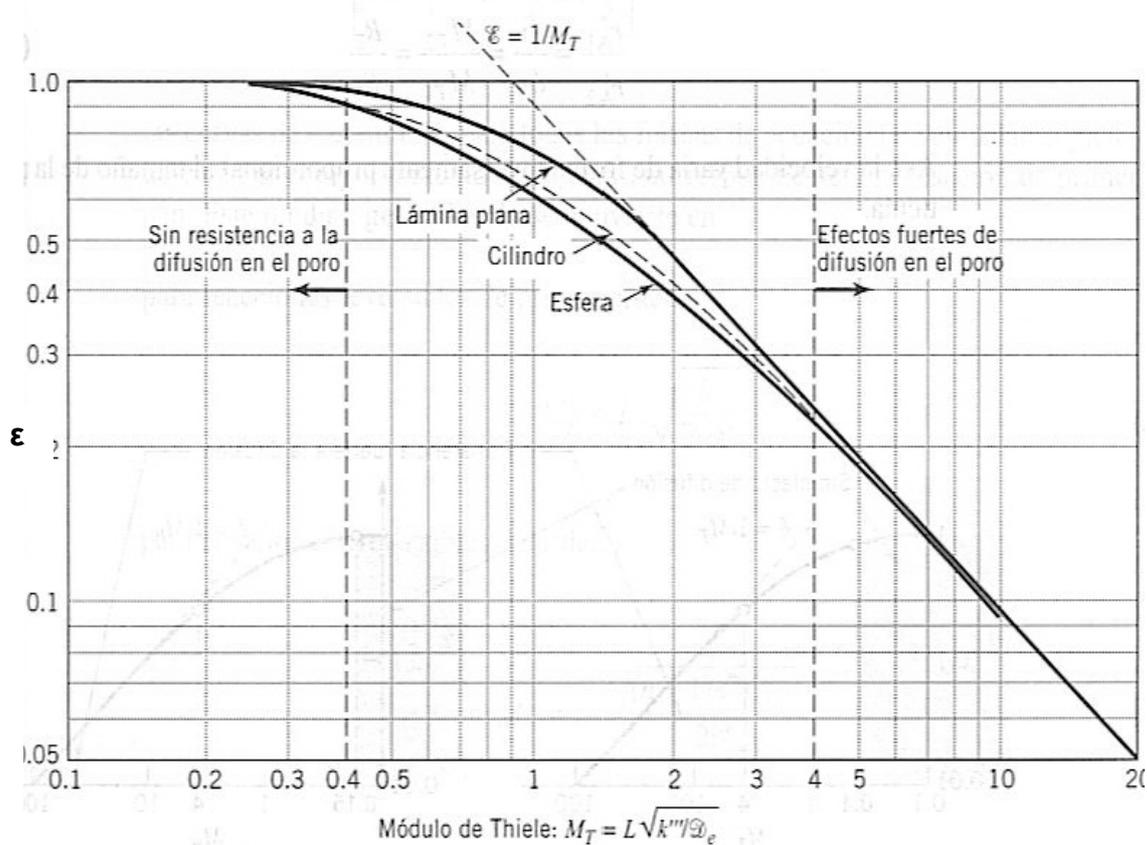


Figura 9: Grafica de efectividad para cinética de primer orden y partículas de catalizador esférico

(Levenspiel, 2004)

La relación entre el modulo de Thiele con el factor de efectividad que se observa en la figura 9 se explica de la siguiente manera: cuando el diámetro de la partícula se reduce se vuelve muy pequeño M_T de modo que el factor de efectividad se acerca a 1 y la reacción esta limitada por la reacción superficial. Por otra parte, si M_T es grande, el factor de efectividad interno es pequeño, y la reacción esta limitada por la difusión dentro del granulo.

La velocidad global, $-r'_A$, también se conoce como velocidad de reacción observada, en términos de símbolos del factor de efectividad es:

$$\eta = \frac{-r_A}{-r_{As}} = \frac{-r'_A}{-r'_{As}} \quad [26]$$

En reacciones de primer orden es mas fácil trabajar con velocidades de reacción en (moles por unidad de tiempo), M_A , y no en moles por unidad de tiempo por unidad de superficie exterior del granulo, es decir $-r'_A$.

La velocidad de reacción real es la velocidad a la que el reactivo se difunde hacia el interior del granulo en la superficie exterior. La ecuación de reacción real es:

$$\eta = \frac{3}{\phi_1} (M_T \coth M_T - 1) \quad [27]$$

Si el módulo de Thiele es grande el factor de efectividad se puede calcular así:

$$\eta = \frac{3}{M_T} = \frac{3}{R} \sqrt{\frac{D_e}{k_1 \rho_c S_a}} \quad [28]$$

Si queremos expresar la ecuación en términos del factor de efectividad, reacomodamos la ecuación y usamos la ecuación de velocidad de una reacción de primer orden

$$-r'_A = \eta(-r'_{As}) \quad [29]$$

$$-r'_A = \eta(k_1 - C_{As})(S_a) \quad [30]$$

Por lo tanto, si se quiere aumentar la velocidad de reacción global, $-r'_A$, se ponen en práctica las siguientes instrucciones: (Fogler *et al.*, 2001)

1. Disminuir el radio R (uso de gránulos mas pequeños);
2. Aumentar la temperatura;
3. Aumentar la concentración;
4. Incrementar el área superficial interna del catalizador.

1.3 TRATAMIENTO DE EFLUENTES CIANURADOS MINEROS

El tratamiento de aguas industriales es quizá una de las operaciones más comunes que existe en toda industria. Ya sea para cumplir normas ambientales o para producir agua de calidad para usar en el proceso. Es conveniente que todo ingeniero sepa cuales son los fundamentos del tratamiento de aguas industriales.

Los efectos tóxicos que tiene la presencia de estos efluentes en el medio ambiente, incluso en concentraciones muy bajas, requieren mayor grado en el tratamiento de sus componentes hasta el punto que los residuos sean inofensivos para ser descargados en las aguas domésticas o municipales. (Tchobanoglous *et al.*, 2003)

1.3.1 IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA MINERA

La minería es una de las actividades industriales de mayor impacto ambiental. Cada una de sus etapas (prospección y exploración de yacimientos, desarrollo y preparación de las minas, explotación y tratamiento de los minerales, y cierre) genera impactos ambientales específicos.

La explotación minera genera impactos sociales y ambientales de corto, mediano y largo plazo. En varias zonas mineras del país, el tratamiento de menas auríferas se lo realiza por concentración gravimétrica en canalón y amalgamación. Los relaves de este proceso, se cianuran por percolación en piscinas o por agitación y luego se recupera el oro disuelto mediante cementación en virutas de cinc o adsorción en carbón activado. Las soluciones cianuradas efluentes, así como las arenas ya tratadas se desechan al medio ambiente, lo que produce un daño ecológico irreversible. (de la Torre y Guevara, 1999)

Son los factores de tipo medioambiental, pero también económicos los que hacen que las compañías auríferas y mineras concentren gran parte de los esfuerzos en la búsqueda de un método efectivo para procesar el agua residual. Se busca por un lado disminuir el impacto producido por las aguas contaminadas y por otro conseguir la recuperación de materias de interés para su reutilización en la planta, y reduce el coste variable de este compuesto.

Los materiales peligrosos afectan no sólo a los seres humanos, sino también a los receptores ecológicos. La existencia de disoluciones acuosas con un alto contenido en residuos cianurados que deben ser gestionados adecuadamente. La concentración de cianuro en el agua residual es aproximadamente de 700 mg/L de cianuro complejo con cobre y 300 mg/L de cianuro libre, y para lo cual la concentración máxima tolerada en un vertido a un sistema de agua dulce de 0,2 mg/L y 1 mg/L en alcantarillas. [Cotruvo *et al.*, 2007, Tulas, 2002]

1.3.2 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES CIANURADOS

Los procesos de tratamiento son usados usualmente para reducir las concentraciones de constituyentes tóxicos en corrientes finales y soluciones de proceso; ya sea por dilución, remoción o conversión a especies químicas menos tóxicas. El objetivo es producir un efluente que se encuentre dentro de

los límites o de los estándares que han sido determinados de conformidad con los requerimientos ambientales y/o metalúrgicos del proyecto.

Los métodos posibles para la oxidación del cianuro pueden ser agrupados en las siguientes categorías:

- Remoción de Cianuro
 - Volatilización natural
 - Adsorción en minerales
- Oxidación a especies menos tóxicas
 - Oxidación natural
 - Complejación con Hierro
 - Proceso con peróxido de hidrogeno
 - Proceso asistido con dióxido de azufre
 - Proceso de Cloración alcalina
 - Oxidación Biológica
 - Ozonización
- Formación de complejos menos tóxicos con Fe (II) y cianuro, con un potencial de remoción como el de una sal doble insoluble.

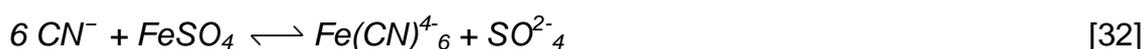
1.3.2.1 Degradación y Volatilización Natural

Es un proceso que reduce la toxicidad de las especies de cianuro con el tiempo. Una variedad de mecanismos son los responsables, entre los que se incluye la volatilización, oxidación, adsorción en otros minerales, hidrólisis, biodegradación, y precipitación. A pesar que estos procesos son efectivos, no tienen la suficiente velocidad o cinética de reacción para los propósitos industriales, un ejemplo de este proceso se indicó en la figura 2. Como una gran ventaja debe ser tomada la degradación natural en el diseño y aplicación de los sistemas de tratamiento. La degradación tiene una cinética de primer orden con respecto al cianuro libre y los complejos de cianuro de los metales, zinc, cobre, hierro y níquel. [Smith y Mudder, 1991]

La volatilización del cianuro contenido en solución se incrementa con lo siguiente: disminución del pH, incremento de la temperatura, incremento de la aereación de la solución, incremento de la agitación de la solución y el incremento de la superficie con relación al cuerpo de la solución.

1.3.2.2 Formación de complejos de hierro

El cianuro libre puede ser convertido a una especie menos tóxica como el complejo de cianuro y Fe(II) por la adición de un exceso sal de Fe(II) soluble, como el sulfato de Fe(II) $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, con un rango de pH de 7,5 a 10,5. La reacción del proceso se muestra a continuación. (D'Ozario *et al.*, 1991)



Se ha demostrado que los complejos ferri y ferro cianuros pueden precipitar con cobre, hierro, magnesio, cadmio y zinc en un amplio rango de pH que va de 2 a 11. (Smith y Mudder, 1991) Por ejemplo:



El proceso es ineficiente en comparación con otros métodos, debido a que la reacción es lenta y es difícil reducir la concentración de cianuro libre por debajo de 2,5 mg/L.

1.3.2.3 Oxidación con peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno tiene la ventaja sobre técnicas que usan cloro o dióxido de azufre, en el que no se introducen iones externos en las soluciones de proceso, a menos que sea usado como catalizador, y la cinética de oxidación es suficientemente rápida y efectiva como la oxidación y puede ser llevada a cabo en pocos minutos. Sin embargo la oxidación de residuos a

concentraciones bajas de cianuro, que usualmente se requieren en los efluentes de descarga, es costosa.

En soluciones alcalinas los complejos WAD por ejemplo, cobre, níquel y zinc son oxidados a cianato y el hidróxido del metal. Los complejos cianurados fuertes no se destruyen, pero los cianuros de Fe (II) pueden ser removidos como sales dobles insolubles con el cobre y el zinc por la adición de sulfatos solubles de zinc y cobre. La oxidación del ion cianuro se ve acelerada por la presencia de catalizadores como iones cobre o formaldehído. Los resultados finales contienen menos de 0,1 mg/L CN^- y puede llevarse a cabo en altas dosis de peróxido, pero generalmente este mecanismo no es económicamente favorable.

El consumo de peróxido de hidrógeno está estimado aproximadamente en 3 Kg H_2O_2 / kg CN^- . Sin embargo por la presencia de otras especies en los efluentes existirá mayor consumo ya que algunos pueden competir por el peróxido y por lo tanto la reducción de la actividad catalítica.

1.3.2.4 Oxidación con ácido de Caro

El ácido de Caro que es la mezcla entre el ácido sulfúrico y el peróxido de hidrógeno (H_2SO_5), ha sido usado en algunas minas por la rápida y efectiva destrucción de cianuro WAD y libre, su reacción es como sigue:



El ácido de Caro ha sido demostrado ser efectivo en concentraciones de menos de 50 mg/L muy rápidamente, usualmente en minutos y más rápidamente que el peróxido por sí solo. Sin embargo el ácido de Caro debe ser preparado en el sitio mismo de la aplicación ya que es muy inestable y para que sea efectivo este debe ser usado rápidamente después de la preparación (pocos segundos). En la práctica 3 a 4 kg SO_2^- equivalente a 5 a 8 kg $Na_2S_2O_5$ son

requeridos por kilogramo de cianuro libre, la cal es usada para el control de pH, porque la reacción de oxidación genera ácido sulfúrico.

1.3.2.5 Oxidación Biológica

El objetivo primario de un tratamiento de residuos líquidos es reducir el DBO y los sólidos suspendidos y posteriormente se realiza la biodegradación del cianuro ya que el proceso requiere de una fase de adaptación de las bacterias a la concentración de cianuro libre, tiocianuro y metales pesados que van a ser tratados en la corriente de proceso. La velocidad de oxidación del cianuro a cianato es incrementada por la presencia de las bacterias, ya que el carbón y el nitrógeno son nutrientes. [Gijzen *et al.*, 1999; Smith y Mudder, 1991]

Los complejos de cianuro también son oxidados y los metales son adsorbidos, ingeridos y precipitados por la bacteria. La velocidad de degradación de los complejos metálicos cianurados por este mecanismo decrece en el siguiente orden: $Zn > Ni > Cu > Fe$, aun los complejos mas fuertes de hierro y cianuro son degradados y adsorbidos por la bacteria. La bacteria obtiene parte de su alimento y energía de la oxidación del cianuro y de tiocianato, pero requiere de otros nutrientes como el ácido fosfórico y el carbonato de sodio.

En la práctica la degradación biológica remueve más del 92% del cianuro total, 99% del cianuro WAD y más de 95% del cobre y otros metales pesados tóxicos.

1.3.2.6 Oxidaciones no habituales

Las oxidaciones y tratamientos presentados en éste punto son poco habituales en las industrias mineras, ya que son procesos patentados con variaciones a los ya existentes o son nuevas ideas para alcanzar los niveles de cianuro

necesarios para la disposición final del fluente, estas ideas se ponen a su consideración:

En el trabajo presentado y patentado por D'Ozario *et al.*, 1991, los iones de cianuro presentes en los efluentes mineros son destruidos por contacto de una corriente con oxígeno y dióxido de carbono, en presencia de un catalizador y soluble en agua, que puede ser una sal de cobre o de hierro.

El uso de aire es preferido por el bajo costo que representa, y el catalizador que se usa generalmente es el sulfato de cobre, la cantidad de esta sal esta definida por la cantidad de cianuro en la solución y la relación entre el ion cobre y el ion cianuro es de por lo menos 0,1:1. Las características de esta patente se muestran en la tabla 9.

Tabla 9: Resultados de la oxidación de cianuro con aire, dióxido de carbono y sulfato de cobre

Concentración CN ⁻ mg/L			Pérdida de CN ⁻ como HCN, mg/L	Porcentaje de CN ⁻ (reducción)	
				Perdido como HCN	Reducción en la sol.
Ensayo	Inicial	Final			
1	155	44	1,2	0,8	70,8
2	280	205	7,0	2,5	24,3
3	290	210	24,0	8,3	19,3

* D'Ozario *et al.*, 1991

De acuerdo a la tabla 9, los autores muestran los resultados alcanzados con la aplicación del proceso de eliminación del cianuro, el ensayo 1 presenta una remoción de 70,8%, con una pérdida de cianuro por volatilización de 0,8%, el ensayo 2 presenta la remoción de cianuro sin emplear el catalizador (CuSO₄), con lo que se logra solo el 24% de remoción y finalmente con el uso de dióxido de carbono.

2. METODOLOGÍA

En esta investigación se estudió la oxidación del cianuro libre (CN^-) a temperatura ambiente (18 - 20 °C) y 0,72 atm, que emplea carbón activado y aire, en dos tipos de soluciones:

- Soluciones sintéticas de concentración conocida de cianuro de sodio (NaCN) grado analítico. Para simular el contenido de cianuro libre que poseen los efluentes de las industrias mineras después de haber sido sometidos a los distintos mecanismos de recuperación de los metales preciosos.
- Soluciones reales: efluentes líquidos del proceso de cianuración carbón en pulpa (CIP) obtenidos en laboratorio y soluciones de cianuración generados por una industria de extracción de oro del país.

El tratamiento de 3 litros de solución sintética de NaCN , se llevó a cabo en columnas de 8 cm de diámetro y 96 cm de alto, con un lecho de carbón activado agitado por aireación; durante el desarrollo de los ensayos se requirió el control del pH, caudal de aire y la concentración de cianuro.

Primeramente se prueba la acción del carbón activado en la remoción del cianuro libre; se emplea carbón activado granular microporoso de superficie $400 \text{ m}^2/\text{gCA}$, obtenido a partir de cuesco de palmiste (malla 8X20 (0,8 x 2,3 mm)). Adicionalmente se investigó la influencia del aire atmosférico al suministrarse como agente oxidante y promotor de agitación del proceso.

En la fase de trabajo con soluciones sintéticas, se estudió el efecto de la utilización de sales de metales de transición como el cobre, metal que ha demostrado mejorar la actividad catalítica del carbón (Adhoum y Monser, 2000; Deveci *et al.*, 2006; Marsden y House, 2002; Smith y Mudder, 1991), por lo

cual, se investigó la influencia de la adición al proceso, de sales como: CuSO_4 , CuCl_2 y $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$.

Para mejorar la velocidad de eliminación del ion cianuro de los efluentes, se ensayó, un mecanismo para la impregnación en la superficie del carbón activado con la sal de cobre que presentó la mejor cinética de remoción y que posea una alta capacidad de adsorción en la superficie del carbón activado. El proceso de oxidación de soluciones sintéticas de NaCN se muestra en la figura10, a manera de un diagrama de flujo.

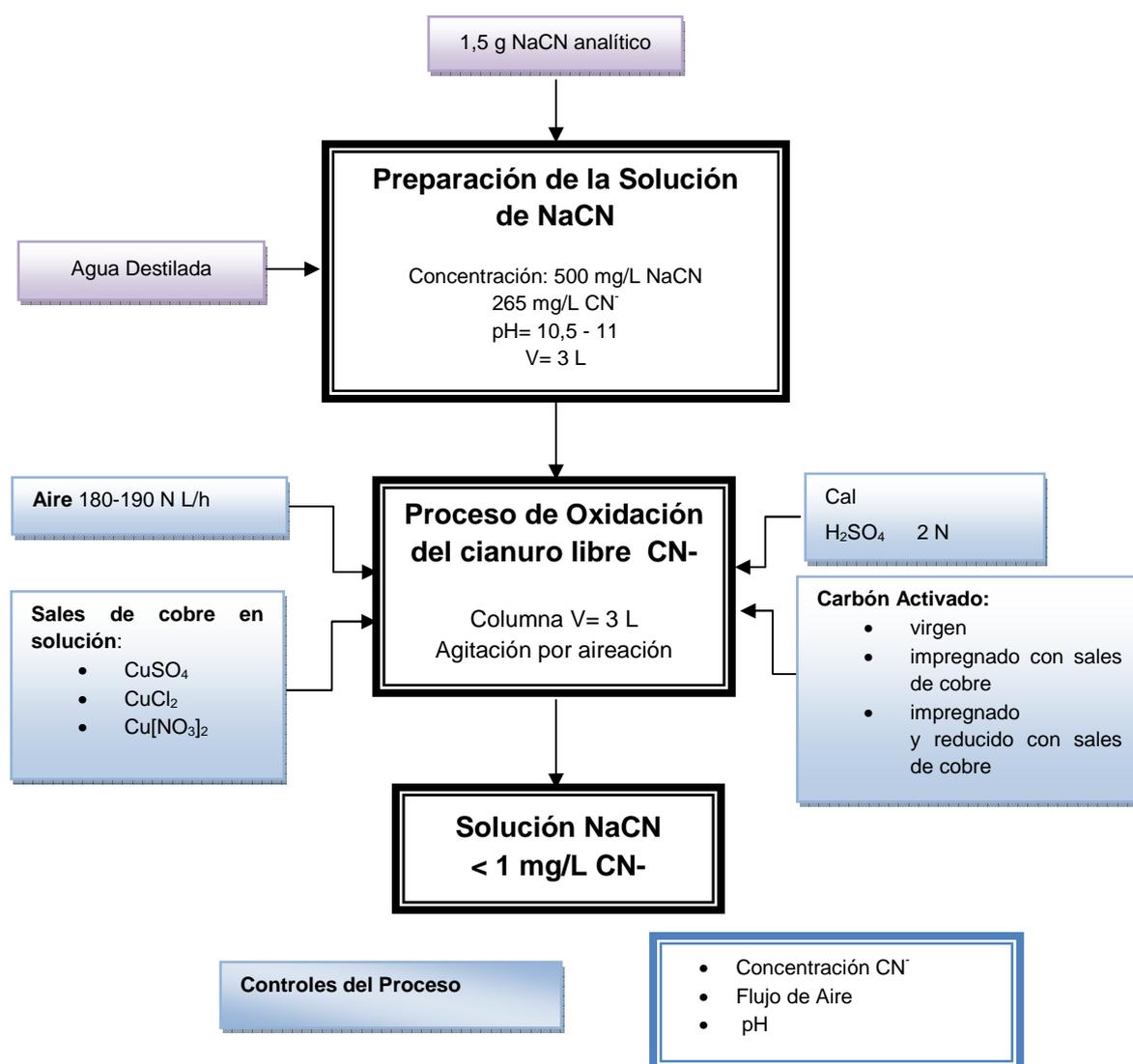


Figura10: Diagrama del proceso aplicado a la oxidación de cianuro libre con soluciones sintéticas

Después de la recopilación y análisis de los datos de soluciones de NaCN, se investigó el proceso con suspensiones (pulpas) efluentes del proceso CIP y con efluentes de la industria.

Para evitar la sedimentación de las partículas sólidas de los efluentes de cianuración, se introdujo agitación mecánica a razón de 400 rpm al proceso. En los efluentes se analizaron las formas de cianuro (libre y WAD) que generalmente están presentes en las soluciones de una planta de cianuración (Smith y Mudder, 1991; Marsden y House, 2002), como las concentraciones de: metales (absorción atómica Perkin Elmer AA300), cianuro libre (electrodo específico de cianuro), y cianuro WAD (destilación a pH 4,5), al inicio y al final del tratamiento.

Como paso final se estudió el desarrollo de un proceso de tratamiento en continuo, al emplear un flujo de alimentación variable, en el que, las columnas de carbón se encuentran dispuestas en serie o paralelo. La ilustración de estos tratamientos, tanto batch como en continuo, para efluentes de cianuración se muestra en la figura 11.

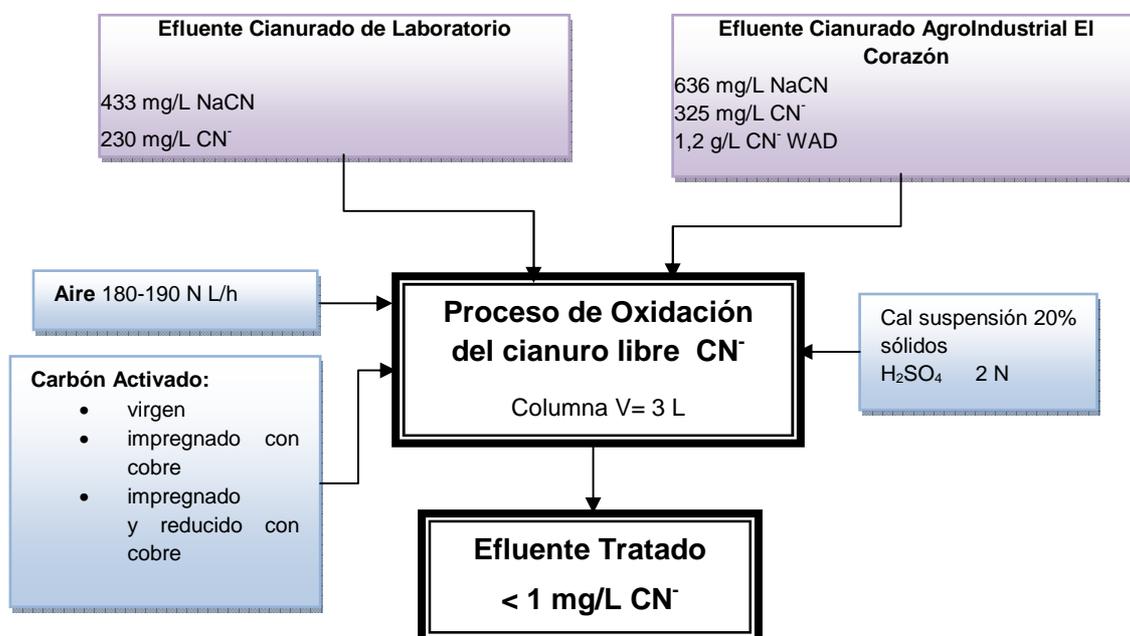


Figura 11: Diagrama de procesos aplicado a la Oxidación de cianuro libre con efluentes de proceso de carbón en pulpa en soluciones reales

La figura 12 representa gráficamente un resumen de la metodología aplicada, además considera las soluciones a tratar, los tipos de carbones y de sales de cobre que se añadieron a la oxidación.

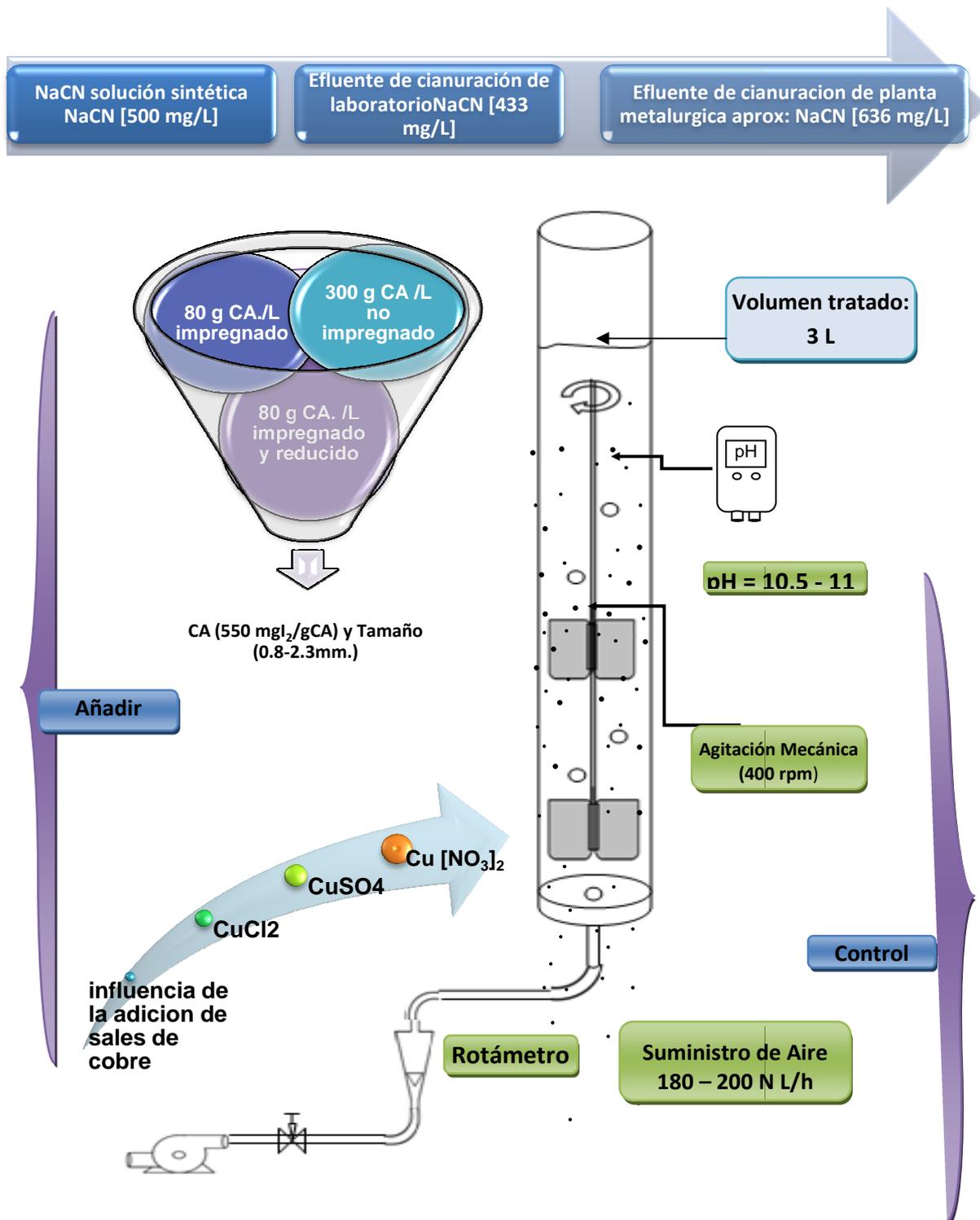


Figura 12: Esquema gráfico del proceso experimental de la oxidación en columnas

2.1 ENSAYOS CON SOLUCIONES DE CIANURO DE SODIO

2.1.1 CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO VIRGEN Y CARBÓN ACTIVADO MODIFICADO

2.1.1.1 Carbón activado virgen

El carbón activado que se utilizó para la realización de los ensayos de eliminación de cianuro libre, es de producción nacional, proporcionado por la fábrica Quimicarb, obtenido a partir de cuesco de palmiste por carbonización y activado físicamente con vapor de agua.

Muchos métodos han sido empleados para la caracterización de carbones activados debido a las metodologías de activación y el material del que se originan, de esta forma se ha seleccionado la caracterización mediante el índice de yodo que determina que el material es microporoso con capacidad de adsorción de 550 mg I₂/g CA a temperatura ambiente. El procedimiento para la determinación el índice de yodo se basó en la norma ASTM D4356

Este carbón activado posee un tamaño de partícula comprendido entre 0,8 x 2,3 mm (8 x 20 mallas) y d₈₀ de 1,8 mm. y al que se conoce como carbón activado granular o CAG.

2.1.1.2 Carbón activado modificado

A partir de los datos obtenidos de remoción del ión cianuro se observó que la cinética disminuye cuando la concentración del contaminante es pequeña, por tal razón se realizó modificaciones a la estructura del material, mediante la impregnación de iones metálicos que favorecen la cinética de eliminación del cianuro.

Los carbones activados impregnados con diferentes tipos de sales de cobre son analizados por espectrofotometría de absorción atómica que requirió el uso del equipo Perkin-Elmer AA300. Para tal fin el carbón activado, fue calcinado y disgregado vía microondas con ácidos minerales, de forma que se elimine completamente el material no metálico.

Por otro lado dentro del análisis de la reutilización del carbón activado impregnado con cobre, se estudió la influencia en la reducción de las sales adheridas, lo que logró la disminución de la solubilidad de estas especies y evitar de esta forma su pérdida por solubilización. La composición mineralógica de los carbones activados impregnados y reducidos se analizó mediante difracción de rayos X (DRX Bruker D8 Advance) con los programas EVA y TOPAS.

2.1.2 PROCESO DE OXIDACIÓN DEL ION CIANURO CON AIRE Y CARBÓN ACTIVADO

Dentro de este tipo de ensayos se estudió la influencia de la adición de aire a una solución de cianuro de sodio, por un lapso de tiempo de hasta 8 horas, el proceso inicia al suministrar a la columna el aire en una proporción de 140 N L/h. Es importante mencionar que el proceso de agitación proporcionado por el aire, necesita de la implementación de dispositivos de burbujeo como difusores de tal forma de asegurar que la solución se sature de oxígeno.

Este estudio se complementa con la variación de la cantidad de carbón activado que ingresa al proceso de eliminación de cianuro libre, lo que determinó la proporción que debe ser agregada a la solución, de tal forma que logre una concentración de cianuro menor o igual a los requerimientos establecidos en las leyes de descargas de efluentes, de esta forma se minimiza la contaminación ambiental, que como máximo es 1 mg/L de CN⁻ libre para la descarga para el sistema de alcantarillado. (TULAS, 2002)

Debido a la similitud de los procedimientos realizados en esta investigación, la metodología a continuación descrita, sirve como base para otros ensayos que incluyen ciertas variaciones al procedimiento.

Las condiciones ambientales de trabajo son: 0,72 atm. y temperatura ambiente comprendida entre 18–20 °C. La secuencia de la metodología se puntualiza a continuación.

- Se prepararon 2 litros de solución de cianuro de sodio (analítico) de 0,5 g/L, Alimentación 10,5 y 11,5.
- Se adicionaron cantidades variables de carbón activado (virgen, impregnado e impregnado y reducido), con capacidad de adsorción variable entre 510-570 mg I2/g CA. La granulometría del carbón activado empleado es de (0,8 – 2,3 mm. (malla 8x20)) y
- Se somete a agitación por aereación (190 N L/h), la cual fue medida con el uso de rotámetro.
- El pH de la columna se controla mediante la adición de una suspensión de cal de 20% de sólidos y ácido sulfúrico 2N.
- Durante la oxidación se tomó muestra, inicialmente cada minuto para determinar la concentración cianuro libre.

Durante el desarrollo de la oxidación del cianuro se adicionan volúmenes muy pequeños (5 ml cada 5 a 15 minutos) de una suspensión de cal de 20% de sólidos, debido a la disminución del pH de la solución cianurada (pH establecido 10,5).

2.1.2.1 Control y medida de la concentración de cianuro libre y cianuro Wad

La finalidad de los ensayos de oxidación es conocer la cinética del proceso; el parámetro que permite obtener esta información fue la medición y seguimiento

de la concentración de cianuro presente en la solución, se desarrolló de dos metodologías:

- valoración de cianuro libre por volumetría y,
- utilización del electrodo específico de cianuro.

y el análisis de cianuro Wad por destilación

Estos procedimientos se describen a continuación.

a. Valoración de cianuro libre por volumetría

Este método se utilizó para la determinación de concentraciones mayores a 5 mg/L y en soluciones claras o transparentes, el método es fácil y rápido, la técnica se basa en la reacción del nitrato de plata con el ion cianuro en solución alcalina para formar el complejo soluble $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$. (Nava *et al.*, 2007)

Se emplean soluciones de nitrato de plata 4,33 g/L y yoduro de potasio 10% como indicador. Las alícuotas empleadas para la valoración son: 10 ml en los ensayos de oxidación con carbón activado virgen y de 25 hasta 50 ml en los ensayos con sales de cobre agregadas y carbón impregnado, debido a la disminución en la concentración de cianuro en la solución.

El seguimiento de la remoción de cianuro se dio mediante el registro de la concentración de cianuro, inicialmente cada 5 min. y luego se varió esta diferencia de tiempo de acuerdo a la cinética de la oxidación. Los cálculos y la información más detallada para el método se presentan en el Anexo I.

b. Electrodo específico de cianuro

Se empleó el electrodo específico de cianuro modelo Orion Specific Electrode Cyanide IonPlus 9606BN, útil para concentraciones bajas, la técnica permite

medir de manera muy precisa cantidades mínimas de cianuro (el rango de trabajo es 0,05 a 10 mg/L) tanto en soluciones claras como en pulpas. El electrodo posee una membrana de sulfuro de plata y yoduro de plata que reacciona con el cianuro de la solución y libera una cantidad de ión yoduro, el cual es detectado por el electrodo.

Fue necesario realizar una curva de calibración de concentración de soluciones estándar contra voltaje del potenciómetro al que está conectado el electrodo y, de esta forma determinar la concentración correspondiente a la medida de voltaje que presenta una la solución o efluente cianurado.

El electrodo detecta todo el cianuro libre y todos los complejos de cianuro que poseen una constante de estabilidad menor que la del cianuro de plata (cianuros de zinc y de cadmio). El cobre y níquel forman complejos de cianuro aún en soluciones muy básicas lo que disminuye la cantidad de cianuro mostrado por el electrodo. Estas soluciones deben tratarse a $\text{pH}=4$, a fin de liberar el cianuro. Después es necesario añadir nuevamente una base para conservar el cianuro en su forma iónica. Mayor información sobre el uso del electrodo específico de cianuro y las condiciones a las que se deben trabajar ver Anexo II.

c. Determinación de cianuro Wad

En efluentes de los procesos CIP, se tiene presencia de cianuro Wad debido a los iones metálicos que con los que lo constituyen, de esta forma fue necesario determinar la cantidad de cianuro presente en estos compuestos como cianuro libre.

La destilación a $\text{pH } 4,5$ se basa en la liberación de los grupos CN^- de las formas de cianuro dissociable en ácidos débiles, mediante acidificación, para luego por medio de destilación recolectar estos vapores en una solución de hidróxido de sodio, en donde se formará cianuro de sodio que se determina con

los métodos de análisis de cianuro libre descritos anteriormente, para reactivos, equipos y cálculos ver Anexo III.

La figura 13 muestra el equipo utilizado para la destilación del cianuro WAD según norma ASTM D2036.



Figura 13: Equipo de destilación de cianuro WAD

2.1.2.2 Control de pH

El pH de la solución o efluentes a 10,5, fue controlado mediante la adición de soluciones de cal al 20% (mezcla de óxido e hidróxido de calcio) y ácido sulfúrico de concentración 2 N, este pH se ha establecido para evitar la pérdida de cianuro por volatilización como gas cianhídrico. (Smith y Mudder, 1991)

La medición se llevó a cabo con el pH-metro 720 WTW series, el que proporcionó tanto el pH como el potencial de oxidación-reducción de la solución.

2.1.2.3 Control de la aireación

El aire fue suministrado por el compresor Schulz modelo MS- 2,6/60, el flujo de aire que ingresa a la columna fue controlado por un rotámetro Rota con capacidad de medición de hasta 70 N ml/s o 252 N L/h. La calibración de este rotámetro se lo realizó dado que no se cuenta con datos reales y que se presenta en el Anexo IV.

2.1.2.4 Acondicionamiento de carbón activado

Al finalizar los ensayos consecutivos de oxidación con carbón activado virgen o re-utilizado se siguen los siguientes pasos:

- Se filtró la columna con un tamiz (malla 20), para separar el carbón activado y el efluente, como se muestra en la figura 14 a.
- El carbón filtrado se lavó con 500 ml de agua destilada por dos veces en un periodo de tiempo de 5 minutos en constante agitación, ilustrado en la figura 14 b.
- Se dispone al carbón activado en un recipiente inundado completamente con agua destilada y se controla el pH mediante la adición de la solución de ácido sulfúrico 2N, hasta $\text{pH} = 3$ y se lo mantiene en agitación por un lapso no mayor a 5 minutos.
- Nuevamente el carbón lavado es filtrado manualmente con un tamiz de malla 20 y llevado a un tratamiento térmico en estufa a una temperatura de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 120 minutos,
- Se dejó reposar el carbón tratado por 20 minutos y se realizó una clasificación de tamaño en un vibro-tamiz.



Figura 14: Fotos del procedimiento de re-utilización del carbón activado

Luego del proceso de acondicionamiento del carbón, éste se encuentra nuevamente apto para su aplicación en otro proceso de oxidación, tanto para soluciones sintéticas de cianuro o en efluentes de cianuración.

2.1.3 ENSAYOS DE OXIDACIÓN CON AIRE, CARBÓN ACTIVADO Y SALES DE COBRE SOLUBLES.

Se sigue el procedimiento básico descrito en la sección 2.1.2, y se incluye además de la acción catalítica del carbón activado, la adición de soluciones de sales de cobre (CuSO_4 , CuCl_2 , $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$) al proceso de oxidación en concentraciones desde 50 a 150 mg Cu/L, al momento de iniciar el tratamiento. Se tomaron muestras para determinar la concentración cianuro libre hasta que se tuvo valores menores a 1mg/L de CN^- en la solución.

2.1.4 ENSAYOS DE OXIDACIÓN CON AIRE CARBÓN ACTIVADO IMPREGNADO Y REDUCIDO

2.1.4.1 Proceso general de impregnación de sales de cobre en la superficie del carbón activado

Inicialmente se realizó un pre-tratamiento al carbón activado lavado con agua destilada, y secado en estufa a 120 °C por 2 horas.

- Se preparó 100 ml de solución de la sal de cobre a impregnar, que contenga al menos (3000 mg/L Cu) a pH 4, el cual es inferior al pH de precipitación del cobre.
- En un recipiente se colocaron cantidades variables de carbón activado (50 -100 g) conjuntamente con la solución de la sal de cobre que se elaboro anteriormente.
- Se agitó por 1 hora y 400 rpm.
- Finalmente la mezcla se vierte en un recipiente de mayor superficie horizontal y se evaporó la solución a temperaturas entre 90 y 100 °C hasta la sequedad.

La concentración de cobre en el carbón activado se determinó al emplear espectrofotometría de absorción atómica, como se indica en la sección 2.1.1.2.

2.1.4.2 Reducción de las sales de cobre impregnadas en atmósfera reductora

Se utilizó el horno Nicolls piloto, que proporciona una atmosfera controlada, en condiciones reductoras $\lambda = 0,76$, en ausencia de oxígeno, el tiempo de residencia es de 2 horas a una temperatura de 600 °C, este equipo se muestra en la figura 15.



Figura 15: Horno Nicholls piloto utilizado para la reducción de las sales de cobre

2.1.4.3 Ensayos de oxidación del cianuro libre con carbón activado impregnado y carbón activado impregnado y reducido

Estos ensayos presentaron características muy semejantes al proceso que se describe en la sección 2.1.2, en la cual el catalizador de la oxidación fue el carbón activado sin tratamiento, mientras que en este caso se usó el carbón activado e impregnado con sales de cobre y posteriormente se lo realizó con carbón activado impregnado con sales de cobre y reducido.

2.1.5 ENSAYOS DE OXIDACIÓN DEL CIANURO LIBRE CON PULPAS DE ANDESITA, AIRE, CARBÓN ACTIVADO Y AGITACIÓN MECÁNICA

Este ensayo tuvo por finalidad evaluar el comportamiento de suspensiones de contenido de sólidos similar al de un efluente cianurado real, cuyo porcentaje de sólidos varía desde 10% hasta 30% en peso.

El ensayo se basa en el procedimiento descrito en la sección 2.1.2, en el que se trabajó con suspensiones de un mineral inerte como la andesita (ripió

común) molido hasta un $d_{80} = 75 \mu\text{m}$. En este ensayo se emplearon cantidades variables de carbón impregnado con nitrato de cobre $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ desde 80 hasta 150 g/L.

La introducción de sólidos en suspensión al proceso generó el incremento de la viscosidad de la pulpa razón por la cual se introdujo agitación mecánica, como se ilustra en la figura 16; de esta forma los sólidos que inicialmente decantaron por la falta de agitación, ahora se encontraban dispersos en la solución, de esta forma se logró mantener el carbón activado en movimiento dentro de la columna y mejorando la cinética de la oxidación.

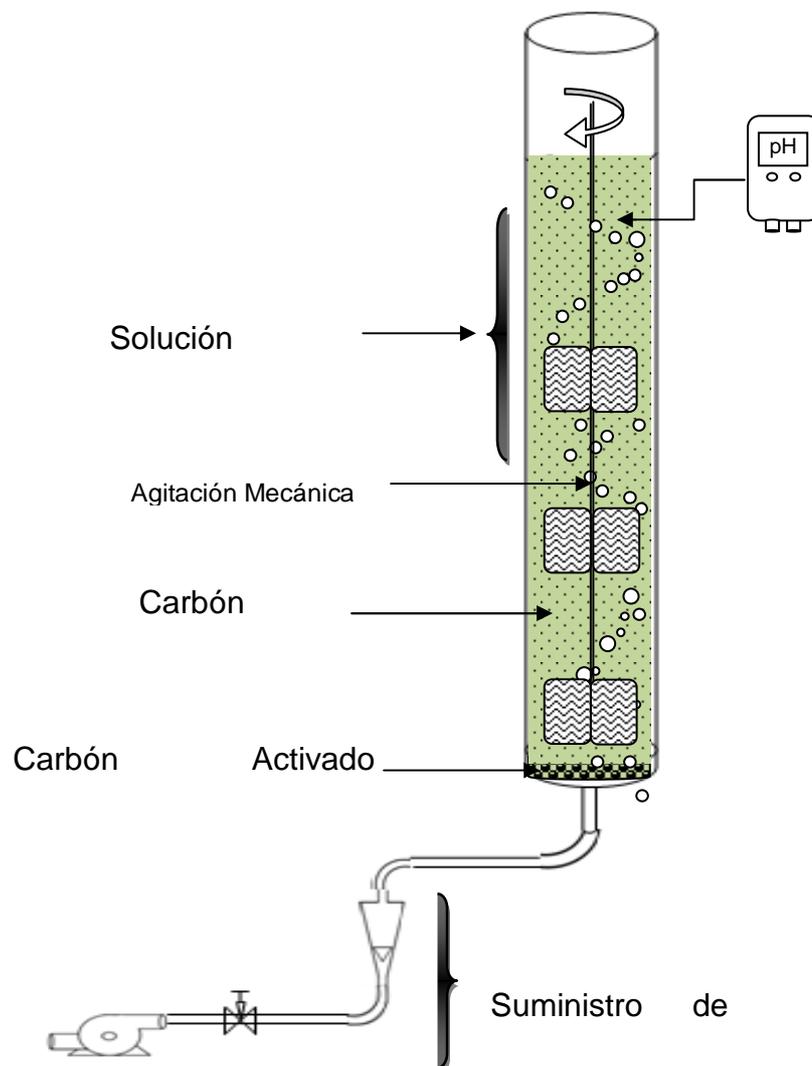


Figura 16: Agitación de soluciones con contenidos de sólidos entre 6 a 33%

Para determinar la concentración de cianuro libre, se tomaron muestras inicialmente cada minuto y se incrementa el tiempo con relación al avance de la remoción, hasta que se obtuvo valores menores a 1 mg/L de CN^- en la solución.

2.2 ENSAYOS CON PULPAS PROVENIENTES DE UN PROCESO DE CIANURACIÓN

2.2.1 OXIDACIÓN DEL CIANURO CON AGITACIÓN MECÁNICA EN EFLUENTES DEL PROCESO DE CIANURACIÓN – CARBÓN EN PULPA (CIP)

Los efluentes de cianuración obtenidos en laboratorio y los generados en una empresa minera son provenientes de la Mina Agro Industrial El Corazón. El mineral utilizado es un diseminado de cobre y metales preciosos, que posee un cuerpo mineralizado de 300000 toneladas, cuyo contenido de oro es 10 g/ton.

A continuación se resume las condiciones experimentales empleadas en el ensayo de cianuración desarrollado en laboratorio, hasta la obtención del efluente, el que fue tratado mediante aire y carbón activado impregnado con nitrato de cobre.

2.2.1.1 Condiciones experimentales del proceso de cianuración a nivel laboratorio

A nivel laboratorio se procede en las siguientes condiciones:

Molienda en molino de bolas

Cantidad de mineral:	1000 g
Volumen de agua:	600 ml
Porcentaje de sólidos:	62,5 %

Tiempo de molienda:	30	min.
Carga de bolas de acero:	10	Kg.

Condiciones de cianuración:

Cantidad de mineral:	2000	g
Volumen de pulpa:	4000	ml
Concentración de cianuro de sodio:	1	g/L
Porcentaje de sólidos:	33	%
Tiempo de operación:	24	h
pH:	10,5 – 11 (controlado con cal)	

Condiciones del CIP

Porcentaje de sólidos en pulpa:	33	%
Condiciones de carbón activado:	25g/L; 510 mg I ₂ /g CA.; 8x20 mallas	
Tiempo de operación:	4	h
pH:	10,5 (controlado con cal)	

Al final del proceso CIP, se tamizó la pulpa para retener el carbón que se agregó y que se encuentra cargado con oro. La pulpa libre de carbón representa el efluente de cianuración, que para nuestros propósitos será empleada en la oxidación del cianuro libre en columna.

2.2.1.2 Proceso de oxidación de efluentes de un proceso de cianuración – carbón en pulpa de laboratorio e industrial

Se emplearon soluciones reales de la industria minera del país para demostrar la aplicabilidad del proceso estudiado con soluciones sintéticas de cianuro de sodio. A continuación se indica el procedimiento general de los ensayos que se realizaron con estas pulpas.

Se siguió la metodología especificada en la sección 2.1.2, la oxidación se llevó a cabo con efluentes provenientes de la Industria Minera El Corazón (0,33 g/L NaCN), y efluente de cianuración de laboratorio (0,513 g/L NaCN), a los cuales

se los caracteriza mediante la determinación del contenido de cianuro libre y WAD, el contenido de sólidos, el pH de la solución y el contenido de metales como: Au, Ag, Cu, Fe, Zn y Ni que se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica.

2.2.2 ENSAYOS EN PROCESOS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA DEL EFLUENTE

Como paso final se desarrolló un tratamiento en continuo, al emplear un flujo variable de soluciones cianuradas y efluentes reales de cianuración alimentado al proceso, en el que, las columnas de carbón se encontraban dispuestas en serie o paralelo.

Esta aplicación del carbón activado en la eliminación de efluentes cianurados se lo realizó en columnas de menor tamaño de 5,5 x 18 cm como las que se ilustran en la figura 17.



Figura 17: Proceso de oxidación en continuo mediante la utilización de columnas empacadas de carbón activado impregnado

Se experimentó al realizar variaciones de carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, de superficie específica 570 $\text{mg I}_2/\text{g CA}$. y granulometría 0,8 – 2,3 mm. (Malla 8x20), desde 300 hasta 1100 gramos en tratamientos continuos. Se manipuló el caudal del efluente tratado, de tal forma que se pudo modificar los tiempos de residencia del líquido en contacto con el catalizador, ilustraciones del proceso en continuo y semi-continuo se encuentran en la figuras 17 y 18.

Se suministró agitación mecánica a razón de 400 rpm, al tanque de abastecimiento de la solución de tal forma que la concentración dentro de este, siempre fue la misma.

El empleo de aire fue necesario para mejorar la oxidación a razón de 120 N L/h. El pH de la solución se controló mediante la adición de una suspensión de cal, y se lo realizó únicamente en la solución antes de ser tratada, mas no después de su salida del proceso.

El estudio cinético de los procesos de oxidación se desarrolló en base a la teoría de la resistencia a la difusión de los poros, la cual se presentó en el Anexo V, conjuntamente con un ejemplo de cálculo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 OXIDACIÓN DE CIANURO LIBRE CN^- EN SOLUCIONES SINTÉTICAS

3.1.1 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO EN LA REMOCIÓN DE CIANURO

La influencia de la variación de la cantidad de carbón activado añadido al proceso de eliminación del CN^- en soluciones de NaCN , se muestra en la figura 18 y en las fichas técnicas 1 a 6, estos resultados se obtuvieron con base en el proceso descrito en el punto 2.1.2.

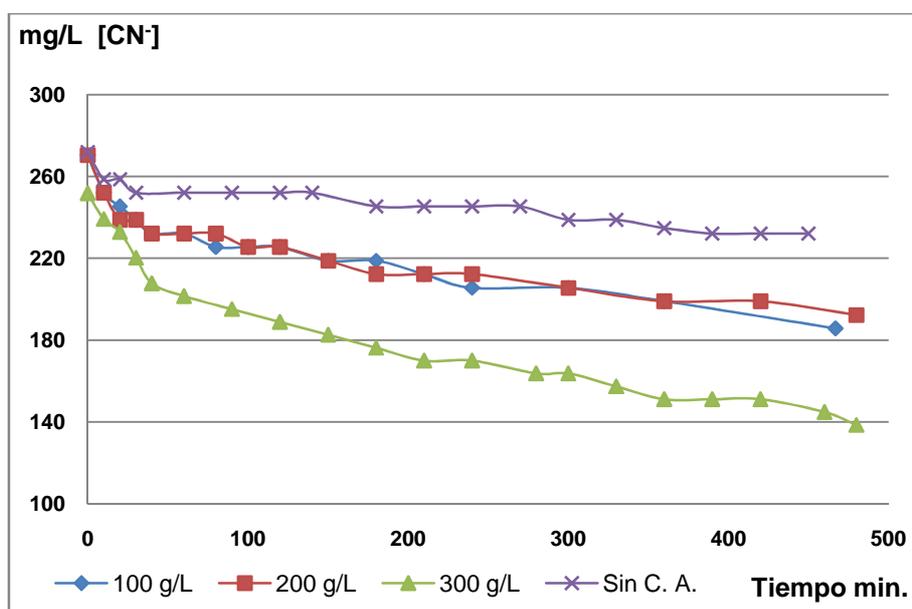


Figura 18: Influencia del carbón activado en la oxidación de cianuro libre.

Condiciones: pH = 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo
530 mg I_2 /g CA

Dash et al., 2009, señala que las reacciones de oxidación, son responsables de la mayor pérdida de cianuro de las soluciones acuosas a pH mayor a 10,5,

en estas, el cianuro es fácilmente oxidable a cianato o cianógeno, que son significativamente menos tóxicos que el gas cianhídrico "HCN".

Adams, indica que el tiempo que requiere la descomposición natural de un efluente de 20 mg/L CN^- de concentración inicial, es de 100 días, pero el proceso de remoción de 265 mg/L CN^- , empleó 1,5 g/L carbón activado en polvo y pH 10 logró eliminar el 50% en 8 horas. (Adams, 1994)

Las cinéticas de la remoción del ion cianuro, verifican la capacidad de mejorar la cinética del proceso mediante la adición de carbón activado, de esta forma se logró semejar los resultados obtenidos por Pilco, 2008, los cuales fueron presentados en la sección 1.2.3. Los resultados presentados en la figura 19, indican que mientras mayor es la cantidad empleada de carbón activado, mejor es la velocidad de remoción, hasta emplear 300 g/L con lo que se logra una reducción de 45% en la concentración de cianuro (Concentración final 138,5 mg/L CN^-) a pH 12. Esto da una idea que la aplicabilidad de los procesos de descontaminación de los efluentes cianurados de las industrias mineras.

El aumento de la concentración de carbón activado genera el incremento en la cinética de remoción de cianuro libre, observando una variación de la constante k_1 de 0,0233 (100 g CA/L) a 0,1002 h^{-1} (300 g CA/L), valores calculados en base a la reacción de la ecuación 18.

La cantidad de carbón activado añadido al proceso de oxidación y la presencia de oxígeno en la solución debido al burbujeo de este, representa una mayor pérdida de cianuro libre, que se aprecia en la figura 19. El incremento en la cantidad de carbón activado presenta una relación lineal con la adsorción de cianuro y por lo tanto en la disminución de la concentración de cianuro en la solución tratada.

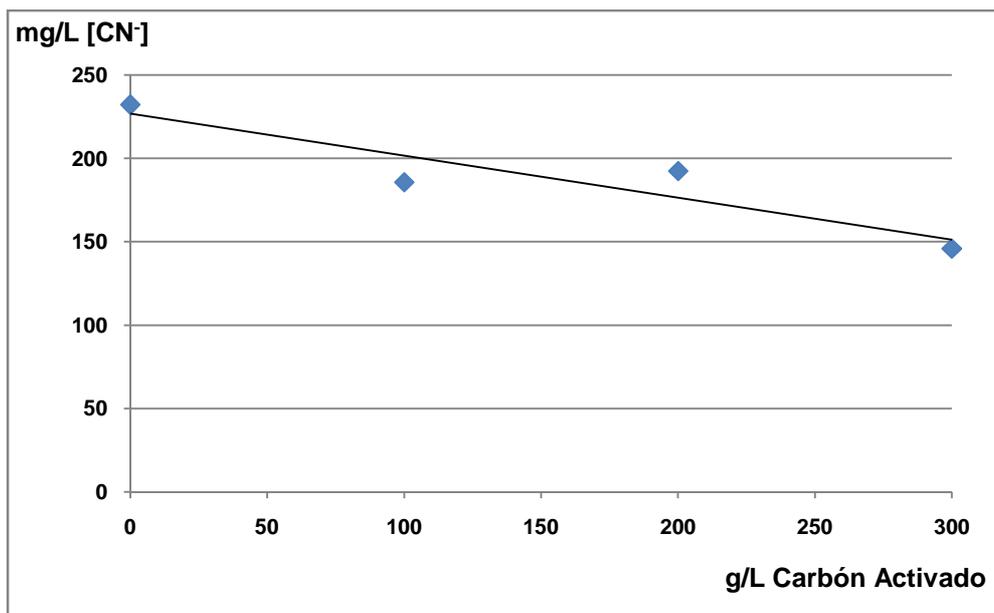


Figura 19: Influencia de la concentración de carbón activado en la oxidación de cianuro libre. *Condiciones:* pH = 12; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 mgI₂/g CA; Tiempo 480 min

La presencia de distintos niveles de oxígeno en la solución, representa una mayor pérdida de cianuro por efectos físicos, como se puede observar en la figura 19. La utilización de carbón y oxígeno en la solución mejora los resultados de pérdida del cianuro, el uso de 180 N L/h de aire por un lapso de tiempo de 8 horas reduce la concentración de cianuro en cerca de 15 % al tener inicialmente 265 mg/L CN⁻.

3.1.2 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DEL PH

El cambio de pH de la solución afecta en la estabilidad del cianuro como ion (CN⁻) ya que la disminución del pH genera una mayor pérdida del cianuro. Dash *et al.*, 2009, indica un aumento de la adsorción y/o oxidación del NaCN en presencia de carbón activado a pH por encima de 8. La remoción del cianuro al pH de trabajo, genera que la superficie del carbón activado granular sufra la de-protonación y provea grupos funcionales que pueden generar en un intercambio iónico con el ion cianuro.

Los resultados de los ensayos realizados emplean la metodología de la selección 2.1.2 y se presentan en la figura 20 y en las fichas técnicas 1a12.

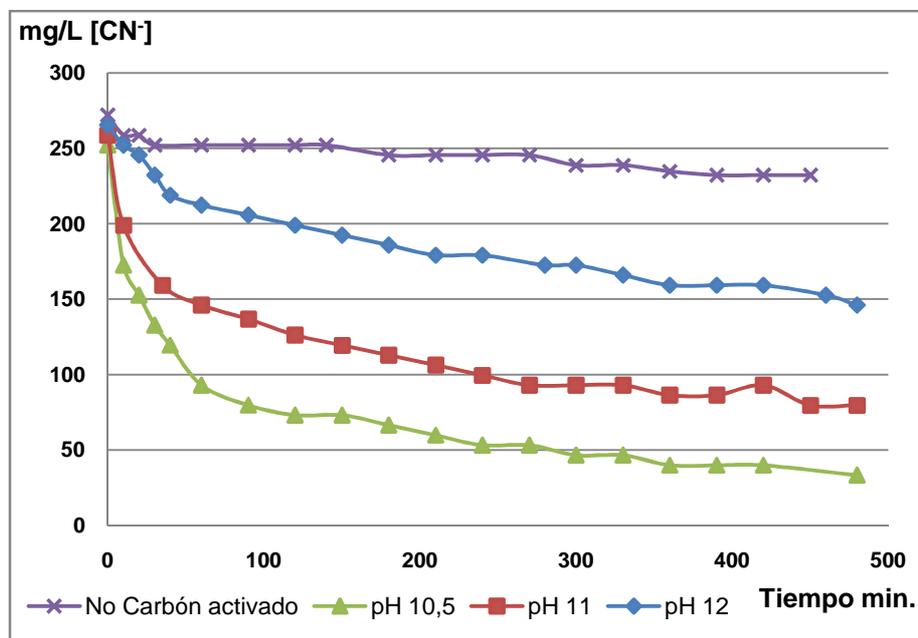


Figura 20: Influencia de la variación de pH de la solución en la oxidación de cianuro.

Condiciones: 300 g/L CA; Aire 140 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo

530 mg I₂/g CA

La influencia en la variación del pH genera según lo observado en la figura 21, una mejoría en las cinéticas de remoción, respecto a lo que se presentó en la figura 20, en la cual se trabajó sólo a pH 12.

El pH es un factor de significativa importancia como se indica en la Parte Teórica de esta investigación, y a la cual se le prestó mucho cuidado ya que se evita de esta forma la eliminación del ion cianuro de las soluciones por la volatilización, mediante la formación de gas cianhídrico.

La disminución del pH a 10,5 y la utilización de 300 g/L de carbón activado logra una concentración final de 30 mg/L CN⁻ en 8 horas de tratamiento, y que obtiene 88,6% de eliminación.

La tabla 10 resume la información presentada en los puntos 3.1.1 y 3.1.2, de la cual se obtiene una mejoría significativa en la remoción de cianuro libre.

Tabla 10: Resultados de los ensayos realizados con carbón activado virgen en pH 12, 11 y 10,5, en soluciones sintéticas de NaCN, Condiciones $[\text{CN}^-]_0=265 \text{ mg/L}$

Parámetros	Tiempo Min	$[\text{CN}^-]_f$ mg/L	Oxidación %
100 g/L CA virgen, pH= 12	480	185,70	31,37
200 g/L CA virgen, pH= 12	480	192,34	28,92
300 g/L CA virgen, pH= 12	480	138,49	45,00
300 g/L CA virgen, pH=11	480	79,59	69,20
300 g/L CA virgen, pH=10,5	480	30,20	88,61
200 g/L CA virgen, pH=10,5	450	53,60	80,49

Se observa una mejoría del 88,61% respecto al 45% que alcanza al trabajar con 300 g/L de carbón activado y para lo cual se efectuó la variación de pH 10,5 a pH 12. Entre ambos ensayos existe una diferencia de 108 mg/L CN^- , en la concentración final del contaminante en las soluciones sintéticas.

3.1.3 ADICIÓN DE COBRE COMO SALES SOLUBLES

Dentro de este estudio realizado con sales de cobre solubles se emplearon tres variaciones que son: CuSO_4 , CuCl_2 y $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, las cuales son solubles en agua y que fueron añadidas al proceso en solución de concentración variable

entre 50 y 150 mg/L. se mantienen las condiciones anteriormente probadas que son pH 10,5 y agitación por aireación.

La figura 21 ilustra la pérdida acelerada de cianuro libre al introducir las sales de cobre al proceso. La remoción es inicialmente muy rápida debido a la presencia de iones cobre que reaccionan con el cianuro de la solución para dar $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$, según lo indicado por Pérez e Higuera, 2008, en el punto 1.2.2. Los datos obtenidos en estos ensayos con base en el proceso descrito en la sección 2.1.3, se muestran en las fichas técnicas 13 a 27.

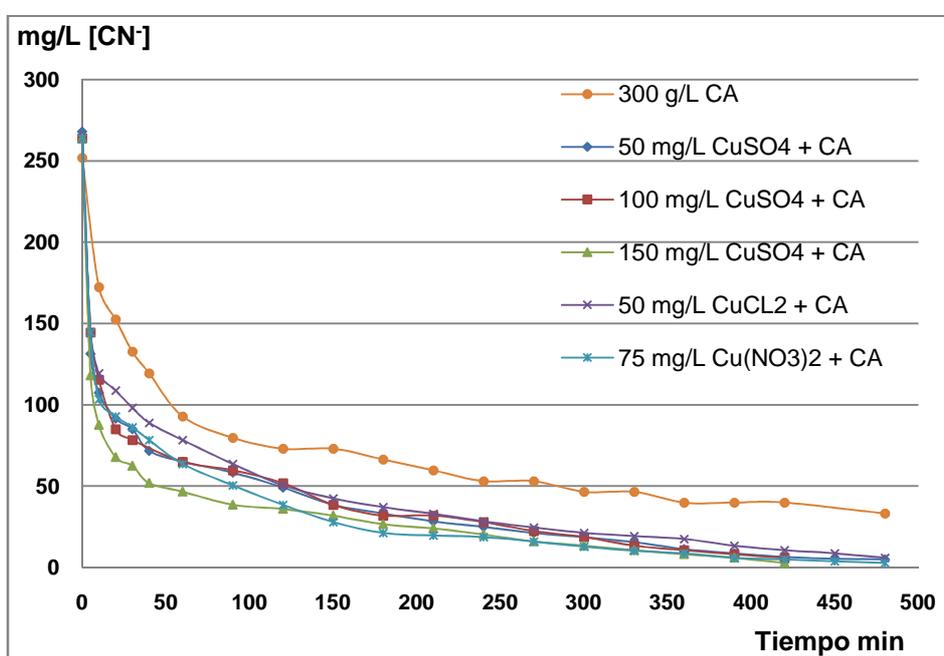


Figura 21: Influencia de la adición de sales de cobre a la oxidación del cianuro.

Condiciones: 300 g/L CA.; pH 10,5, Aire 180N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm, No. Iodo 550 mg I₂/g CA

Luego de la reacción inicial de complejación del cianuro, el proceso tiende a estabilizarse a una concentración menor a 100 mg/L CN⁻, de esta forma de reduce la velocidad de eliminación, esto ocurre en un lapso de tiempo comprendido entre los 20 y 40 min.

Deveci *et al.*, 2006, indica que la difusión de los reactivos hacia el interior de los poros del carbón impera en la acción catalítica de oxidación del CN^- , esto se da por la adsorción de los complejos cianurados de cobre en el carbón activado, razón por la cual la velocidad de remoción del cianuro complejado es menor en la etapas finales del proceso.

En la figura 22 se amplía la escala de los resultados presentados en la figura 21, de tal forma que se puede apreciar que los mejores resultados para los ensayos realizados empleando estas sales se da mediante la utilización del CuSO_4 , en una concentración de 150 mg/L, cantidad que dobla a la que requiere el $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ que es la siguiente cinética en remoción de cianuro libre.

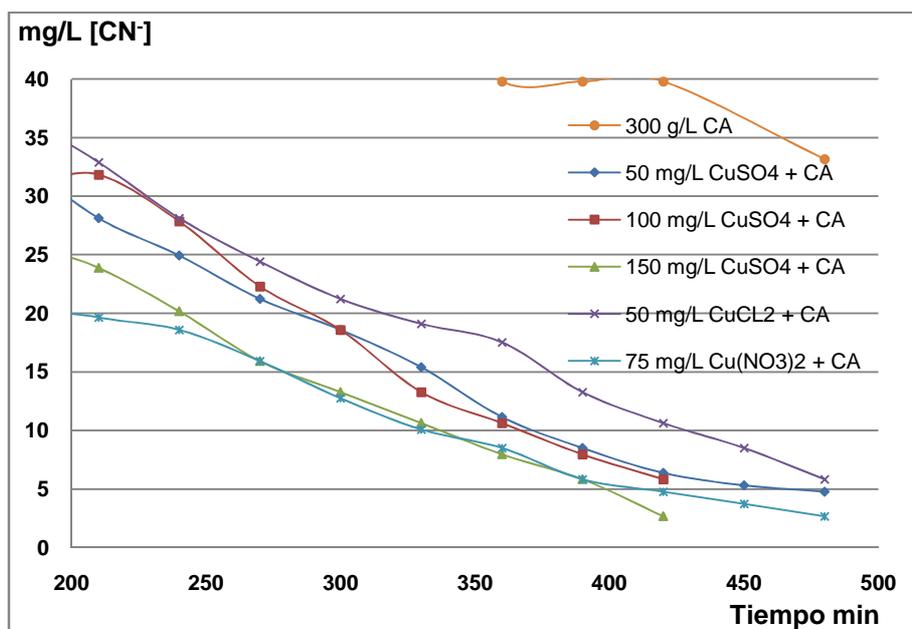


Figura 22: Figura 21 a escala ampliada. Influencia de la adición de sales de cobre a la oxidación del cianuro. *Condiciones:* 300 g/L CA.; pH 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm, No. Iodo 550 mg I₂/g CA

Todos los ensayos excepto el que empleo 150 mg/L CuSO_4 se llevaron a cabo en 480 minutos, los datos de concentración final y el porcentaje de remoción de cianuro libre, se presentan en la tabla 11, con la cual se puede discutir los resultados de una mejor forma.

Tabla 11: Resultados de los tratamientos realizados con sales de cobre solubles en soluciones sintéticas de NaCN, *Condiciones* $[\text{CN}^-]_0=265 \text{ mg/L}; 300 \text{ g/L CA}; \text{pH } 10,5$

Parámetros	Tiempo Min	$[\text{CN}^-]_f$ mg/L	Oxidación %
300 g/L CA virgen, pH=10,5, 150 mg/L CuSO_4	420	1,60	99,39
300 g/L CA virgen, pH=10,5, 100 mg/L CuSO_4	480	3,20	98,79
300 g/L CA virgen, pH=10,5, 50 mg/L CuSO_4	480	4,80	98,22
300 g/L CA virgen, pH=10,5, 50 mg/L CuCl_2	480	5,80	97,79
300 g/L CA virgen, pH=10,5, 75 mg/L $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	480	2,65	98,99

Se demuestra que la remoción de cianuro al emplear iones de cobre es efectiva, al alcanzar una concentración de menos de 5 mg/L CN^- en 480 minutos, lo que significa más del 98% de remoción de cianuro, respecto al 87% de remoción al emplear sólo 300 g/L de carbón activado.

Perez e Higuera, 2008 determinaron el efecto de la adición de sales de cobre en soluciones de cianuro de sodio, que obtiene la formación de complejos cianurados; se determinó que mayoritariamente cada átomo de cobre se une a dos moléculas de cianuro en las condiciones del ensayo. La superficie porosa del carbón proporciona un lugar para la formación de los complejos que posteriormente son adsorbidos por el mismo.

El ensayo que empleó 150 mg/L de CuSO_4 obtiene una concentración final del efluente de 1,6 mg/L CN^- pero al usar 75 mg/L de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ se obtiene 2,65 mg/L en un tiempo de 8 horas. Es importante mencionar que: la cantidad de cobre presente en 150 mg de CuSO_4 es de 59,74 mg y en 75 mg $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ es de 25,41 mg lo que da como resultado una proporción de 2,35 a 1, esta relación se refleja en las concentraciones alcanzadas al final de ambos ensayos, se demostró que la sal de nitrato de cobre posee un efecto similar a la sal de sulfato pero requiere sólo 42% de cobre.

Por esta razón se considera a la sal de nitrato de cobre como la de mejor desempeño en este ensayo de remoción de cianuro, que empleo tres sales de cobre solubles distintas.

3.1.4 CARBÓN IMPREGNADO CON SALES DE COBRE

3.1.4.1 Carbón impregnado con sulfato de cobre (1,7% Cu)

El proceso de impregnación de sales de cobre en la superficie del carbón activado se realiza con base en el procedimiento descrito en la sección 2.1.4.1, se empleó sulfato de cobre como agente impregnante y con el cual se logró una carga de 1,7 % de Cu en peso.

La selección de esta sal como primer agente impregnante se lo hizo en base a su amplia utilización en la industria y a los bajos costos que presenta, aunque en la sección anterior no fue la sal que presento los mejores resultados.

La adición de carbón impregnado con sulfato de cobre al proceso genera un aumento en la cinética de oxidación del cianuro, tal como se puede ver en las figuras 23 y 24 y las fichas técnicas 19 a 21 donde se aprecia que tanto el tiempo como la concentración final de cianuro en el efluente son menores a los casos anteriores, en donde el tiempo que toma el ensayo de remoción empieza a disminuir, como se apreciara mas adelante.

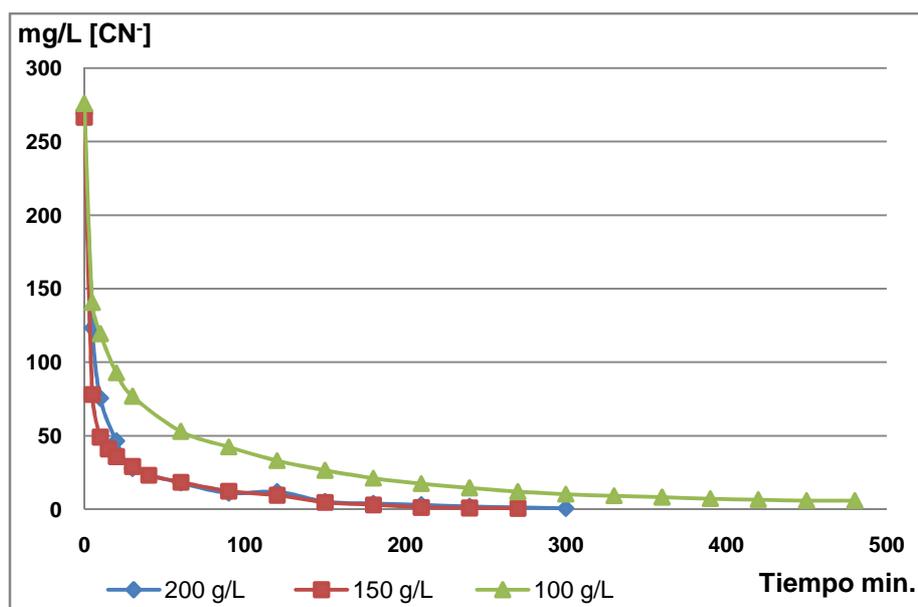


Figura 23: Influencia de la adición de cantidades variables de carbón impregnado con CuSO_4 . Condiciones: pH 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 mg I_2/g CA

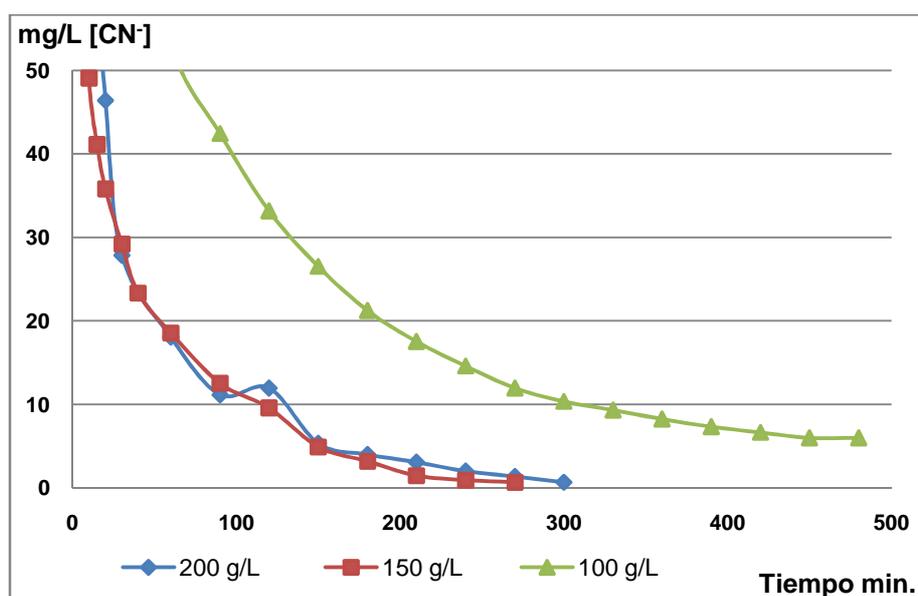


Figura 24: Figura 23 a escala ampliada. Influencia de la adición de cantidades variables de carbón impregnado con CuSO_4 . Condiciones: pH 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 mg I_2/g CA

La utilización de carbón impregnado con sulfato de cobre, permitió reducir la cantidad de carbón activado inicial necesario para alcanzar los mismos resultados anteriores, de esta forma se realizan ensayos con 200, 150 y 100

g/L, de carbón impregnado con CuSO_4 , dando como resultado una reducción de la cantidad del material y menores tiempos del proceso para alcanzar concentraciones menores a 1 mg/L de CN^- , concentración requerida en el Libro IV del TULAS, para descarga de efluentes en el sistema de alcantarillado.

El empleo de 150 g/L de carbón activado impregnado con CuSO_4 , alcanza una concentración de 0,7 mg/L CN^- (99,75% de remoción de cianuro), en un tiempo de 270 minutos, esto es una reducción del 50% de material empleado respecto al carbón activado sin tratamiento. Esta cinética de remoción presenta una k_1 de $0,5963 \text{ h}^{-1}$, mientras que la constante de velocidad al emplear 300 g/L carbón activado virgen es de $0,1002 \text{ h}^{-1}$, esto es alrededor 6 veces inferior.

3.1.4.2 Carbón impregnado con nitrato de cobre 2,05% Cu

Como complemento de la utilización de carbón activado impregnado con sales de cobre, se realiza el estudio con la sal de cobre que presento los mejores resultados al ser empleada en solución y añadida al proceso. El nitrato de cobre es ahora impregnado en la estructura del carbón activado y se verifica su influencia en los ensayos de remoción del cianuro.

Estos ensayos presentan similitud a los estudios realizados por León, 1996, en el que llega a la conclusión que el tamaño de las moléculas influye en la capacidad de impregnación en el carbón activado, siendo que la molécula de nitrato de cobre es menor que la de sulfato, el proceso de impregnación en la superficie del carbón activado con nitrato de cobre, logró cargar con 2,05 % de Cu en peso, con lo cual se mejora el proceso desarrollado con sulfato de cobre.

Los efectos de la adición del carbón impregnado con nitrato de cobre se observan en la figura 25, y en las fichas técnicas 22 y 23, y que mejora los resultados que se obtuvieron al emplear carbón impregnado con CuSO_4 .

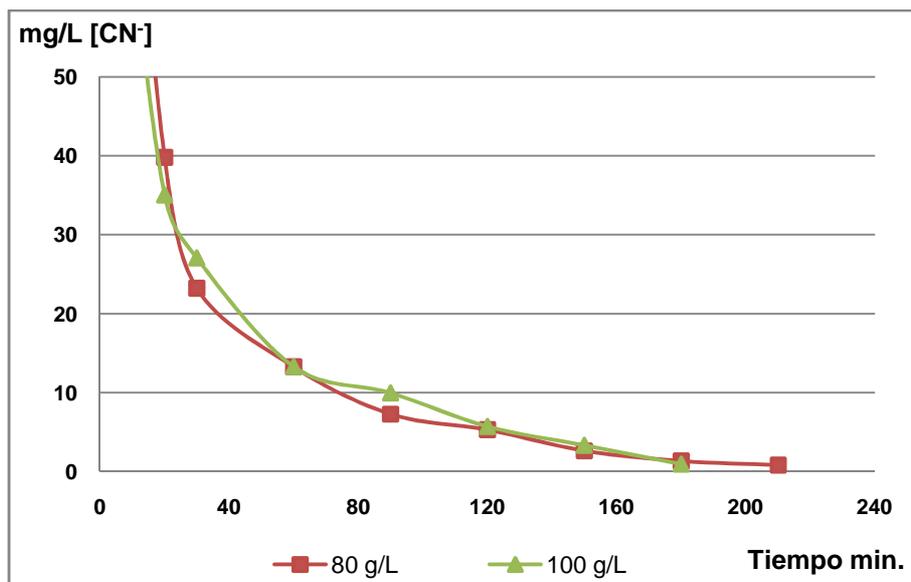


Figura 25: Influencia de la adición de cantidades variables de carbón impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$. *Condiciones:* pH 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550 $\text{mgI}_2/\text{g CA}$

Se llevaron a cabo ensayos con variaciones de la cantidad de carbón activado impregnado con nitrato de cobre de 80 y 100 g/L, empleado las mismas características de pH y aireación.

Los niveles de remoción de cianuro libre en soluciones sintéticas de concentración inicial 0,5 g/L NaCN, se redujo hasta emplear 80 g/L, lo que representa una reducción de 75% respecto a los ensayos iniciales donde se empleó 300 g/L de carbón activado sin tratamiento.

Dado que la cinética aumenta, respecto a los resultados observados al emplear carbón impregnado con sulfato de cobre, dato que se confirma ya que el proceso requiere menos tiempo (210 minutos) para alcanzar la contracción final de 0,8 mg/L CN^- o 99,7% de eliminación.

Se selecciona a la sal de nitrato de cobre como el agente imprégnate para los siguientes ensayos, ya que se observa una reducción del 50% en la cantidad de carbón impregnado empleado, respecto al carbón impregnado con sulfato de cobre.

La adsorción del ion cianuro en el carbón activado impregnado se da espontáneamente (Adams, 1990), con una capacidad de remoción de cianuro libre de 3,37 mg CN⁻/g carbón activado impregnado con Cu[NO₃]₂ en un tiempo de 210 minutos, mientras que la capacidad de remoción del carbón virgen es de 0,85 mg CN⁻/g CA en condiciones similares de pH y aireación.

En la tabla 12 se muestra el contenido de cobre que se impregna en el carbón activado. Estos resultados muestran que la sal de nitrato de cobre consigue 2,05% Cu respecto a 1,57% Cu obtenido con sulfato de cobre.

Tabla 12: Contenido de Cobre en el Carbón Activado al emplear CuSO₄ y Cu[NO₃]₂

	Cu mg/g CA	% peso
CuSO₄	15,72	1,57
Cu[NO₃]₂	20,46	2,05

Los resultados de los tratamientos de soluciones sintéticas con carbón activado impregnado con CuSO₄ y Cu[NO₃]₂ se presentan en la tabla 13, con lo cual se realiza un diagnostico de la sal que mejores resultados presenta.

Tabla 13: Resultados de los tratamientos realizados con carbón activado impregnado con CuSO₄ y Cu[NO₃]₂ en soluciones sintéticas de NaCN, Condiciones [CN⁻]_o=265 mg/L; pH 10,5

Parámetros	Tiempo Min	[CN⁻]_f mg/L	Oxidación %
150 g/L CA Imp. CuSO ₄ 1,7 % Cu	270	0,70	99,75
100 g/L CA Imp. CuSO ₄ 1,7 % Cu	480	6,00	97,84
80 g/L CA Imp. Cu(NO ₃) ₂ 2,05% Cu	210	0,80	99,69
100 g/L CA Imp. Cu(NO ₃) ₂ 2,05% Cu	150	0,90	99,66

Es importante mencionar que a partir de este punto se cumple con la normativa ambiental vigente sobre descarga de efluentes que requiere de 1 mg/L para los sistemas de alcantarillado y de 0,8 mg/L para fuentes de agua para animales.

3.1.4.3 Reciclos del carbón impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

La reutilización del carbón activado impregnado se considera de importancia económica para que el proceso sea aplicable; dada las características que posee este material de desorber las sustancias que atrapa, se realizan ensayos en los cuales se reutiliza hasta por 6 veces consecutivas, como se muestra en la figura 26 y en las fichas técnicas 24 a 28, dando valores de remoción de 96 % en el último de los ciclos, para posteriormente acondicionar el carbón según la metodología definida en la sección 2.1.2.6.

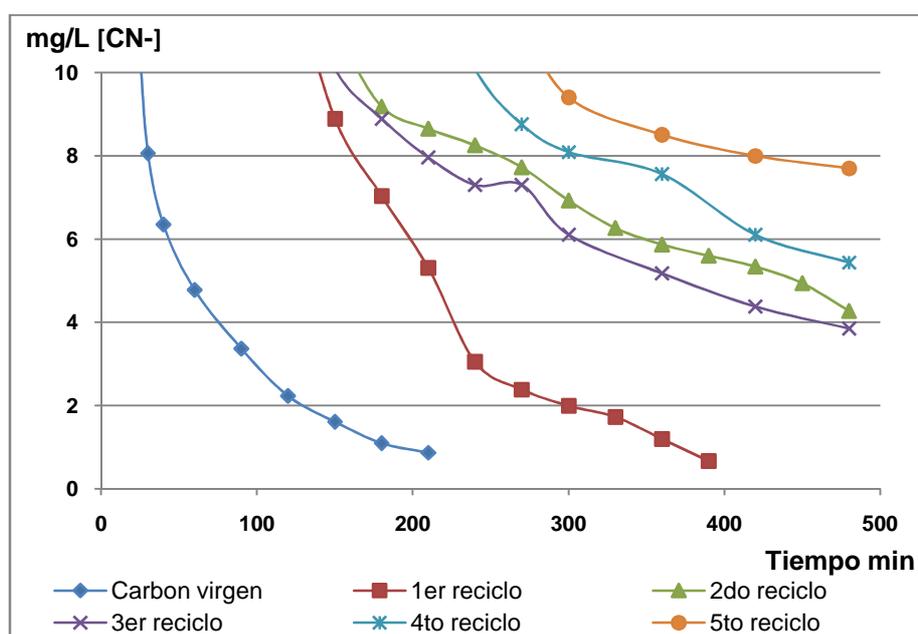


Figura 26: Reciclo de carbón activado impregnado *Condiciones:* 80 g CA imp./L; pH=10,5; Aire 190 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 570 mgI₂/g CA

Se aprecia claramente la diferencia entre la cinética de remoción de cianuro libre con carbón de primer uso respecto a los carbones reciclados. Esto se debe principalmente a la pérdida de cobre impregnado y adherido en la

superficie del carbón activado, y en una segunda instancia se debe a la disminución en la actividad de los sitios activos, por el taponamiento de los poros ya que el material ha adsorbido complejos cianurados ($\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Cu}(\text{CN})_3^-$), por largos periodos de tiempo.

Es necesario mencionar que entre cada uno de los ciclos, el carbón activado no es sometido a ningún proceso de reactivación o elución de las sustancias que se adsorbieron durante el ensayo, para determinar la capacidad de trabajo en procesos sucesivos.

Los resultados de los ensayos de reciclaje de carbón activado impregnado se presentan en la tabla 14, con la cual se puede dar un seguimiento de las cinéticas y las concentraciones finales de cianuro libre.

Tabla 14: Resultados de los tratamientos realizados con carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ en soluciones sintéticas de NaCN , Condiciones $[\text{CN}^-]_0=265 \text{ mg/L}$; pH 10,5

Parámetros	Tiempo Min	$[\text{CN}^-]_f$ mg/L	Oxidación %
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ 1 ^{er} uso	210	0,63	99,80
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ 2 ^{do} uso	390	0,70	99,75
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ 3 ^{er} uso	480	4,30	98,39
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ 4 ^{to} uso	480	3,80	98,56
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ 5 ^{to} uso	480	5,40	97,96
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ 6 ^{to} uso	480	7,70	97,10

Los resultados de la remoción de cianuro en los ciclos del carbón impregnado con nitrato de cobre presenta una concentración final al quinto ciclo de 7,7 mg/L CN^- en un tiempo de 480 minutos, demostrando todavía que tiene una mejor capacidad de trabajo que el carbón activado sin tratamiento que alcanza 130 mg/L CN^- empleando 300g/L y utilizando el mismo tiempo.

La disminución de la remoción del ion cianuro en cada uno de los ciclos consecutivos se puede explicar por la pérdida de sitios activos libres que posee el carbón activado, lo cual reduce significativamente su capacidad de promover esta reducción, además de la saturación de los poros por la adsorción de los complejos ciano cuprosos formados en la solución.

Otra de las razones por la que se reduce la cinética de remoción es por la pérdida de cobre de la superficie del carbón activado impregnado. Para determinar la cantidad de cobre que permanece en el sólido, se realizó el análisis de los carbones activados por absorción atómica, los cuales se presentan en la tabla 15.

Tabla 15: Pérdida de Cobre de la superficie del catalizador

	Cu mg/g CA	% Peso
1er reciclo	9,40	0,94
3to reciclo	5,90	0,59
5to reciclo	4,22	0,42

Después del primer uso, la cantidad de cobre disminuye en cerca de la mitad de su contenido inicial y se concluye que después del quinto reciclo, con cerca del 25% del contenido inicial de Cu, es necesario proporcionar un tratamiento para acondicionar el carbón y emplearlo nuevamente en otros procesos de descontaminación.

3.1.5 CARBÓN IMPREGNADO CON NITRATO DE COBRE Y REDUCIDO

Dada la solubilidad en agua que presenta la sal de cobre impregnada en el carbón activado, es necesario considerar un mecanismo para la disminución de la solubilidad del cobre y por lo tanto su permanencia en el sólido tras algunos ciclos; por esta razón, se estudia la modificación del carbón impregnado mediante la reducción de esta sal en una atmósfera reductora controlada, hasta obtener el cobre metálico Cu.

La figura 27 y las fichas técnicas 1 a 30 muestran la evolución de la remoción del cianuro en soluciones sintéticas; desde el tratamiento con carbón activado virgen, la adición de la sal de cobre de mejor desempeño ($\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$), el empleo de carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y por último, la modificación al reducir la sal de cobre en el carbón activado impregnado, de esta forma se presenta una mejoría en cada variación de la cinética de remoción del cianuro libre.

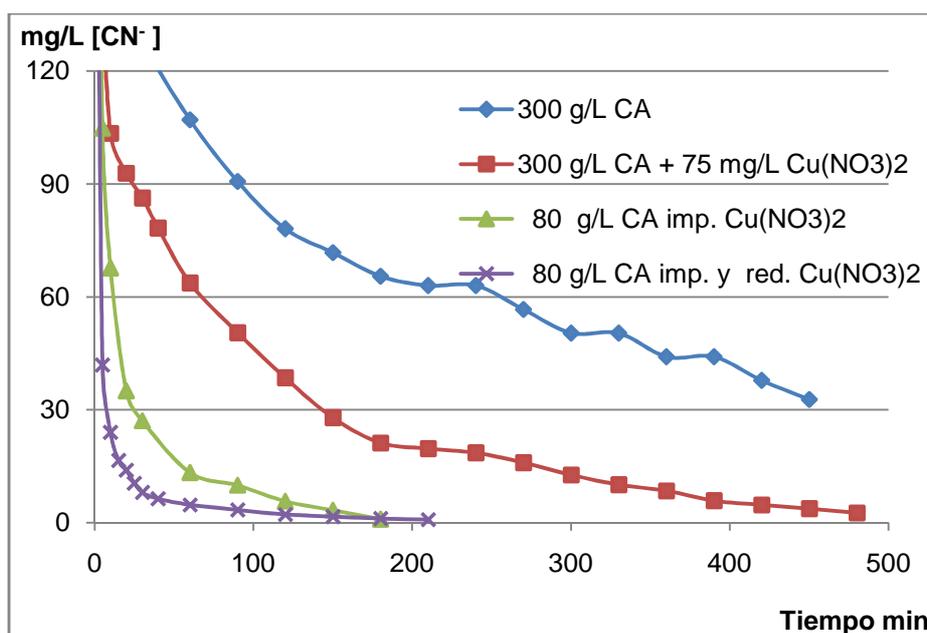


Figura 27: Influencia de la adición a una solución de $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ como sal soluble, impregnada en carbón activado (2,05% Cu) e impregnada y reducida. *Condiciones:* pH = 10,5; Aire 180 NL/h; Tamaño CA 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550mg I₂/g CA

La oxidación más rápida se obtiene al emplear 80 g/L de carbón activado impregnado con nitrato de cobre, con lo cual se alcanza una oxidación de 99,7% en un tiempo de 180 minutos, es decir menos de 0,8mg/L de CN^- , mejorando todos los ensayos hasta ahora realizados.

Sin embargo al emplear 80 g/L de carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y reducido, se alcanza una concentración final de 0,84 mg/L CN^- en un tiempo de 210 minutos, cinética que presenta otro secuencia de curva y que no se

encuentra lejos del tiempo y la concentración final obtenida por el carbón impregnado.

Los resultados de los análisis por difracción de rayos X, para el carbón activado impregnado y para carbón activado impregnado y reducido se indican en la tabla16.

Tabla16: Resultados obtenidos del análisis de difracción de rayos X, para muestras de carbón impregnado y carbón impregnado y reducido

Mineral	Formula	CA. impregnado y reducido Contenido (%)	CA. impregnado Contenido(%)
Carbón	C	80	89
Cuprita	CuO	10	--
Cobre	Cu	3	--
Cristobalita	SiO ₂	7	5
Gerhardtita	Cu ₂ (OH) ₃ NO ₃	--	6

Las características mineralógicas que presenta el carbón reducido indican que al someter la muestra a la atmósfera reductora y alta temperatura, se produjo la reducción del Cu(NO₃)₂ a CuO y Cu metálico, con una pequeña cantidad de carbón que es eliminada del material por efectos de la calcinación.

Debido a la disminución en la solubilización de los compuestos de cobre del material reducido, las cinéticas de eliminación del ion cianuro CN⁻ no se ven favorecidas en tiempos largos, como se muestra en la figura 27. Pero la secuencia en la cinética del carbón activado impregnado y reducido, muestra una mayor disminución en la concentración de cianuro hasta un tiempo menor a 150 minutos.

Las cinéticas que se desarrollaron al emplear sólo la sal de cobre ($\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$) y el Cu metálico en soluciones cianuradas de concentración 0,5 g/L NaCN, registran que el nitrato de cobre es más efectivo al tener cinéticas más rápidas que las que presenta solo el cobre metálico, es por esto que los ensayos realizados empleando carbón activado impregnado y reducido presenta cinéticas de remoción menores a las realizadas con carbón impregnado sin reducir.

La variación que ha experimentado la cinética del proceso se puede apreciar en la figura 28, la cual indica cuan efectivo es el empleo del carbón activado impregnado y reducido. Además se comprueba la sinergia que existe en la utilización de las dos fases de este catalizador que son el cobre metálico y el carbón activado, que de otra forma al ser utilizados por si solos no presentan mayores beneficios.

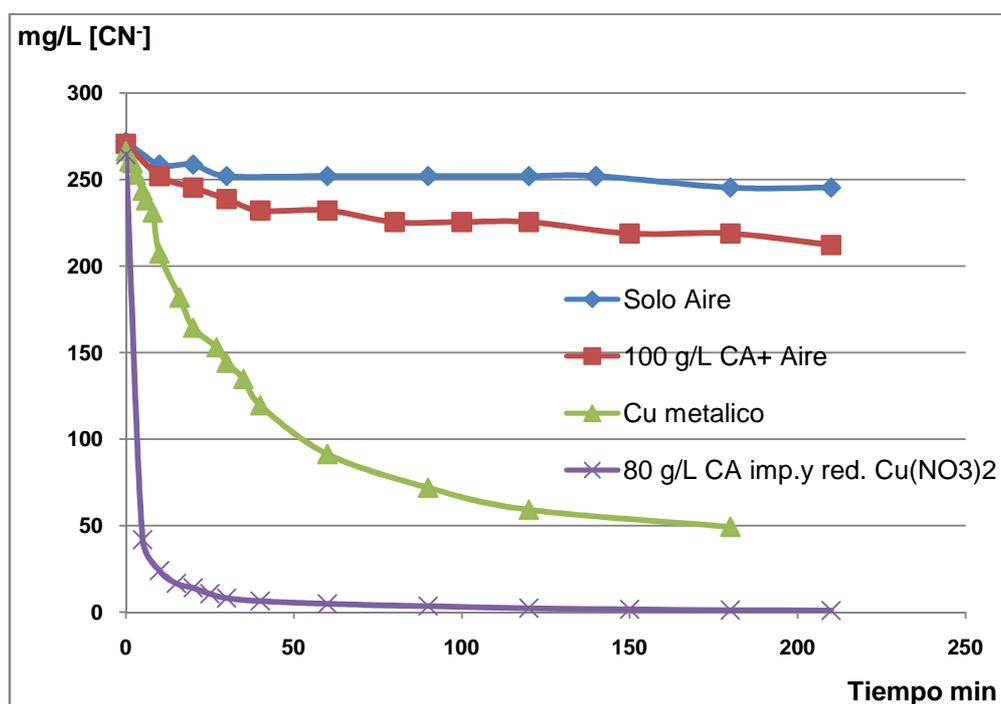


Figura 28: Variación de la cinética de remoción del ion cianuro a través del empleo de aire, CA virgen, cobre metálico y CA Impregnado-Reducido $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ (2,05% Cu),
 Condiciones: pH = 10,5, Aire 180 NL/h, tamaño 0,8x2,3 mm, No. Iodo 550–570 mgI_2/g

CA

- **Reciclos de carbón impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y reducido**

La reutilización del carbón activado impregnado y reducido se desarrolló por 5 veces, al igual a lo que se presentó en el punto 3.1.4.3 datos que se muestran en la figura 29 y en las fichas técnicas 30 a 34, alcanzando valores de remoción de 97% de CN^- , de esta forma se iguala el comportamiento de los reciclos de carbón activado impregnado.

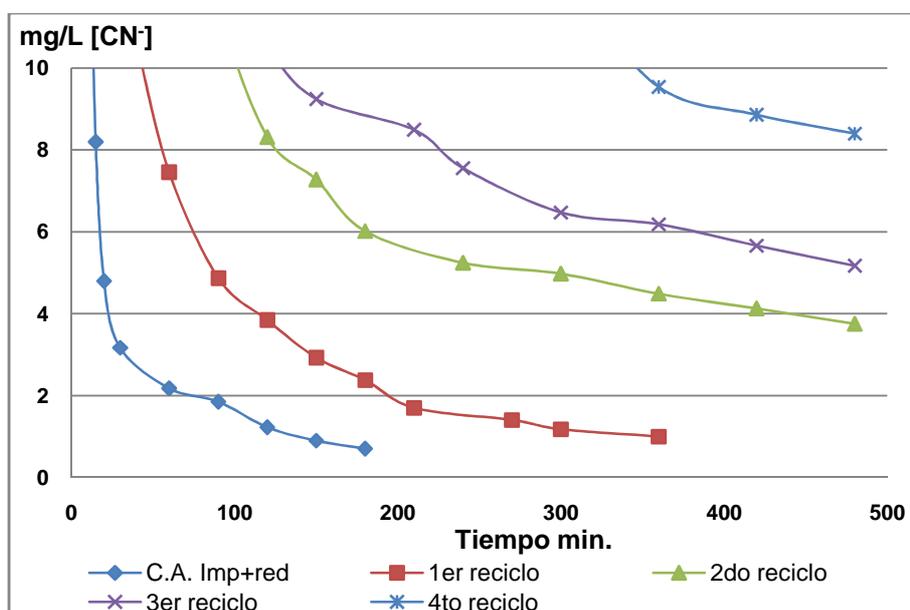


Figura 29: Reciclos de Carbón Activado impregnado y reducido. *Condiciones:* 80 g CA imp./L; pH=10,5; Aire 190 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 570 mg I_2 /g C.A

En comparación con los resultados gráficos presentados en la figura 27, existe una relación en el comportamiento de ambos reciclos, aunque las sustancias impregnadas en cada material sean distintas.

Los resultados de los reciclos con carbón activado impregnado y reducido se presentan en la tabla 17.

Tabla 17: Resultados de los tratamientos realizados al reutilizar carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y reducido en soluciones sintéticas de NaCN , Condiciones $[\text{CN}^-]_0=265 \text{ mg/L}$; $\text{pH } 10,5$

Parámetros	Tiempo Min	$[\text{CN}^-]_f$ mg/L	Oxidación %
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 1 ^{er} uso	210	0,84	99,68
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 2 ^{do} uso	480	0,83	99,67
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 3 ^{er} uso	480	3,75	98,59
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 4 ^{to} uso	480	5,17	97,98
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 5 ^{to} uso	480	8,41	96,74

La remoción de cianuro en los ciclos del carbón impregnado con nitrato de cobre reducido, presenta una concentración final al cuarto reciclo de 8,4 mg/L CN^- en un tiempo de 480 minutos, lo que muestra que tiene mejor capacidad de trabajo que el carbón activado virgen que alcanza 130 mg/L CN^- empleando 300 g/L utilizando el mismo tiempo de oxidación.

Después de los ciclos de carbón impregnado y reducido se analizó la cantidad de cobre que permanece impregnado en el material, los resultados se presentan en la tabla 18.

Tabla 18: Pérdida de Cobre de la superficie del catalizador reducido

	Cu mg/g CA	% Peso
1er reciclo	10,11	1,01
3er reciclo	9,16	0,916
5to reciclo	8,91	0,891

Al igual que el anterior punto se puede demostrar que el carbón requiere de un tratamiento de acondicionamiento para que pueda ser reutilizado en otro ciclo de procesos de oxidación. Es importante también observar que la cantidad de

cobre que permanece en el carbón activado impregnado y reducido, después del cuarto reciclo es de 0,89%, mayor a lo que posee el carbón activado impregnado sin reducir en su quinto reciclo con 0,42%, aunque la cinética del proceso no es proporcional a la cantidad de cobre ya que son formas distintas de cobre, las que se encuentran depositadas en cada carbón.

La figura 30 resume la información presentada para los ensayos más importantes, donde se puede percibir fácilmente la mejora en la cinética del proceso y la disminución en el material que se emplea en la remoción.

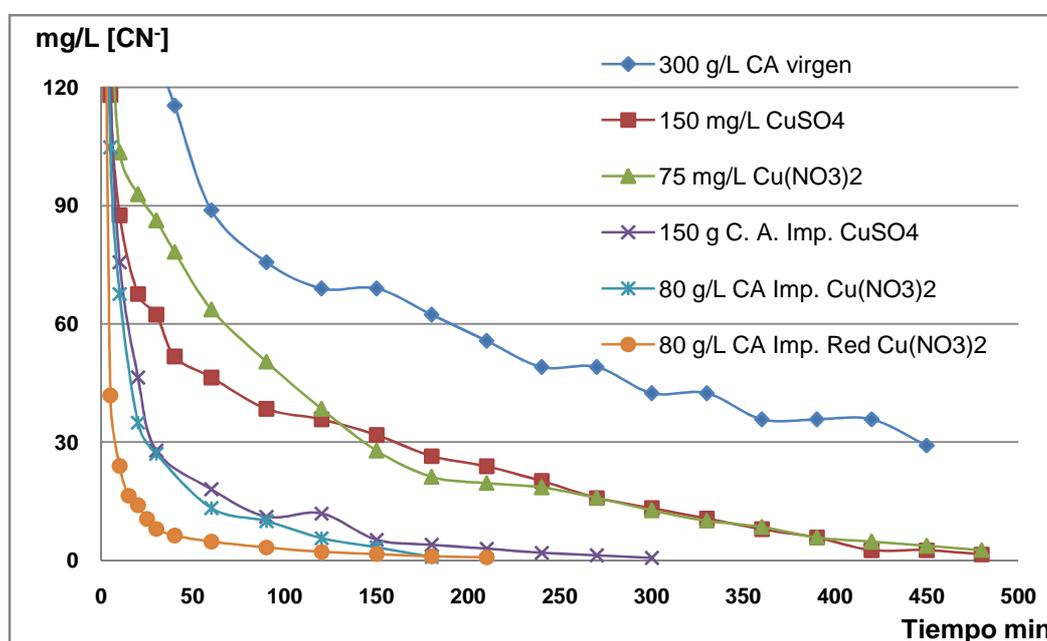


Figura 30: Influencia de la adición de cobre a la oxidación del cianuro. *Condiciones:* pH= 10,5; Aire 180 N L/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 550-570 mgI₂/g CA

La evolución que ha presentado esta investigación demuestra el desarrollo de un material capaz de promover la remoción del ion cianuro libre de las soluciones sintéticas, hasta alcanzar los límites permisibles de cianuro en un efluente.

En base a estos resultados, el proceso de remoción de cianuro se emplea para tratar soluciones provenientes de un proceso CIP de laboratorio y con efluentes de la industria minera, en donde se puede evidenciar si existe o no influencia

de iones disueltos en las soluciones y el alto contenido de sólidos que tienen las soluciones en las colas.

3.1.6 OXIDACIÓN DE CIANURO LIBRE CON PULPAS DE ANDESITA, AIRE, CARBÓN ACTIVADO

3.1.6.1 Variación de la cantidad de sólidos en la solución cianurada

El desarrollo de estos ensayos se lo hizo al seguir el procedimiento descrito en la sección 2.1.5 en donde se estudia la influencia de la adición de sólidos en las soluciones, de tal forma que aumente su viscosidad, este ensayo emplea 80 g/L de carbón activado impregnado.

Estas cinéticas de oxidación se presentan en la figura 31 y en las fichas técnicas 37 y 38, en las cuales se puede evidenciar la disminución en la capacidad de oxidación del cianuro, respecto a lo que se observó en los ensayos anteriores.

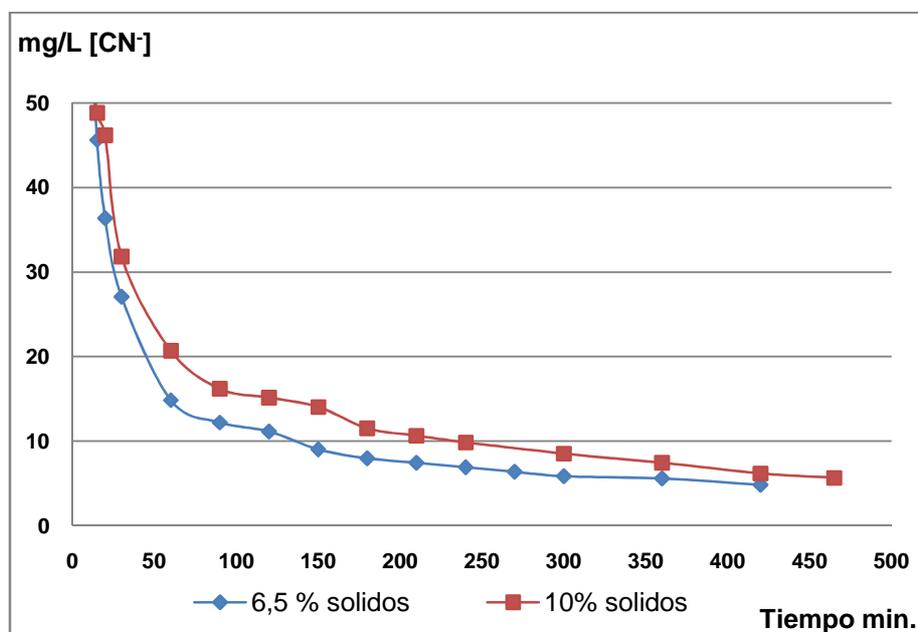


Figura 31: Influencia de la adición de sólidos en la oxidación de soluciones cianuradas. Condiciones: 80 g CA imp./L; pH=10,5; Aire 200 NL/h; Tamaño 0,8x2,3 mm; No. Iodo 570 mgI₂/g CA

Este ensayo se realizó para aproximar la naturaleza de los efluentes de los procesos de cianuración de las industrias mineras, en las que se trabaja con pulpas de 30% de sólidos. La adición de andesita (- # 200, -75 μm) en bajos porcentajes de 6,5 y 10% en la solución sintética cianurada, determinó ciertos inconvenientes, respecto al aumento de la viscosidad y la dificultad de agitación por aireación.

Se determina que la concentración final alcanzada es de 4,8 mg/L CN^- a las 7 y 8 horas, con 6,5 y 10 % de sólidos respectivamente. Esta pérdida en la capacidad de oxidación del cianuro se debió a la sedimentación de los sólidos de la pulpa, encapsulando al carbón activado en el fondo de la columna, y evita que pueda llevar a cabo tanto el intercambio iónico y la adsorción de los complejos ciano cuprosos.

3.1.6.2 Oxidación de cianuro libre con pulpa de 33% sólidos con agitación

Debido al aumento de la viscosidad de la solución de cianuro, se estudia la introducción al proceso de un mecanismo de agitación mecánica que homogenice la solución y que promueva que el carbón activado se distribuya uniformemente en la columna.

La agitación **en el** proceso de remoción de cianuro genera que el reactor asemeje al comportamiento de un CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor), de esta forma se lo que logra mejorar el contacto del carbón activado con la solución y evita la decantación de sólidos. Este proceso se muestra en **la** figura 32 y en la ficha técnica 39, en donde se puede observar la mejora de la cinética, respecto los ensayos con bajos contenidos de andesita pero sin agitación mecánica.

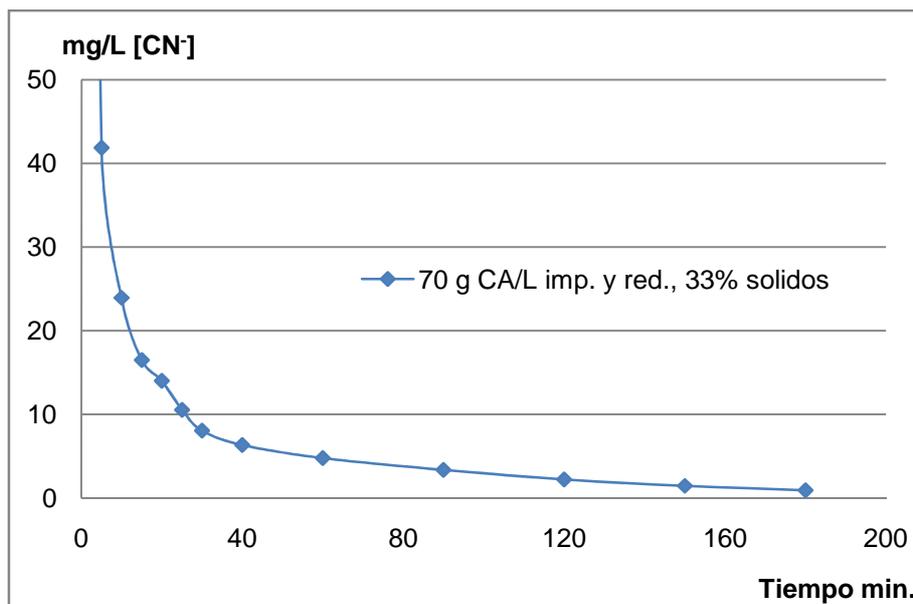


Figura 32: Oxidación del cianuro en solución al 33 % sólidos. *Condiciones:* 70 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$; pH=10,5; Aire 200 NL/h; 400 rpm

El proceso alcanza 0,93 mg/L CN^- en un tiempo de 180 min, y requiere 70 g/L de carbón activado impregnado. La introducción de la agitación genera el inconveniente de la ruptura o atrición del carbón activado, que contamina la solución con sólidos, este efecto inesperado necesitó de la clasificación del carbón activado mediante un tamiz de malla 20, al final del proceso para eliminar partículas muy finas y reponer el peso perdido para los siguientes ciclos.

La pérdida por atrición del carbón activado impregnado es 3,1 g por ensayo ($\approx 1,03$ g/L), que se incorporan a la solución en forma de sólidos suspendidos.

3.1.6.3 Oxidación de efluentes de cianuración de laboratorio

El proceso se desarrolló con una pulpa de 30% de sólidos preparada en laboratorio según el procedimiento descrito en la sección 2.2.1.2 y cuyas características se presentan en la tabla 19 y en la ficha técnica 59:

Tabla 19: Características del efluente del proceso carbón en pulpa de laboratorio

inicio del ensayo		fin del ensayo	
cianuro wad	1,412 g/L	cianuro wad	0,18 g/L
cianuro libre	272,48 mg/L	Cianuro libre	0,69 mg/L
Total	1684,48 mg/L	Total	180,7 mg/L

Se logra una remoción total de 89,27%, aunque la concentración de cianuro WAD es aun grande, alcanza una oxidación de 87,25% y la remoción de cianuro libre es de 99,75%, la figura 33 y la ficha técnica 42 presentan la oxidación del efluente de cianuración - CIP.

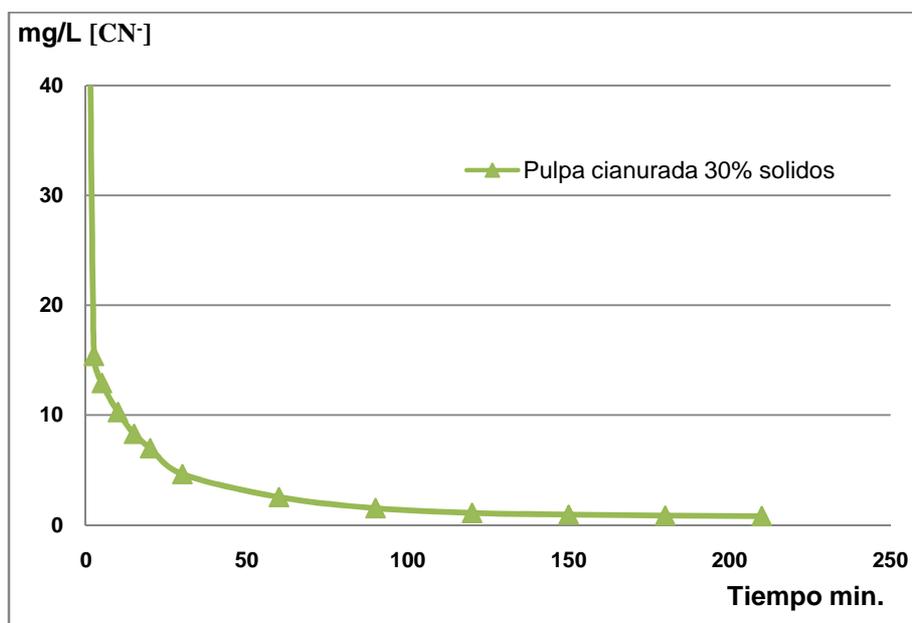


Figura 33: Oxidación del cianuro en efluentes de laboratorio. *Condiciones* 80 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$; pH=10,5; Aire 200 NL/h; 33 % sólidos; 400 rpm

Este tipo de solución con 30% de sólidos y gran contenido de complejos cianurados requiere un tiempo 210 min para la eliminación de cianuro libre, de esta forma existe un mayor tiempo de oxidación respecto a una pulpa no cianurada (180 min), esto se puede explicar por la presencia de complejos de cianuro que interfieren en la remoción.

3.2 OXIDACIÓN DEL CIANURO LIBRE EN SOLUCIONES DE LA INDUSTRIA

3.2.1 REMOCIÓN DE CIANURO LIBRE EN PROCESOS EN COLUMNA Y AL EMPLEAR CARBÓN ACTIVADO IMPREGNADO

El tratamiento de soluciones reales tomadas de la industria minera se basa en el método descrito en la sección 2.2.1.2. Este ensayo se desarrolla con el efluente obtenido de la mina Agro Industrial El Corazón que presenta las características descritas en la tabla 20 y en las fichas técnicas 60 y 61:

Tabla 20: Características del efluente de la Mina Agro Industrial Corazón, antes y después del tratamiento

inicio del ensayo		fin del ensayo	
cianuro wad	1,245 g/L	cianuro wad	0.143g/L
cianuro libre	177,81 mg/L	Cianuro libre	0,72 mg/L
Total	1422,81 mg/L	Total	143,72 mg/L

Continuación tabla 20

	%sólidos	pH	Au mg/L	Ag mg/L	Cu mg/L	Zn mg/L	Ni mg/L
Inicio	8,7	10,76	0,09	0,65	79,00	1,56	0,52
Final	9,0	10,37	<0,01	0,048	13,84	0,02	0,11

La cinética del tratamiento del efluente de cianuración requirió menos tiempo, ya que logró una oxidación de cianuro libre mas rápida que en ensayos anteriores, estos ensayos emplean agitación mecánica a 400 rpm, lo que favoreció un mejor contacto entre el carbón activado y la solución y un pH de 10,5. Los datos del ensayo se presenta en la figura 34.

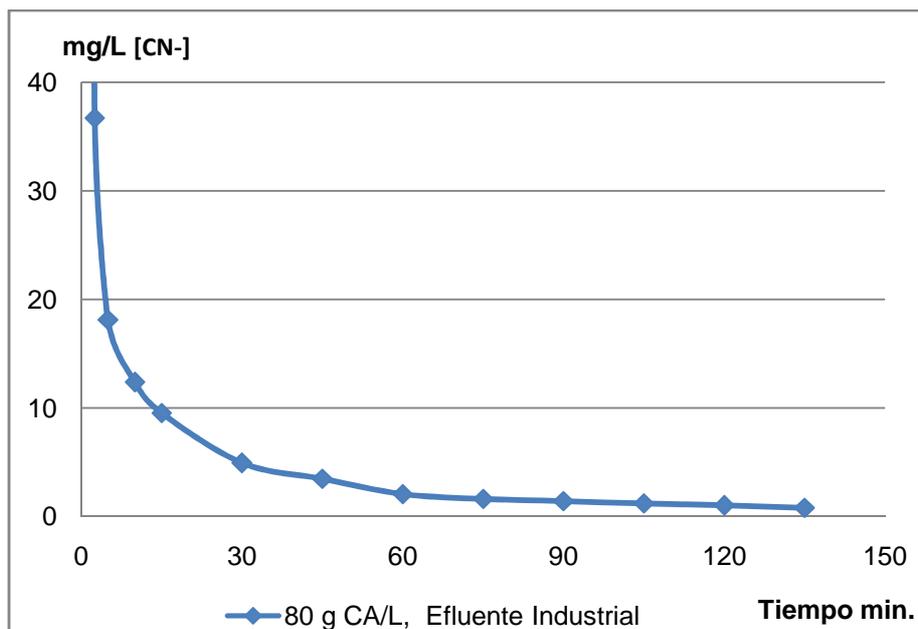


Figura 34: Oxidación del cianuro en efluentes industriales. *Condiciones* 80 g CA/L impregnado y reducido $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$; pH=10,5; Aire 200 N L/h; 400 rpm

Los resultados para este ensayo es una remoción de 99,6% de cianuro libre en 135 minutos, lo que corresponde a una concentración final de 0,72 mg/L CN^- . Esta cinética es la que ha requerido menor tiempo de todos los ensayos, esto se puede explicar porque, el contenido de cianuro libre inicial es mas bajo que los registrados en los procesos que se desarrollaron previamente (≈ 265 mg /L $[\text{CN}^-]$).

3.2.2 RECICLOS DE CARBÓN IMPREGNADO Y REDUCIDO EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES CIANURADOS MINEROS

En este punto se presenta los resultados del tratamiento del efluente de cianuración de la mina Agro Industrial El Corazón al reutilizar el carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y reducido.

Los datos de los tratamientos se presentan en la figura 35, la tabla 21 y en las fichas técnicas 47 a 54.

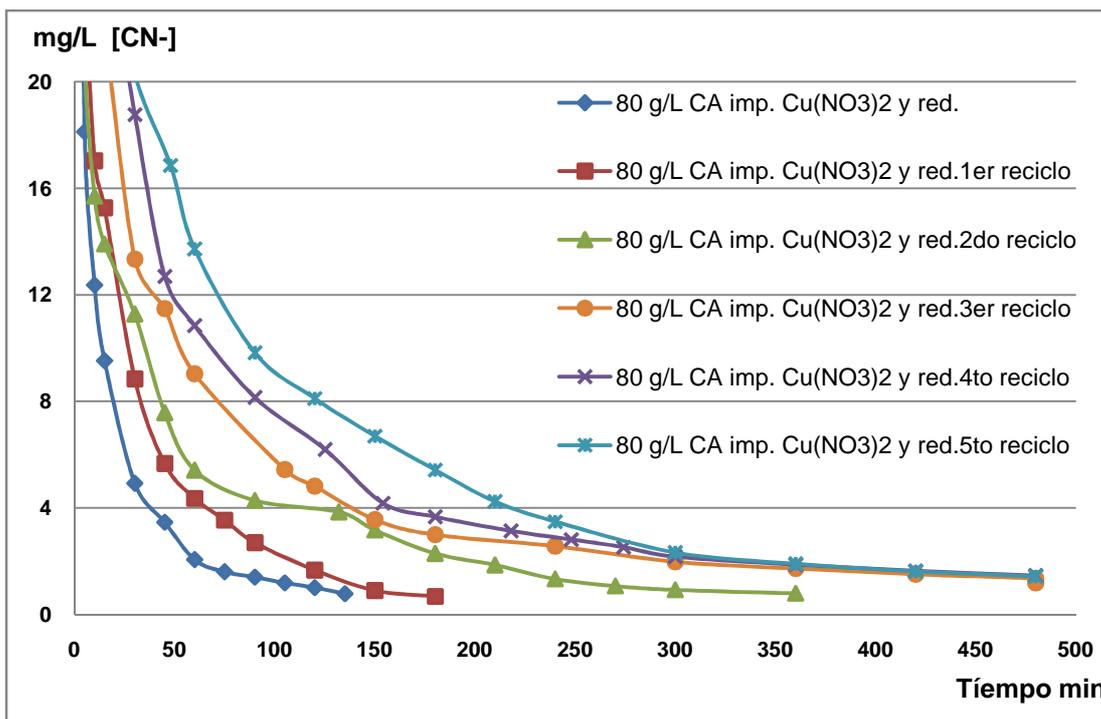


Figura 35: Oxidación del cianuro libre en efluentes industriales al reutilizar carbón activado impregnado y reducido. *Condiciones:* 80 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y reducido; $\text{pH}=10,5$; Aire 200 N L/h; 400 rpm

Tabla 21: Resultados de los tratamientos realizados al reutilizar carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y reducido en soluciones industriales, Condiciones $[\text{CN}^-]_0=177,81\text{mg/L}$; $\text{pH } 10,5$

Parámetros	Tiempo Min	$[\text{CN}^-]_f$ mg/L	Oxidación %
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 1 ^{er} uso	135	0,78	99,56
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 2 ^{do} uso	180	0,69	99,61
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 3 ^{er} uso	360	0,79	99,56
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 4 ^{to} uso	480	1,23	99,31
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 5 ^{to} uso	480	1,42	99,20
80 g/L CA imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ y red. 6 ^{to} uso	480	1,49	99,16

Como se puede apreciar el comportamiento de la cinética es similar a los procesos con soluciones sintéticas, pero tiene la diferencia de eliminar el cianuro de la solución real en un tiempo menor debido a la menor cantidad de cianuro libre presente.

Estos resultados muestran la gran capacidad de aplicación que tiene el carbón impregnado y reducido al tratar 9 litros del efluente en 11 horas, que de otra forma al emplear carbón activado sin tratamiento no lo podría realizar con esa cantidad de material ni mucho menos en ese tiempo.(3 litros de efluente en 8 horas)

3.2.3 OXIDACIÓN EN PROCESOS DE ALIMENTACIÓN CONTINÚA DE SOLUCIONES CIANURADAS

La remoción de cianuro libre en procesos de alimentación continua de efluentes se lo realizó en base a la metodología expuesta en la sección 2.3, en la cual se trabajo inicialmente en columnas empacadas con un lecho fijo de 15 cm, lo que corresponde a una carga de 270 g de carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$. Los ensayos se desarrollaron con y sin suministro de aire y los resultados se muestran en la figura 36 y en las fichas técnicas 43 a 46.

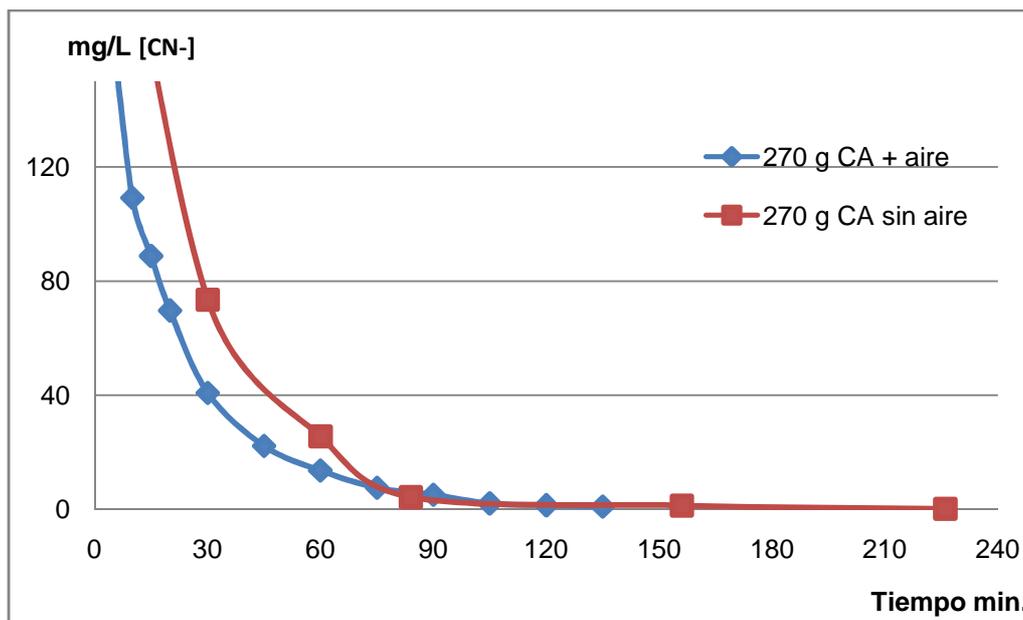


Figura 36: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando columna empacada con 270 g CA impregnado $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$, Condiciones: $\text{pH}=10,5$; $0,5$ g/L NaCN

La adición del aire favorece a la cinética del proceso, ya que disminuye el tiempo de tratamiento de 226 a 135 minutos, para un volumen de 3 L, la relación que se obtiene al utilizar 270 g de carbón activado en la columna indica que se emplea 90 g/L de solución tratada.

Con el desarrollo del proceso anterior se mejora el tratamiento al operar con mayor cantidad de carbón en un lecho empacado de mayor altura, del cual obtuvo los resultados que se muestran a continuación en la tabla 22.

Tabla 22: Resultados de la oxidación en proceso continuo en columna empacada con 1200 g de CA. Impregnado

Tiempo Min	Volumen L	NaCN mg/L	CN- mg/L	Flujo mL/min
30,3	3	0,86	0,46	99,0
34,7	3	1,41	0,75	86,5
44,6	3	1,86	0,99	67,3
68,0	2	1,85	0,98	29,4
185,1	3	0,38	0,2	16,2
Promedio final CN⁻			0,611	

Los resultados de la columna empacada con carbón activado impregnado, indican que esta trabaja los ciclos iniciales rápidos, con flujos de 100 mL/min, al continuar el tratamiento de otros 3 litros de solución cianurada, el caudal se debe reducir para generar un mayor tiempo de residencia en la columna, de esta forma se consigue el tratamiento de las soluciones alcance las concentraciones de cianuro requeridas. Es así que el último ciclo requirió para su tratamiento cerca de 185 min para tratar 3 litros de solución de cianuro de sodio 0,5 g/L, reduciendo el caudal hasta 16 ml/min.

El tratamiento por medio de la utilización de la alimentación en continuo de los efluentes cianurados a una columna empacada con suministro de aire es de 24,2 min/L, lo que demuestra una mejoría en el tiempo que requiere el proceso, respecto a los 30 minutos que demoraría si se trabaja con la columna de oxidación con agitación y con el empleo 80 g/L de carbón activado impregnado.

De lo anterior se puede decir que los procesos tanto con alimentación continua y en batch son semejantes por requerir tiempos de oxidación relativamente iguales y cantidades de carbón semejantes.

3.3 CINÉTICAS DE REMOCIÓN DE CIANURO

El estudio cinético de la oxidación del cianuro se lo realizó considerando la descomposición de cianuro en forma global con una cinética de primer orden (de la Torre *et al.*, 2008)

Se considera un solo poro cilíndrico de longitud L , con un reactivo A que se difunde hacia el interior del poro, los parámetros de las cinéticas de reacción se determinaron por el uso de regresión lineal de los gráficos de $\ln[\text{CN}^-]_t$ contra el tiempo de la oxidación, se obtiene una tendencia lineal a partir de las cuales se pueden obtener inicialmente la velocidad de reacción aparente, tanto para carbón activado granular, como para carbón pulverizado, los resultados de los análisis matemáticos y las cinéticas de oxidación se muestran en la tabla 23.

Tabla 23: Resultados de la cinética de primer orden para la oxidación catalizada del ion CN^-

Parámetros	Tiempo min.	CN^- mg/L	Oxidación %	k_1' h^{-1}	R^2
Solo aire 180 N L/h	480	242,46	15,61	--	--
Aire y agitación 400 rpm	480	186,39	29,90	--	--
100 g/L Carbón activado	480	185,70	31,30	0,0233	0,98
300 g/L CA pH=10,5	480	30,51	88,50	0,1138	0,96
150 g/L CA Imp. CuSO_4	480	1,59	99,40	0,1127	0,97
80 g/L CA Imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ sin agitación	180	0,75	99,73	0,3176	0,99
80 g/L CA Imp. Red. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ no agitado	180	0,69	99,75	0,2899	0,97
80 g/L CA Imp. Red. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ agitado 30% sólidos	210	0,87	99,67	0,3502	0,99
80 g/L CA Imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ solución cianurada 30% sólidos agitado	180	0,63	99,12	0,4073	0,96
80 g/L CA Imp. $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$ efluente industrial	135	0,88	99,50	0,6055	0,96

La introducción de la agitación en los procesos, significa un incremento en la velocidad de reacción como se puede ver en la tabla 24, es decir, existe mayor superficie de catalizador en contacto con la solución y por lo tanto disminuye los tiempos de tratamiento de los efluentes.

Tabla 24: Parámetros de la obtención de la cinética de primer orden para la oxidación del ion CN^-

Parámetros	k_1 h^{-1}	R^2	M_t	Eficiencia
80 g/L CA Imp. Cu $[\text{NO}_3]_2$ sin agitación	0,3176	0,99	5,422	0,451
80 g/L CA Imp. Red. Cu $[\text{NO}_3]_2$ no agitado	0,2899	0,97	5,747	0,431
80 g/L CA Imp. Red. Cu $[\text{NO}_3]_2$ agitado 30% sólidos	0,3502	0,993	5,086	0,474
80 g/L CA Imp. Cu $[\text{NO}_3]_2$ solución cianurada 30% sólidos agitado	0,4073	0,96	4,597	0,511
80 g/L CA Imp. Cu $[\text{NO}_3]_2$ efluente industrial	0,6055	0,96	3,421	0,623

El M_T para las reacciones de oxidación de CN^- para carbón activado impregnado con $\text{Cu}[\text{NO}_3]_2$, varían entre 3,42 y 5,75, estos valores representan según la figura 4, que la cinética de reacción esta limitada por la difusión interna de las sustancias dentro del carbón, haciendo necesario determinar la eficiencia de la reacción que se sitúa entre 0,43 y 0,62; y con los cuales se obtiene la cinética de reacción real para el proceso.

En la figura 37 se presenta un análisis gráfico de la cinética de oxidación del cianuro, empleando las coordenadas: $\text{Ln} [\text{CN}^-]$ vs. tiempo se puede observar inicialmente que la reacción no ajusta a una recta a altas concentraciones debido a la reacción de los iones de cobre con cianuro, razón por la cual la concentración disminuye rápidamente. Se ha considerado para la obtención de los parámetros de las cinéticas de reacción los registros de datos a partir de 25 min, que son los que ajustan al modelo de primer orden con altas correlaciones.

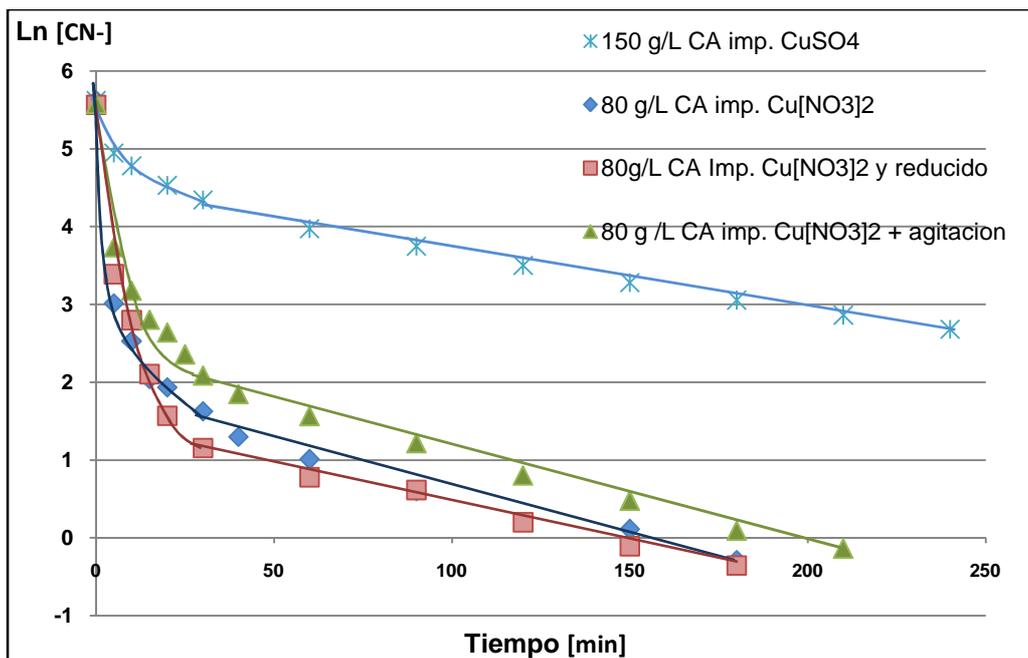


Figura 37: Logaritmo natural de $[CN^-]$ versus el tiempo de oxidación a diferentes condiciones de catalizador

La cinética de oxidación envuelve dos procesos: la reacción instantánea del cobre adsorbido en la superficie del CA y la oxidación y adsorción ejercida por la superficie catalítica del CA agregado al proceso.

Luego de reaccionar el cobre en solución la concentración de cianuro es baja respecto a la concentración inicial y la cinética ajusta a un modelo lineal, concluyéndose que la oxidación atiende a un proceso de primer orden.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

La capacidad de remoción del ion cianuro en solución con el uso de aire y carbón activado, se mejoró significativamente con la adición de iones cobre en solución o impregnados en la porosidad del carbón activado. La remoción del ion cianuro en soluciones sintéticas es de 99,8 % con aire y 80 g/L de carbón activado impregnado con $\text{Cu}[(\text{NO}_3)_2]$ o impregnado-reducido, mientras que sólo del 30% de remoción que se alcanza con aire y carbón activado, en 3 horas.

La velocidad específica de reacción (k_1) varió desde $0,0233 \text{ h}^{-1}$ con carbón activado, hasta $0,605 \text{ h}^{-1}$ con carbón impregnado y reducido en el tratamiento de efluentes industriales, esto demuestra la positiva influencia del ion cúprico y del cobre en la cinética de las reacciones de oxidación del ion cianuro, lo que mejoró la cinética en alrededor de 26 veces.

El tratamiento de un efluente de cianuración industrial presentó una remoción de 99,6% de cianuro libre y de 99,9 % de cianuro WAD en un tiempo total de 135 minutos y que empleó carbón impregnado con $\text{Cu}[(\text{NO}_3)_2]$ y reducido (CAM).

Ensayos realizados que emplearon carbón activado impregnado y reducido (CAM), determinan que la sal de cobre impregnada ($\text{Cu}[(\text{NO}_3)_2]$), se reduce hasta CuO y Cu metálico en la porosidad del carbón, lo que favoreció su reutilización y posible aplicación industrial.

La cinética de los procesos de remoción aquí desarrollados, se ajustaron con una alta correlación a modelos de primer orden cuyos parámetros (M_T y η) indican que la reacción está controlada por el proceso de difusión interna.

Se ha logrado disminuir el tiempo del proceso de remoción de 8 horas con el empleo de 300 g/L de carbón activado sin tratamiento a un proceso que requiere solamente 3 horas y 80 g/L de carbón impregnado con $\text{Cu}[(\text{NO}_3)]_2$.

El tratamiento de un efluente de cianuración presenta una remoción de 99,6% de cianuro libre y de 99,9 % de cianuro WAD en un tiempo total de 3 horas empleando carbón impregnado con $\text{Cu}[(\text{NO}_3)]_2$.

La aereación tiene un efecto importante sobre la remoción de cianuro, mejorando su capacidad en poco más de 20%, que logró que la solución se sature de oxígeno y que se generen especies oxidantes en la solución.

Se ha demostrado que la capacidad de reutilización del carbón activado puede llevarse a cabo por un número indefinido de veces proporcionando un tratamiento de reactivación al alcanzar 5 reciclos.

Los procesos de reutilización de carbón impregnado sometido a la reducción de la especie impregnada, indican que el proceso favorece en la disminución de la solubilidad del cobre impregnado en la superficie, pero también disminuye la cinética de oxidación al ser especies distintas.

La utilización de carbón granular en la remoción proporciona economía al proceso, ya que este puede ser recuperado y reutilizado, esto no se lo podría realizar de forma efectiva si se emplea carbón pulverizado.

Ensayos realizados con el empleo de carbón activado impregnado y reducido, determinan que la sal de cobre impregnada ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), se reduce hasta CuO y Cu metálico, sin embargo estos compuestos obtenidos no presentan mayores ventajas sobre la utilización de la sal impregnada, debido a que presentan solubilidades menores de cianuro, respecto a la sal inicial y por lo tanto la cinética del proceso disminuye ligeramente al emplear el carbón impregnado y reducido.

La introducción de diferentes porcentajes de andesita a la solución cianurada, influyen en la capacidad que tiene la pulpa en conservar el estado homogéneo, aumentando la viscosidad, este factor generó la introducción de la agitación mecánica como agente de homogenización, lo cual mejoró el contacto del catalizador con la pulpa y que logra mejores cinéticas de remoción.

4.2 RECOMENDACIONES

Llevar a cabo una siguiente investigación para la implementación del proceso a nivel piloto, de tal forma de determinar los parámetros más sensibles del proceso, al tomar como referencia los datos aquí presentados.

Elaborar un sistema de agitación mecánico o neumático que disminuya la atrición del carbón, de tal forma que la solución no se vea contaminada por la presencia de carbón.

Determinar otros mecanismos de impregnación que puedan ser más eficientes y que permita reducir la cantidad de catalizador que se agrega al proceso.

Realizar ensayos de impregnación de nitrato de cobre o cualquier otra sal de cobre, en la superficie de carbones activados con mayor índice de yodo a lo que se realizó en esta investigación, de esta forma se determinará la influencia de un material de superficie específica más grande.

Desarrollar sistemas de ayuda a pequeños mineros para el desarrollo de plantas piloto empleando esta tecnología y evaluar su comportamiento en la mitigación del problema ambiental generado por la contaminación de las fuentes de agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, M., 1990, "The Chemical Behavior 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*, 90 (2). 37.
- Adhoum, N. y Monser, L., 2002, "Removal of Cyanide from Aqueous Solution using Impregnated Activated Carbon", *Chemical Engineering and Processing*, 41 (1). 17.
- Chen, J. y Wang, X., 2000, "Removing copper, zinc, and lead ion by granular activated carbon in pretreated fixed-bed columns", *Separation and Purification Technology*, 19 (3), 157.
- Cho, E. y Pitt, C., 1979, "Kinetics and Thermodynamics of Silver Cyanide Adsorption on Activated Charcoal", *American Society for Metals and the Metallurgical Society of AIME*, 10 B,165.
- Cotruvo, J., Fawell, J., Giddings M., Jackson P., Magara Y. y Ohanian E., 2007, "Cyanide in Drinking-water". Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality (GDWQ)", Geneva , Suiza, pp 3-14.
- Dash, R., Balomajumder, C. y Kumar, A., 2009, "Removal of cyanide from water and wastewater using granular activated carbon" *Chemical Engineering Journal*, 146 (1), 408.
- Deveci, H., Yazici, E., Alp, I. y Ulsu, T., 2006, "Removal of Cyanide from Aqueous Solutions by Plain and Metal-Impregnated Granular Activated Carbons", *International Journal of Mineral Processing*, 79 (6).198.
- D'Ozario, R., Rakszawski, J. y Ridge, B., "Removal of Cyanide from Aqueous Streams", United States Patent, Pat. No. 5.015 396, Date of Patent May 1991.
- de la Torre, E. y Guevara, A., 1999, "Recirculación del Efluentes del Proceso de Cianuración–Cementación, purificados previamente con carbón activado", IX Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva, Sonora, México.

- de la Torre, E., Guevara, A. y Pilco, Y., 2008, "Alternative Methods for the Treatment of Cyanide Effluents by air and Activated Carbon", Hydroprocess, Santiago de Chile, Chile, pp 13-23.
- Fogler, S., Escalona, J. y Ramírez, J., 2001, "Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas", 3ra Edición, Editorial Prentice Hall, México, pp. 736-779.
- Gaviria, A. y Meza, L., 2006, "Análisis de Alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del Municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa Mineros Nacionales, Municipio de Marmato, Caldas", Revista de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. DYNA, 73 (149), 3.
- Gijzen, H., Bernal, E. y Ferrer, H., 2000, "Cyanide Toxicity and Cyanide Degradation in Anaerobic Wastewater treatment", Wat. Res. 34, (9), 2447
- Higuera, O., Trisancho, J y Flores, L., 2007, "Comportamiento Electroquímico del cobre en soluciones Cianuradas", Scientia Et Technica, Pereira, Colombia, 13 (36), 239.
- Kuhn, R., 1971, Process for Detoxification of Cyanide Containing Aqueous Solutions" US Pat No. 3.586 623.
- León, A., 1996, "Tratamiento de efluentes del proceso de Cianuración de Metales Auríferos en Base de Carbón Activado", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.
- Levenspiel, O., 2004, "Ingeniería de las Reacciones Químicas", 3ra Edición, Editorial Limusa, México, .pp 369-466
- Linares, N., 2008, "Manejo ambiental de residuos de cianuración de oro en el laboratorio metalúrgico de la Facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Jorge Basadre Grohmann". Proyecto de Titulación previo a la obtención de Maestro en Ciencias con Mención en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, Tacna, Perú.
- Lu, J., Dreisinger, D. y Cooper W., 2002, "Thermodynamics of the aqueous copper – cyanide system", Hydrometallurgy, 66 (2), 23.

- Marron, S. y Prutton, C. 1996 "Fundamentos de Fisicoquímica"; Editorial Limusa SA, México, pp 356-379
- Marsden, J. y House, C., 2006, "The Chemistry of Gold Extraction", 2da Edición, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, USA, pp. 220-350.
- Marsh, H. y Rodríguez, F., 2006, "Activated Carbon", Elsevier, Londres, Reino Unido, pp. 444-447
- Misra, M., Priyadarshan, G., y Kumar, B., 2003, "Cyanide Detoxification Process", US Pat. No. 6 551 514.
- Moran, R., 1998, "Cyanide Uncertainties Observations on the Chemistry, Toxicity, and Analysis of Cyanide in Mining-Related Waters" Mineral Policy Center Protecting Communities and the Environment
- Nava, F., Elorza, E., Uribe, A. y Pérez, R., 2007, "Análisis Químico de Cianuro en el proceso de Cianuración: Revisión de los Principales Métodos", Revista de Metalurgia, 43 (1).59.
- Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes: Recurso Agua., Texto Unificado de Legislación Ambiental (TULAS), Libro VI, 2002, pp 295-328
- Pérez, J. e Higuera, O., 2008, "Análisis Termodinámico de Especies Cianuradas de Oro, Plata y Cobre sometidas a cementación con Zinc y Aluminio", Scientia et Technica, 14 (38), 155.
- Pilco, Y., 2008, "Estudio de la Oxidación de Efluente Cianurados en Presencia de Aire y Carbón Activado", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.
- Rodríguez, F. y Molina, M., 2002 "El Carbón Activado en procesos de descontaminación", pp163-168. [http://www.estrucplan.com.ar/Produccion es/ entrega.asp?IdEntrega=791](http://www.estrucplan.com.ar/Produccion%20es/entrega.asp?IdEntrega=791), (Enero, 2009).
- Rojas, N. y Bustamante, O., 2007, "Disolución del Cobre en Cianuración Convencional proveniente de Ferrita Cúprica", Revista de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. DYNA, 74, (152), 151.
- Romero, R., 1997, "Detoxificación de Efluentes de cianuración mediante carbón activado granular". Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.

- Roshan, R., Balomajumder, C. y Kumar, A., 2008, "Removal of Cyanide from Water and Wastewater using Granular Activated Carbon", Chemical Engineering Journal, 146 (1), 408.
- Smith, J., 1991, "Ingeniería de Cinética Química", 6ta edición, Editorial Mc Graw Hill, Mexico, pp 385 -595.
- Smith, A. y Mudder, T., 1991, "Chemistry and treatment of Cyanidation Wastes", Editorial Mining Journal Books, Londres, Reino Unido, pp 60, 201-202.
- Solis, J., May, P. y Hefter, G., 1996, "Enthalpies and entropies of cyanide complexation of Cu', Ag', Zn and Cd", J. Chem. SOC., Faraday Trans., 92, (4), 641.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. y Stensel, H., "Wastewater Engineering Treatment and Reuse""", 4ta edition, Editorial Mc Graw Hill, 2003, pp 3 – 33.
- Tiwari, D., Kim, H., Choi, B., Lee, S., Kwon, O., Choi, K., y Yang J., 2007, "Ferrate(VI): A green chemical for the oxidation of cyanide in aqueous waste solutions", Journal of Environmental Science and Health Part A (42), 803.
- Tozzi, E., 2005, "Aguas Industriales", <http://www.elprisma.com/apuntes/-ingenieriaquimica/aguasindustriales/default.asp> (Noviembre, 2008)
- Young, A. y Jordan, T., 1995, "Cyanide Remediation: Current and Past Technologies C.A.", 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research, pp 104-106
- Yan, T., 1993, "Removal of Cyanide from Water", World Intellectual Property Organization, WO 04984.

ANEXO I

4.3 DETERMINACIÓN DEL CIANURO LIBRE

4.3.1 PROCEDIMIENTO

Se prepara una solución estándar de nitrato de plata (AgNO_3) disolviendo 4,33 g de AgNO_3 en agua destilada y completando a un litro. Se toma una alícuota de la solución de cianuro, generalmente 25 ml. se titula utilizando la solución estándar de nitrato de plata. El punto de final de titulación está indicado por la formación de una opacidad marcada que enturbia el brillo y transparencia original de la solución, es preciso trabajar contra un fondo oscuro.

En ciertas ocasiones debido a la inexistencia de una total transparencia de la solución, es difícil detectar el punto de viraje. En este caso se utilizan 2 a 3 gotas de yoduro de potasio al 10% como indicador. Aquí el punto de viraje se produce con el apareamiento de un precipitado amarillo debido a la formación de yoduro de plata.

4.3.2 CÁLCULOS

La reacción que se produce en la titulación es:



169,87 g 98 g 4,33 g 2,5 g

(1000 ml)

1 ml 0,0025 g (0,0025 g / 25 ml = 0,1 g/L)

La estequiometría de la reacción anterior, indica que 169,87 g de AgNO_3 consumen 98 g de NaCN . Para 1 litro (1000 ml) de solución de AgNO_3 donde existen 4,33 g de AgNO_3 que reaccionarán con 2,5 g de NaCN , por tanto se tiene que: 1 ml de solución titulante consumirá 0,0025 g de NaCN , cada mililitro

de solución de nitrato de plata consumido equivale a una concentración de 0,1 g de NaCN/L.

Ejemplo: para una alícuota de 25 ml de solución de NaCN cuya concentración se quiere determinar, se consumen 3,2 ml de solución de nitrato de plata en la titulación, entonces se tiene:

$$[\text{NaCN}] = 3,2 \text{ (ml de solución titulante)} * 0,1 \text{ (gr NaCN/L)} / 1 \text{ (ml de solución titulante)}$$

$$[\text{NaCN}] = 0,32 \text{ (g NaCN/L)}$$

La solución de cianuro contiene 0,32 g NaCN/L. Es decir, cuando se toma una alícuota de 25 ml de muestra, la concentración de cianuro libre resultante es igual a la cantidad de nitrato de plata empleada en la titulación dividida para un factor igual a 10, así en el ejemplo anterior se tiene que se consumen 3.2 ml de solución de nitrato de plata, que dividido para 10 da 0,32 que es la cantidad de cianuro libre presente en la muestra.

Si se toman distintas cantidades de muestra, cuya concentración de cianuro libre se quiere determinar, se deberá dividir para un factor diferente, en cada caso, el gasto de nitrato de plata para obtener directamente el valor de concentración de cianuro libre.

A continuación se presentan algunos factores para facilitar el cálculo:

Cantidad de muestra tomada (ml)	Factor de división
100	40
25	10
10	4
5	2

En los ensayos de oxidación de cianuro que se realizan a nivel de laboratorio, generalmente se toma una alícuota de 10 ml de muestra, por tanto el factor de división será igual a 4.

ANEXO II

4.4 CALIBRACIÓN DEL ELECTRODO ESPECÍFICO DE CIANURO

4.4.1 PROCEDIMIENTO

Se prepara una solución estándar de cianuro de sodio disolviendo 1 g de NaCN en agua destilada y aforando a un litro, es importante que la solución posea un pH alcalino, lo que se consigue mediante la adición de pocos mililitros de una solución 2 N de NaOH hasta un valor de 10,5 a 11, que se medirá con un pHmetro.

Se toma una alícuota de 10 ml de la solución anterior y se afora a un volumen de 100 ml, nuevamente controlando que el pH se encuentre entre 10,5 a 11 por la adición de la solución de NaOH. Esta solución tendrá una concentración de 100 mg/L de NaCN.

Semejante al punto anterior se realizan soluciones estándares de 10, 1 y 0,1 mg/L NaCN. El electrodo de cianuro se calibra mediante la obtención de la ecuación y/o grafica de la concentración de NaCN en escala logarítmica en contra de la mv que proporciona el equipo acoplado al electrodo, un ejemplo de esta grafica se muestra a continuación.

Por regresión exponencial de la grafica se obtiene la ecuación con la que se puede calcular las concentraciones de las soluciones con las que se trabajó en el desarrollo de la investigación.

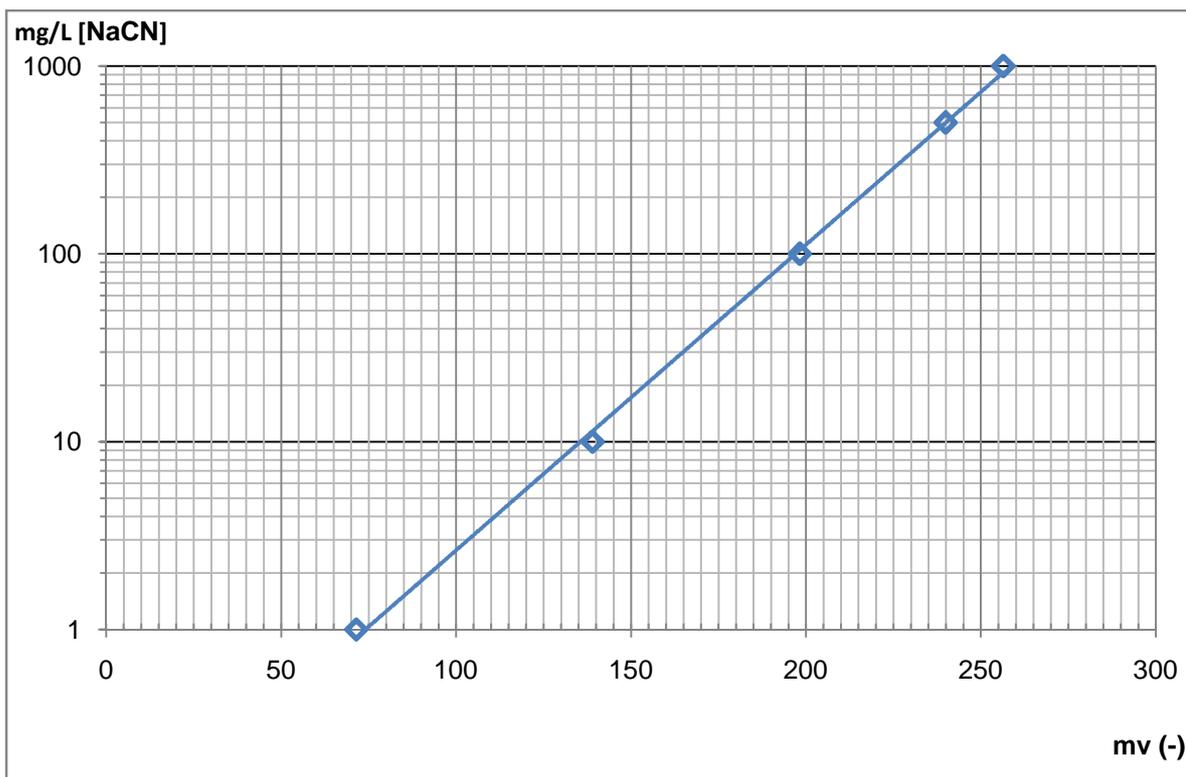


Figura III.1: Grafico de la calibración realizada al electrodo específico de cianuro. Concentración mg/L [NaCN] vs. Mv (-).

Ecuación: $y = 0,0626e^{0,0374x}$

Correlación (R^2): 0,9989

ANEXO III

DETERMINACIÓN DEL CIANURO TOTAL POR DESTILACIÓN

Este método se basa en la disociación de complejos cianurados fácilmente disociables a valores aproximados de $\text{pH}=4$, mediante acidificación, para luego por medio de destilación recolectar estos vapores en una solución de hidróxido de sodio, en donde se formará cianuro de sodio que se lo titula con el método del cianuro libre descrito anteriormente.

4.4.2 REACTIVOS

Acido Acético 1:9

Solución buffer de acetato de sodio: 820 g de $\text{Na}_2\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ /litro, se añade acético glacial hasta pH 4.5.

Solución de Acetato de cinc: 100 g de $\text{ZnC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ /litro

Rojo de metilo

Solución de hidróxido de sodio; 40 g NaOH /litro

4.4.3

4.4.4 PROCEDIMIENTO

Montar el equipo que se indica en la Figura V.1. Por el tubo de ingreso de aire colocar 500 ml de muestra en el balón con una concentración de CN^- no mayor a 10 mg/l. Diluir en el caso de ser necesario.

En el tubo de recolección de gases colocar 10 ml de la solución de NaOH y diluir hasta un volumen máximo de 225 ml, esto con el objeto de absorber adecuadamente los gases en la solución.

Los reactivos que se añaden al balón son: 10 ml del buffer de acetato de sodio, 10 ml de solución de acetato de cinc, 2 a 3 gotas de rojo de metilo. Dejar que se mezcle el contenido durante 3 minutos. Si la solución no es rosada añadir el ácido acético (1:9) hasta que quede un color permanente. Calentar y proceder de manera idéntica que en la determinación de cianuro total

Si va a existir generación de S^{2-} , añadir 0.05 g de carbonato de plomo o más, al tubo de recolección de gases, con el objeto de precipitar el sulfuro de plomo. Activar el vacío hasta tener formación de 1 a 2 burbujas por segundo. Calentar el balón, mantener por lo menos 1 hora de reflujo, luego quitar la calefacción, dejar que se enfríe al ambiente.

Desmontar el equipo, la solución del tubo recolector aforar a 250 ml y titular el cianuro libre. En el caso de formación de sulfures, filtrar o sedimentar previamente la solución.

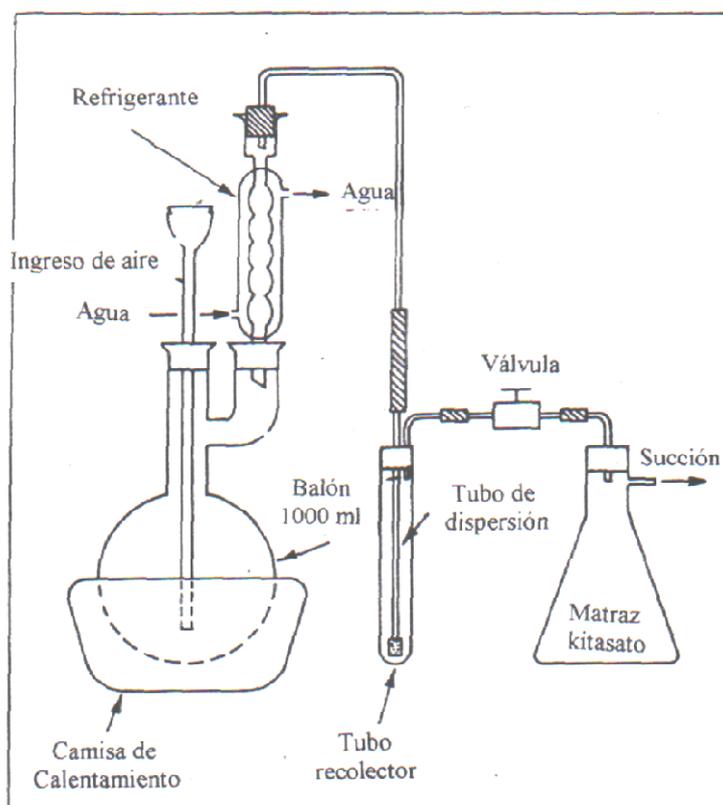


Figura V1: Esquema del montaje de los materiales para la destilación del cianuro WAD.

CÁLCULOS

Luego de la destilación, primero se determina la concentración del cianuro libre presente como NaCN en la solución del tubo recolector, este valor multiplicado por el volumen de la solución de recolección (250 ml) indica la cantidad de NaCN presente, y que proviene del CN⁻ de la muestra original (relave o efluente) liberado en la destilación.

$$[\text{NaCN}]_{\text{muestra}} = [\text{NaCN}]_{\text{solución de recolección}} * V_{\text{solución de recolección}} / \text{Peso}_{\text{muestra}} \text{ ó } \text{Volumen}_{\text{muestra}}$$

Ejemplo: Una muestra de 10 g se lleva a destilación para la determinación de cianuro total. Una alícuota de 25 ml de la solución de recolección consume 0.5 ml de solución de nitrato de plata. El contenido de cianuro WAD se determina con el siguiente cálculo:

NaCN (cianuro libre) presente en la solución de recolección.

$$[\text{NaCN}]_{\text{solución de recolección}} = 0.2 \text{ (ml solución titulante)} * 0.1 \text{ (g NaCN/l)} / 1 \text{ (ml solución titulante)}$$

$$= 0.02 \text{ (g NaCN/l)}$$

Cianuro WAD como NaCN presente en la muestra:

$$\text{Cianuro WAD}_{\text{muestra}} = 0.02 \text{ (g NaCN/l)} * 0.25 \text{ (l)} / 0.01 \text{ (Kg muestra)} = 0.5 \text{ (g/Kg)}$$

La muestra contiene 0.5 (g/Kg) ó 500 (mg/L) de cianuro WAD como NaCN.

ANEXO IV

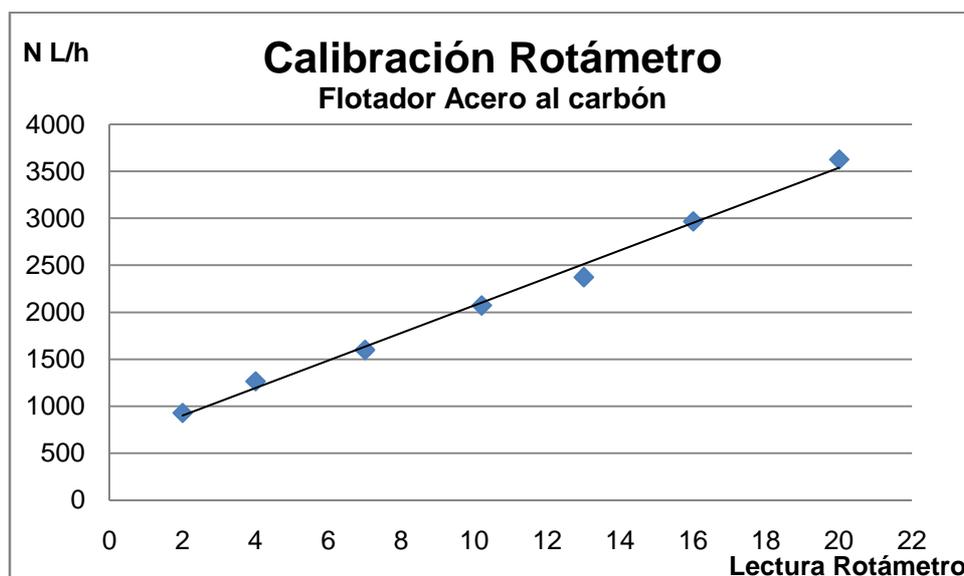
CALIBRACIÓN ROTÁMETRO

vol tanque	30,19	L
------------	-------	---

Po	98	psi	6,667	atm
Mol inicio	8,41			

Pf	60	psi	4,082	atm
mol final	5,146494201			

rotámetro	tiempo	Caudal		
	s	N L/s	N L/min	N L/h
0	0			0
2	422	0,26	15,46	927,86
4	310	0,35	21,05	1263,09
7	245	0,44	26,64	1598,19
10,2	189	0,58	34,53	2071,73
13	165	0,66	39,55	2373,07
16	132	0,82	49,44	2966,34
20	108	1,01	60,43	3625,53



$$Y = 146,56X + 606,29$$

$$R^2 = 0,9936$$

ANEXO V

Calculo de la constante de velocidad de la reacción catalítica de oxidación de cianuro libre en presencia de Carbón Activado impregnado.

4.5

4.6 EJEMPLO DE CÁLCULO

La necesidad de contar con D, puede eliminarse efectuando determinaciones de velocidad para dos a más tamaños de gránulos, siempre y cuando D, sea la misma para todos los tamaños. Para mostrar esto, nótese en la Ec. () que el cociente de las velocidades de los dos tamaños 1 y 2 es

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: **75 gr. Carbón Activado 8x20#**

Aire: Flujo de 250 L/h

pH= 10,5

Tiempo	pH	AgNO₃	NaCN	NaCN	CN⁻	Oxidación
min.		ml	g/L	mg/L	mg/L	%
0	11,8	1,95	0,488	487,5	259	0
5	10,57	0,99	0,248	247,5	131	49,23
10	10,39	0,64	0,160	160	85	67,18
20	10,65	0,339	0,085	84,75	45	82,62
30	10,41	1,92	0,048	48	25	90,15
60	10,43	1,23	0,031	30,75	16	93,69
90	10,55	0,73	0,018	18,25	10	96,26
120	10,49	0,57	0,014	14,25	8	97,08
150	10,4	0,42	0,011	10,5	5,6	97,85
180	10,5	0,29	0,007	7,25	3,8	98,51
210	10,54	0,22	0,006	5,5	2,9	98,87
240	10,61	0,18	0,005	4,5	2,4	99,08

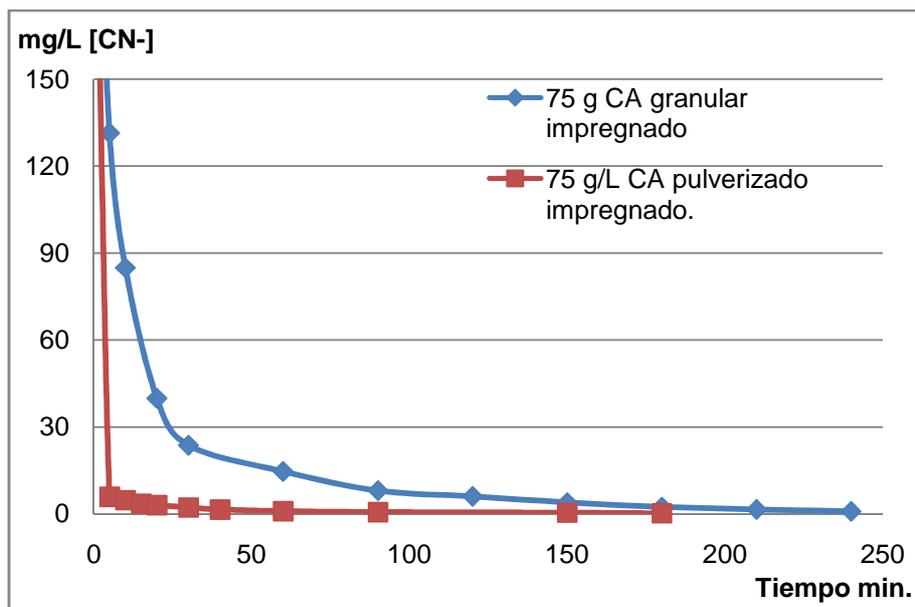


Figura VI.1: Cinéticas de oxidación empleando carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, granular y pulverizado.

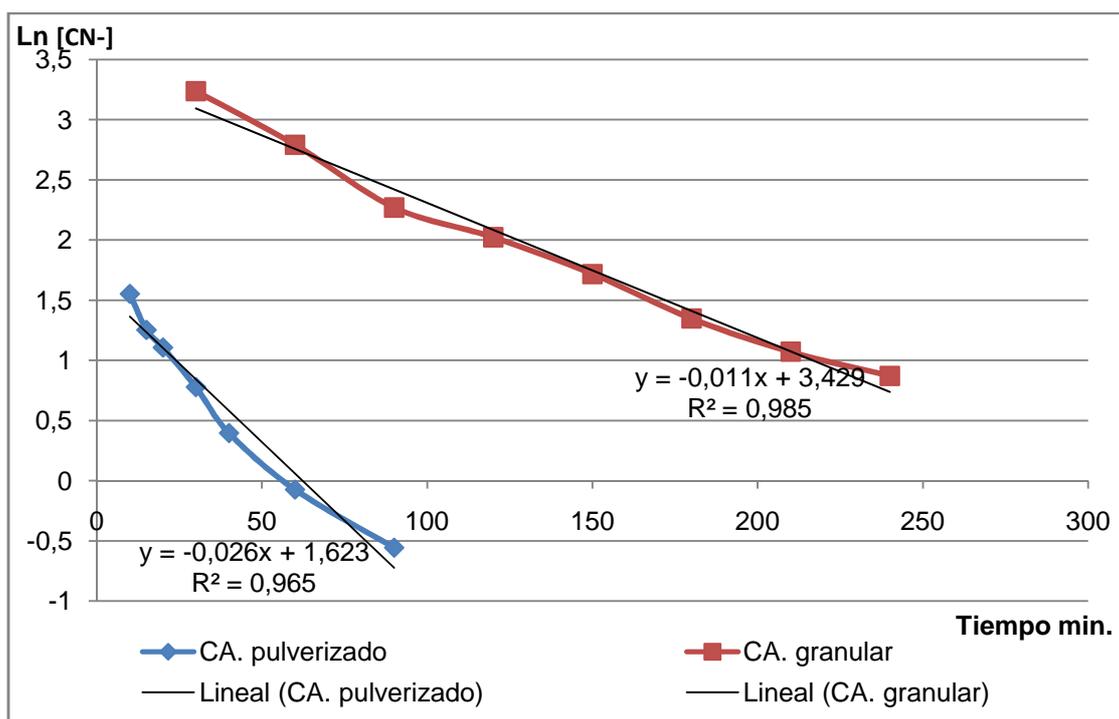


Figura VI.2: Logaritmo natural de las cinéticas de oxidación empleando carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, granular y pulverizado.

$$\eta = \frac{-r'_A}{-r'_{AS}}$$

$$\frac{-r'_A}{-r'_{AS}} = \frac{0,01121}{0,02608} = 0,4298$$

Para calcular el valor de las eficiencias por prueba y error se comenzará sumiendo que la eficiencia de la reacción con carbón activado pulverizado es 1, esto se justifica en parte dado que de acuerdo a bibliografía para catalizadores de tamaño de partícula pequeña el valor de la eficiencia tiende a 1, por tanto:

$$\eta_1 = 0,4298$$

Luego asumiendo la partícula del catalizador a analizar como una esfera, se tiene que:

$$\eta = \frac{3}{M_T} (M_T \coth M_T - 1)$$

De donde $M_{T1} = 5,77$

De la relación $\frac{M_{t1}}{M_{t2}}$ se obtiene la relación entre los módulos de Thiele para cada proceso:

$$\frac{M_{t1}}{M_{t2}} = \frac{\sqrt{\frac{k'''}{D}} * L_1}{\sqrt{\frac{k'''}{D}} * L_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

Se determinaron los radios promedio de cada uno de los carbones: el carbon activado granular fue procesado para determinar el d80 de sus partículas, lo que dio como resultado 1,8 mm y por lo tanto el radio de este carbon es $R = 0,0009$ m.

Por otro lado el carbon activado pulverizado fue tamizado en malla 200, que posee una abertura de 75 μm , por o que se considera que las partículas tienen una radio $R = 0,000037$ m.

Para una esfera la longitud del poro (L) Por tanto para el caso estudiado, se puede considerar los radios antes mencionados:

$$\frac{M_{t1}}{M_{t2}} = \frac{0,0009 \text{ m}}{0,000037 \text{ m}} = 24,324$$

De donde M_{T2} sería igual a 0,2372

Finalmente se calcula de nuevo la eficiencia 2, y se continua con la iteración:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{0,2372} * (0,2372 * \coth(0,2372) - 1) = 0,9963$$

Los resultados obtenidos para las iteraciones se presentan a continuación

n	n2 asumido	n1 calculado	M_{T1}	M_{T2}	n2 calculada
0,429831288	1,00000	0,429831	5,77000	0,23721	0,99627
	0,99627	0,431441	5,74270	0,23609	0,99630

Utilizando la ecuación $-r'_A = \eta(-r'_{As})$ se calcula el valor de la constante cinética volumétrica:

$$-r'_A = \eta(-r'_{As}) = 0,4314 * 0,01121 \text{ min}^{-1}$$

$$-r'_A = 0,0048364 \text{ min}^{-1}$$

Dado el valor de la constante se puede despejar la difusividad en la estructura porosa de la ecuación:

$$D = \frac{r'_A}{\frac{M_T^2}{L^2}} = \frac{0,0048364 \text{ s}^{-1}}{\frac{5,7427^2}{(0,0003)^2}} = 3,199e - 11 \frac{\text{m}^2}{\text{min}}$$

Ficha Técnica N° 1

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g. 8x20#

Flujo de Aire: 140 L/h

pH: 12

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	12,20	2,1	0,513	271,9	0,00
5	9,5	12,17	1,0	0,500	265,3	2,44
10	10,0	12,10	1,9	0,475	252,0	7,32
20	10,0	12,10	1,8	0,450	238,8	12,20
30	10,5	12,10	1,7	0,425	225,5	17,07
40	9,8	12,10	1,6	0,400	212,2	21,95
50	10,7	12,04	1,6	0,400	212,2	21,95
60	10,1	11,95	1,5	0,375	199,0	26,83
80	10,1	12,08	1,5	0,375	199,0	26,83
100	10,0	11,95	1,4	0,350	185,7	31,71
120	10,0	12,09	1,3	0,325	172,4	36,59
150	10,5	12,10	1,3	0,325	172,4	36,59
180	10,0	11,90	1,2	0,300	159,2	41,46
210	9,5	12,10	1,2	0,300	159,2	41,46
250	8,0	12,20	1,15	0,288	152,5	43,90

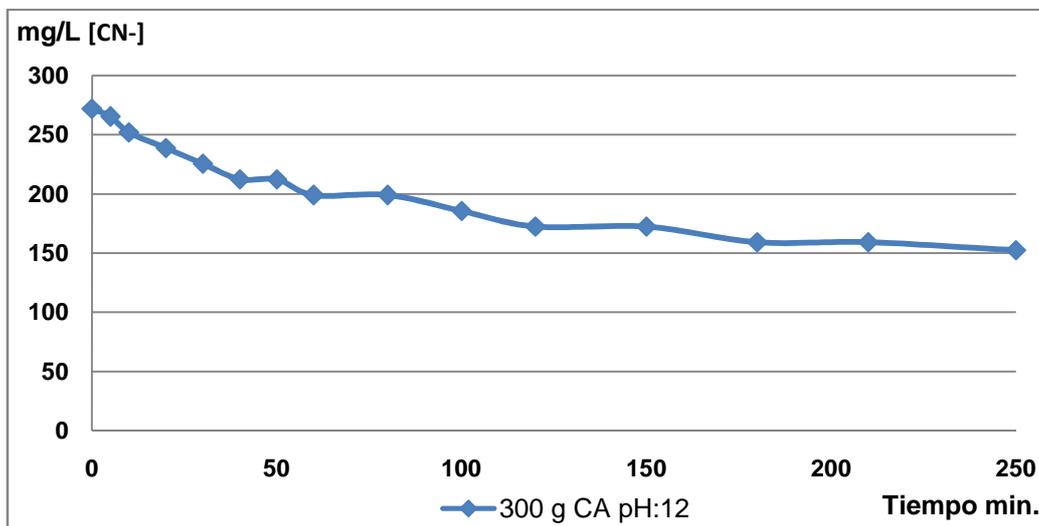


Figura VII.1: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L y pH=12.

Ficha Técnica 2

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 100 g. 8x20#

Flujo de Aire: 140 L/h

pH:12

Tiempo min.	Qaire Rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	12,20	2,05	0,510	270,6	0
5	9,0	12,14	2,00	0,500	265,3	1,96
10	8,0	12,07	1,90	0,475	252,0	6,86
20	7,8	12,02	1,90	0,475	252,0	6,86
30	8,4	12,42	1,90	0,475	252,0	6,86
40	8,4	12,43	1,85	0,463	245,4	9,31
50	8,1	12,43	1,80	0,450	238,8	11,76
60	8,5	12,43	1,80	0,450	238,8	11,76
80	9,5	12,40	1,75	0,438	232,1	14,22
100	8,3	12,40	1,70	0,425	225,5	16,67
120	7,8	12,40	1,70	0,425	225,5	16,67
150	7,2	12,40	1,65	0,413	218,9	19,12
180	7,8	12,23	1,65	0,413	218,9	19,12
210	7,4	12,40	1,60	0,400	212,2	21,57
240	9	12,38	1,60	0,400	212,2	21,57
300	8,8	12,30	1,50	0,375	199,0	26,47
360	8,5	12,10	1,45	0,363	192,3	28,92
1440	8,8	11,12	1,10	0,275	145,9	46,08

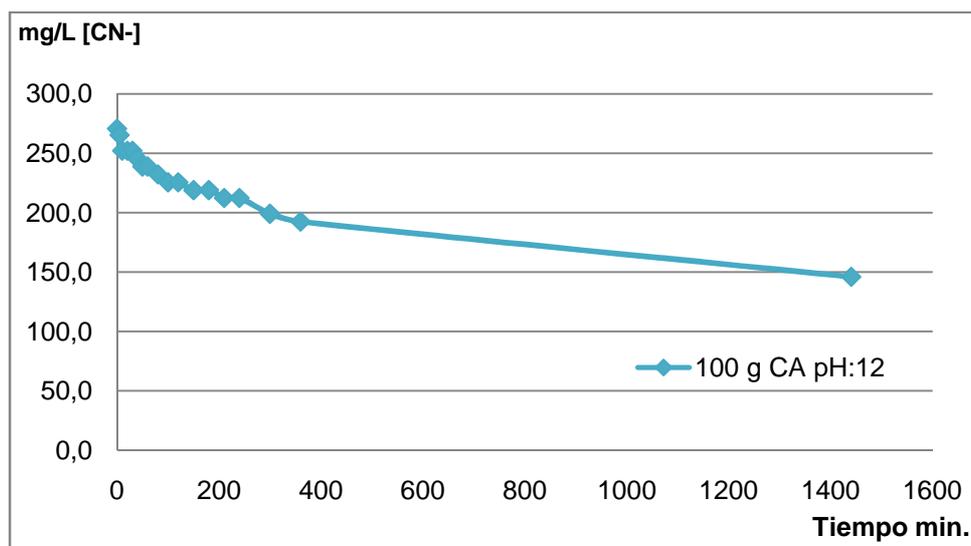


Figura VII.2: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 100 gCA/L y pH=12.

Ficha Técnica 3

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 200 g. 8x20#

Flujo de Aire: 140 L /h

pH: 12

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	12,10	2,05	0,510	270,61	0,00
5	10,0	12,10	1,90	0,475	252,04	6,86
10	10,0	12,00	1,85	0,463	245,40	9,31
20	9,0	12,10	1,80	0,450	238,77	11,76
30	9,0	12,20	1,75	0,438	232,14	14,22
40	11,0	12,15	1,70	0,425	225,51	16,67
60	9,0	12,30	1,70	0,425	225,51	16,67
80	8,0	12,20	1,70	0,425	225,51	16,67
100	9,0	12,15	1,65	0,413	218,87	19,12
120	8,5	12,10	1,60	0,400	212,24	21,57
150	10,2	11,50	1,60	0,400	212,24	21,57
180	8,0	12,10	1,55	0,388	205,61	24,02
210	9,0	12,20	1,50	0,375	198,98	26,47
1200	8,5	11,63	1,15	0,288	152,55	43,63

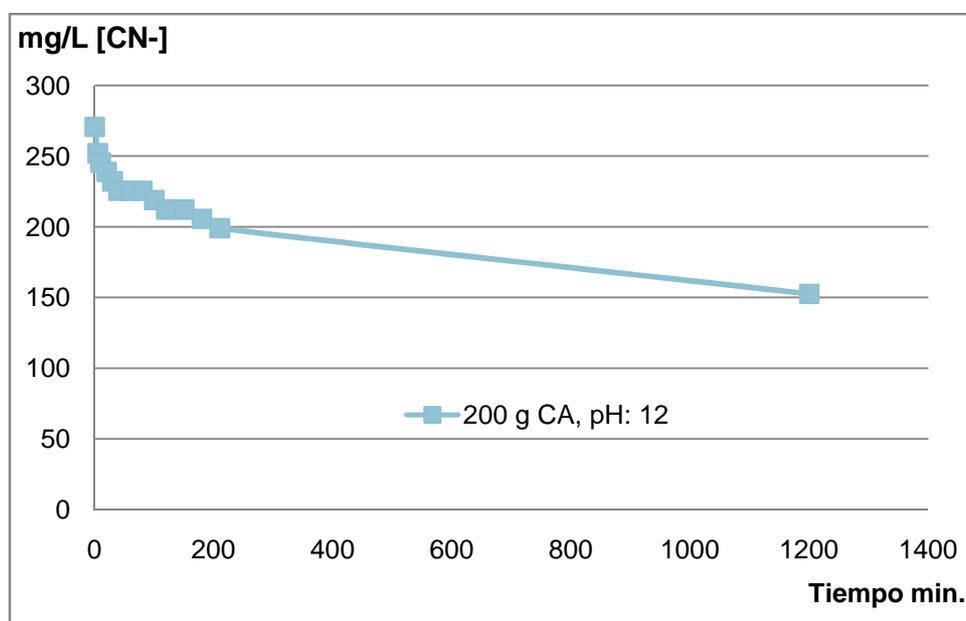


Figura VII.3: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 200 gCA/L y pH=12.

Ficha Técnica 4

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 200 g. 8x20#

Flujo de Aire: 194 L/h

Tiempo min.	Qaire lectura	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	12,08	2,05	0,510	270,61	0
10	15,0	12,08	1,90	0,475	252,04	6,86
20	15,9	12,07	1,80	0,450	238,77	11,76
30	14,3	12,06	1,80	0,450	238,77	11,76
40	14,5	12,04	1,75	0,438	232,14	14,22
60	14,5	11,92	1,75	0,438	232,14	14,22
80	14,0	12,10	1,75	0,438	232,14	14,22
100	14,0	12,10	1,70	0,425	225,51	16,67
120	14,5	12,09	1,70	0,425	225,51	16,67
150	14,0	12,04	1,65	0,413	218,87	19,12
180	14,5	12,02	1,60	0,400	212,24	21,57
210	14,0	12,00	1,60	0,400	212,24	21,57
240	14,2	12,00	1,60	0,400	212,24	21,57
300	14,0	11,85	1,55	0,388	205,61	24,02
360	15,0	11,78	1,50	0,375	198,98	26,47
420	13,0	11,00	1,50	0,375	198,98	26,47
480	14,0	12,08	1,45	0,363	192,34	28,92
2880	15,0	12,00	0,50	0,125	66,33	75,49

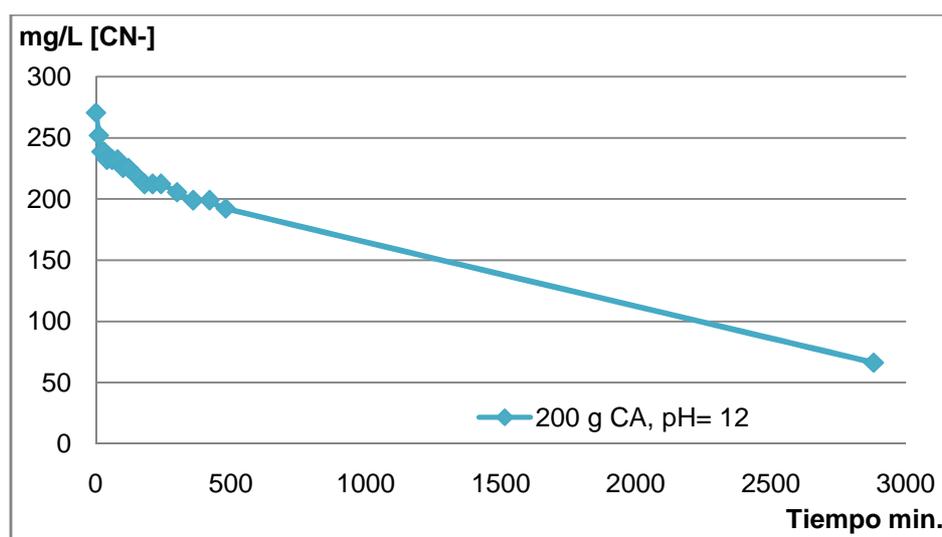


Figura VII.4: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 200 gCA/L y pH=12.

Ficha Técnica 5

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 100 g. 8x20#

Aire: Flujo de 100 L /h

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	12,15	2,00	0,510	270,6	0
10	16,0	12,14	1,90	0,475	252,0	6,86
20	17,5	12,12	1,85	0,463	245,4	9,31
30	15,3	12,11	1,80	0,450	238,8	11,76
40	15,6	12,05	1,75	0,438	232,1	14,22
60	15,0	12,04	1,75	0,438	232,1	14,22
80	21,0	12,04	1,70	0,425	225,5	16,67
100	15,0	12,04	1,70	0,425	225,5	16,67
120	16,0	12,00	1,70	0,425	225,5	16,67
150	18,0	11,91	1,65	0,413	218,9	19,12
180	15,0	12,56	1,65	0,413	218,9	19,12
210	16,5	12,54	1,60	0,400	212,2	21,57
240	14,0	12,51	1,55	0,388	205,6	24,02
300	18,0	12,50	1,55	0,388	205,6	24,02
360	18,0	12,39	1,50	0,375	199,0	26,47
467	15,0	12,20	1,40	0,350	185,7	31,37
1440	16,0	11,60	1,10	0,275	145,9	46,08

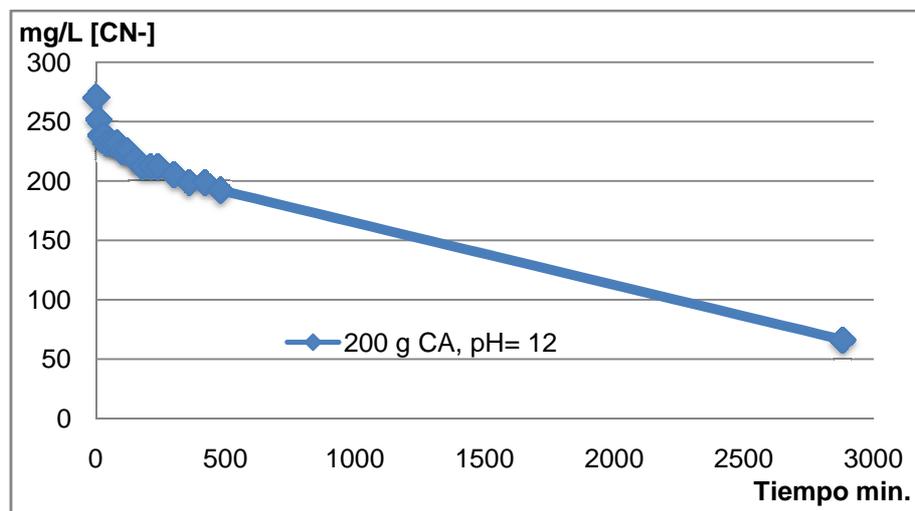


Figura VII.5 : Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 200 gCA/L y pH=12.

Ficha Técnica 6

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Flujo de Aire: 140 L/h

pH: 12

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN mg/L	Oxidación %
0	0,0	12,56	2,00	0,500	251,80	0,00
10	17,5	12,55	1,90	0,475	239,21	5,00
20	21,0	12,54	1,85	0,463	232,91	7,50
30	17,7	12,53	1,75	0,438	220,32	12,50
40	15,7	12,50	1,65	0,413	207,73	17,50
60	19,5	12,40	1,60	0,400	201,44	20,00
90	17,0	12,34	1,55	0,388	195,14	22,50
120	20,0	12,20	1,50	0,375	188,85	25,00
150	18,5	12,15	1,45	0,363	182,55	27,50
180	16,5	12,10	1,40	0,350	176,26	30,00
210	18,0	12,00	1,35	0,338	169,96	32,50
240	15,6	12,01	1,35	0,338	169,96	32,50
280	19,0	11,98	1,30	0,325	163,67	35,00
300	21,0	11,96	1,30	0,325	163,67	35,00
330	19,0	11,93	1,25	0,313	157,37	37,50
360	16,0	11,90	1,20	0,300	151,08	40,00
390	16,0	11,92	1,20	0,300	151,08	40,00
420	17,0	12,25	1,20	0,300	151,08	40,00
460	15,0	12,25	1,15	0,288	144,78	42,50
480	20,0	12,40	1,10	0,275	138,49	45,00
1440	19,5	11,50	0,50	0,125	62,95	75,00

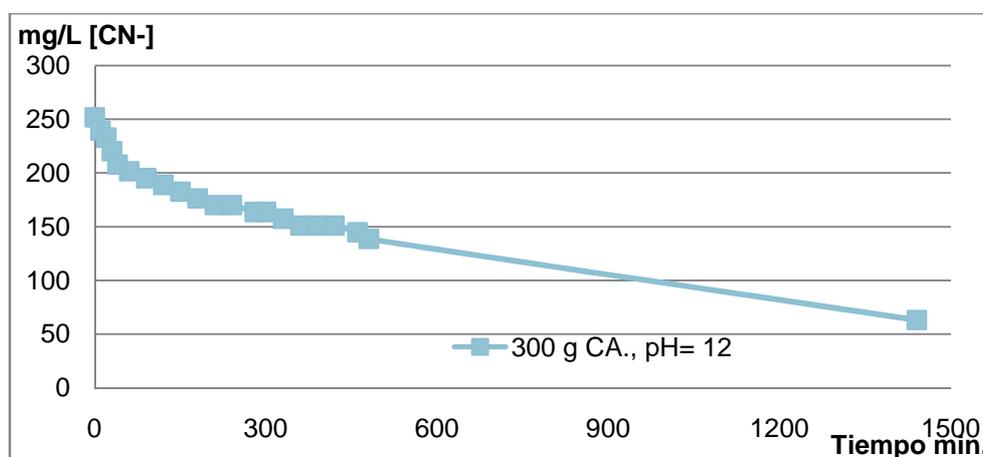


Figura VII.6: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L y pH=12.

Ficha Técnica 7

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Flujo de Aire: 140 L/h

ph: 10,5

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	12,10	1,90	0,475	252,0	0
10	15,0	10,88	1,30	0,325	172,4	31,58
20	14,0	10,84	1,15	0,288	152,5	39,47
30	16,0	10,57	1,00	0,250	132,7	47,37
40	16,0	10,55	0,90	0,225	119,4	52,63
60	18,0	10,50	0,70	0,175	92,9	63,16
90	17,0	10,56	0,60	0,150	79,6	68,42
120	18,0	10,50	0,55	0,138	72,9	71,05
150	17,5	10,70	0,55	0,138	72,9	71,05
180	16,5	10,60	0,50	0,125	66,3	73,68
210	15,5	10,58	0,45	0,113	59,7	76,32
240	16,0	10,56	0,40	0,100	53,1	78,95
270	18,0	10,55	0,40	0,100	53,1	78,95
300	15,0	10,53	0,35	0,088	46,4	81,58
330	14,5	10,50	0,35	0,088	46,4	81,58
360	19,3	10,72	0,30	0,075	39,8	84,21
390	14,0	10,70	0,30	0,075	39,8	84,21
420	18,5	10,59	0,30	0,075	39,8	84,21
450	15,0	10,57	0,25	0,063	33,2	86,84
1440	12,50	10,56	0,20	0,020	10,6	95,79

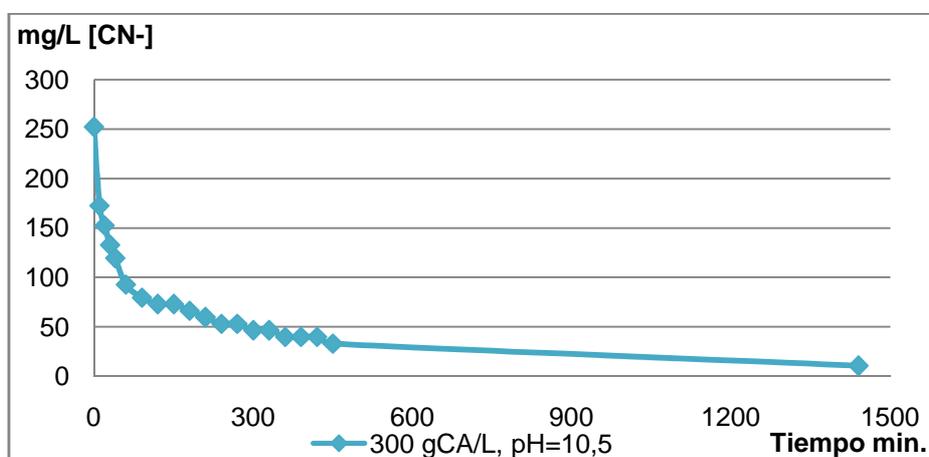


Figura VII.7: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L y pH=10,5.

Ficha Técnica 8

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: No se empleó

Flujo de Aire: 140 L/h

pH: 10,5

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	11,50	2,05	0,513	271,9	0
10	8,0	10,90	1,95	0,488	258,7	4,88
20	10,0	10,61	1,95	0,488	258,7	4,88
30	9,8	10,58	1,90	0,475	252,0	7,32
60	12,0	10,65	1,90	0,475	252,0	7,32
90	12,5	10,50	1,90	0,475	252,0	7,32
120	10,0	10,55	1,90	0,475	252,0	7,32
140	10,0	10,50	1,90	0,475	252,0	7,32
180	17,0	10,45	1,85	0,463	245,4	9,76
210	15,0	10,44	1,85	0,463	245,4	9,76
240	14,0	10,42	1,85	0,463	245,4	9,76
270	12,0	10,20	1,85	0,463	245,4	9,76
300	13,0	10,04	1,80	0,450	238,8	12,20
330	12,0	10,62	1,80	0,450	238,8	12,20
360	15,0	10,51	1,77	0,443	234,8	13,66
390	16,0	10,50	1,75	0,438	232,1	14,63
420	15,5	10,51	1,75	0,438	232,1	14,63
450	13,0	10,50	1,75	0,438	232,1	14,63

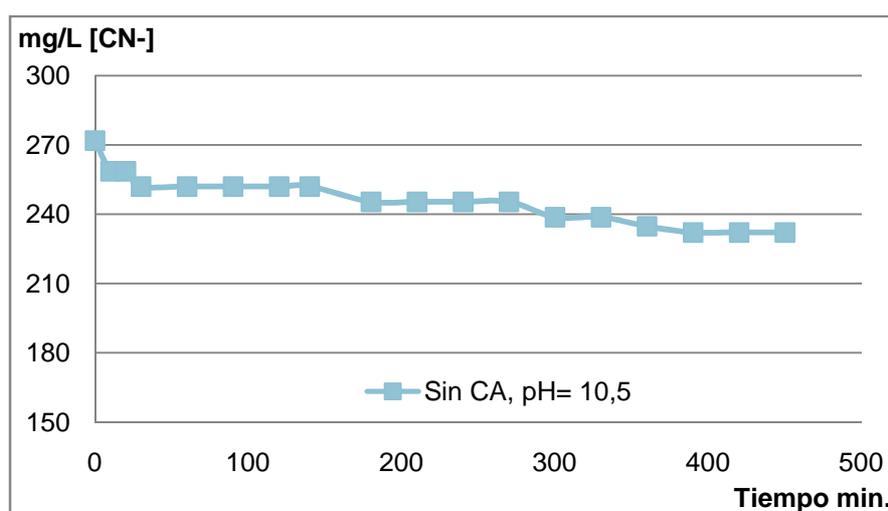


Figura VII.8: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, sin emplear carbón activado y pH=10,5

Ficha Técnica 9

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 200 g 8x20#

Flujo de Aire: 165 L/h

pH: 10,5

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	11,68	1,80	0,450	238,8	0
10	13,0	10,50	1,45	0,363	192,3	19,44
20	12,5	10,53	1,30	0,325	172,4	27,78
30	11,6	10,70	1,20	0,300	159,2	33,33
60	11,3	10,50	1,05	0,263	139,3	41,67
90	10,6	10,48	0,92	0,230	122,0	48,89
120	10,5	10,49	0,85	0,213	112,8	52,78
150	10,5	11,00	0,80	0,200	106,1	55,56
180	14,5	10,66	0,70	0,175	92,9	61,11
210	11,0	10,54	0,62	0,155	82,2	65,56
240	10,3	10,50	0,55	0,138	73,0	69,44
270	13,0	10,50	0,55	0,138	73,0	69,44
300	12,5	10,60	0,50	0,125	66,3	72,22
330	11,3	10,62	0,50	0,125	66,3	72,22

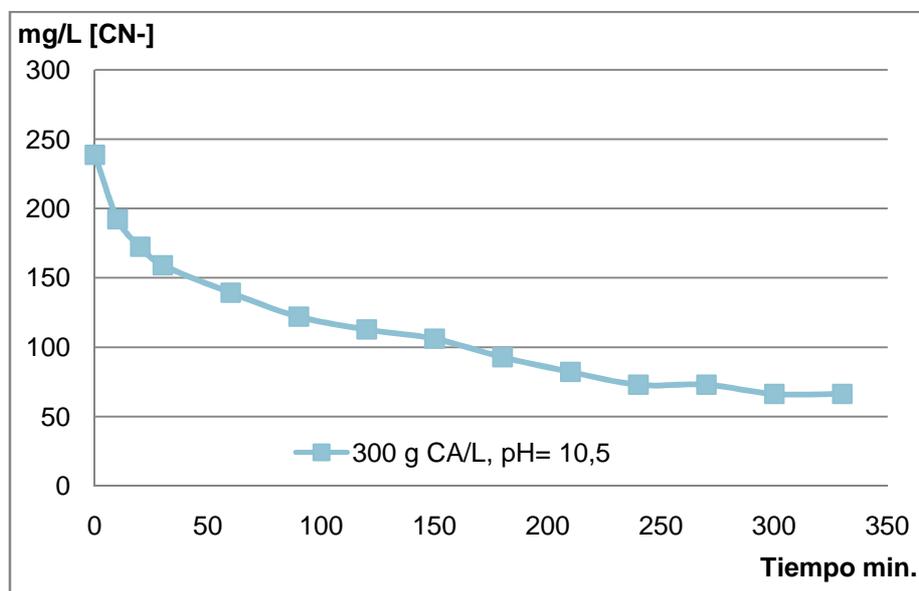


Figura VII.9: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 200 gCA/L, pH=10,5 y Qa= 165 L/h

Ficha Técnica 10

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 200 g. 8x20#

Flujo de Aire: 180 L/h

pH: 10,5

Tiempo	Qaire	pH	AgNO3	NaCN	CN ⁻	Oxidación
min.	rotámetro		ml	g/L	mg/L	%
0	0,0	12,10	2,05	0,513	271,93	0
10	12,0	11,00	1,70	0,425	225,51	17,07
20	10,6	10,53	1,45	0,363	192,34	29,27
30	13,8	10,50	1,32	0,330	175,10	35,61
60	16,8	10,52	1,17	0,293	155,20	42,93
90	13,3	10,51	1,10	0,275	145,92	46,34
120	17,0	10,52	0,97	0,243	128,67	52,68
150	16,0	10,70	0,87	0,218	115,41	57,56
180	16,2	10,45	0,80	0,200	106,12	60,98
210	15,3	10,50	0,75	0,188	99,49	63,41
240	13,0	10,75	0,70	0,175	92,86	65,85
270	14,0	10,48	0,65	0,163	86,22	68,29
300	12,1	10,60	0,65	0,163	86,22	68,29
330	16,0	10,48	0,60	0,150	79,59	70,73
360	12,0	10,70	0,60	0,150	79,59	70,73
390	8,0	10,48	0,55	0,138	72,96	73,17
420	9,5	10,78	0,45	0,113	59,69	78,05
450	10,0	10,51	0,40	0,100	53,06	80,49

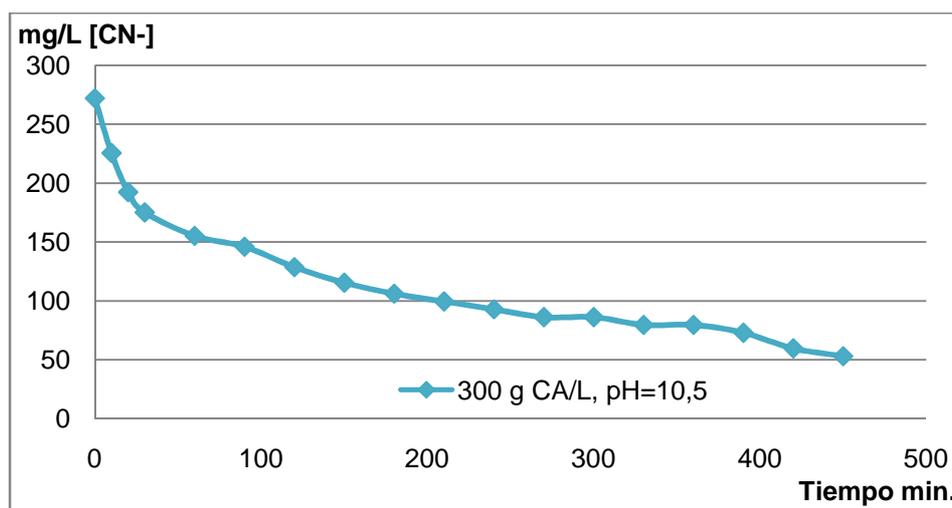


Figura VII.10: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 200 gCA/L, pH=10,5 y Qa= 180 L/h

Ficha Técnica 11

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Aire: 180 Flujo de 180 L/h

pH: 10,5

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO ₃ ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	10,80	2,00	0,500	251,80	0,00
10	12,5	10,60	1,40	0,350	176,26	30,00
20	11,5	10,57	1,15	0,288	144,79	42,50
30	12,6	10,55	1,02	0,255	128,42	49,00
60	13,5	10,52	0,85	0,213	107,02	57,50
90	14,5	10,51	0,72	0,180	90,65	64,00
120	11,1	10,51	0,62	0,155	78,06	69,00
150	13,8	10,63	0,57	0,143	71,76	71,50
180	11,2	10,61	0,52	0,130	65,47	74,00
210	11,0	10,56	0,50	0,125	62,95	75,00
240	12,5	10,52	0,50	0,125	62,95	75,00
270	13,8	10,50	0,45	0,113	56,66	77,50
300	13,0	10,49	0,40	0,100	50,36	80,00
330	10,0	10,55	0,40	0,100	50,36	80,00
360	14,0	10,54	0,35	0,088	44,07	82,50
390	12,5	10,52	0,35	0,088	44,07	82,50
420	13,1	10,56	0,30	0,075	37,77	85,00
480	12,0	10,53	0,26	0,065	34,49	86,30

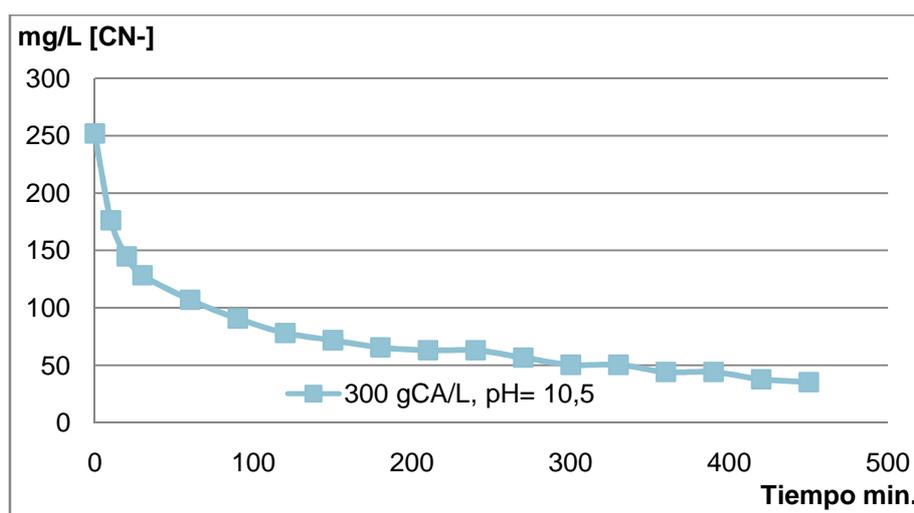


Figura VII.11: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L, pH=10,5 y Q_a= 180 L/h

Ficha Técnica 12

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Aire: 180 Flujo de L/h

pH= 11

Tiempo min.	Qaire rotámetro	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	0,0	10,80	1,95	0,488	258,67	0,0
10	12,5	11,00	1,50	0,375	198,98	23,1
35	11,5	10,97	1,20	0,300	159,18	38,5
60	9,8	10,95	1,10	0,275	145,92	43,6
90	10,5	10,87	1,03	0,258	136,63	47,2
120	10,8	10,76	0,95	0,238	126,02	51,3
150	10,8	10,94	0,90	0,225	119,39	53,8
180	10,5	10,80	0,85	0,213	112,75	56,4
210	11,5	11,03	0,80	0,200	106,12	59,0
240	9,0	10,92	0,75	0,188	99,49	61,5
270	10,0	10,90	0,70	0,175	92,86	64,1
300	10,5	10,86	0,70	0,175	92,86	64,1
330	11,0	10,82	0,70	0,175	92,86	64,1
360	10,5	10,78	0,65	0,163	86,22	66,7
390	10,0	10,93	0,65	0,163	86,22	66,7
420	1,5	10,97	0,70	0,175	92,86	64,1
450	11,9	10,83	0,60	0,150	79,59	69,2
480	10,5	10,93	0,60	0,150	79,59	69,2
510	11,0	11,59	0,55	0,138	72,96	71,8
540	12,0	11,05	0,55	0,138	72,96	71,8
1440	12,5	10,81	0,25	0,063	33,16	87,2

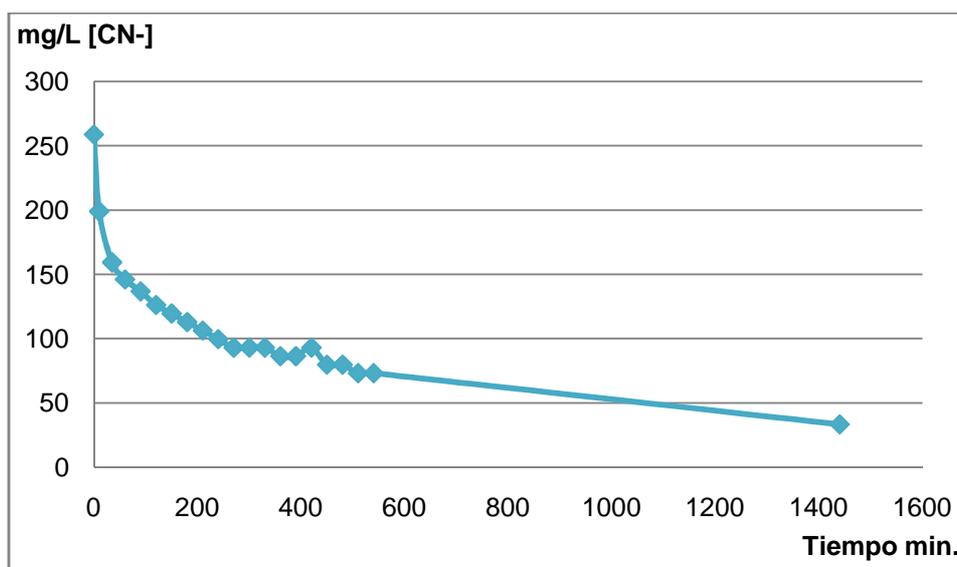


Figura VII.12: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 g CA/L, pH=11 y Qa= 180 L/h

Ficha Técnica 13

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Flujo de Aire: 180 L/h

pH=10,5

Añadido: 100 mg/L CuSO₄

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ ml	NaCN g/L	NaCN mg/L	CN mg/L	Alícuota ml	Oxidación %
0	0,0	10,70	1,90	0,473	472,5	250,7	10	0,00
5	13,0	10,51	1,00	0,248	247,5	131,3	10	47,62
10	12,5	10,55	0,75	0,180	180,0	95,5	10	61,90
20	9,9	10,45	0,65	0,155	155,0	82,2	10	67,20
30	10,6	10,52	0,60	0,143	142,5	75,6	10	69,84
60	11,3	10,51	0,45	0,105	105,0	55,7	10	77,78
90	15,1	10,55	0,35	0,080	80,0	42,4	10	83,07
120	12,5	10,54	0,25	0,055	55,0	29,2	10	88,36
150	10,4	10,52	0,22	0,048	47,5	25,2	10	89,95
180	8,2	10,50	0,20	0,017	17,0	9,0	25	96,40
210	14,8	10,58	0,16	0,013	13,0	6,9	25	97,25
240	12,3	10,56	0,12	0,009	9,0	4,8	25	98,10
270	10,4	10,53	0,10	0,007	7,0	3,7	25	98,52
300	8,4	10,48	0,08	0,005	5,0	2,7	25	98,94
330	13,7	10,53	0,07	0,004	4,0	2,1	25	99,15
360	10,9	10,51	0,06	0,003	3,0	1,6	25	99,37

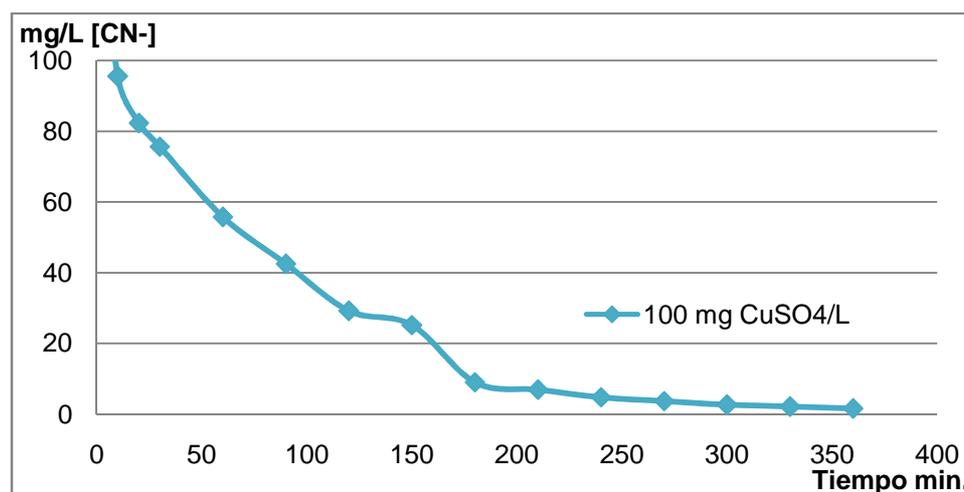


Figura VII.13 : Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L, pH=10,5, Qa= 180 L/h y Añadido: 100 mg/L CuSO₄

Ficha Técnica 14

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Aire: Flujo de 180 L/h

pH =10,5

Añadido: 100 mg/L CuSO₄

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ g/L	NaCN g/L	CN mg/L	Alícuota ml	Oxidación %
0	0,0	10,70	1,99	0,498	264,0	10	0,00
5	13,0	10,50	1,09	0,273	144,6	10	45,23
10	12,1	10,54	0,87	0,218	115,4	10	56,28
20	11,6	10,51	0,64	0,160	84,9	10	67,84
30	13,0	10,50	0,59	0,148	78,3	10	70,35
60	12,8	10,55	0,49	0,123	65,0	10	75,38
90	9,5	10,48	0,45	0,113	59,7	10	77,39
120	12,9	10,52	0,39	0,098	51,7	10	80,40
150	11,0	10,50	0,29	0,073	38,5	10	85,43
180	13,0	10,52	0,24	0,060	31,8	10	87,94
210	13,0	10,52	0,24	0,060	31,8	10	87,94
240	14,0	10,49	0,21	0,053	27,9	10	89,45
270	11,8	10,50	0,42	0,042	22,3	25	91,56
300	14,2	10,50	0,35	0,035	18,6	25	92,96
330	11,5	10,50	0,25	0,025	13,3	25	94,97
360	14,2	10,50	0,2	0,020	10,6	25	95,98
390	13,0	10,50	0,15	0,015	8,0	25	96,98
420	16,0	10,60	0,11	0,011	5,8	25	97,79
450	13,1	10,56	0,1	0,010	5,3	25	97,99
480	10,2	10,52	0,06	0,006	3,2	25	98,79

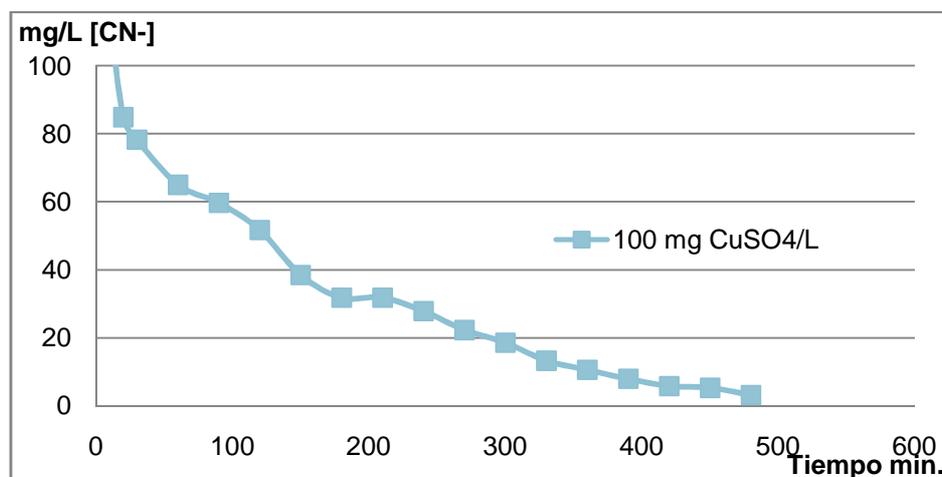


Figura VII.14: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L, pH=10,5, Qa= 180 L/h y Añadido: 100 mg/L CuSO₄

Ficha Técnica 15

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Flujo de Aire: L/h

pH = 10,5

Añadido: 150 mg/L CuSO₄

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 g/L	NaCN g/L	CN mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0,0	10,50	1,99	0,498	264,0	10	0
5	16,0	10,50	0,89	0,223	118,1	10	55,28
10	15,4	10,50	0,66	0,165	87,5	10	66,83
20	14,7	10,55	0,51	0,128	67,7	10	74,37
30	15,1	10,50	0,47	0,118	62,3	10	76,38
40	14,9	10,53	0,39	0,098	51,7	10	80,40
60	15,6	10,48	0,35	0,088	46,4	10	82,41
90	14,0	10,49	0,29	0,073	38,5	10	85,43
120	16,2	10,49	0,27	0,068	35,8	10	86,43
150	14,0	10,54	0,60	0,060	31,8	25	87,94
180	12,8	10,53	0,50	0,050	26,5	25	89,95
210	16,1	10,51	0,45	0,045	23,9	25	90,95
240	13,1	10,48	0,38	0,038	20,2	25	92,36
270	13,6	10,50	0,30	0,030	15,9	25	93,97
300	11,0	10,51	0,25	0,025	13,3	25	94,97
330	14,9	10,58	0,20	0,020	10,6	25	95,98
360	12,1	10,49	0,15	0,015	8,0	25	96,98
390	13,9	10,50	0,11	0,011	5,8	25	97,79
420	17,0	10,50	0,05	0,005	2,7	25	98,99
450	12,4	10,65	0,05	0,005	2,7	25	98,99
480	16,3	10,58	0,03	0,003	1,6	25	99,40

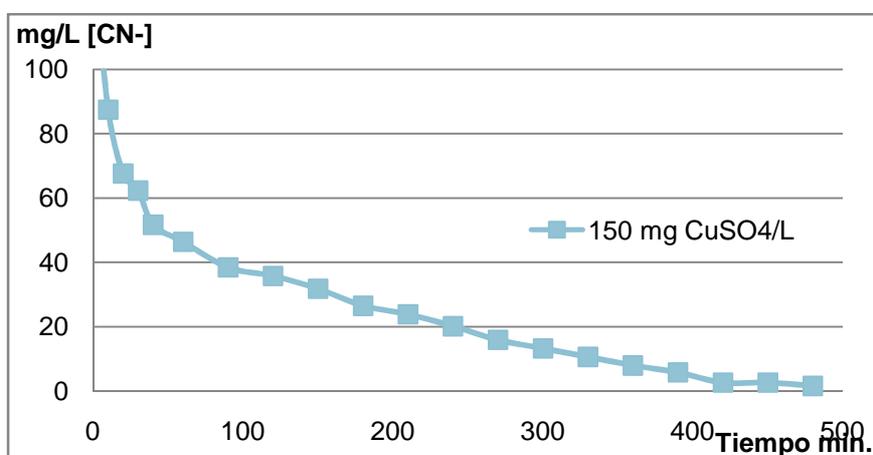


Figura VII.15: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L, pH=10,5, Qa= 180 L/h y Añadido: 150 mg/L CuSO₄

Ficha Técnica 16

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g. 8x20#

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

Añadido: 50 mg/L CuSO₄

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ g/L	NaCN g/L	CN mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0,0	12,30	2,02	0,505	268,0	10	0
5	17,0	10,48	0,99	0,248	131,3	10	50,99
10	16,2	10,56	0,81	0,203	107,4	10	59,90
20	14,5	10,50	0,69	0,173	91,5	10	65,84
30	16,5	10,50	0,64	0,160	84,9	10	68,32
40	19,0	10,51	0,54	0,135	71,6	10	73,27
60	15,0	10,50	0,49	0,123	65,0	10	75,74
90	16,7	10,49	0,44	0,110	58,4	10	78,22
120	15,0	10,49	0,37	0,093	49,1	10	81,68
150	17,5	10,60	0,29	0,073	38,5	10	85,64
180	16,1	10,54	0,25	0,063	33,2	10	87,62
210	15,6	10,51	0,53	0,053	28,1	25	89,50
240	14,0	10,58	0,47	0,047	24,9	25	90,69
270	17,3	10,50	0,40	0,040	21,2	25	92,08
300	13,0	10,63	0,35	0,035	18,6	25	93,07
330	15,7	10,53	0,29	0,029	15,4	25	94,26
360	15,3	10,50	0,21	0,021	11,1	25	95,84
390	17,1	10,50	0,16	0,016	8,5	25	96,83
420	15,0	10,50	0,12	0,012	6,4	25	97,62
450	16,3	10,50	0,10	0,010	5,3	25	98,02
480	17,4	10,51	0,09	0,009	4,8	25	98,22

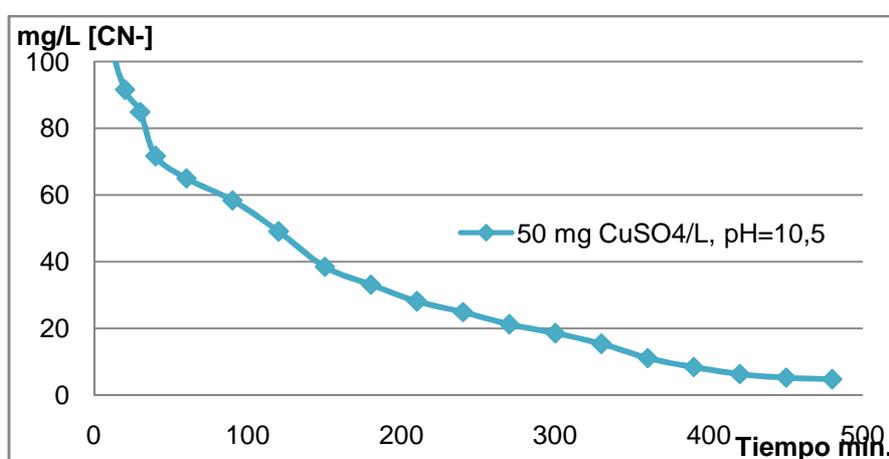


Figura VII.16: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L, pH=10,5, Q_a= 180 L/h y Añadido: 50 mg/L CuSO₄

Ficha Técnica 17

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g/L 8x20#

Aire: Flujo de 200 L/h

pH=10,5

Añadido: 50 mg/L CuCl₂

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0,0	12,11	1,99	0,498	264	10	0
5	15,1	10,55	1,09	0,272	145	10	45,23
10	14,0	10,47	0,9	0,225	119	10	54,77
20	16,7	10,59	0,82	0,205	109	10	58,79
30	14,8	10,49	0,74	0,185	98	10	62,81
40	16,0	10,49	0,67	0,167	89	10	66,33
60	17,8	10,60	0,59	0,147	78	10	70,35
90	13,8	10,50	0,48	0,120	64	10	75,88
120	17,4	10,50	0,38	0,095	50	10	80,90
150	19,5	10,50	0,32	0,080	42	10	83,92
180	17,5	10,51	0,70	0,070	37	25	85,93
210	15,0	10,58	0,62	0,062	33	25	87,54
240	15,0	10,56	0,53	0,053	28	25	89,35
270	19,6	10,52	0,46	0,046	24	25	90,75
300	14,1	10,50	0,40	0,040	21	25	91,96
330	15,2	10,62	0,36	0,036	19	25	92,76
360	17,0	10,59	0,33	0,033	18	25	93,37
390	15,5	10,46	0,25	0,025	13	25	94,97
420	13,2	10,47	0,20	0,020	11	25	95,98
450	19,1	10,58	0,16	0,016	8	25	96,78
480	15,2	10,57	0,11	0,011	5,8	25	97,79

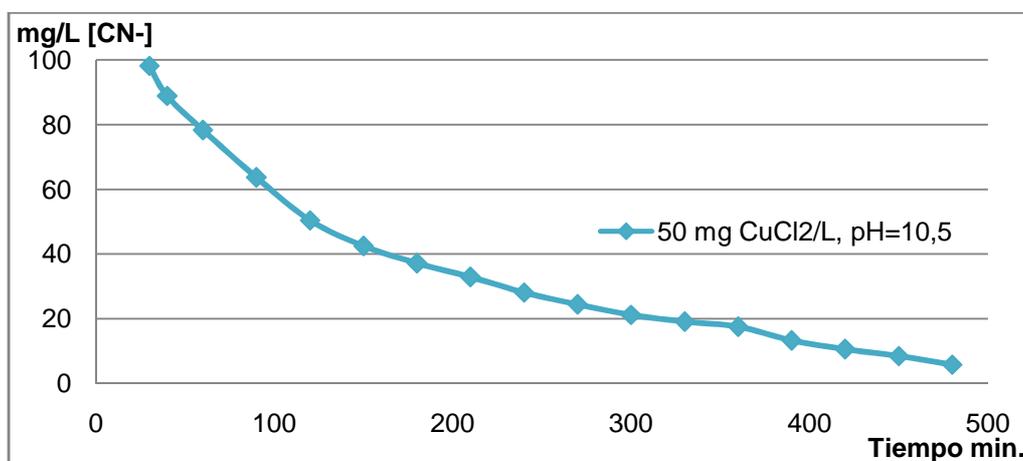


Figura VII.17: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L, pH=10,5, Q_a= 200 L/h y Añadido: 50 mg/L CuCl₂

Ficha Técnica 18

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 300 g 8x20#

Flujo de Aire: 190 L/h

pH=10,5

Añadido: 75 mg/L $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0,0	10,70	1,99	0,498	264,0	10	0
5	16,8	10,61	1,09	0,273	144,6	10	45,23
10	15,7	10,33	0,78	0,195	103,5	10	60,80
20	19,7	10,23	0,70	0,175	92,9	10	64,82
30	16,0	10,31	0,65	0,163	86,2	10	67,34
40	14,2	10,20	0,59	0,148	78,3	10	70,35
60	17,4	10,13	0,48	0,120	63,7	10	75,88
90	15,0	10,26	0,38	0,095	50,4	10	80,90
120	16,6	10,12	0,29	0,073	38,5	10	85,43
150	17,1	10,05	0,21	0,053	27,9	10	89,45
180	13,0	10,00	0,40	0,040	21,2	25	91,96
210	15,8	10,50	0,37	0,037	19,6	25	92,56
240	19,6	10,42	0,35	0,035	18,6	25	92,96
270	16,7	10,30	0,30	0,030	15,9	25	93,97
300	15,5	10,21	0,24	0,024	12,7	25	95,18
330	16,2	10,12	0,19	0,019	10,1	25	96,18
360	14,3	10,06	0,16	0,016	8,5	25	96,78
390	17,2	10,60	0,11	0,011	5,8	25	97,79
420	15,7	10,53	0,09	0,009	4,8	25	98,19
450	13,9	10,48	0,07	0,007	3,7	25	98,59
480	20,2	10,33	0,05	0,005	2,7	25	98,99

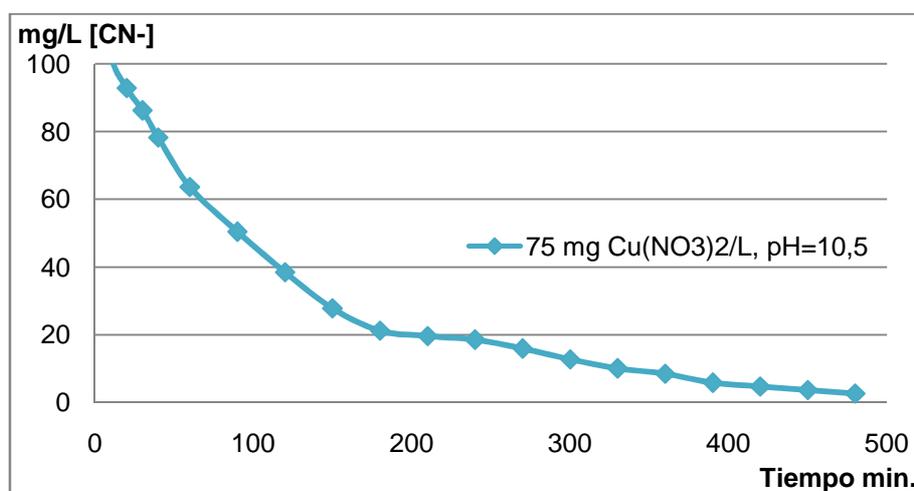


Figura VII.18 : Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 300 gCA/L, pH=10,5, Qa= 200 L/h y Añadido: 75 mg/L $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Ficha Técnica 19

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado: 150 g 8x20# impregnado con CuSO₄

Flujo de Aire: 200 L/h

pH = 10,42

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0,0	12,05	2,01	0,503	266,6	10	0
5	17,0	10,32	0,59	0,148	78,3	10	70,65
10	17,2	10,91	0,37	0,093	49,1	10	81,59
15	18,1	10,10	0,31	0,078	41,1	10	84,58
20	17,1	10,32	0,27	0,068	35,8	25	86,57
30	17,4	11,01	0,55	0,055	29,2	25	89,05
40	18,3	10,41	0,44	0,044	23,3	25	91,24
60	20,5	10,25	0,35	0,035	18,6	25	93,03
90	17,4	11,03	0,9	0,023	12,5	100	95,52
120	16,0	10,31	0,72	0,018	9,6	10*	96,42
150	15,0	10,90	0,37	0,009	4,9	10*	98,16
180	16,9	10,94	0,24	0,006	3,2	10*	98,81
210	15,9	11,01	0,11	0,003	1,5	10*	99,45
240	14,2	11,03	0,07	0,002	0,9	10*	99,65
270	11,7	10,60	0,05	0,001	0,7	10*	99,75

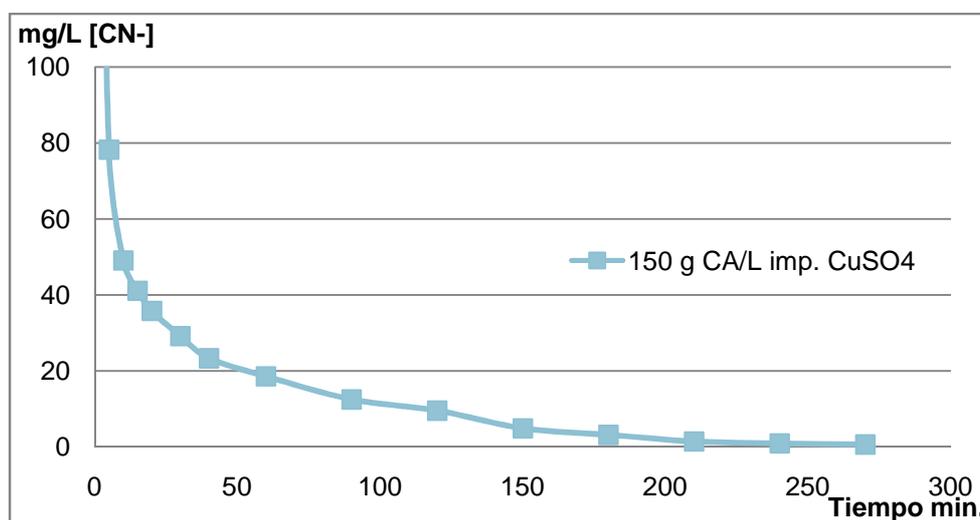


Figura VII.19: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 150 gCA/L impregnado con CuSO₄, pH=10,5 y Qa= 200 L/h

Ficha Técnica 20

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado: 200 g 8x20# impregnado con CuSO₄

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidacion %
0	0,0	12,00	2,03	0,508	269,3	10	0
5	18,5	10,20	0,93	0,233	123,4	10	54,19
10	17,2	10,33	0,57	0,143	75,6	10	71,92
20	16,8	10,20	0,35	0,088	46,4	10	82,76
30	15,7	10,20	0,21	0,053	27,9	10	89,66
60	14,9	10,40	0,34	0,034	18,0	25	93,30
90	20,8	10,27	0,21	0,021	11,1	25	95,86
120	14,6	10,29	0,90	0,023	11,9	10*	95,57
150	15,7	10,21	0,40	0,010	5,3	10*	98,03
180	19,5	10,40	0,30	0,008	4,0	10*	98,52
210	18,4	10,50	0,23	0,006	3,1	10*	98,87
240	14,7	10,44	0,15	0,004	2,0	10*	99,26
270	12,3	10,40	0,10	0,003	1,3	10*	99,51
300	18,5	10,47	0,05	0,001	0,7	10*	99,75

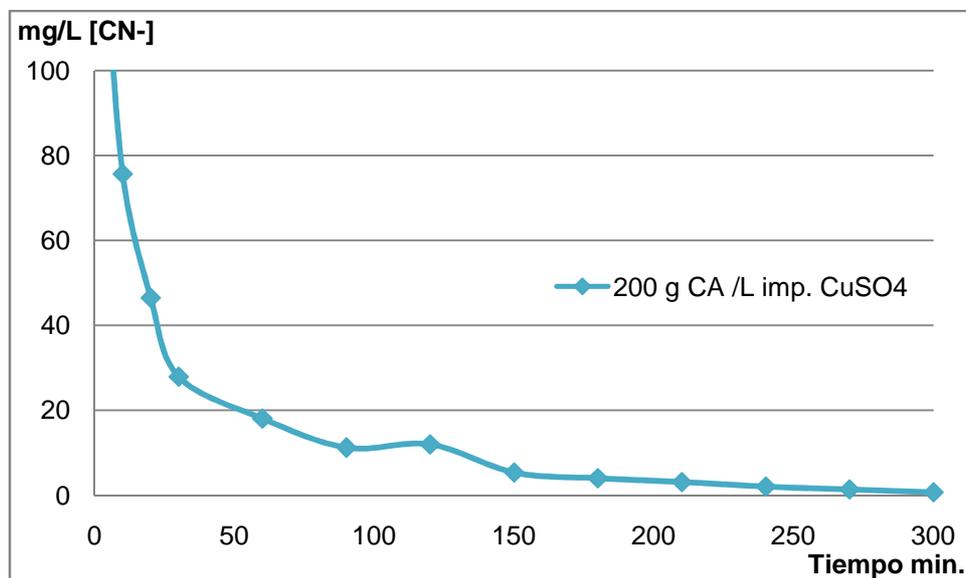


Figura VII.20: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 200 gCA/L impregnado con CuSO₄, pH=10,5 y Qa= 200 L/h

Ficha Técnica 21

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado: 100 g. 8x20# impregnado CuSO₄

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidacion %
0	0,0	12,00	2,08	0,520	275,9	10	0
5	15,0	10,35	1,06	0,265	140,6	10	49,04
10	17,8	10,34	0,90	0,225	119,4	10	56,73
20	17,0	10,36	0,70	0,175	92,9	10	66,35
30	16,5	10,38	0,58	0,145	76,9	10	72,12
60	13,6	10,31	0,40	0,100	53,1	10	80,77
90	12,1	10,37	0,32	0,080	42,4	10	84,62
120	11,2	10,31	0,25	0,063	33,2	10	87,98
150	16,3	10,44	0,50	0,050	26,5	25	90,38
180	9,4	10,30	0,40	0,040	21,2	25	92,31
210	18,1	10,41	0,33	0,033	17,5	25	93,65
240	12,1	10,40	1,10	0,028	14,6	10*	94,71
270	20,0	10,40	0,90	0,023	11,9	10*	95,67
300	13,5	10,31	0,78	0,020	10,3	10*	96,25
330	19,6	10,53	0,70	0,018	9,3	10*	96,63
360	16,7	10,47	0,62	0,016	8,2	10*	97,02
390	12,5	10,43	0,55	0,014	7,3	10*	97,36
420	11,5	10,32	0,50	0,013	6,6	10*	97,60
450	17,6	10,36	0,45	0,011	6,0	10*	97,84
480	14,6	10,43	0,45	0,011	6,0	10*	97,84

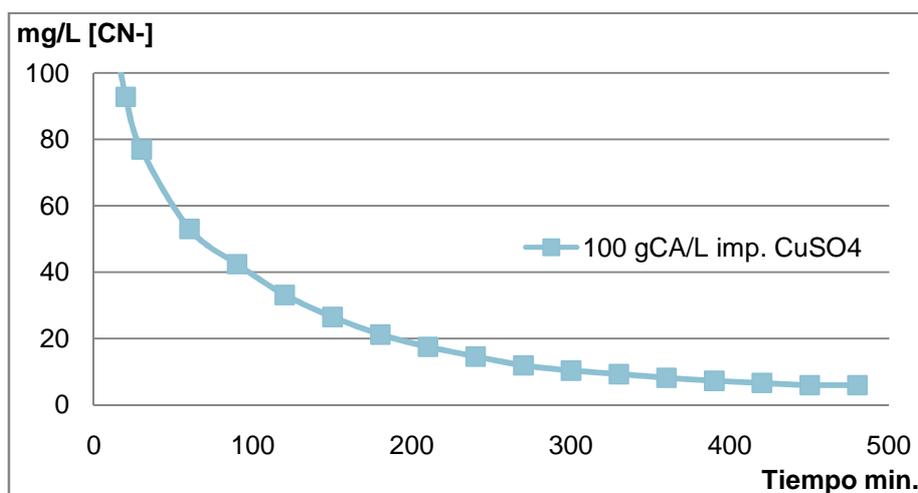


Figura VII.21: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 100 gCA/L impregnado con CuSO₄, pH=10,5 y Qa= 200 L/h

Ficha Técnica 22

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado: 100 g 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0,0	12,00	2,04	0,510	270,6	10	0
5	19,1	10,32	0,79	0,198	104,8	10	61,27
10	19,7	10,28	0,51	0,128	67,7	10	75,00
20	17,1	10,52	0,66	0,066	35,0	25	87,06
30	15,4	10,47	0,51	0,051	27,1	25	90,00
60	12,0	10,60	0,25	0,025	13,3	25	95,10
90	20,5	10,60	0,65	0,016	8,6	10*	96,81
120	18,8	10,25	0,30	0,008	4,0	10*	98,53
150	11,8	10,44	0,07	0,002	0,9	10*	99,66

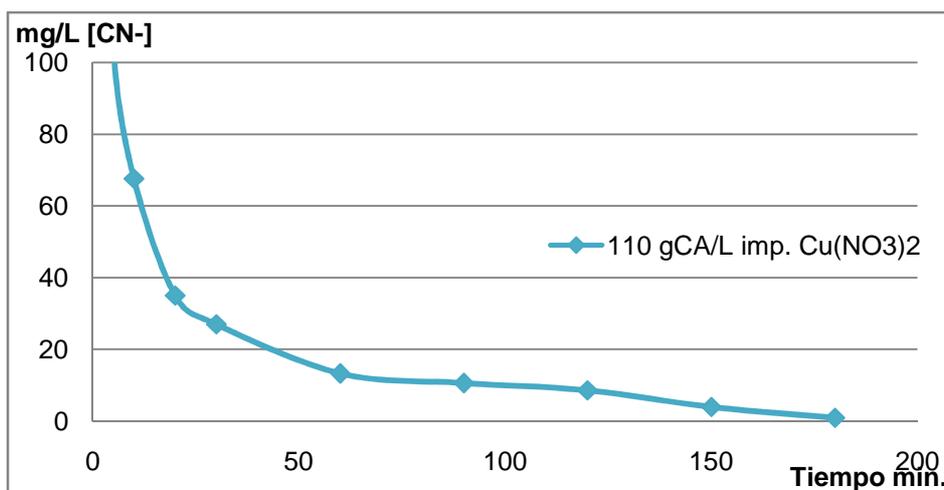


Figura VII.22: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 100 gCA/L impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h

Ficha Técnica 23

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

80 g Carbón Activado 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Aire: Flujo de 200 L/h

pH=10,3

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0,0	11,80	1,95	0,488	258,7	10	0
5	19,6	10,57	0,99	0,248	131,3	10	49,23
10	20,1	10,49	0,64	0,160	84,9	10	67,18
15	16,6	10,45	0,30	0,075	39,8	10	84,62
20	18,0	10,41	1,78	0,045	23,6	10*	90,87
30	14,1	10,53	1,10	0,028	14,6	10*	94,36
60	18,7	10,55	0,60	0,015	8,0	10*	96,92
90	20,2	10,49	0,45	0,011	6,0	10*	97,69
120	17,9	10,40	0,30	0,008	4,0	10*	98,46
150	15,3	10,44	0,20	0,005	2,7	10*	98,97
180	14,6	10,51	0,10	0,003	1,3	10*	99,49
210	16,2	10,43	0,06	0,002	0,8	10*	99,69

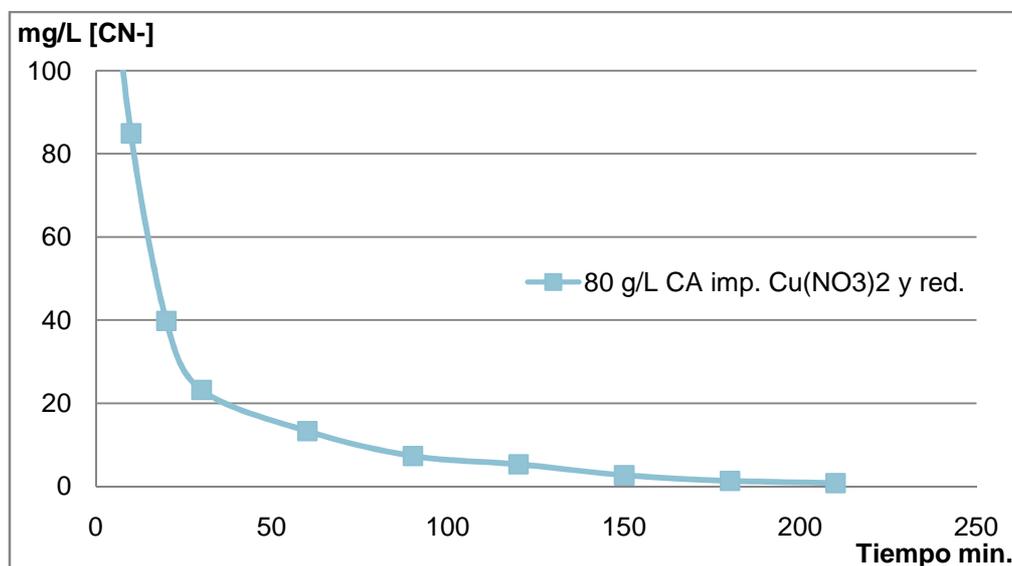


Figura VII.23: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 80 gCA/L impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h

Ficha Técnica 24

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 80 g. 8x20# impregnado con Cu(NO₃)₂ 2do uso

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,48

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ ml	NaCN g/l	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	0	12,17	2,01	0,503	266,6	10	0
5	13,2	10,40	1,19	0,298	157,9	10	40,80
10	15,7	10,57	0,93	0,233	123,4	10	53,73
15	18,1	10,45	0,75	0,188	99,5	10	62,69
20	16,8	10,39	0,52	0,130	69,0	10	74,13
30	15,5	10,40	0,31	0,078	41,1	10	84,58
60	15,4	10,30	0,18	0,045	23,9	10	91,04
90	13,2	10,46	1,15	0,029	15,3	10*	94,28
120	16,3	10,43	0,95	0,024	12,6	10*	95,27
150	15,6	10,38	0,67	0,017	8,9	10*	96,67
180	14,3	10,37	0,53	0,013	7,0	10*	97,36
210	16,8	10,38	0,4	0,010	5,3	10*	98,01
240	13,1	10,34	0,23	0,006	3,1	10*	98,86
270	14,2	10,48	0,18	0,005	2,4	10*	99,10
300	18,4	10,30	0,15	0,004	2,0	10*	99,25
330	15,9	10,44	0,13	0,003	1,7	10*	99,35
360	13,2	10,28	0,09	0,002	1,2	10*	99,55
390	16,4	10,32	0,05	0,001	0,7	10*	99,75

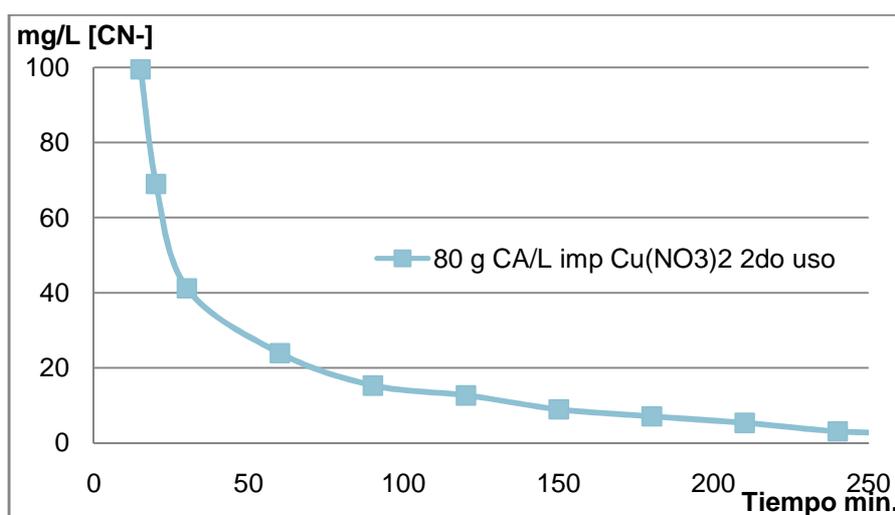


Figura VII.24 : Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 gCA/L impregnado con Cu(NO₃)₂, 2do uso, pH=10,5 y Qa= 200 L/h

Ficha Técnica 25

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

Carbon Activado: 80 g 8x20# impregnado con Cu(NO₃)₂ 3er uso

Flujo de Aire: 250 L/h

pH=10,24

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alícuota ml	Oxidación %
0	0,0	11,60	2,01	0,503	266,6	10	0
5	17,8	10,40	1,18	0,295	156,5	10	41,29
10	20,5	10,45	0,71	0,178	94,2	10	64,68
15	18,1	10,44	0,52	0,130	69,0	10	74,13
20	16,1	10,42	0,43	0,108	57,0	10	78,61
30	13,6	10,20	0,26	0,065	34,5	11	87,06
60	14,2	10,35	0,18	0,045	23,9	10	91,04
90	15,6	10,23	1,33	0,033	17,6	10	93,38
120	20,3	10,30	0,89	0,022	11,8	10	95,57
150	14,6	10,34	0,822	0,021	10,9	10*	95,91
180	15,0	10,31	0,692	0,017	9,2	10*	96,56
210	15,0	10,31	0,652	0,016	8,6	10*	96,76
240	13,6	10,34	0,622	0,016	8,3	10*	96,91
270	9,8	10,37	0,582	0,015	7,7	10*	97,10
300	13,1	10,39	0,522	0,013	6,9	10*	97,40
330	18,3	10,36	0,472	0,012	6,3	10*	97,65
360	13,6	10,34	0,442	0,011	5,9	10*	97,80
390	18,1	10,45	0,422	0,011	5,6	10*	97,90
420	13,0	10,52	0,402	0,010	5,3	10*	98,00
450	15,9	10,53	0,372	0,009	4,9	10*	98,15
480	14,8	10,48	0,322	0,00805	4,3	10*	98,398

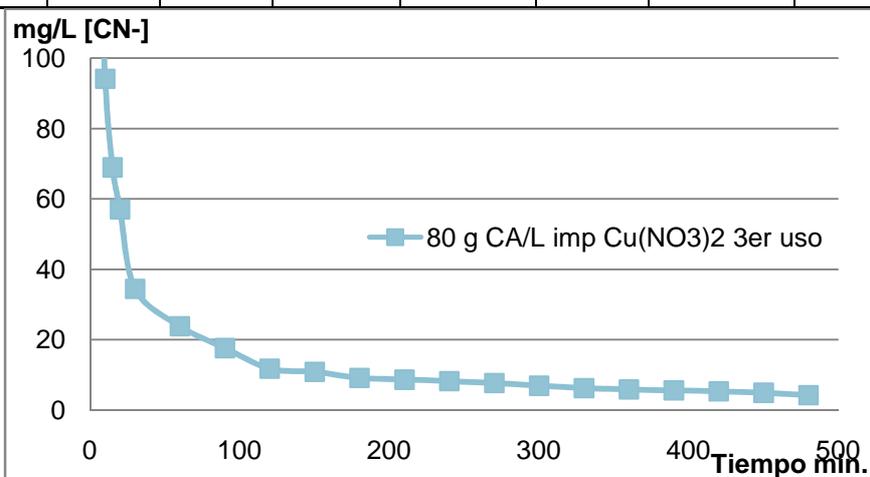


Figura VII.25: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 gCA/L impregnado con Cu(NO₃)₂, 3er uso, pH=10,5 y Qa= 200 L/h

Ficha Técnica 26

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

Carbon Activado: 80 g 8x20# impregnado con Cu(NO₃)₂ 4to uso

Flujo de Aire: 250 L/h

pH=10,4

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO ₃ ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alícuota ml	Oxidación %
0	0,0	11,60	1,99	0,498	264,0	10	0
5	16,2	10,48	1,21	0,303	160,5	10	39,20
10	15,1	10,30	0,89	0,221	117,4	10	55,53
15	17,3	10,37	0,70	0,175	92,9	10	64,82
20	19,8	10,43	0,57	0,143	75,6	10	71,36
30	18,0	10,47	0,45	0,113	59,7	10	77,39
60	13,4	10,19	0,23	0,058	30,5	10	88,44
90	14,5	10,30	1,85	0,046	24,5	10*	90,70
120	16,0	10,55	0,97	0,024	12,9	10*	95,13
150	12,8	10,36	0,76	0,019	10,1	10*	96,18
180	16,5	10,37	0,67	0,017	8,9	10*	96,63
210	15,7	10,37	0,60	0,015	8,0	10*	96,98
240	14,2	10,52	0,55	0,014	7,3	10*	97,24
270	17,4	10,50	0,55	0,014	7,3	10*	97,24
300	14,3	10,50	0,46	0,012	6,1	10*	97,69
360	14,2	10,31	0,39	0,010	5,2	10*	98,04
420	15,3	10,53	0,33	0,008	4,4	10*	98,34
480	14,5	10,46	0,29	0,007	3,8	10*	98,56

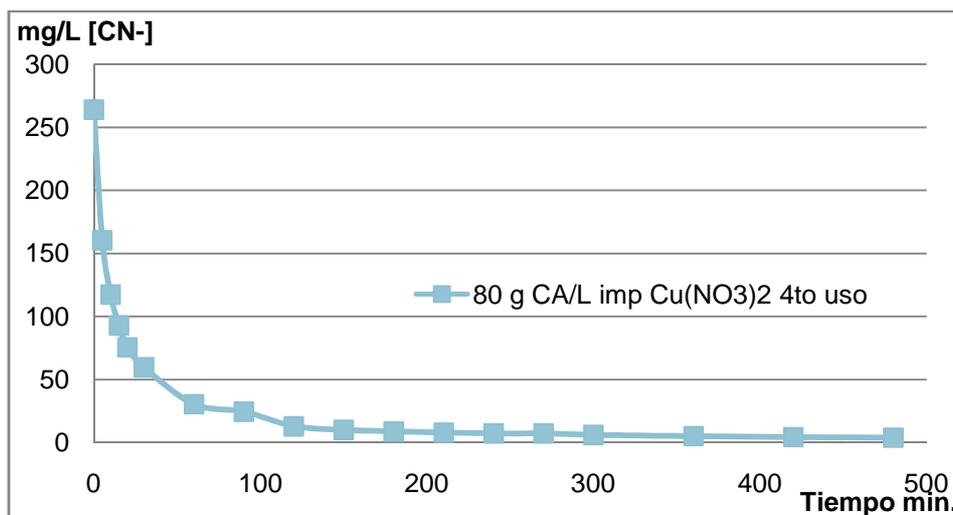


Figura VII.26: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 gCA/L impregnado con Cu(NO₃)₂, 4to uso, pH=10,5 y Qa= 200 L/h

Ficha Técnica 27

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

Carbon Activado: 80 g 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 5to uso

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,4

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alícuota ml	Oxidación %
0	0,0	12,11	2,01	0,503	266,6	10	0,00
5	13,0	10,65	1,48	0,370	196,3	10	26,37
10	14,0	10,56	1,18	0,295	156,5	10	41,29
15	14,5	10,62	1,03	0,258	136,6	10	48,76
20	16,8	10,36	0,83	0,208	110,1	10	58,71
30	15,7	10,59	0,58	0,145	76,9	10	71,14
60	14,7	10,40	0,33	0,083	43,8	10	83,58
90	14,1	10,23	0,26	0,065	34,5	10	87,06
120	14,2	10,20	1,80	0,045	23,9	10	91,04
150	14,3	10,53	1,26	0,032	16,7	10*	93,73
180	15,5	10,36	1,06	0,027	14,1	10*	94,73
210	14,1	10,23	0,96	0,024	12,7	10*	95,22
240	15,8	10,53	0,76	0,019	10,1	10*	96,22
270	15,1	10,41	0,66	0,017	8,8	10*	96,72
300	12,6	10,38	0,61	0,015	8,1	10*	96,97
360	15,3	10,45	0,57	0,014	7,6	10*	97,16
420	12,8	10,43	0,46	0,012	6,1	10*	97,71
480	14,3	10,32	0,41	0,010	5,4	10*	97,96

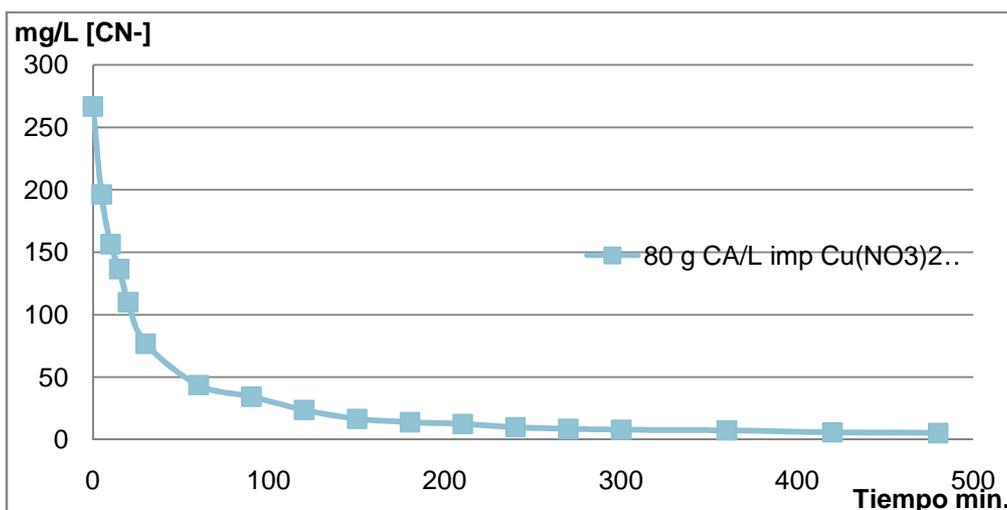


Figura VII.27: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 80 gCA/L impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 5to uso, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h

Ficha Técnica 28

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

Carbon Activado: 80 g 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 6to uso

Flujo de Aire: 250 L/h

pH=10,4

Tiempo min.	Qaire	pH	AgNO3 ml	NaCN g/L	CN ⁻ mg/L	Alicuota ml	Oxidación %
0	16,5	10,53	2	0,500	265,3	10	0
5	14,8	10,45	1,54	0,385	204,3	10	23,00
10	13,2	10,53	1,39	0,348	184,4	10	30,50
15	15,1	10,65	1,27	0,318	168,5	10	36,50
20	14,4	10,41	1,17	0,293	155,2	10	41,50
30	19,2	10,36	1,00	0,250	132,7	10	50,00
60	15	10,39	0,67	0,168	88,9	10	66,50
90	17,5	10,40	0,43	0,108	57,0	10	78,50
120	19,2	10,35	0,26	0,065	34,5	10	87,00
150	18,7	10,40	1,70	0,425	25,0	10*	90,58
180	14,3	10,36	1,49	0,373	19,0	10*	92,84
210	12,9	10,57	1,30	0,325	16,0	10*	93,97
240	12,9	10,34	1,19	0,298	13,6	10*	94,89
270	13,6	10,33	1,05	0,263	11,2	10*	95,77
300	14,8	10,45	0,98	0,026	9,4	10*	96,46
360	12,8	10,42	0,92	0,016	8,5	10*	96,80
480	11,9	10,37	0,88	0,015	7,7	10*	97,10

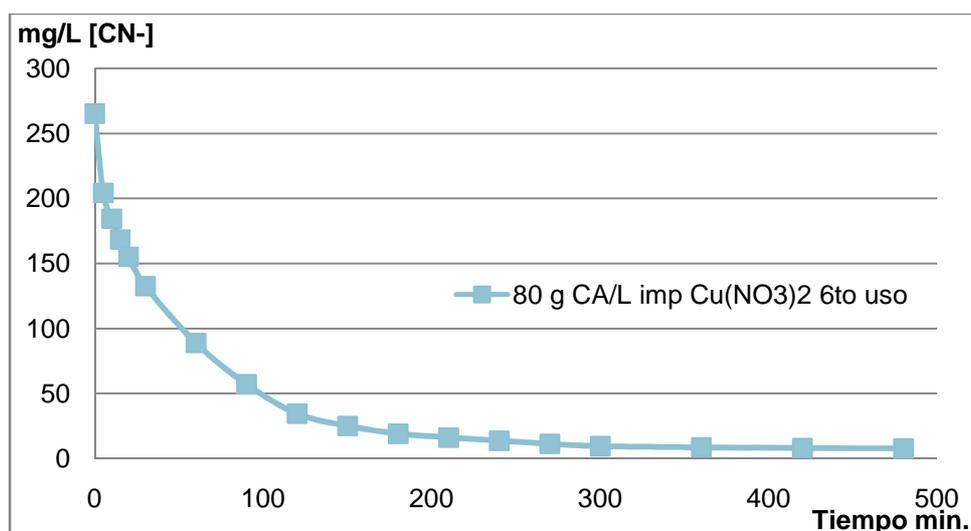


Figura VII.28: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 80 gCA/L impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 6to uso, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h

Ficha Técnica 29

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

Carbón Activado: 150 g/L 8x20# 1er uso reducido en Horno Nicholls

Flujo de Aire: 150 L/h

pH=11

#	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	10,77	249,3	493,40	261,80	0,00
2	5	11,20	108,5	3,60	1,91	99,27
3	10	11,30	48,3	0,80	0,42	99,84
4	15	11,20	32,6	0,25	0,13	99,95
5	20	11,15	27,0	0,20	0,11	99,96
6	30	10,70	26,0	0,18	0,10	99,96
7	60	10,80	19,0	0,16	0,08	99,97

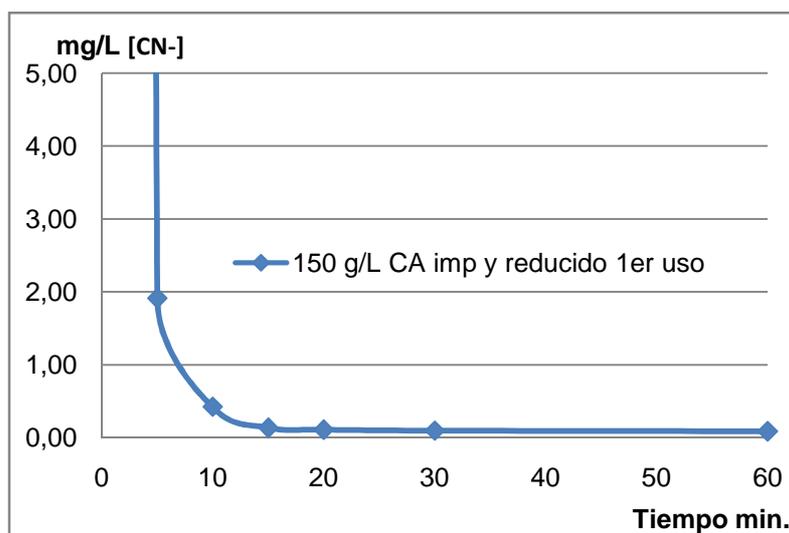


Figura VII.29: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 150 g CA/L impregnado con Cu(NO₃)₂ y reducido, pH=11 y Q_a= 150 L/h

Ficha Técnica 30

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

Carbon Activado: 80 g/ L 8x20# 1er uso reducido en Horno Nicholls

Flujo de Aire: 150 L/h

pH=11

#	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidacion
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	10,53	249,2	491,52	260,80	0,0
2	5	11,16	179,7	55,81	29,61	88,65
3	10	10,97	155,9	30,91	16,40	93,71
4	15	10,72	141,8	15,45	8,20	96,86
5	20	11,02	134,1	9,04	4,80	98,16
6	30	10,93	124,9	5,97	3,17	98,79
7	60	10,89	117,7	4,10	2,18	99,17
8	90	10,89	110,9	3,48	1,85	99,29
9	120	10,75	105,7	2,89	1,53	99,41
10	150	10,65	99,7	2,19	0,16	99,55
11	180	10,54	95,3	1,72	0,91	99,65
12	210	10,43	94,2	1,59	0,84	99,68

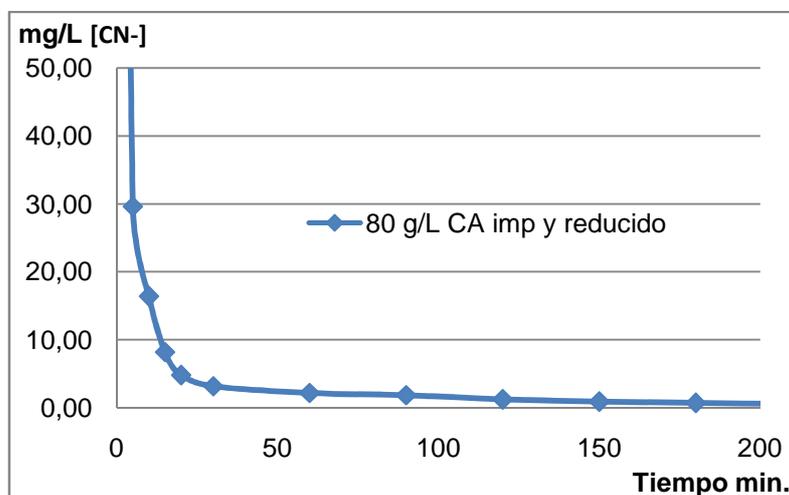


Figura VII.30 : Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 g CA/L impregnado con Cu(NO₃)₂ y reducido 1er uso, pH=11 y Qa= 150 L/h

Ficha Técnica 31

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/l

Carbon Activado: 80 g/L 8x20# 2do uso reducido en Horno Nicholls

Flujo de Aire: 150 L/h

pH=11

#	Tiempo	pH	Medida	NaCN	CN ⁻	Oxidacion
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	10,61	249,7	493,26	261,72	0,00
2	2,5	11,15	229,6	244,05	129,49	50,52
3	5	11,03	219,3	170,16	90,29	65,50
4	7,5	10,92	206,1	107,17	56,87	78,27
5	10	10,89	186,8	54,50	28,92	88,95
6	15	10,95	180,4	43,55	23,11	91,17
7	20	10,57	169,9	30,13	15,99	93,89
8	25	10,43	167,7	27,89	14,80	94,35
9	30	10,48	162,8	23,48	12,46	95,24
10	40	10,36	158,3	20,05	10,64	95,94
11	60	10,35	148,2	14,06	7,46	97,15
12	90	10,35	136,1	9,18	4,87	98,14
13	120	10,20	129,4	7,24	3,84	98,53
14	150	10,41	121,7	5,51	2,92	98,88
15	180	10,39	115,9	4,48	2,38	99,09
16	210	10,37	106,5	3,20	1,70	99,35
17	270	10,35	101,2	2,65	1,41	99,46
18	300	10,50	96,3	2,22	1,18	99,55
19	360	10,45	91,8	1,88	1,00	99,62
20	420	10,44	86,6	1,56	0,83	99,68
21	480	10,51	83,1	1,37	0,73	99,72

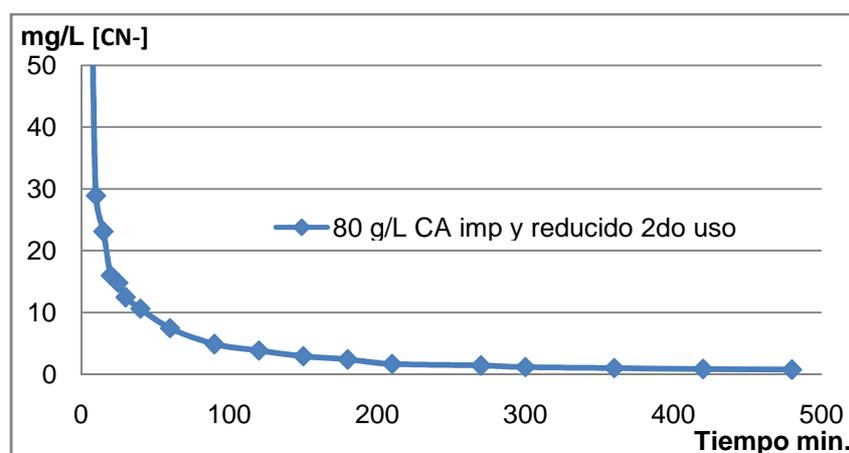


Figura VII.31: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 g CA/L impregnado con Cu(NO₃)₂ y reducido 2do uso, pH=10,5 y Qa= 150 L/h

Ficha Técnica 32

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado 80 g/L 8x20# 3er uso reducido en Horno Nicholls

Flujo de Aire: 150 L/h

pH=10,5

#	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidacion
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	10,71	249,0	481,32	255,39	0,00
2	5	10,63	221,2	181,86	96,50	63,13
3	10	10,57	212,9	135,99	72,16	72,43
4	20	10,45	193,7	69,41	36,83	85,93
5	30	10,42	185,8	52,62	27,92	89,33
6	60	10,21	171,8	32,21	17,09	93,47
7	90	10,47	160,7	21,81	11,57	95,58
8	120	10,49	151,3	15,68	8,32	96,82
9	150	10,25	147,5	13,71	7,28	97,22
10	180	10,36	142,1	11,34	6,02	97,70
11	240	10,44	138,2	9,88	5,24	98,00
12	300	10,34	136,7	9,37	4,97	98,10
13	360	10,25	133,8	8,46	4,49	98,28
14	420	10,75	131,4	7,77	4,12	98,42
15	480	10,58	128,7	7,06	3,75	98,57

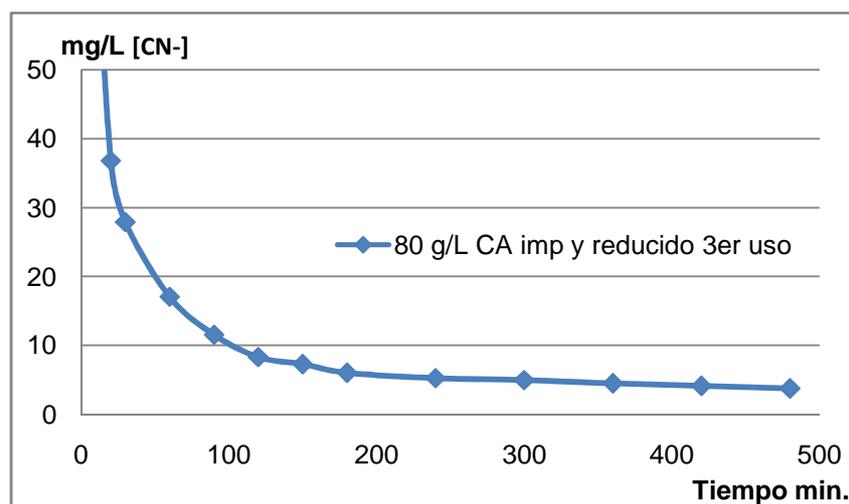


Figura VII.32: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 g CA/L impregnado con Cu(NO₃)₂ y reducido 3er uso, pH=10,5 y Qa= 150 L/h

Ficha Técnica 33

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado 80 g/L 8x20# 4to uso reducido en Horno Nicholls

Flujo de Aire: 150 L/h

pH=10,5

#	Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
1	0	10,83	249,1	483,00	256,28	0,00
2	5	10,76	228,0	230,75	122,44	52,23
3	10	10,79	216,5	154,27	81,85	68,06
4	20	10,80	206,0	106,80	56,67	77,89
5	30	10,59	191,9	65,17	34,58	86,51
6	60	10,32	175,5	36,67	19,46	92,41
7	90	10,43	163,7	24,24	12,86	94,98
8	120	10,36	158,1	19,91	10,56	95,88
9	150	10,38	154,3	17,42	9,24	96,39
10	210	10,50	151,9	16,01	8,49	96,69
11	240	10,52	148,6	14,25	7,56	97,05
12	300	10,55	144,2	12,21	6,48	97,47
13	360	10,40	142,9	11,66	6,19	97,59
14	420	10,46	140,4	10,68	5,67	97,79
15	480	10,40	137,8	9,74	5,17	97,98

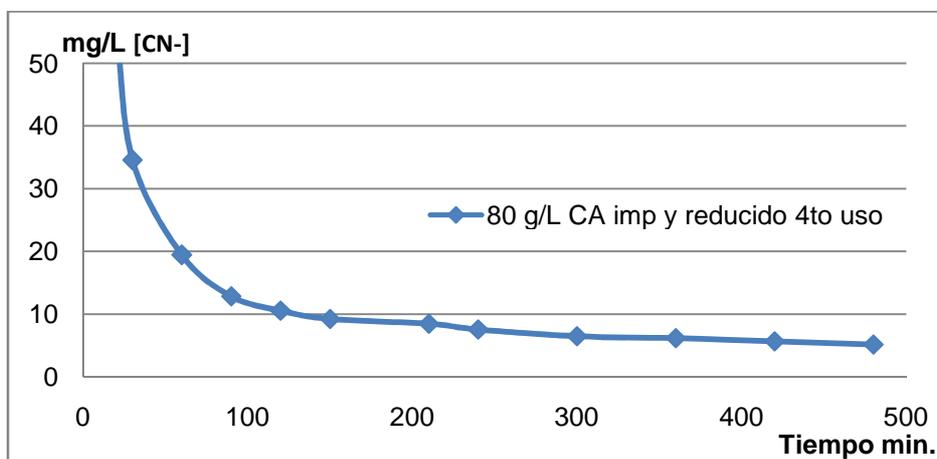


Figura VII.33: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 g CA/L impregnado con Cu(NO₃)₂ y reducido 4to uso, pH=10,5 y Q_a= 150 L/h

Ficha Técnica 34

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado 80 g/L 8x20# 5to uso reducido en Horno Nicholls

Flujo de Aire: 150 L/h

pH=10,5

#	Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
1	0	10,71	249,3	486,40	258,08	0,00
2	5	10,68	230,6	252,74	134,11	48,04
3	10	10,65	213,7	139,86	74,21	71,25
4	20	10,62	195,0	72,65	38,55	85,06
5	30	10,68	187,9	56,64	30,06	88,35
6	60	10,35	184,9	50,99	27,06	89,52
7	90	10,24	179,1	41,61	22,08	91,45
8	120	10,16	171,2	31,54	16,73	93,52
9	180	10,15	169,4	29,61	15,71	93,91
10	240	10,10	165,9	26,18	13,89	94,62
11	300	10,10	162,1	22,91	12,16	95,29
12	360	10,20	155,2	17,98	9,54	96,30
13	420	10,15	153,1	16,70	8,86	96,57
14	480	10,19	151,6	15,84	8,41	96,74

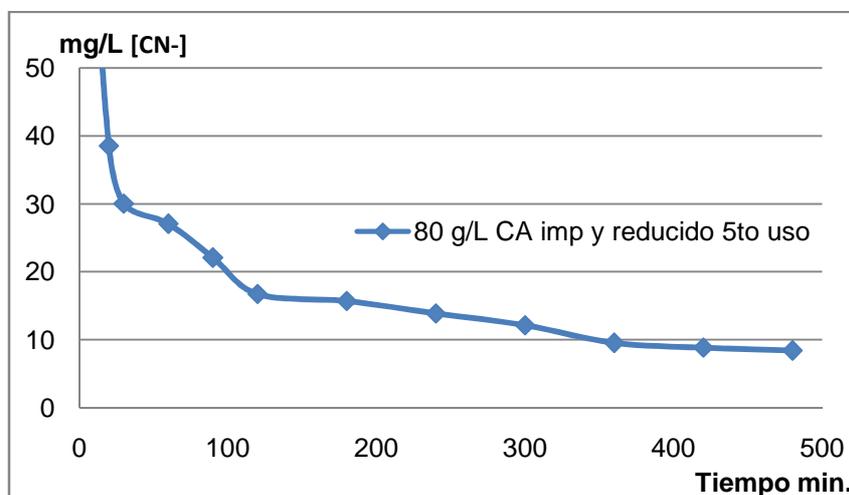


Figura VII.34: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 g CA/L impregnado con Cu(NO₃)₂ y reducido 5to uso, pH=10,5 y Q_a= 150 L/h

Ficha Técnica 35

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbon Activado 80 g/L 8x20# virgen

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

#	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
	min.		electrodo			
1	0	10,75	248,9	479,72	254,54	0,00
2	5	10,68	247,0	448,85	238,16	6,43
3	10	10,58	246,6	442,61	234,85	7,73
4	20	10,57	245,3	422,92	224,40	11,84
5	30	10,57	243,8	401,29	212,93	16,35
6	60	10,48	240,9	362,56	192,37	24,42
7	90	10,40	236,6	311,90	165,50	34,98
8	120	10,32	234,2	286,77	152,16	40,22
9	150	10,24	231,3	259,09	137,48	45,99
10	180	10,37	228,0	230,83	122,48	51,88
11	210	10,23	226,8	221,34	117,44	53,86
12	270	10,49	220,4	176,92	93,87	63,12
13	300	10,39	217,4	159,28	84,52	66,80
14	360	10,25	214,3	142,91	75,83	70,21

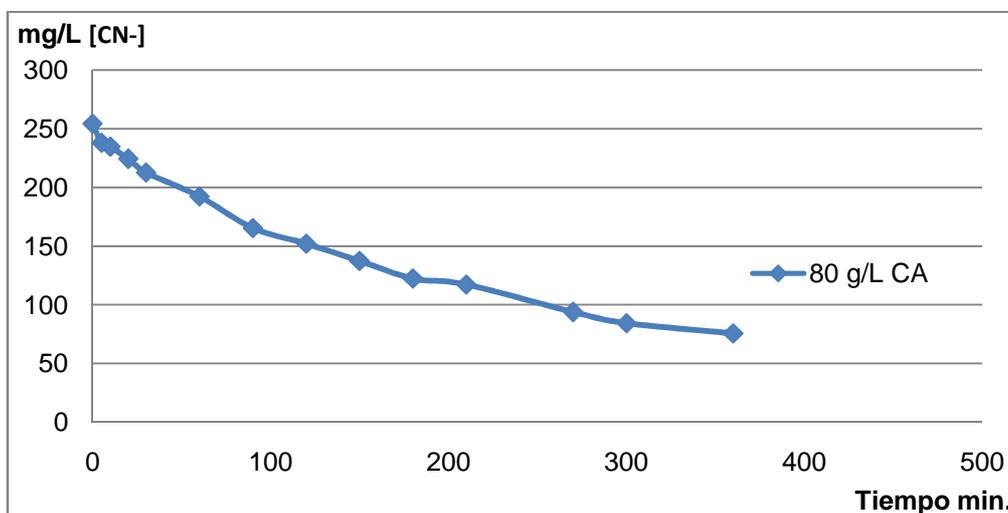


Figura VII.35: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 g CA/L virgen, pH=10,5 y Q_a= 200 L/h

Ficha Técnica 36

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado 60 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

#	Tiempo	pH	Medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	11,12	248,5	473,05	251,00	0,0
2	2,5	10,76	228,3	233,27	123,77	50,7
3	5	10,77	218,5	165,54	87,83	65,0
4	10	10,70	197,6	79,65	42,26	83,2
5	15	10,52	188,8	58,54	31,06	87,6
6	20	10,48	182,6	47,12	25,00	90,0
7	30	10,38	178,1	40,25	21,36	91,5
8	60	10,51	171,6	32,06	17,01	93,2
9	90	10,62	167,1	27,39	14,53	94,2
10	120	10,37	161,8	22,75	12,07	95,2
11	180	10,35	153,9	17,26	9,16	96,4
12	240	10,42	150,1	15,11	8,02	96,8
13	300	10,46	147,8	13,94	7,40	97,1
14	360	10,52	145,2	12,73	6,75	97,3

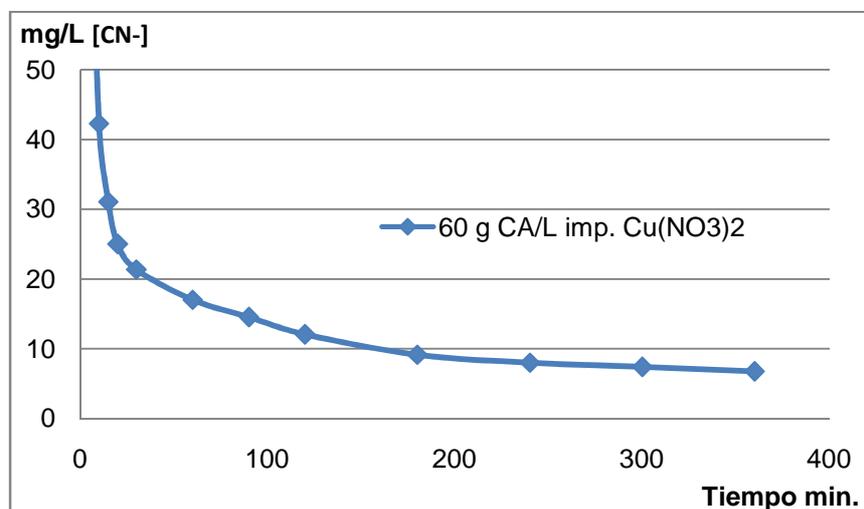


Figura VII.36: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 60 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h

Ficha Técnica 37

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado 75 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ reducido

Pulpa: 6,5% Sólidos

Agitación: no

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

Tiempo min.	pH	Q aire	medida electrodo	NaCN mg/L	CN- mg/L	Oxidación %
0	10,56	4,0	341,2	499,2	264,88	0,00
5	10,55	19,0	313,7	176,0	93,39	64,74
10	10,53	18,0	307,1	120,0	63,67	75,96
15	10,52	21,0	299,5	86,0	45,63	82,77
20	10,50	20,5	292,9	68,5	36,35	86,28
30	10,48	20,1	286,5	51,0	27,06	89,78
60	10,28	19,0	268,9	28,0	14,86	94,39
90	10,25	18,8	266,9	23,0	12,20	95,39
120	10,16	17,3	264,2	21,0	11,14	95,79
150	10,08	19,3	256,1	17,0	9,02	96,59
180	10,76	14,2	255,6	15,0	7,96	97,00
210	10,69	18,1	254,1	14,0	7,43	97,20
240	10,62	15,3	252,8	13,0	6,90	97,40
270	10,52	19,3	249,4	12,0	6,37	97,60
300	10,40	14,9	247,9	11,0	5,84	97,80
360	10,29	15,0	245,1	10,5	5,57	97,90
420	10,21	17,9	241,8	9,1	4,83	98,18

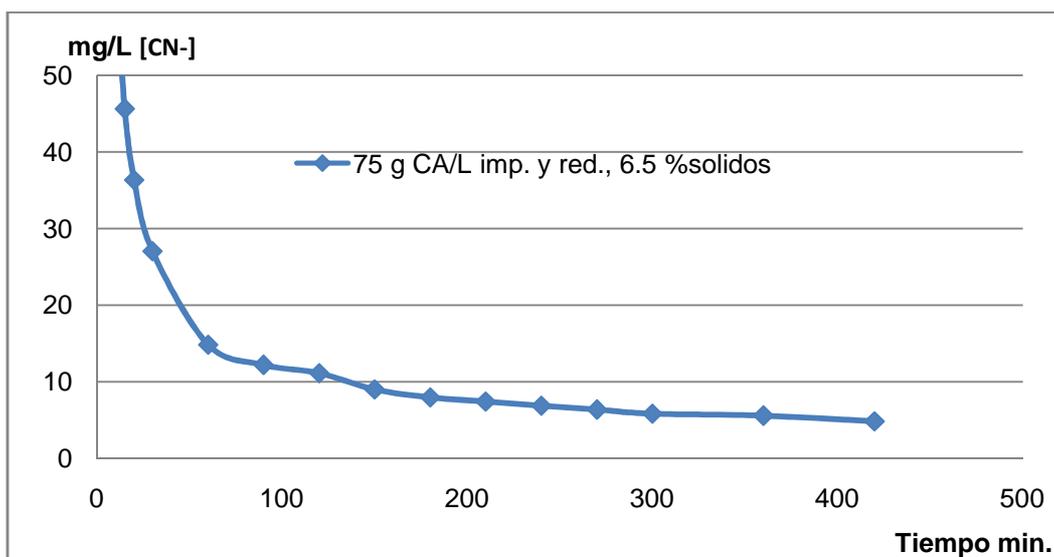


Figura VII.37: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando 75 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h, solución al 6,5 % sólidos

Ficha Técnica 38

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado 75 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y reducido

Pulpa: 10% Sólidos

Agitación: no

Flujo de Aire: 240 L/h

pH=10,5

#	Tiempo min.	pH	Q aire	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
1	0	10,75	18,0	338,4	430,0	228,16	0,00
2	5	10,71	15,7	318,2	205,0	108,77	52,33
3	10	10,65	17,0	308,7	110,0	58,37	74,42
4	15	10,59	16,5	302,1	92,0	48,82	78,60
5	20	10,54	13,4	297,9	87,0	46,16	79,77
6	30	10,43	15,7	290,0	60,0	31,84	86,05
7	60	10,60	16,3	278,2	39,0	20,69	90,93
8	90	10,34	19,5	273,0	30,5	16,18	92,91
9	120	10,58	19,8	271,8	28,5	15,12	93,37
10	150	10,27	18,7	269,7	26,5	14,06	93,84
11	180	10,37	18,1	264,5	21,7	11,51	94,95
12	210	10,27	15,1	263,5	20,1	10,67	95,33
13	240	10,35	18,5	261,5	18,6	9,87	95,67
14	300	10,23	13,2	256,3	16,1	8,54	96,26
15	360	10,45	16,4	253,8	14,0	7,43	96,74
16	420	10,20	14,6	249,2	11,7	6,21	97,28
17	465	10,36	10,2	247,3	10,7	5,68	97,51

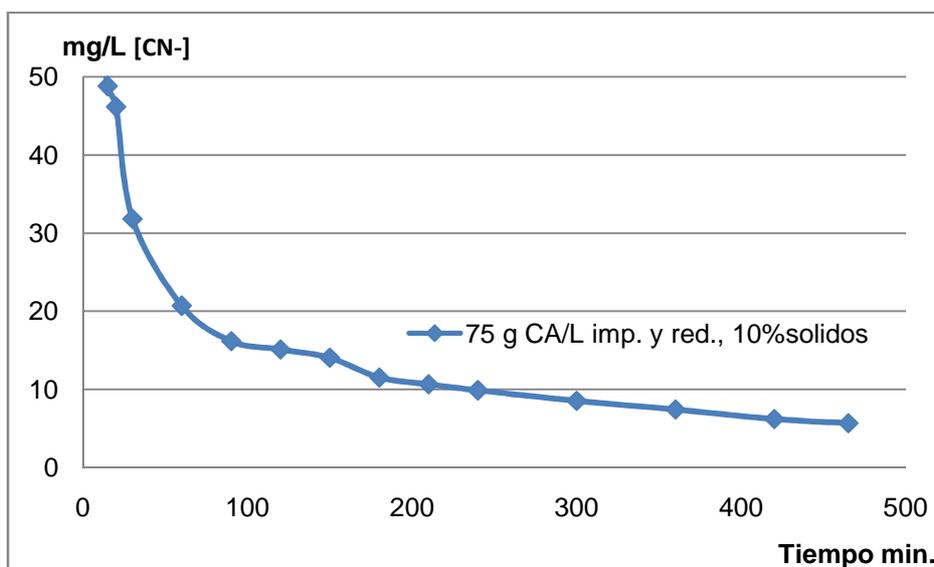


Figura VII.38: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando 75 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h, solución al 10 % sólidos

Ficha Técnica 39

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado 70 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y reducido

Pulpa: 33% Sólidos

Agitación: 400 rpm

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

#	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	11,09	237,7	498,32	264,41	0,0
2	5	10,45	193,8	78,88	41,86	84,2
3	10	10,53	180,5	45,14	23,95	90,9
4	15	10,35	171,6	31,08	16,49	93,8
5	20	10,63	167,7	26,39	14,00	94,7
6	25	10,60	160,9	19,85	10,53	96,0
7	30	10,36	154,5	15,18	8,05	97,0
8	40	10,42	148,8	11,96	6,35	97,6
9	60	10,47	142,0	9,00	4,78	98,2
10	90	10,55	133,6	6,34	3,36	98,7
11	120	10,62	123,7	4,20	2,23	99,2
12	150	10,47	113,8	2,79	1,48	99,4
13	180	10,38	102,5	1,75	0,93	99,6

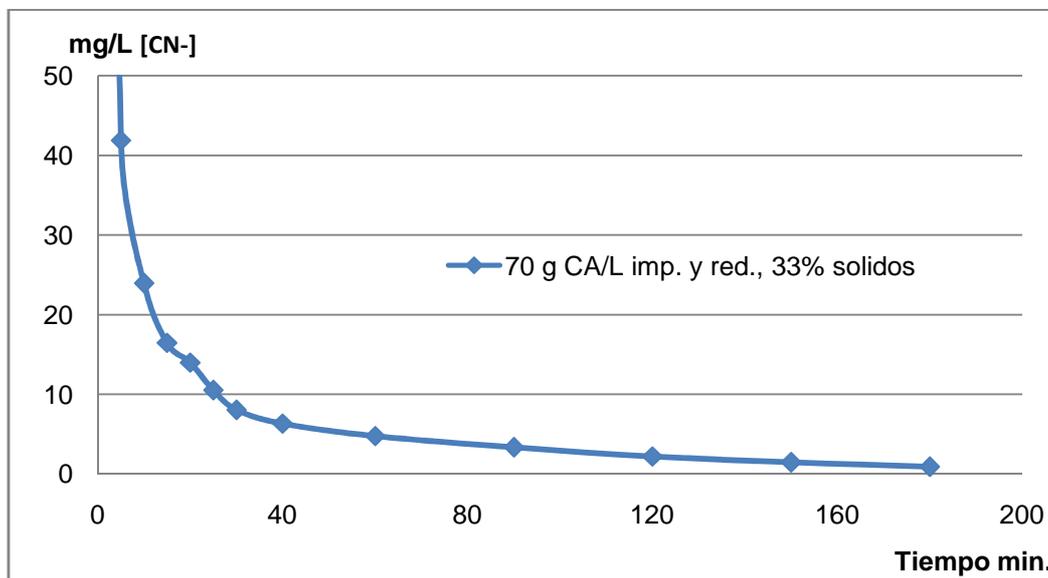


Figura VII.39: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando 70 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=200$ L/h, solución al 33 % sólidos y agitación mecánica 400 rpm.

Ficha Técnica 40

Parámetros

ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE COBRE RESIDUAL EN LA SOLUCIÓN

Volumen: 1 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado 60 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ sin lavado

Pulpa: 0% Sólidos

Agitación: 400 rpm

Flujo de Aire: 190 L/h

pH=10,5

	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
#	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	11,51	237,8	500,37	265,49	0,0
2	5	10,85	192,5	74,56	39,56	85,1
3	10	10,24	174,1	34,38	18,24	93,1
4	15	10,8	169,6	28,45	15,10	94,3
5	20	10,54	166,9	25,39	13,47	94,9
6	30	10,27	161,8	20,48	10,87	95,9
7	40	10,05	154,6	15,11	8,02	97,0
8	60	10,95	149,9	12,39	6,58	97,5
9	90	10,31	141,2	8,58	4,55	98,3
10	120	10,02	131,7	5,73	3,04	98,9
11	150	10,47	123,7	4,07	2,16	99,2
12	180	10,47	117,0	3,05	1,62	99,4

**Análisis por Absorción Atómica de Cu
En solución**

67,5 mgCu/L

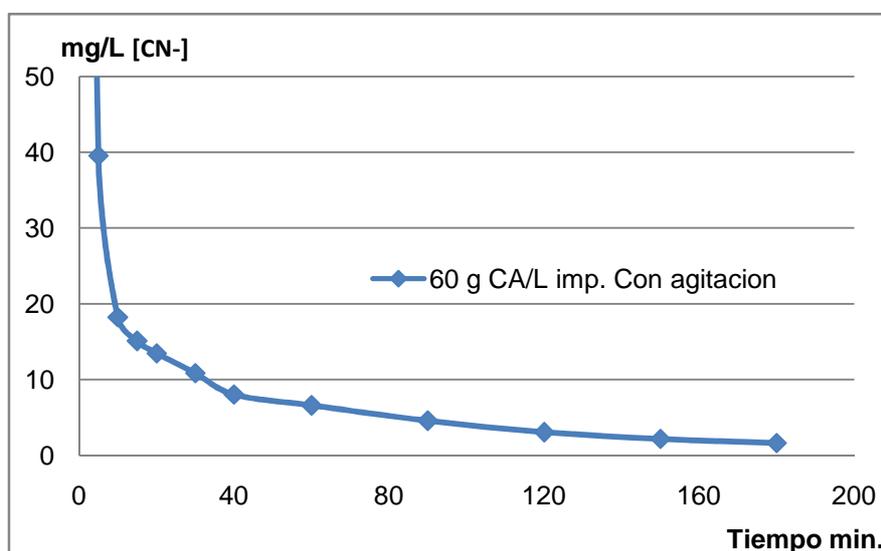


Figura VII.40: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando 60 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5, $Q_a= 200$ L/h y agitación 400 rpm

Ficha Técnica 41

Parámetros

Columna: 3 litros de solución de NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con Cr+6 y Plata

Pulpa: 0% Sólidos

Agitación: no

Flujo de Aire: 200 L/h

pH=10,5

#	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	10,93	353,2	498,30	264,40	0,00
2	2,5	10,74	344,8	359,10	190,54	27,93
3	5	10,63	333,1	227,53	120,73	54,34
4	10	10,53	323,3	155,26	82,38	68,84
5	15	10,37	316,1	117,25	62,21	76,47
6	20	10,25	308,6	87,51	46,43	82,44
7	30	10,22	298,6	59,25	31,44	88,11
8	60	10,14	282,2	31,26	16,58	93,73
9	90	11,32	274	22,70	12,04	95,44
10	120	11,08	267,8	17,82	9,46	96,42
11	150	10,75	259,5	12,90	6,84	97,41
12	180	10,25	253,8	10,33	5,48	97,93
13	210	10,05	249,4	8,70	4,61	98,25
14	240	10,17	244,7	7,24	3,84	98,55
15	300	10,73	238,1	5,60	2,97	98,88
16	360	10,43	234,5	4,86	2,58	99,02
17	420	10,34	231,1	4,26	2,26	99,15

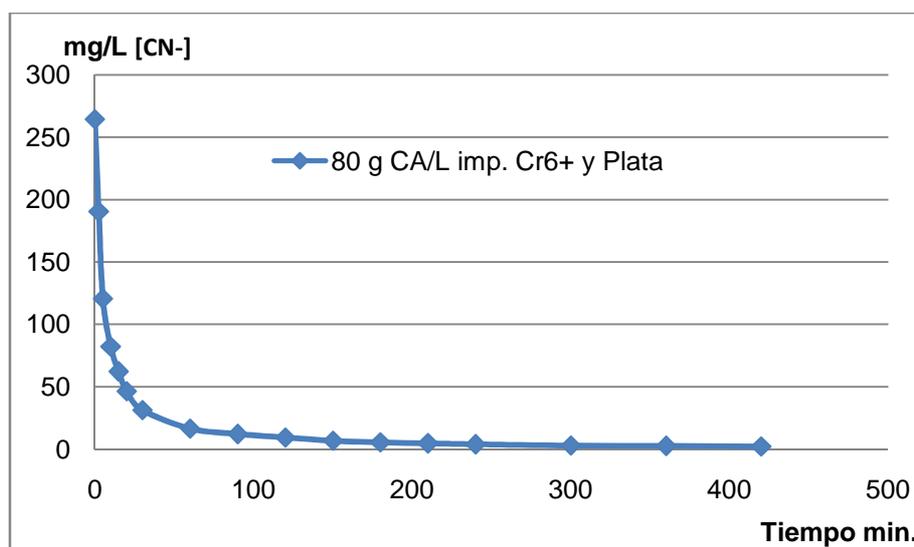


Figura VII.41: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando 80 g CA/L impregnado Cr⁶⁺ y Ag, pH=10,5 y Q_a= 200 L/h.

Ficha Técnica 42

Parámetros

Columna: 3 litros de solución cianurada en laboratorio.

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Pulpa: 30% Sólidos

Agitación: 400 rpm

Flujo de Aire: 190 L/h

pH=10,5

#	Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
	min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
1	0	10,96	307,9	160,32	85,07	0,0
2	2,5	10,89	263,1	28,96	15,36	81,9
3	5	10,86	258,5	24,29	12,89	84,8
4	10	10,80	252,5	19,32	10,25	88,0
5	15	10,71	246,9	15,60	8,27	90,3
6	20	10,62	242,4	13,13	6,97	91,8
7	30	10,52	231,6	8,69	4,61	94,6
8	60	10,46	215,8	4,75	2,52	97,0
9	90	10,39	202,1	2,82	1,49	98,2
10	120	10,32	193,0	1,99	1,06	98,8
11	150	10,26	189,7	1,75	0,93	98,9
12	180	10,36	186,9	1,58	0,84	99,0
13	210	10,24	184,5	1,44	0,76	99,1
14	240	10,28	183,3	1,37	0,73	99,1

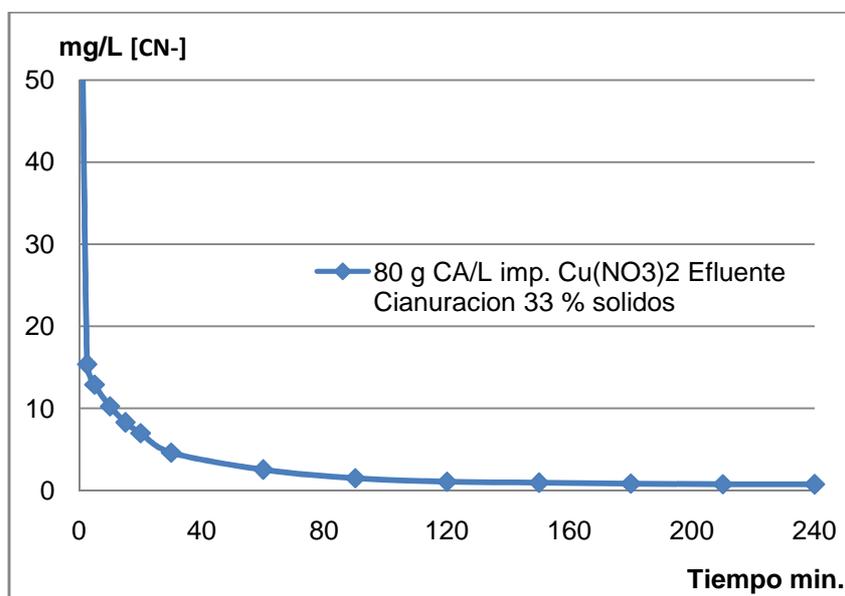


Figura VII.42: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando 80 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=190$ L/h, solución cianurada al 33 % sólidos y agitación mecánica 400 rpm.

Ficha Técnica 43

Ficha Técnicas de oxidación de cianuro en procesos continuos a través de un lecho empacado

Parámetros

Columna: empacada altura 15 cm

Volumen: 2 litros de solución 0,5 g/L NaCN.

Carbón Activado: 280 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Flujo de Aire: no pH=10,5

Tiempo: 150 min.

pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
	electrodo	mg/L	mg/L	%
10,81	353	473,701	251,35	0,0
11,02	254,3	9,988	5,30	97,9
10,75	255,4	10,427	5,53	97,8
10,54	231,1	4,032	2,14	99,1
10,4	212,1	1,918	1,02	99,6
10,47	193,8	0,938	0,50	99,8

Ficha Técnica 44

Ficha Técnicas de oxidación de cianuro en procesos continuos a través de un lecho empacado

Parámetros

Columna: empacada altura 15 cm

Volumen: 3 litros de solución 0,5 g/L NaCN.

Carbón Activado: 280 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Flujo de Aire: no

pH=10,5

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,82	353,7	504,37	267,62	0,0
84	10,44	248,5	8,16	4,33	98,4
156	11,43	221,1	2,62	1,39	99,5
226	10,48	176,8	0,45	0,24	99,9

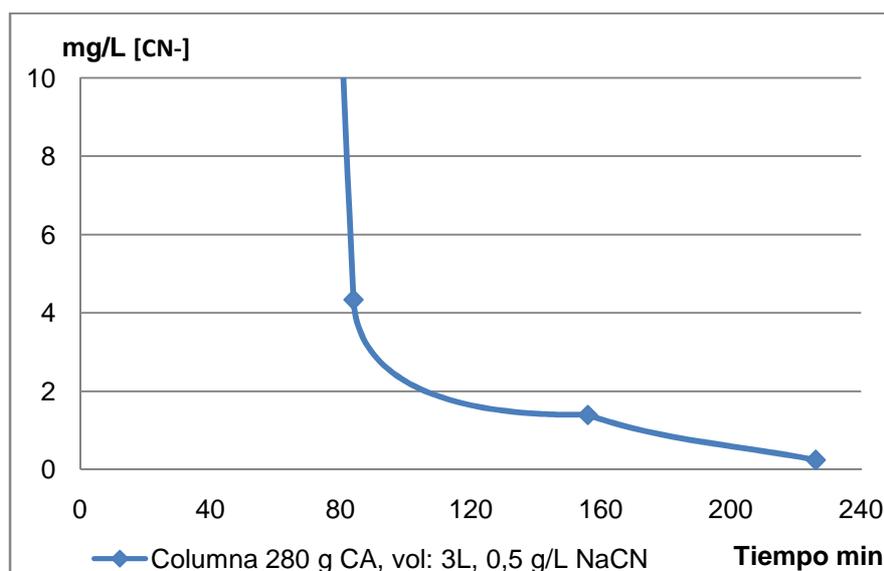


Figura VII.43: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando columna empacada 280 g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5, sin aire.

Ficha Técnica 45

Ficha Técnicas de oxidación de cianuro en procesos continuos a través de un lecho empacado

Parámetros

Columna: empacada altura 15 cm

Volumen: 3 litros de solución 0,5 g/L NaCN.

Carbón Activado: 245 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Flujo de Aire: no

pH=10,5

Tiempo	pH	medida	NaCN	CN ⁻	Oxidación
min.		electrodo	mg/L	mg/L	%
0	10,78	352,9	497,102	263,76	0,0
84	10,45	248,3	7,735	4,10	98,4
149	10,87	234,9	4,538	2,41	99,1
184	10,29	215	2,055	1,09	99,6

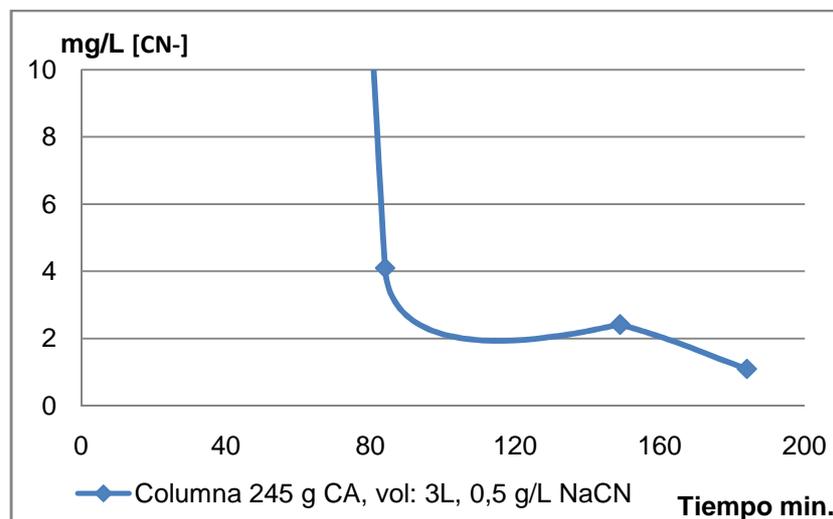


Figura VII.44: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando columna empacada 245 g CA impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5, sin aire.

Ficha Técnica 46

Ficha Técnicas de oxidación de cianuro en procesos continuos a través de un lecho empacado

Parámetros

Columna: empacada altura 15 cm

Volumen: 3 litros de solución 0,5 g/L NaCN.

Carbón Activado: 270 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Flujo de Aire: 140 N L/h

pH=10,5

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN^- mg/L	Oxidación %
0	10,55	349,9	441,15	234,08	0,0
2,5	10,43	342,4	327,31	173,67	25,8
5	10,36	338	274,73	145,77	37,7
10	10,30	327,6	181,61	96,36	58,8
15	10,25	322,4	147,66	78,35	66,5
20	10,45	316,3	115,83	61,46	73,7
30	10,33	302,9	67,95	36,06	84,6
45	10,49	287,7	37,11	19,69	91,6
60	10,40	275,4	22,74	12,07	94,8
75	10,32	260,6	12,62	6,70	97,1
90	10,31	250,8	8,54	4,53	98,1
105	10,64	228,2	3,48	1,84	99,2
120	10,50	218,3	2,34	1,24	99,5
135	10,37	209,9	1,68	0,89	99,6

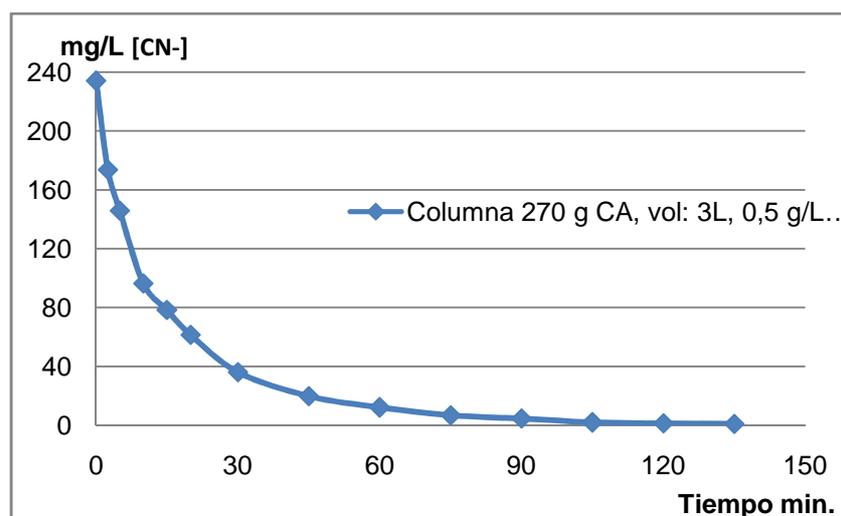


Figura VII.45: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo, empleando columna empacada 270 g CA impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5 y $Q_a=140$ L/h

Ficha Técnica 47

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 1 er uso

Flujo de Aire: 190 L/h

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,78	338,1	333,60	177,01	0,00
2,5	10,48	296,8	69,18	36,71	79,26
5	10,43	278,7	34,15	18,12	89,76
10	10,37	268,9	23,30	12,36	93,01
15	10,25	262,2	17,94	9,52	94,62
30	10,35	245,3	9,28	4,93	97,22
45	10,27	236,3	6,53	3,47	98,04
60	10,50	222,9	3,88	2,06	98,84
75	10,46	216,6	3,03	1,61	99,09
90	10,33	213,2	2,65	1,41	99,20
105	10,48	208,9	2,24	1,19	99,33
120	10,66	204,7	1,91	1,01	99,43
135	10,42	198,1	1,47	0,78	99,56

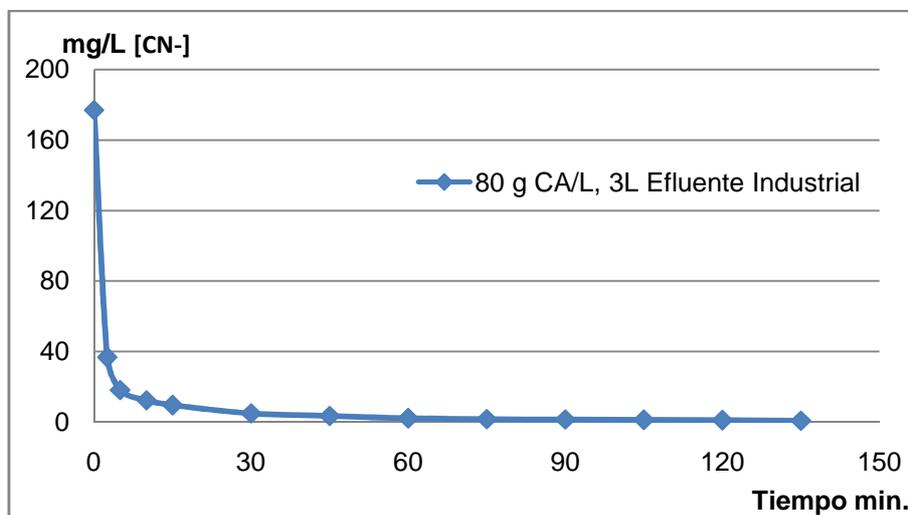


Figura VII.46: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando: Efluente industrial, 80g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, pH=10,5, $Q_a= 190$ L/h y agitación 400 rpm

Ficha Técnica 48

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 2do uso

Flujo de Aire: 190 L/h

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,72	337,5	325,99	172,97	0,00
2,5	10,63	300,3	79,29	42,07	75,68
5	10,60	287,0	47,20	25,05	85,52
10	10,53	277,1	32,08	17,02	90,16
15	10,50	274,3	28,77	15,26	91,18
30	10,41	260,3	16,66	8,84	94,89
45	10,32	248,9	10,68	5,67	96,72
60	10,27	242,2	8,23	4,36	97,48
75	10,21	236,9	6,69	3,55	97,95
90	10,38	229,8	5,07	2,69	98,44
120	10,26	217,5	3,14	1,67	99,04
150	10,47	201,7	1,70	0,90	99,48
180	10,45	194,8	1,30	0,69	99,60

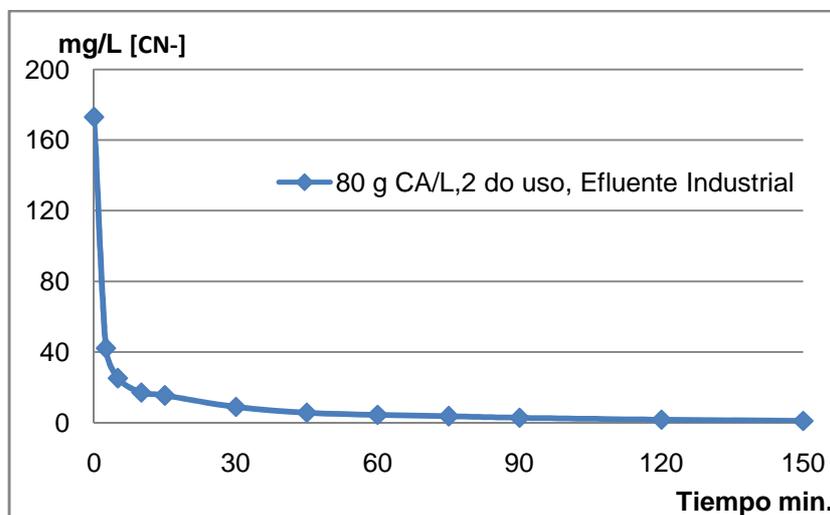


Figura VII.47: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando: Efluente industrial, 80g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 2do uso, pH=10,5, $Q_a= 190$ L/h y agitación 400 rpm

Ficha Técnica 49

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 3er uso

Flujo de Aire: 190 L/H

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,59	322,5	325,06	172,48	0,00
2,5	10,38	287,5	75,00	39,80	76,93
5	10,41	272,5	40,01	21,23	87,69
10	10,33	265,3	29,59	15,70	90,90
15	10,31	262,4	26,20	13,90	91,94
30	10,40	257,4	21,25	11,27	93,46
45	10,31	247,9	14,27	7,57	95,61
60	10,57	239,9	10,21	5,42	96,86
90	10,33	234,3	8,07	4,28	97,52
132	10,24	231,7	7,24	3,84	97,77
150	10,28	227,1	5,97	3,17	98,16
180	10,34	219,3	4,31	2,28	98,68
210	10,31	214,3	3,49	1,85	98,93
240	10,40	206,5	2,52	1,34	99,23
270	10,38	201,2	2,02	1,07	99,38
300	10,26	197,8	1,75	0,93	99,46
360	10,59	194,1	1,50	0,79	99,54

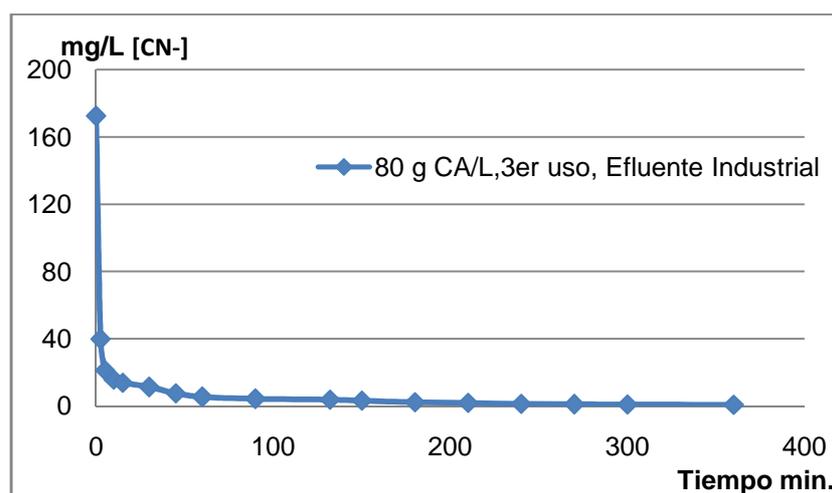


Figura VII.48: Representación de la concentración de CN^- contra el tiempo de oxidación, empleando: Efluente industrial, 80g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 3er uso, pH=10,5, $Q_a=190$ L/h y agitación 400 rpm

Ficha Técnica 50

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 4to uso

Flujo de Aire: 190 L/H

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,59	228,3	317,40	168,41	0,00
5	10,16	175,1	45,29	24,03	85,73
10	10,39	171	38,98	20,68	87,72
15	10,28	165,2	31,52	16,73	90,07
30	10,15	157,5	23,78	12,62	92,51
45	10,18	151,2	18,88	10,02	94,05
60	10,13	142,4	13,68	7,26	95,69
90	10,68	135,9	10,79	5,72	96,60
125	10,35	132,7	9,59	5,09	96,98
154	10,09	128,2	8,14	4,32	97,44
180	10,28	124,6	7,13	3,78	97,75
218	10,00	117,4	5,48	2,91	98,27
274	10,10	106,7	3,70	1,97	98,83
300	10,53	103,2	3,26	1,73	98,97
360	10,06	100,4	2,94	1,56	99,07
420	10,45	97,6	2,66	1,41	99,16
480	10,32	93,8	2,31	1,23	99,27

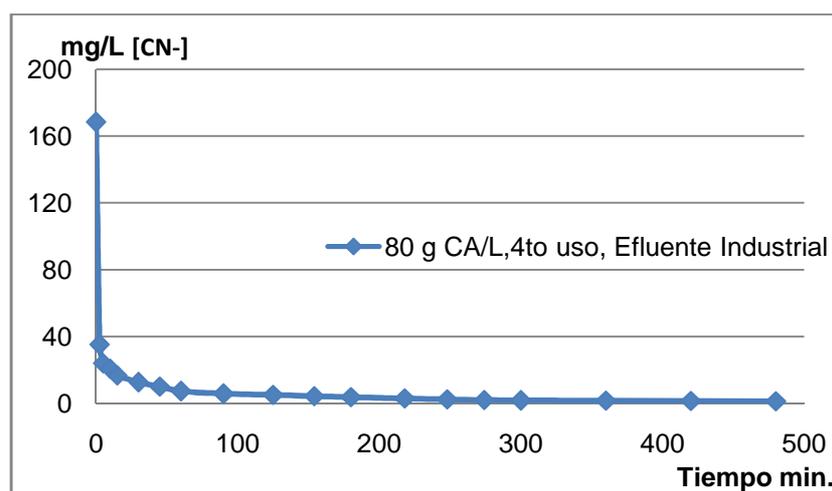


Figura VII.49: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando: Efluente industrial, 80g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 4to uso, pH=10,5, Q_a = 190 L/h y agitación 400 rpm

Ficha Técnica 51

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 5to uso

Flujo de Aire: 190 L/H

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,38	222,3	325	172,45	0,0
2,5	10,73	198,5	133,13	70,64	59,0
5	10,72	188,9	92,88	49,28	71,4
10	10,67	176,9	59,22	31,42	81,8
15	10,62	171,4	48,19	25,57	85,2
30	10,58	165,2	38,19	20,26	88,2
48	10,54	160,3	31,78	16,86	90,2
60	10,46	154,8	25,86	13,72	92,0
90	10,35	145,9	18,52	9,83	94,3
120	10,67	140,8	15,30	8,12	95,3
150	10,36	135,7	12,63	6,70	96,1
180	10,57	130,1	10,24	5,43	96,8
210	10,43	123,5	8,00	4,24	97,5
240	10,35	118,3	6,58	3,49	98,0
300	10,42	107,4	4,37	2,32	98,7
360	10,34	102,1	3,58	1,90	98,9
420	10,31	97,8	3,05	1,62	99,1
480	10,39	94,4	2,68	1,42	99,2

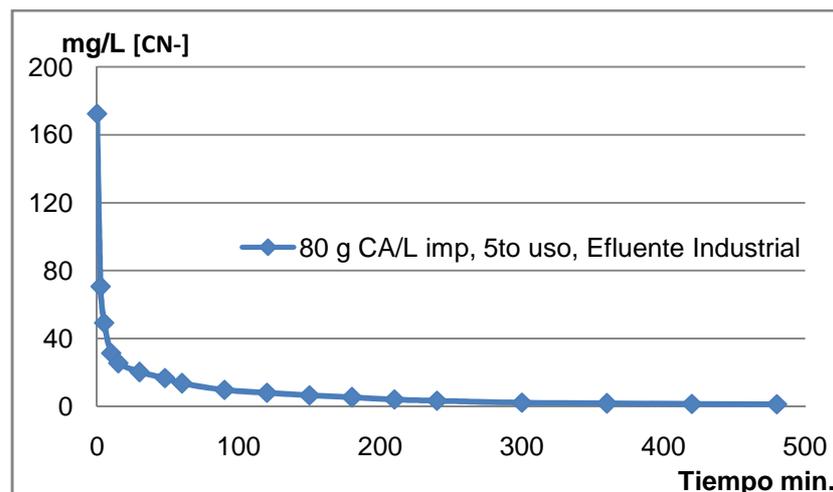


Figura VII.50: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando: Efluente industrial 80g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 5to uso, pH=10,5, Q_a = 190 L/h y agitación 400 rpm

Ficha Técnica 52

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: 80 g/L 8x20# impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 6to uso

Flujo de Aire: 190 L/H

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,53	224,6	325	172,45	0,0
5	10,47	177,4	60,74	32,23	81,3
10	10,41	168,4	44,10	23,40	86,4
15	10,35	166,5	41,22	21,87	87,3
30	10,30	152,6	25,12	13,33	92,2
45	10,34	148,4	21,63	11,48	93,3
60	10,25	141,7	17,03	9,04	94,7
105	10,66	127,5	10,25	5,44	96,8
120	10,39	124,1	9,07	4,81	97,2
150	10,70	115,7	6,71	3,56	97,9
180	10,28	110,9	5,64	2,99	98,2
240	10,57	106,6	4,83	2,56	98,5
300	10,43	99,5	3,73	1,98	98,8
360	10,23	95,7	3,25	1,72	99,0
420	10,34	92,1	2,84	1,51	99,1
480	10,23	88,9	2,53	1,34	99,2
480	10,29	85,6	2,24	1,19	99,3

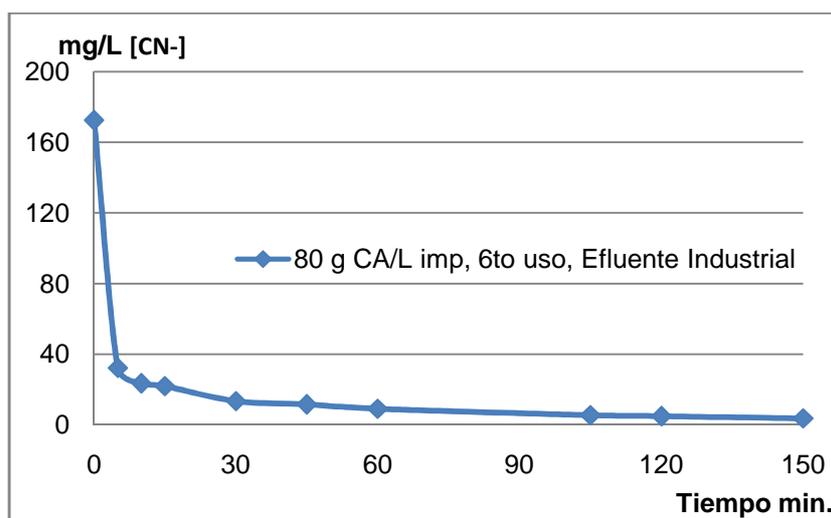


Figura VII.51: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando: Efluente industrial, 80g CA/L impregnado $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 6to uso, pH=10,5, Q_a = 190 L/h y agitación 400 rpm

Ficha Técnica 53

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: no

Flujo de Aire: 190 L/H

pH=10,5

Agitación: no

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,59	224,6	325	172,44	0,00
5	10,36	223,9	317,02	168,21	2,45
10	10,39	223,1	308,15	163,50	5,19
15	10,48	223,1	308,15	163,50	5,19
30	10,35	222,7	303,80	161,19	6,52
60	10,48	222,3	299,52	158,92	7,84
90	10,33	222,5	301,65	160,06	7,18
120	10,68	221,9	295,30	156,68	9,14
180	10,35	221,7	293,21	155,57	9,78
240	10,49	221,3	289,07	153,38	11,05
300	10,28	220,9	285,00	151,22	12,31
360	10,30	220,3	278,99	148,03	14,16
420	10,40	219,8	274,08	145,43	15,67
480	10,53	219,5	271,18	143,89	16,56

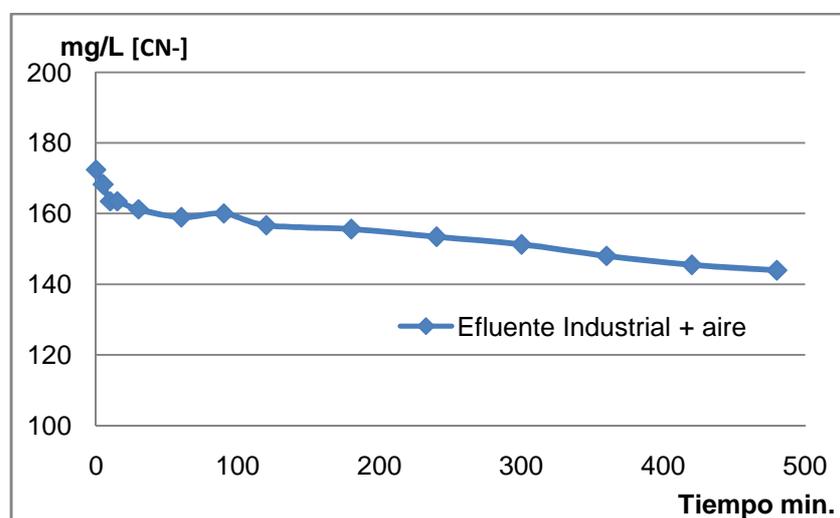


Figura VII.52: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando, Efluente cianurado industrial, pH=10,5 y Q_a= 190 L/h

Ficha Técnica 54

Oxidación de cianuro en de solución Agro Industrial El Corazón.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución

Carbón Activado: no

Flujo de Aire: 190 L/H

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Tiempo min.	pH	medida electrodo	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %
0	10,52	224,3	325,00	172,45	0,0
5	10,48	224,1	322,70	171,22	0,7
10	10,48	223,2	312,55	165,84	3,8
15	10,45	222,6	305,97	162,35	5,9
30	10,43	222,7	307,05	162,92	5,5
69	10,48	221,4	293,21	155,58	9,8
90	10,54	220,9	288,05	152,84	11,4
120	10,43	220,6	285,00	151,22	12,3
150	10,38	219,8	277,02	146,98	14,8
180	10,28	218,7	266,41	141,36	18,0
240	10,58	218,0	259,87	137,89	20,0
300	10,34	217,2	252,59	134,03	22,3
360	10,42	216,1	242,92	128,89	25,3
420	10,34	215,6	238,64	126,62	26,6
480	10,39	214,3	227,88	120,91	29,9

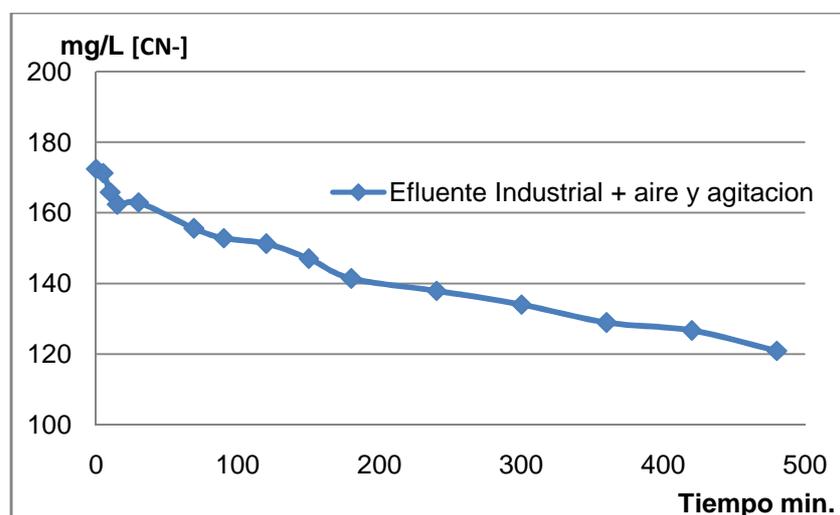


Figura VII.53: Representación de la concentración de CN⁻ contra el tiempo de oxidación, empleando el efluente cianurado industrial, pH=10,5, Q_a= 190 L/h y agitación 400 rpm.

Ficha Técnica 55

Oxidación de cianuro en de solución de laboratorio en columna en continuo.

Parámetros

Columna: 3 litros de solución NaCN 0,5 g/L

Carbón Activado: 1200 g empacado en columna

Flujo de Aire: 150 L/H

pH=10,5

Agitación: 400 rpm

Volumen Tratado: 13 litros

Tiempo Total: 328 min

Promedio descarga: 0,69 mg/L

	Tiempo	Volumen	medida	NaCN	CN ⁻
	min	L	electrodo	mg/L	mg/L
1	31	3	72,2	0,86	0,46
2	34	3	84,7	1,41	0,75
3	45	3	91,8	1,86	0,99
4	68	2	91,6	1,85	0,98
5	185	3	52,5	0,38	0,20

Ficha Técnica 56

Determinación del contenido de Cobre en el carbón activado al emplear Cu(SO₄) y Cu(NO₃)₂.

Análisis: Absorción Atómica

Carbón Activado: 1g

Volumen: 100 ml

	Cu mg/L	Cu mg/g CA	% peso
M1 Cu(SO₄)	157,3	15,72	1,57
M2 Cu(NO₃)₂	204,7	20,46	2,05

Ficha Técnica 57

Determinación de la pérdida de Cobre de la superficie del carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

Análisis: Absorción Atómica

Carbón Activado: 1g

Volumen: 100 ml

	Cu mg/L	Cu mg/g CA	% peso
M1 1er reciclo	94,2	9,4	0,94
M2 4to reciclo	59,2	5,9	0,59
M3 6mo reciclo	42,4	4,22	0,42

Ficha Técnica 58

Determinación de la pérdida de Cobre de la superficie del carbón activado impregnado con $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y reducido.

Análisis: Absorción Atómica

Carbón Activado: 1g

Volumen: 100 ml

	Cu mg/L	Cu mg/g CA	% peso
M1 1er reciclo	102,3	10,21	1,02
M2 3er reciclo	91,8	9,16	0,916
M3 6to reciclo	89,2	8,91	0,891

Ficha Técnica 59

Determinación de cianuro WAD al inicio y final del proceso de oxidación de la solución efluente del proceso carbón en pulpa 30% sólidos.

Análisis: Destilación ácida a pH 4,5.

Carbón Activado: 0,1g

Volumen: 1000 ml

inicio del ensayo		fin del ensayo	
cianuro wad	1,4 g/L	cianuro wad	0,18 g/L
cianuro libre	272,48 mg/L	Cianuro libre	0,69 mg/L
Total	1672,48 mg/L	Total	180,7 mg/L

Ficha Técnica 60

Determinación de cianuro WAD al inicio y final del proceso de oxidación de la solución efluente del proceso carbón en pulpa 10% sólidos Agro Industrial el Corazón.

Análisis: Destilación ácida a pH 4,5.

Carbón Activado: 0,1g

Volumen: 1000 ml

inicio del ensayo		fin del ensayo	
cianuro wad	1,2 g/L	cianuro wad	0.143g/L
cianuro libre	177,81 mg/L	Cianuro libre	0,72 mg/L
Total	1377,81 mg/L	Total	143,72 mg/L

Ficha Técnica 61

Determinación de las concentraciones de los metales presentes en el Efluente de Agro Industrial El Corazón.

Análisis: Absorción Atómica

Carbón Activado: 1g

Volumen: 100 ml

	%sólidos	pH	Au mg/L	Ag mg/L	Cu mg/L	Zn mg/L	Ni mg/L
Muestra Agro Corazón	8,7	10,76	0,09	0,65	79	1,56	0,52
Final del proceso	9	10,37	<0,01	0,048	13,84	0,02	0,11

Ficha Técnica 62

Resultados Análisis por difracción de rayos X

Mineral	Formula	CA. impregnado y reducido Contenido (%)	CA. impregnado Contenido(%)
Carbón	C	80	89
Cuprita	CuO	10	--
Cobre	Cu	3	--
Cristobalita	SiO ₂	7	5
Gerhardtita	Cu ₂ (OH) ₃ NO ₃	--	6

Ficha Técnica 63

Oxidación del ion cianuro en solución empleando cobre metálico de 3mm de arista.

Concentración Cu: 500 mg/L

tiempo min	Electrodo () mv	NaCN mg/L	CN ⁻ mg/L	Oxidación %	log (CN ⁻)
0	226,5	502,10	266,41	0,00	5,71
1	225,9	490,94	260,49	2,22	5,69
2	225,8	489,11	259,52	2,59	5,68
3	225,1	476,45	252,80	5,11	5,66
5	224,1	458,93	243,51	8,60	5,62
6	223,5	448,73	238,10	10,63	5,60
8	222,7	435,49	231,07	13,27	5,57
10	219,8	390,66	207,28	22,19	5,46
16	216,3	342,66	181,81	31,76	5,33
20	213,6	309,70	164,32	38,32	5,23
27	211,7	288,42	153,04	42,56	5,16
30	210,1	271,64	144,13	45,90	5,10
35	208,3	253,93	134,73	49,43	5,03
40	205,1	225,24	119,51	55,14	4,91
60	197,9	171,98	91,25	65,75	4,64
90	191,5	135,31	71,79	73,05	4,40
120	186,3	111,35	59,08	77,82	4,20
180	181,4	92,66	49,17	81,54	4,02

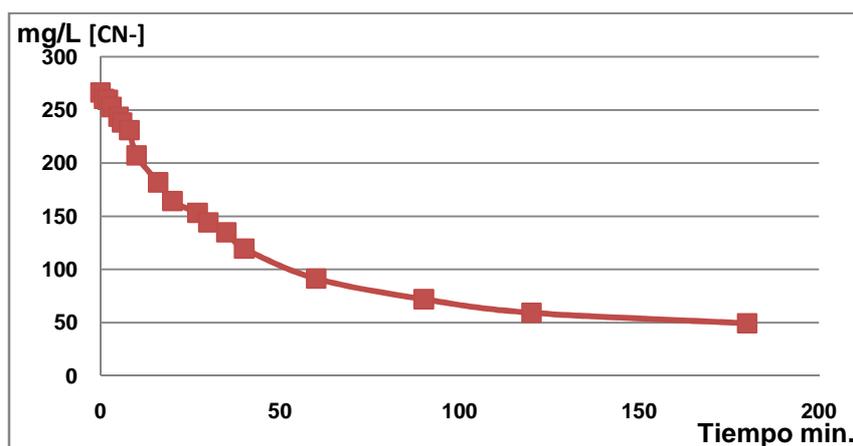


Figura VII.54: Oxidación del ion CN⁻ empleando cobre metálico.