

THERMODYNAMIC STUDY OF CADMIUM PRECIPITATION OF CONTAMINATED SOLUTIONS

M.Sc. Ing. Oscar F. Silva Campos. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, osilva@uni.edu.pe

Abstract -- The present study of solubility of cadmium, was carried out for different forms of precipitates of this ion, at three different temperatures and in a pH range of 0 to 20. This study was carried out to predict thermodynamically under what form, in what temperature range and in what pH range we can have the lowest concentration of aqueous cadmium and if it complies with the Environmental Quality Standards (ECA) provided in Peruvian law (SUPREME DECREE N ° 004-2017 issued by MINAM). Likewise, it should be mentioned and highlighted that the study being thermodynamic is clearly predictive, it is complemented with the presentation of the Pourbaix diagram of the Cd-S-H₂O, which means that the conclusions of this study must be corroborated with a kinetic study. This is done with the data from the weathering study of a polymetallic mine tailings.

Keywords -- Cadmium, pH, precipitation, speciation, diagrams, sulfides, ECAS.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.323>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

ESTUDIO TERMODINÁMICO DE LA PRECIPITACIÓN DE CADMIO EN SOLUCIONES CONTAMINADAS

M.Sc. Ing. Oscar F. Silva Campos. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, osilva@uni.edu.pe

Resumen- El presente estudio de solubilidad del cadmio, se realizó para distintas formas de precipitados de este ión, a tres temperaturas diferentes y en un rango de pH de 0 a 20. Este estudio se realizó para predecir termodinámicamente bajo qué forma, en qué rango de temperatura y en que rango de pH podemos tener la menor concentración de cadmio acuoso y si cumple con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) dispuestos en la ley peruana (DECRETO SUPREMO N° 004-2017 emitido por el MINAM). Asimismo, cabe mencionar y resaltar que el estudio al ser termodinámico es netamente predictivo, se complementa con la presentación del diagrama de Pourbaix del $Cd-S-H_2O$, lo que significa que las conclusiones de este estudio se tienen que corroborar con un estudio cinético. Lo cual se hace con los datos del estudio de intemperismo de un relave de mina polimetálica y de una muestra de roca de desmonte de un yacimiento epitermal de alta sulfidación.

Key Words: Cadmio, pH, precipitación, especiación, diagramas.

I. INTRODUCCIÓN

El cadmio es uno de los 6 metales pesados (As, Cr, Pb, Hg, Cd y Cu), más dañinos para el ser humano según la organización mundial de la salud (OMS), si bien esto es cierto, el cadmio se usa generalmente en pinturas, plásticos, pilas, recubrimientos, etc., su uso actual en productos en contacto con el hombre está restringido; la fuente principal de cadmio se obtiene como subproducto en las refinerías de zinc en forma de cadmio metálico; los principales minerales de cadmio son la Greenockita (sulfuro) y la otavita (mezcla de carbonatos), actualmente para la mayoría de seres vivos la principal fuente de exposición al cadmio es mediante los alimentos y el agua.[1]

Bajo el contexto minero metalúrgico podemos encontrar estos metales pesados en los drenajes de residuos de mina [2] los cuales potencialmente pueden contaminar acuíferos y suelos que son adsorbidos por las raíces de las plantas depositando este metal pasado en los frutos que ingieren animales y hombres, esta ingesta a la larga puede producir daños a los huesos, disfunción renal, anemia, hipertensión, etc.

El caso de drenaje de metales pesados en minas peruanas es estudiado por el Instituto de Minería y Medio Ambiente (IMMA) de la Facultad de Minas (FIGMM) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Lima-Perú. Reportado en [3].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.323>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

En la naturaleza hay algunas plantas como el cacao que son capaces de concentrar cadmio [4], por adsorción, existiendo hoy regulaciones de contenidos máximos de él, siendo hoy un problema crítico para los exportadores de cacao peruano dado que a partir del 2019 la Unión Europea exigirá un contenido de cadmio máximo para diversos productos entre 0.10 a 0.80 mg/kg. (Organización Mundial de Comercio).

En los últimos años se ha visto la manera de eliminar el cadmio, así como los demás metales de las soluciones contaminadas de residuos de minería, existen distintos estudios sobre la forma de cómo eliminar los metales pesados bajo distintas formas, por ejemplo, por adsorción con carbón activado [5] o por medio de suelos arcillosos [6].

Nuestro trabajo presenta el estudio termodinámico de la precipitación de cadmio iónico aprovechando la solubilidad de diferentes compuestos de cadmio a diferentes pH y temperaturas.

La formación de compuestos insolubles es un método muy práctico para reducir el contenido del cadmio en las soluciones, bajo esta premisa se evalúan las distintos compuesto de cadmio que se pueden formar a distintos pH, estos pueden ser hidróxidos, carbonatos o sulfuros, entre otros, en este trabajo mostramos el análisis de la data termodinámica de cada compuesto formado usando diferentes fuentes de información de datos termodinámicos: FactSage, HSC, PHEERCALC, MEDUSA y artículos especializados como [7]. Lo que nos permite determinar la función ΔG_T y la constante de equilibrio de las reacciones químicas involucradas, permitiéndonos de esta manera el análisis y determinación de la mejor manera de precipitar el cadmio iónico bajo una forma insoluble a distintos rangos de temperatura y pH.

Así mismo se puede aplicar la misma metodología para los demás metales pesados, buscando la manera de reducir los niveles de contaminación de suelos y efluentes, respetando los límites permisibles por el Decreto Supremo N° 004-2017 emitido por el Ministerio del Ambiente MINAM.

II. METODOLOGÍA

La data termodinámica fue estudiada estadísticamente validándola con la determinación del coeficiente de correlación (r^2) para cada reacción utilizada, para este proyecto se trabajó con ajustes de coeficientes muy cercanos a 1, además se usó data para un amplio rango de temperatura 5°-25°-95°C a una

17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”, 24-26 July 2019, Jamaica.

presión de 1 atm, se analizaron estas tres temperaturas en específico donde se observó el comportamiento de la solubilidad de los compuestos en función del pH en el que se encuentre el medio, haciendo énfasis en la temperatura de 25°C la cual es un valor utilizado como referencia.

Se analizó la data en base a la termodinámica aplicando una simplificación de la ecuación de V'Ant Hoff, que asume en el rango de temperatura (5-95°C) un valor constante de ΔH y ΔS .

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (1)$$

$$\Delta G^\circ = -RT\ln(K_{eq}) \quad (2)$$

De ahí que:

$$\ln(K_{eq}) = \frac{\Delta H^\circ}{-RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (3)$$

De forma práctica:

$$Y = A' + B'X \quad (4)$$

Dónde:

$$\ln(K_{eq}) = Y \quad \frac{1}{T} = X \quad (5)$$

Se realizó la estimación lineal de la data termodinámica obteniendo los valores X e Y, estimando los valores de $\ln(K_{eq})$ para temperaturas de 5°C, 25°C, 95°C.

Este análisis se basó en la obtención de los diagramas de especiación del Cd^{2+} y solubilidad de los compuestos en función del pH y a distintas temperaturas: 5°C, 25°C, 95°C, dependiendo del compuesto a obtener se compararon estos diagramas con los diagramas de especiación de los agentes precipitantes tales como $H_2S(a)$, HS^- , S^{2-} , $H_2CO_3(a)$, HCO_3^- , CO_3^{2-} , HSO_4^- , SO_4^{2-} .

De estas comparaciones se obtuvieron múltiples reacciones a diferentes rangos de pH con especies que aparecen y desaparecen en función de la temperatura, las cuales cada una aportaba un contenido al cadmio total en solución, por ello se empleó los diagrama de solubilidad total o del cadmio total bajo una escala logarítmica para poder apreciar la concentración total de cadmio según el pH de la solución, cabe mencionar que el trabajo realizado se hizo con concentraciones ideales, es decir que los coeficientes de actividad se asumieron como igual a 1 esto debido a que en trabajos anteriores se logró demostrar que la variación de la fuerza iónica no alteraba en forma significativa la predicción termodinámica de los diagramas de predominancia de las especies a trabajar [8], estos resultados fueron comparados con los estándares medio ambientales ECAS para verificar termodinámicamente la reducción de la concentración de cadmio iónico tomándose como referencia el límite permisible de cadmio en la solución evaluada.

Las pruebas cinéticas de laboratorio, cuyos resultados se reportan en Figura N°8, se realizaron en el Instituto de Minería y Medio Ambiente de la Facultad de Minas (FIGMM) de la UNI de acuerdo a la norma estándar ASTM para efectuar esta prueba (ASTM D5744-96 (2001)). Se puede ver un estudio cinético completo en [9].

III. RESULTADOS

17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities", 24-26 July 2019, Jamaica.

Determinada la especiación del ion cadmio en diferentes medios, se analizó las distintas reacciones a distintos rangos de pH y temperatura, en la Tabla N°1 se muestra las reacciones obtenidas con la precipitación del cadmio bajo la forma de sulfuro, la cual resultó ser la opción de precipitación más estable ya que cumple con los estándares de calidad ambiental dispuestos por el MINAM. Ver los diagramas de especiación en las Figuras N°1 y N°2.

Empezamos por definir la especiación del ion cadmio con la finalidad de optimizar el número de ecuaciones a considerar en los diagramas combinados con iones carbonato o sulfuro:

Especiación a 5° y 25° C

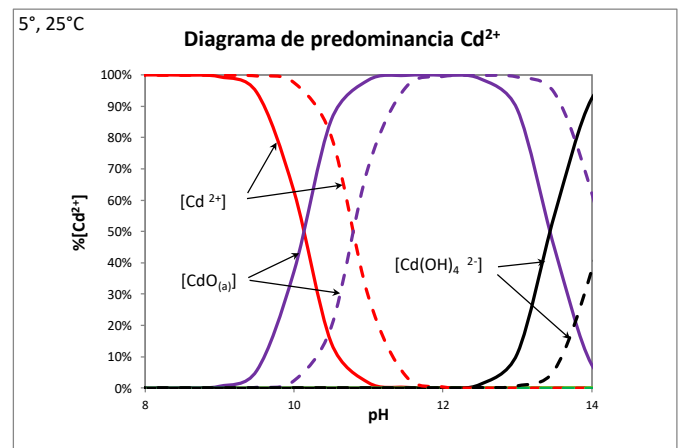


Figura N° 1: Diagrama de Predominancia del Cadmio a 5°y 25°C.

Especiación a 95°C:

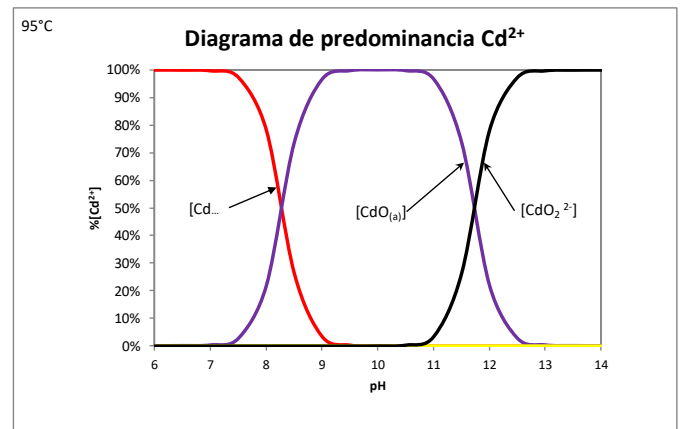


Figura N° 2: Diagrama de Predominancia del Cadmio a 95°C.

A 95°C Se observa la desaparición de la especie $Cd(OH)_4^{2-}$ y la aparición de CdO_2^{2-} .

Las soluciones estudiadas son ideales pues se determinó que el considerar soluciones reales genera una diferencia de estimación mínima y dado el carácter predictivo más cualitativo que cuantitativo de la predicción termodinámica resulta una precisión suficiente.

También se puede presentar la especiación iónica mediante los diagramas de Bjerrum, [10] pero en el presente estudio se considera suficiente presentar la especiación con ayuda de los diagramas de predominancia.

| REACCIONES | log K _{25°C} | r ² |
|---|-----------------------|----------------|
| $Cd^{2+} + H_2S_{(a)} = CdS + 2H^+$ | 6.819 | 0.999 |
| $Cd^{2+} + HS^- = CdS + 2H^+$ | 14.140 | 0.999 |
| $CdOH^+ + HS^- = CdS + H_2O$ | 24.196 | 1.000 |
| $CdO_{(a)} + HS^- + H^+ = CdS + H_2O$ | 34.492 | 0.999 |
| $HCO_2^- + S^{2-} + 3H^+ = CdS + 2H_2O$ | 60.317 | 1.000 |
| $Cd(OH)_4^{2-} + S^{2-} + 4H^+ = CdS + 4H_2O$ | 74.286 | 0.999 |

Tabla 1: Tabla de Reacciones Formadas en Medio Sulfuroso.

Se determinó la regresión lineal de cada ecuación obtenida, los valores de A' y B' para cada reacción comprobando su coeficiente de regresión lineal muy próximo a 1, tal el caso de log Keq presentados en la Tabla I, los que se usarán en el cálculo del Cd²⁺ total de ahí se calculó los valores de Cd total tabulando el pH y para un contenido de azufre total a 10⁻² M, se obtuvieron los siguientes gráficos a 5°C, 25°C y 95°C.

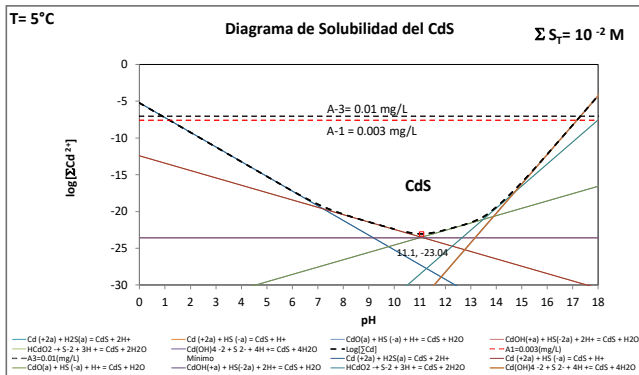


Figura N° 3: Diagrama de Cadmio total a 5°C.

Para una temperatura de 5°C, la figura N° 3 nos muestra el mínimo valor del cadmio total acuoso (log Σ [Cd²⁺]= -23.04) y su respectivo pH= 11.1, este mínimo de la curva que representa el cadmio total se encuentra muy por debajo de los límites A-1 y A-3, demuestra que el hecho de precipitar cadmio en forma de sulfuro es uno de los métodos más convenientes para la eliminación de este ion a esta temperatura.

Podemos apreciar también que esta tendencia se mantiene tanto para 5°C como para 25°C y 95°C, es decir el sulfuro de cadmio se precipita dejando una cantidad insignificante de ion en solución, disminuyendo su solubilidad cuando se incrementa la temperatura. Ver Figuras N°4 y N°5 y la Tabla N° II dónde se resumen el cumplimiento de los ECAS.

Para una temperatura de 25°C la Figura N°4 nos muestra el mínimo valor del cadmio total acuoso (log Σ [Cd²⁺]=21.80) y el correspondiente pH= 10.18. Para 95°C la Figura °5 nos muestra el mínimo valor del cadmio total acuoso (log Σ [Cd²⁺]=-18.57) y su respectivo pH= 7.41.

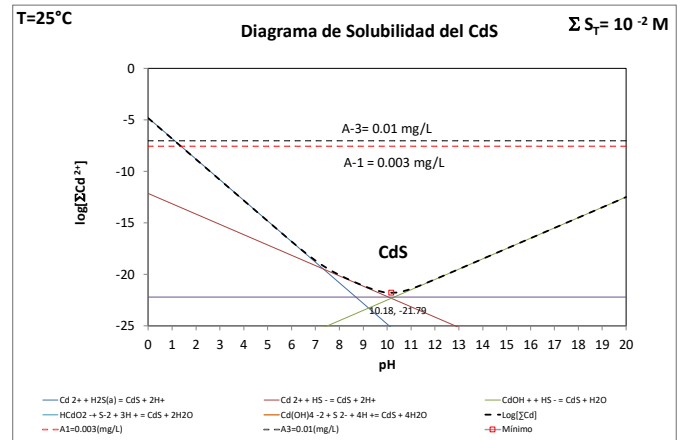


Figura n°4: Diagrama de Solubilidad del Cadmio total a 25°C

Para todo el rango de temperatura el CdS cumple con dejar un contenido de Cd²⁺ muy por debajo del valor establecido por los ECAS A-1 = -7.57 y A-3 = -7.051.

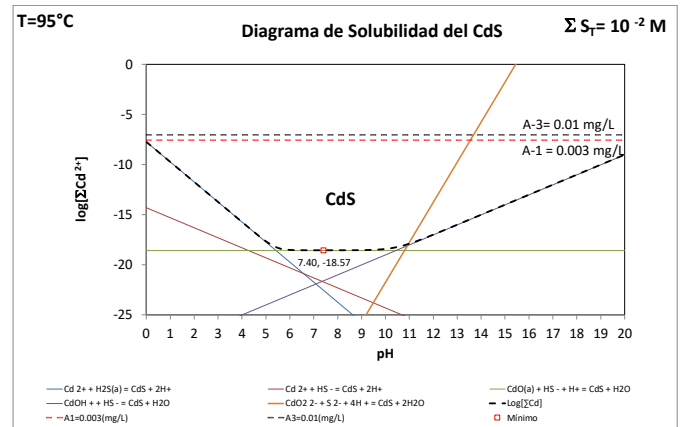


Figura N°5: Diagrama de Solubilidad del Cadmio total a 95°C

| CUMPLIMIENTO ECAS PARA EL CdS | | | | | | |
|-------------------------------|-------|------------|------------|---------|--------------|--------|
| ECAS | Cd | mg/L | mol/L | log[Cd] | P. atm | |
| | A1 | 0.003 | 2.6688E-08 | -7.5737 | | 112.41 |
| | A2 | 0.003 | 2.6688E-08 | -7.5737 | | |
| A3 | 0.010 | 8.8960E-08 | -7.0508 | | | |
| TEMPERATURA | pH | | | | CUMPLIMIENTO | |
| 5°C | 11.07 | 1.024E-18 | 9.1053E-24 | -23.041 | A1, A2, A3 | |
| 25°C | 10.18 | 1.803E-17 | 1.6041E-22 | -21.795 | A1, A2, A3 | |
| 95°C | 7.41 | 3.009E-14 | 2.6769E-19 | -18.572 | A1, A2, A3 | |

Tabla 2: Resumen de cumplimiento de ECAS para el CdS

Con la ayuda de los diagramas de Pourbaix podemos clasificar los ambientes de movilidad del cadmio de acuerdo al potencial redox y el pH. [10], [11].

El diagrama conceptual E_{th} (voltios)-pH del agua muestra los límites de estabilidad del agua y los diferentes ambientes. Ver Figura N°6.

Ambiente anaeróbico: < -300 mv
 Ambiente oxidante parcial > 330 mv
 Ambiente oxidante total > 750 mv

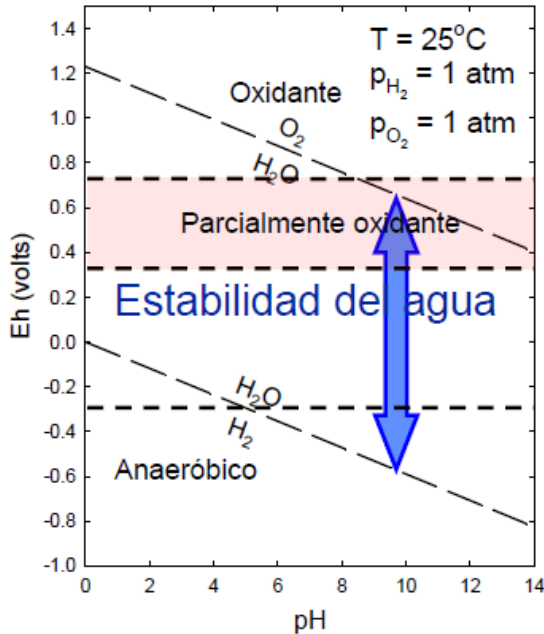


Figura N°6: diagrama de Pourbaix conceptual

Cuando comparamos con el diagrama conceptual el diagrama de Pourbaix Cd-S-H₂O a 25 °C Observamos que ubicarnos en la zona de estabilidad del sulfuro de cadmio sería lo más adecuado para eliminar el cadmio iónico. Ver Figura N°7.

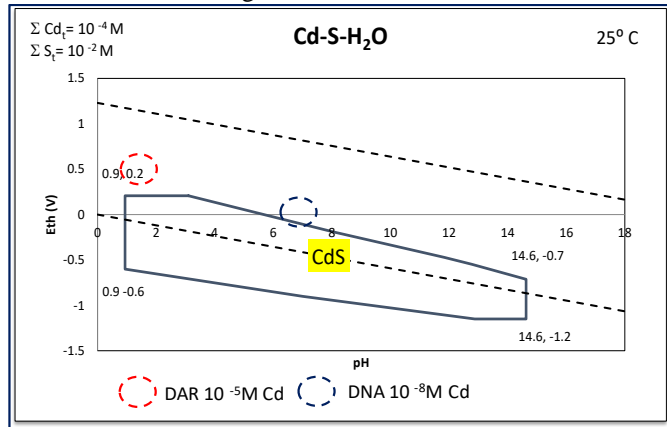


Figura N°7: diagrama de Pourbaix Cd-S-H₂O

Del polígono de estabilidad del CdS mostrado en el diagrama de la Figura N° 7, deducimos que el rango de solubilidad del sulfuro cae en el ambiente denominado reductor.

Variando el pH de -0.9 a 14.6 y de potencial termodinámico redox E_{th} (voltios) de 0.2 a -1.2 voltios.

Lo que ratifica la predicción de utilizar bacterias sulfuroreductoras o un reductor poderoso como el NaHS para una eficiente eliminación de metales pesados tal como cadmio en soluciones acuosas. [12].

De otro lado podemos analizar los datos cinéticos generados en el IMMA, en este caso se presenta el estudio del drenaje por intemperismo en celda de humedad [13] de un relave de planta de flotación de una mina polimetálica (Cu, Pb, Zn) caracterizado como drenaje no ácido. Los datos presentados en la Figura N° 8 corresponde a la variación del drenaje de cadmio vs. el pH.

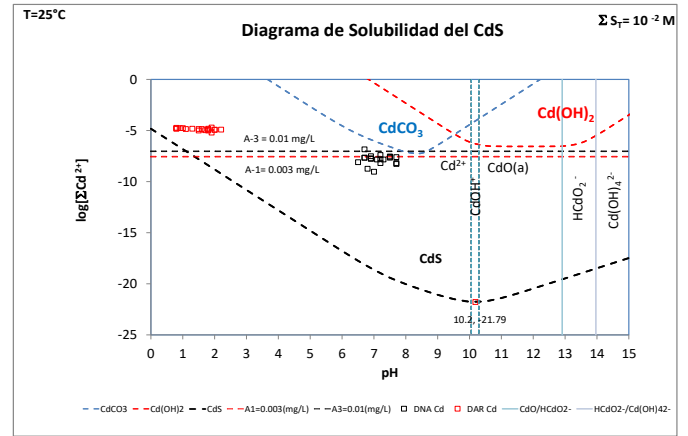


Figura N°8: diagrama de solubilidad del cadmio y resultados cinéticos de prueba de intemperismo de un relave

Vemos la utilidad de los cálculos termodinámicos para el análisis de resultados de pruebas cinéticas. El potencial redox de la prueba cinética de 20 semanas nos arroja una fluctuación de 308 a 184 mV. para un drenaje no ácido (DNA) de un relave de mina polimetálica con una variación de pH de 6.5 a 7.0 para el tiempo de evaluación. Un medio que puede clasificarse de ligeramente oxidante.

De otro lado si graficamos el resultado de una prueba cinética en columna de intemperismo de también de 20 semanas para roca de desmonte (waste rock) de un yacimiento epitermal de alta sulfidación realizado también en el IMMA, los contenidos de cadmio en solución están fuera del rango permitido, en este caso la fluctuación del potencial redox varía de 618 a 396 mV., considerándose al ambiente de parcialmente oxidante a oxidante con un pH ácido que varía de 0.8 a 2.2.

Se concluye que la disminución del drenaje del cadmio de estas soluciones está fuertemente ligada al aumento del pH y la reducción del potencial redox. A diferencia de los metales que forman oxianiones como el selenio o el arsénico que son muy solubles en un rango amplio de pH y Eh [14].

IV. CONCLUSIONES

En base a los datos obtenidos del análisis termodinámico podemos concluir que:

La mejor especie en precipitar respetando los límites permisibles (ECAS) es el sulfuro de Cadmio para todo el rango de temperaturas (5° - 95°C) analizado.

Manteniendo la solución a un pH de 10.2 aproximadamente y a una temperatura de 25°C se puede precipitar el cadmio a una mínima concentración, cumpliendo con los ECAS correspondientes.

A medida que bajamos la temperatura se puede obtener un mayor grado de precipitación del cadmio, de ello podemos decir que, si se trabaja entre 5°C a 25°C, termodinámicamente hablando, se tendría buenos resultados en la eliminación del cadmio de las soluciones contaminadas, además podemos destacar que, a la temperatura de 95°C, también se cumpliría con los estándares de calidad alrededor de un pH= 7.4.

De otro lado para todo el rango de temperatura y de pH considerados ni el hidróxido, ni el carbonato de cadmio cumplen con los valores permitidos por los ECAS. Por lo que una planta de neutralización con cal no sería una solución confiable para controlar la contaminación por cadmio.

De manera práctica esto nos sugiere dos caminos para eliminar el cadmio de soluciones acuosas de manera confiable y definitiva: el uso de bacterias sulfuroductoras que mantendrían al metal inmovilizado como sulfuro (ya se usa en lagos de tajos) e igualmente para efluentes de mina con alto contenido de cadmio u otros metales pesados podría utilizarse H₂S, NaHS, Na₂S para precipitar todos estos metales pesados como sulfuros insolubles y abrir una posibilidad práctica de su recuperación como sulfuros.

Con ayuda de los diagramas de Pourbaix hemos ratificado que el ambiente ideal para una eficiente eliminación del cadmio de soluciones acuosas es el reductor y como ya se estableció en la forma sulfuro de cadmio.

Con los resultados de pruebas de intemperismo de un relave cuyo drenaje se clasificó como no ácido, corroboramos que este ambiente poco oxidante a reductor y con un pH neutro no representa un riesgo de contaminación en cadmio.

En el caso de la prueba de intemperismo de roca de desmonte de un yacimiento epitermal de alta sulfidación se enfrenta a un problema de contaminación ligado al ambiente ácido y oxidante que se genera con el paso del tiempo.

Se concluye que la eliminación del cadmio de estas soluciones está fuertemente ligada al incremento del pH y la reducción del potencial redox.

Los resultados hallados se pueden calificar como de predicciones termodinámicas que nos ayudan a comprender el comportamiento cinético y nos ayudan también en la evaluación costo beneficio para determinar la solución más adecuada para el tratamiento de los drenajes mineros, bajo este enfoque contribuimos a reducir el impacto ambiental de nuestros acuíferos y suelo apuntando hacia una minería sostenible.

V. AGRADECIMIENTO

Se expresa un especial agradecimiento al director del Instituto de Minería y Medio Ambiente profesor Atilio Mendoza A. de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (FIGMM) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por las facilidades brindadas. A los alumnos del curso Termodinámica y Cinética Metalúrgica II de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la FIGMM de la UNI de Lima-Perú.

VI. REFERENCIAS

- [1] Londoño-Franco L, Londoño-Muñoz P., Muñoz-García F. “Los Riesgos de los Metales Pesados en la Salud Humana y Animal”. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, Vol 14 No. 2 (145-153) Julio - Diciembre 2016.
- [2] Edelev, A.V. 2013. Composition of drainage mine waters interacting with sulfide-containing rock: a predictive estimation. *Russian Geology and Geophysics* 54: 110–119.
- [3] Silva O. “Minería y Desarrollo Sostenible: El caso peruano”. World Forum of Universities of Resources on Sustainability (WFURS) en San Petersburgo Rusia 28 de septiembre al 1 de octubre 2016 en la Universidad de Minas de San Petersburgo de la Federación Rusa.
- [4] Jiménez D. B. (2012) “Cuantificación de metales pesados (cadmio, cromo, níquel y plomo) en agua superficial, sedimentos y organismos (*crassostrea columbiensis*) ostionde mangle en el puente portete del estero salado (Guayaquil). Tesis Universidad de Guayaquil. Ecuador.
- [5] Xiaofeng L, Xin X, Xiaoqiang D, Junboun P.(2018) Adsorption of Cadmium from Aqueous Solution onto Activated carbon and recycle materiales, Taiyuan university of technology, Taiyuan, China.
- [6] Hojatt S., Khademi H, (2013) “Cadmium sorption from aqueous solution onto Iranian Sepiolite: Kinetics and Isotherms”, Isfahan, Iran.
- [7] Geological Survey of Japan Open File Report No.419. 2005. Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases. Disponible en http://www.fssm.ucam.ac.ma/biblioadmin/opac_css/chimie/Atlas_Eh-pH_diagrams.pdf.
- [8] Benjamin, M. 2010. WATER CHEMISTRY (reprint). Waveland Press, Incorporated.
- [9] Silva, O., Mendoza, A. 2009. Aplicación de la Geoquímica Ambiental al Estudio de la Eliminación del Selenio en Efluentes de Mina. Operadores Mineros 29° PERUMIN, Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, Arequipa.
- [10] Burkin, A.R. 2001. Chemical Hydrometallurgy Theory and Principles. Imperial College press.
- [11] Pourbaix, Marcel E. Lectures on Electrochemical Corrosion. 1973, Plenum Press, New York- London.

[12] Silva Campos O., Cusma G. "Precipitation of copper from acid solutions with variable contents of gold. SART process" XXXII PERUMIN on 21 to 25 September 2015. Arequipa.

[13] Maest, A, Nordstrom, D.K., A geochemical examination of humidity cell test, Applied Geochemistry (2017), doi 10.1016/apgeochem.2017.03.016

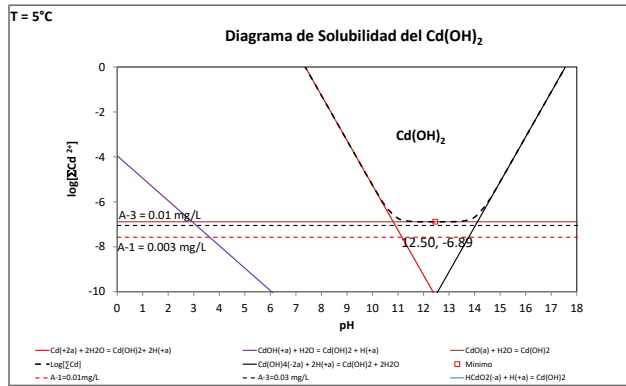
[14] Dong, H., Guan, X., Wang, D., Li, Ch., Yang, X., Dou, X. 2011. A novel application of H₂O₂-Fe (II) process for arsenate removal from synthetic acid mine drainage (AMD) water. Chemosphere 85: 1115-1121.

ANEXO A.

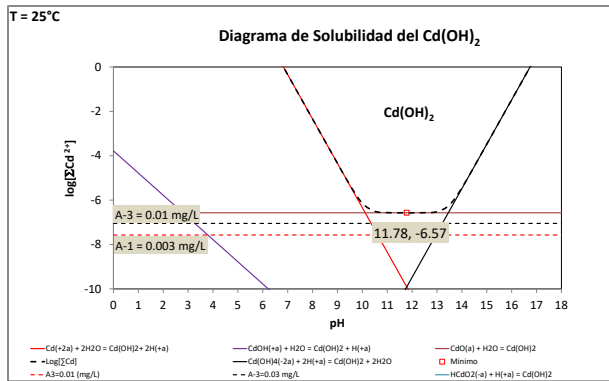
Diagrama de solubilidad del cadmio a diferentes medios

1.- MEDIO HIDROXIDO.

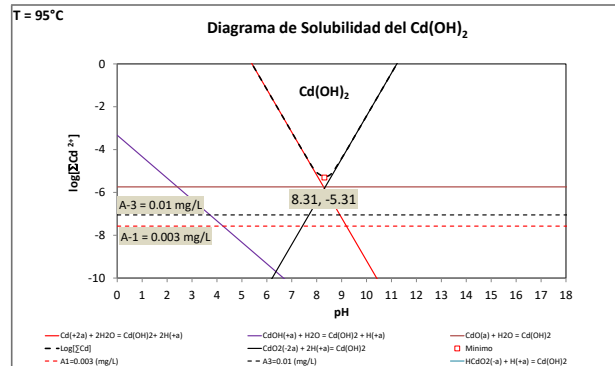
A 5°C:



A 25°C:



A 95°C:

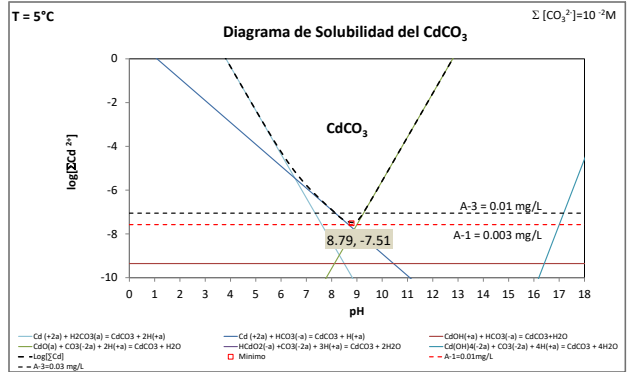


Resumen de cumplimiento de ECAS para el Cd(OH)₂:

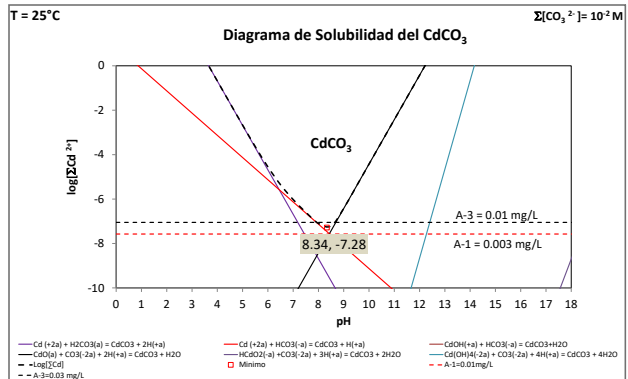
| CUMPLIMIENTO ECAS PARA EL Cd(OH) ₂ | | | | | | |
|---|-------|-------|------------|---------|--------------|--------|
| ECAS | Cd | mg/L | mol/L | log[Cd] | P.atm | |
| | A1 | 0.003 | 2.6688E-08 | -7.5737 | | 112.41 |
| | A2 | 0.003 | 2.6688E-08 | -7.5737 | | |
| | A3 | 0.010 | 8.8960E-08 | -7.0508 | | |
| TEMPERATURA | pH | | | | CUMPLIMIENTO | |
| 5°C | 12.46 | 0.015 | 1.3022E-07 | -6.885 | - | |
| 25°C | 11.78 | 0.030 | 2.6827E-07 | -6.571 | - | |
| 95°C | 8.31 | 0.553 | 4.9199E-06 | -5.308 | - | |

2.- MEDIO CARBONATO

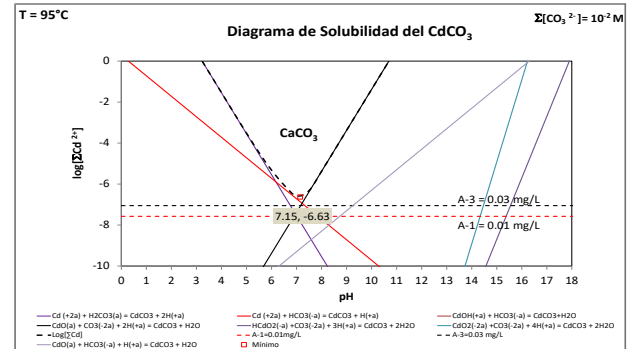
A 5°C:



A 25°C:



A 95°C:



Resumen de cumplimiento de ECAS para el CdCO₃:

| CUMPLIMIENTO ECAS PARA EL CdCO ₃ | | | | | | |
|---|------|-------|------------|---------|--------------|--------|
| ECAS | Cd | mg/L | mol/L | log[Cd] | P.atm | |
| | A1 | 0.003 | 2.6688E-08 | -7.5737 | | 112.41 |
| | A2 | 0.003 | 2.6688E-08 | -7.5737 | | |
| | A3 | 0.010 | 8.8960E-08 | -7.0508 | | |
| TEMPERATURA | pH | | | | CUMPLIMIENTO | |
| 5°C | 8.79 | 0.003 | 3.0749E-08 | -7.512 | A2, A3 | |
| 25°C | 8.33 | 0.006 | 5.2383E-08 | -7.281 | - | |
| 95°C | 7.15 | 0.026 | 2.3415E-07 | -6.631 | - | |

ANEXO B

Técnicas de procesamiento de aguas residuales para remover metales pesados.

1. Precipitación química
 - 1.1. Precipitación de hidróxidos
 - 1.2. Precipitación de sulfuros
 - 1.3. Precipitación química combinada con otros métodos
 - 1.4. Precipitación con quelatos de metales pesados
2. Sorción
 - 2.1. Intercambio iónico
 - 2.2. Adsorción
 - 2.3. Adsorbentes de carbón activado
 - 2.4. Nanotubos de carbono adsorbentes
 - 2.4. Adsorbentes abióticos de bajo costo
 - 2.5. Bioadsorbentes
3. Filtración por membranas
 - 3.1. Ultrafiltración
 - 3.2. Ósmosis inversa
 - 3.3. Nanofiltración
4. Electrodialisis
5. Coagulación y floculación
6. Flotación
7. Tratamientos electroquímicos

Flowsheet simplificado de Tratamiento por Precipitación de sulfuros (H_2S , $NaHS$, Na_2S)

