

## AUTORES

José Antonio Alonso Pérez

Carlos Cañete Pérez

Jesús Manuel López Kramer

Nyls Ponce Seoane

Ernesto Iglesias Rodríguez

Instituto de Geología y Paleontología (IGP), Servicio Geológico de Cuba (SGC), Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Vía Blanca No. 1002/Río Luyanó, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba;

E-mail: [josea@igp.minem.cu](mailto:josea@igp.minem.cu)

Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), CUPET; E-mail: [cañete@ceinpet.cupet.cu](mailto:cañete@ceinpet.cupet.cu)

## UTILIDAD DEL DIAGRAMA DE FICKLIN Y MOSIER EN EVALUACIONES DE GEODISPONIBILIDAD DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A CUERPOS HÍDRICOS IMPACTADOS POR DRENAJE ÁCIDO

USE OF THE FICKLIN AND MOSIER DIAGRAM TO EVALUATE THE GEOAVAILABILITY OF POLLUTANTS ASSOCIATED TO WATER BODIES IMPACTED BY ACID DRAINAGE

## RESUMEN

Se evalúa la utilidad del diagrama de Ficklin y Mosier de Plumlee. Se utilizaron espectrometrías de: Absorción Atómica (EAA) y de Emisión Óptica con Plasma Acoplada por Inducción (ICP) en medio HNO<sub>3</sub>. Se analizaron los ríos; Santa Lucía, Palma, Biajaca y Nombre de Dios, vinculados a depósitos de sulfuros polimetálicos del modelo genético SEDEX en el distrito metalogénico "Santa Lucía-Castellano". Los resultados se compararon en un punto común de muestreo en aguas del Santa Lucía y confirmaron que el índice de contaminación se incrementó 1,12 veces. En los ríos Santa Lucía, Palma, Biajaca y Nombre de Dios, disminuyó la contaminación y, en la medida que sus aguas se acercan a las fuentes primarias de contaminación por presencia de sulfuros piro-polimetálicos, esta se incrementa, clasificándose en categorías de intensidad de contaminación desde cercanas a la neutralidad y bajas actividades iónicas de EPT en disolución a elevadas, extremas y ultra ácidas con valores de significación de actividades iónicas de EPT disueltos, respectivamente. Las aguas del Santa Lucía alcanzaron tasas de contaminación incrementadas 113 veces en relación con las del Palma, mientras que en el Biajaca se incrementan 1,11 veces. Nombre de Dios fue el acuífero de menor índice de contaminación del total de muestras que se evaluaron. La aplicación de este diagrama permitió el incremento del grado de conocimiento actual de los procesos biogeoquímicos DAM en acuíferos superficiales del distrito estudiado, por lo que se recomienda su aplicación a otros cuerpos hídricos que se vinculen a yacimientos, proponiéndose su inclusión en el paquete analítico de evaluaciones geoquímicas de impacto ambiental.

*Palabras clave:* aguas superficiales, geodisponibilidad, sistema mineral Zn-Pb-Ag ± (Au, Ba), elementos potencialmente tóxicos (EPT), drenaje ácido de mina (DAM), yacimientos exhalativo-sedimentarios (SEDEX)..

The main objective at the present research was to evaluate the usefulness of the Ficklin and Mosier diagram proposed by Plumlee, a tool used in the practice of geochemistry for the evaluation of environmental impacts on water bodies. As an example in Cuba rivers are mentioned; "Santa Lucía", "Palma", "Biajaca" and "Nombre de Dios", all linked to the deposits of polymetallic sulfides of the SEDEX genetic model in the "Santa Lucía - Castellanos" metallogenic district, which is located in the northwestern part of the country. The results obtained during the sampling campaigns through the application of the afore mentioned diagram, were compared at a common sampling point in waters of the "Santa Lucía" river, they confirmed that the contamination index increased in the order of 1.12 times. In parallel, in the rivers "Santa Lucía", "Palma", "Biajaca" and "Nombre de Dios", it was observed that the trend of pollution decreased and, as their waters get closer to the primary sources of pollution due to the presence of pyrite-polymetallic sulphides, it increases, being classified into categories of pollution intensity from close to neutrality and low ionic activities of EPT in solution (upstream of the river), to high, extreme and ultra-acidic with significance values of ionic activities of EPT dissolved respectively. Therefore, the application of the afore mentioned diagram allowed the increase of the current degree of knowledge about the biogeochemical processes DAM in surface aquifers of the metallogenic district "Santa Lucía" - Castellano ", for this reason it is recommended its application to other water bodies that are linked to sulphide deposits, proposing their inclusion in the analytical package of geochemical environmental impact assessments that are carried out in the country for this purpose.

*Keywords:* surface waters, geoavailability, Zn-Pb-Ag ± (Au, Ba) mineral system, potentially toxic elements (EPT), acid mine drainage (DAM), exhalative-sedimentary deposits (SEDEX)

## ABSTRACT

Los yacimientos del tipo exhalativo-sedimentarios (SEDEX) del subtipo Selwyn que se vinculan al sistema mineral Zn-Pb-Ag ± (Au, Ba), conceptualmente redefinido en nuestro país por Torres-Zafra et al. (2017) como: “Aquel conjunto de elementos y procesos geológicos, espacial y temporalmente relacionados que dan lugar a la formación de un depósito o conjunto de ellos y cuyas partes principales son: la fuente de metales, las vías de migración, los fluidos transportadores de especies metálicas en disolución y otros compuestos, además del sitio de deposición de mena y la fuente de energía”; son propensos con el transcurso del tiempo, a desarrollar procesos de meteorización natural que propician los laboreos mineros en presencia del dióxigeno y agua, dado que presentan en su composición mineralógica sustancial, sulfuros de elevada reactividad química (pirita, pirrotina, troilita, arsenopirita), y por ello provocan diversas reacciones biogeoquímicas redox de drenaje ácido de roca (DAR), con la consiguiente afectación del entorno ambiental de los ecosistemas circunmeníferos aledaños a los mismos (agua, suelos, flora, fauna).

Por lo expuesto, la calidad del agua producto de las actividades mineras y procesamiento de minerales se convierte entonces en una tarea de alta prioridad en todo el mundo; para evitarlo, resulta vital que se consideren entre otros aspectos de interés, la composición química de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) presentes en aguas residuales y sistemas hidrográficos comprendidos en el radio de influencia de los yacimientos con la aplicación de normas ambientales apropiadas en las minas impactadas.

En la actualidad, existe una amplia variedad de técnicas y ensayos analíticos que se aplican para determinar la magnitud del drenaje en minas activas e inactivas (pasivos mineros; PAM), tales como las pruebas estáticas (conteo ácido-base) que recomiendan White et al., (1997, 1999)

y los ensayos en celdas húmedas (ASTM, 1996) entre otras.

Apartir de la década de los noventa y comienzos del 2000, se emprendieron a nivel mundial un grupo importante de investigaciones encaminadas a evaluar la composición de las aguas del DAR en el contexto de la geología de los depósitos minerales (Ficklin et al., 1992; Plumlee et al., 1992; Smith et al. 1994; Price et al., 1995; du Bray, 1995; Goldfarb et al. 1997; Eppinger et al. 2007; Kelley and Taylor, 1997) entre otros. Esos autores realizaron en todos los casos, valoraciones geoquímicas acerca de la composición de las aguas de las minas y de aquellas que se derivan del drenaje en un amplio espectro y tipos de depósitos minerales, con características geomíneralógicas disímiles y a través de la implementación del diagrama de Ficklin y Mosier (Plumlee et al. 1999) e interpretación de los datos del drenaje en un contexto geológico dado, restringiendo los intervalos de potencial de hidrógeno (pH) en los que las actividades iónicas de especies potencialmente tóxicas (EPT) presentes en las aguas del drenaje minero y natural pueden desarrollarse dentro de diferentes zonas mineralógicas, ya sea por tipos de mineral o sus respectivas alteraciones.

No obstante lo anterior, en nuestro país dicho diagrama no se ha generalizado aún a menas hospederas de sulfuros polimetálicos durante las evaluaciones de impacto ambiental realizadas en diferentes periodos, a excepción de las aguas residuales con elevada influencia de microorganismos acidófilos que provienen del drenaje de los depósitos tecnogénicos de tostación de la pirita en la U.E.B “Producciones Industriales” (antiguo complejo sulfometales) de la propia región realizados por Cabrera-Díaz (2015) y Delgado-Díez et al. (2015).

Desde el punto de vista hidrológico el distrito metalogénico “Santa Lucía-Castellano” comprende las siguientes cuencas: ríos Santa Lucía, Palma, Biajaca y Nombre de Dios. De forma general, el escurrimiento se produce a través de los mencionados ríos hacia la zona

litoral baja, aunque los ríos Santa Lucía y Nombre de Dios lo hacen directamente al mar. Todo el sistema fluvial pertenece a la vertiente norte de Cuba, aunque no todas escurren sus aguas desde el parteagua principal (Cañete-Pérez et al. 2007, Cañete-Pérez 2009).

Con respecto a la calidad de las aguas superficiales, Ponce et al. (1998), López-Kramer et al. (2007), entre otros, concluyen que los valores anómalos de pH se encontraron en aquellas corrientes en las que drenan escombreras, áreas con depósitos de cola y excavaciones o canteras de extracción de mineral.

Cañete-Pérez (2009) evaluó por su parte, los riesgos ambientales en pasivos ambientales mineros (PAM) de minerales sulfurados en el distrito metalogénico que se investiga, para lo cual aplicó el modelo propuesto por el Centro de Toxicología de Edimburgo (1999), el que se fundamenta en estimaciones de la concentración ambiental prevista (siglas en inglés PEC) y la concentración sin efecto observable prevista (PNEC) respecto a cada objeto ambiental. Si la PEC excede la PNEC se considera que existe riesgo ambiental, es decir, si la relación entre ambos parámetros ambientales resulta ser de un orden de magnitud mayor de la unidad, hecho que se comprobó en varios puntos de muestreo para esos analitos y otros adicionales de interés.

Por lo expuesto, el objetivo de la presente investigación consiste en demostrar la validez del referido diagrama aplicado a sistemas hídricos impactados por DAR en el distrito metalogénico “Santa Lucía” y “Castellano”, vinculados a dos yacimientos tipo SEDEX, subtipo Selwyn del sistema mineral Zn-Pb-Ag ± (Ag, Au), a partir de la reinterpretación de los datos experimentales de EPT reportados por diferentes investigadores en el periodo

1997-2009, con la finalidad de contribuir al conocimiento y clasificación de tales procesos en aguas y su posible vinculación con las evaluaciones de riesgos ambientales realizadas en la propia región.

El monitoreo geoquímico de la calidad de las aguas superficiales se llevó a cabo mediante el muestreo en ríos, arroyos y drenajes incluidos dentro del perímetro del área de influencia de ambos depósitos, los cuales se realizaron en la tercera decena del mes de mayo. Para ello se dividió el área en sus diferentes cuencas y se llevó a cabo la ejecución del muestreo, caracterización y ejecución de ensayos, respectivamente.

Las muestras de agua se colectaron tomándose dos alícuotas (volumen 250 ml) -filtrada y acidificada con HNO<sub>3</sub> (concentración 2 meq/l)-. En todos los casos, las mismas se conservaron a baja temperatura (T < 200C) hasta el momento de su arribo al laboratorio para ejecutar los análisis correspondientes. En todos los puntos de muestreo, a la salida de cada uno se midió la conductividad eléctrica y el pH con equipos digitales previamente calibrados con sus respectivas disoluciones patrones.

Con posterioridad, las muestras se enviaron al Laboratorio Central de Minerales (LACEMI). Las especies iónicas disueltas se analizaron mediante el empleo de las siguientes técnicas instrumentales: Espectrometrías de: Absorción Atómica (EAA) y de Emisión Óptica con Plasma Acoplada por Inducción (ICP) en medio HNO<sub>3</sub>. Para cada analito de interés (Cu, Pb, Zn, Cd, Co y Ni) el límite inferior de detección alcanzado fue de 0.01 mg/l (10 µg/l, 10 ppb).

Por su parte, los diagramas de Ficklin y Mosier se construyeron en el IGP-SGC mediante el empleo de la hoja de cálculo EXCEL, compatible con WINDOWS para Office 2010.

RESULTADOS

A continuación, se describen los puntos del muestreo realizado por Ponce et al. (1997):

Punto 3. Afluente superior río Santa Lucía; corriente intermitente.

Punto 5. En la intersección de dos corrientes temporales que drenan del yacimiento Santa Lucía.

Punto 7. Río Santa Lucía, curso superior.

Punto 11. Puente, aguas de la zona afectada por el drenaje de la mina Santa Lucía.

Punto 12. Río Santa Lucía, curso medio-inferior.

Punto 16. Puente de la presa de aguas de uso industrial de Castellano, que drena al río Nombre de Dios.

Punto 18. Río Nombre de Dios, curso inferior.

En las tablas I y II se señalan los puntos muestreados de aguas superficiales en diferentes campañas de muestreo realizados por Ponce et al (1998), López-Kramer et al. (2007) y Cañete- Pérez (2009) con sus respectivas coordenadas planas.

RESULTADOS

01. TABLA

Relación de puntos de muestreo en aguas superficiales y coordenadas Lambert (Fuente: López-Kramer et al. 2007).

No.	Identificador	Coordenadas planas		Observaciones
		X	Y	
1	Drenaje Ácido	194149	315153	Drenaje de la cantera actual
2	Manantial	194029	315256	Fuente de agua de oro Castellanos
3	Puente Madera	190805	313905	Río Nombre de Dios, aguas debajo de la presa
4	Brazo Derecho	193802	315698	Afluente del río La Palma, drenaje de <u>colera</u> reforestada
5	<u>Micropresa</u> La Palma	193566	315723	Depósito de aguas industriales y técnicas
6	Puente Santa Lucía	197820	317358	Zona afectada por drenaje ácido desde la mina Santa Lucía
7	Río Las Coloradas	197513	314945	Corriente natural proveniente de escombreras al sur de la mina actual

## 02. TABLA

Puntos de muestreo de aguas superficiales y coordenadas Lambert (Cañete-Pérez 2009).

No.	Muestra	Coordenadas planas		Descripción del punto de muestreo
		X	Y	
1	S-01	197519,8	314950,3	Río Santa Lucía (curso inferior alejado de la mina)
2	S-02	197471,9	314788,8	Río Santa Lucía (curso inferior alejado de la mina)
3	S-03	196893,5	314005,6	Río Santa Lucía (curso inferior alejado de la mina)
4	S-04	197256,2	314857,4	Arroyo Puñales (Santa Lucía alejado de la mina)
5	S-05	197819,4	317399,7	Laguna Río Santa Lucía
6	S-06	197510,3	317349,6	Laguna Río Santa Lucía
7	S-07	197149,3	317014,0	Laguna Río Santa Lucía
8	S-08	197062,5	316827,9	Laguna Río Santa Lucía
9	S-09	197561,1	317232,9	Laguna Río Santa Lucía
10	S-10	197701,9	317216,1	Laguna Río Santa Lucía
11	S-11	197972,5	318441,9	Río Santa Lucía (curso superior)
12	S-12	196072,7	315899,8	Río Santa Lucía (noroeste y cercano a la mina)
13	S-13	196110,9	315831,0	Río Santa Lucía (noroeste y cercano a la mina)
14	S-14	196062,2	315802,0	Río Santa Lucía (noroeste y cercano a la mina)
15	S-15	196197,9	316154,0	Río Santa Lucía (norte, cercano a la mina)
16	S-16	196122,6	316638,7	Río Santa Lucía (norte, alejado de la mina)
17	S-17	196068,4	316700,4	Río Santa Lucía (alejado de la mina, noreste)
18	S-18	196355,5	315879,2	Río Santa Lucía (noreste y cercano a la mina)
19	S-19	196321,6	316195,6	Río Santa Lucía (al norte del punto 15)
20	S-20	196740,3	316390,6	Río Santa Lucía (al sur del punto 8)
21	P-01	193817,0	315689,7	Río Palma (norte del yacimiento Castellano)
22	P-02	193511,4	315724,0	Embalse Río Palma (al noroeste del yacimiento Castellano)
23	P-03	194677,2	315610,1	Río Palma (al noreste del yacimiento Castellano)
24	P-04	194644,1	315552,8	Río Palma (IDEM anterior al sur del P-03, Castellano)
25	P-05	194719,4	315544,0	Río Palma (al este del punto P-04, Castellano)
26	P-06	194744,5	316204,0	Río Palma (al norte y alejado del punto P-03, Castellano)
27	P-07	193955,5	315756,0	Río Palma (al norte y alejado de la mina Castellano)
28	P-08	193997,3	315327,8	Río Palma (al noroeste y muy alejado del yac. Castellano)
29	P-09	193831,9	314939,4	Río Palma (punto más cercano al yac. Castellano)
30	P-10	193473,9	315622,6	Embalse Río Palma (al sur del punto P-02)
31	P-11	194118,2	315837,8	Río Palma (al norte de la colera de Castellano)
32	P-12	193617,1	316951,1	Río Palma (curso superior y muy alejado del yac. Castellano)
33	P-13	193540,8	315245,6	Río Palma (noreste y cercano al yac. Castellano)
34	P-14	195509,6	314953,8	Río Palma (este y alejado del yac. Castellano)
35	P-15	193279,3	316227,8	Río Palma (norte del embalse)
36	N-01	194625,0	314130,1	Arroyo Los Cerdos (sureste y alejado del yac. Castellano)
37	N-02	194673,3	313770,3	Arroyo Los Cerdos (sureste y alejado del yac. Castellano)
38	N-03	193679,1	313095,1	Río Nombre de Dios (sur y alejado del yac. Castellano)
39	N-04	193646,6	312952,4	Río Nombre de Dios (sur y alejado del yac. Castellano)
40	N-05	193739,1	313021,2	Río Nombre de Dios (sur y alejado del yac. Castellano)
41	N-06	192666,1	313365,1	Río Nombre de Dios (suroeste y alejado del yac. Castellano)
42	B-01	191883,6	316218,6	Río Biajaca (curso superior, muy alejado de la mina Castellano)
43	B-02	192987,9	314776,0	Río Biajaca (curso inferior, al oeste de la mina Castellano, aprox.1000m)
44	B-03	192950,0	315028,2	Río Biajaca (curso inferior, al oeste de la mina Castellano y norte del punto B-02)

RESULTADOS

La selección de los EPT -base del diagrama de Ficklin-, guardan estrecha relación con la movilidad de tales especies que caracterizan los depósitos de minerales sulfurados para diferentes tipos de modelos de depósitos,

y presentan, además, diferentes valores de acidez en función del tipo de drenaje y la composición mineralógica de las menas, tal como se observa en las figuras 1 y 2 respectivamente (Plumlee 1999).

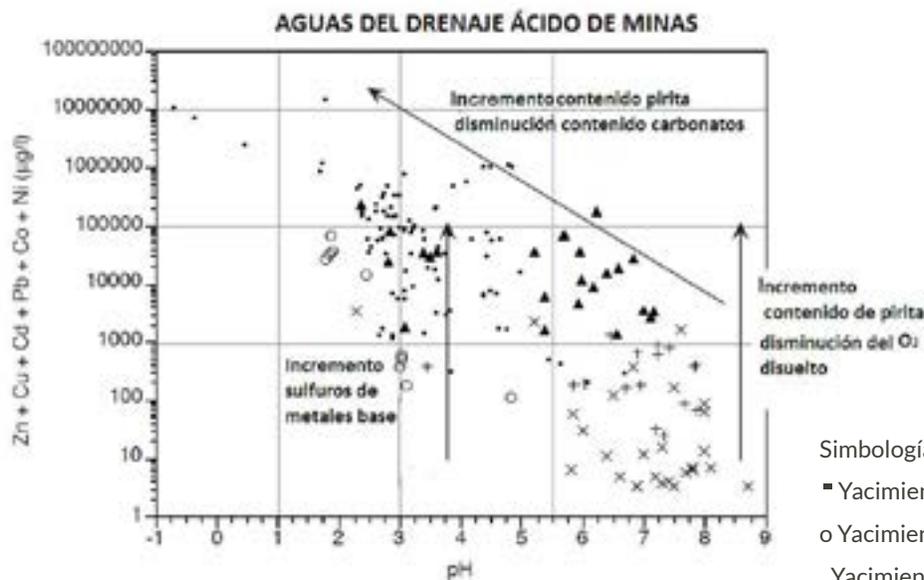


FIGURA 1.

Diagrama de Ficklin y Mosier que agrupa los diferentes tipos de aguas de drenaje de mina (DAM) en función de la mineralogía de las menas de sulfuros pirito-polimetálicos (Fuente: Plumlee et al. 1999).

Simbología:

- Yacimientos de pirita ricos en metales base
- Yacimientos ricos en pirita y pobres en metales base
- ▲ Yacimientos de pirita y metales base, ricos en carbonatos
- X Yacimientos de pirita, pobres en metales base y ricos en carbonatos
- + Yacimientos de metales base ricos en carbonatos

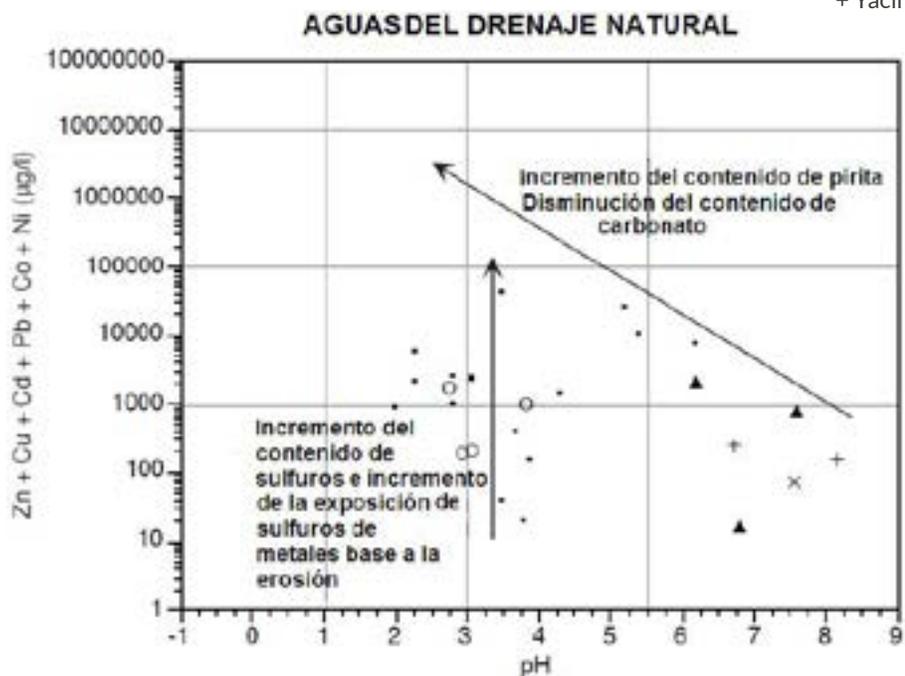


FIGURA 2.

Diagrama de Ficklin y Mosier que agrupa los diferentes tipos de aguas naturales de drenaje en función de la mineralogía de las menas de sulfuros pirito-polimetálicos (Fuente: Plumlee et al. 1999).

RESULTADOS

Como consecuencia del DAR, las aguas con presencia de EPT en sus respectivas formas geodisponibles, circundan las zonas aledañas a los yacimientos y se transforman en formas biodisponibles, según plantea Smith (2007) en función de la movilidad geoquímica y pH (figura 3).

Del análisis de la figura anterior se concluye que la movilidad de los iones metálicos potencialmente tóxicos (EPT) y su efecto en los suelos - a un mismo valor de pH-, varía para cada grupo de EPT en el orden que se observa, hecho que fundamenta la posterior aplicación del diagrama de Ficklin.

A continuación, en la tabla III se exponen los resultados del muestreo de aguas superficiales para los iones  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  y  $Pb^{2+}$  versus pH en el distrito metalogénico “Santa Lucía-Castellano” obtenidos por Ponce et al. (1997).

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla anterior, se construyó el diagrama de Ficklin y Mosier correspondiente (figura 4).

RESULTADOS

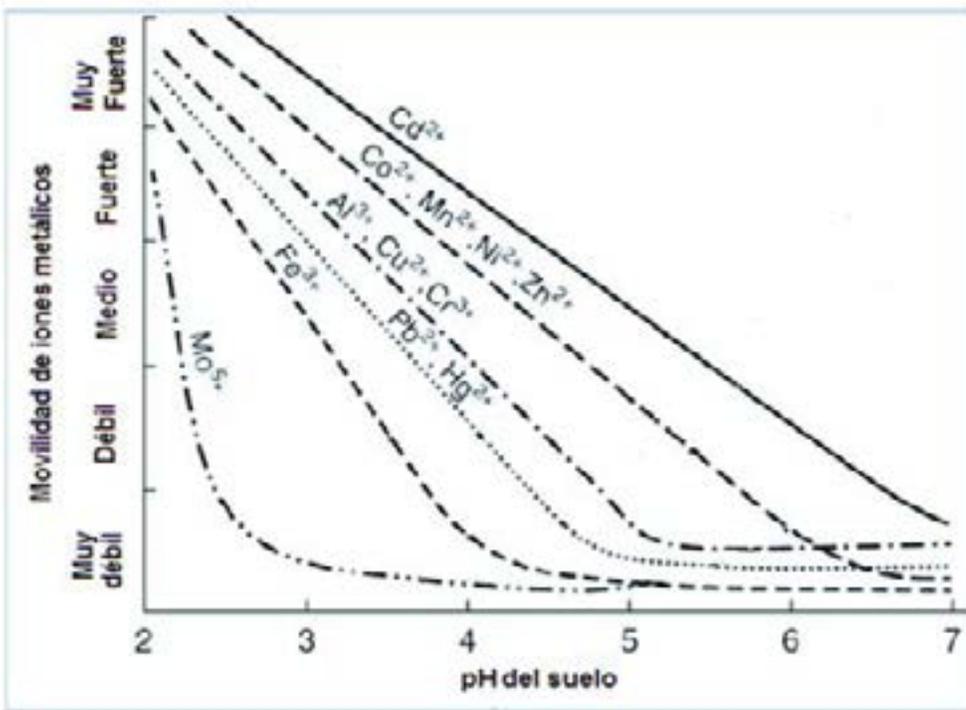


FIGURA 3.

Diagrama de movilidad de iones metálicos en suelos en función del pH durante el transcurso de procesos DAM (Fuente: Neuman D.R et al. citado en Jacobs et al. (2014))

Mtra	pH	Cu (mg/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Total (µg/l)
Pto. 3	6,51	0,01	0,01	0,50	0,005	0,055	580
Pto.5	<b>3,20</b>	0,50	0,01	<b>141</b>	0,185	<b>0,970</b>	<b>142665</b>
Pto.7	6,10	0,20	0,01	2,00	0,008	0,083	2301
Pto.11	<b>2,82</b>	0,09	0,01	<b>162</b>	<b>0,844</b>	0,592	<b>163536</b>
Pto.12	<b>3,17</b>	0,24	0,01	<b>139</b>	0,254	0,262	<b>139766</b>
Pto.16	7,40	0,01	0,01	0,50	0,005	0,085	610
Pto.18	6,76	0,01	0,01	0,50	0,006	0,211	737
NC:27 2012	6 - 9	< 5,0	-	5,0	< 0,3	1,0	-

TABLA 3.

Resultados del muestreo de aguas superficiales para los iones bivalentes Cu, Ni, Zn, Cd, Co y Pb en el distrito metalogénico “Santa Lucía-Castellano” (Ponce et al. 1997).

Nota: No se determinó cobalto en las muestras durante esta etapa de muestreo

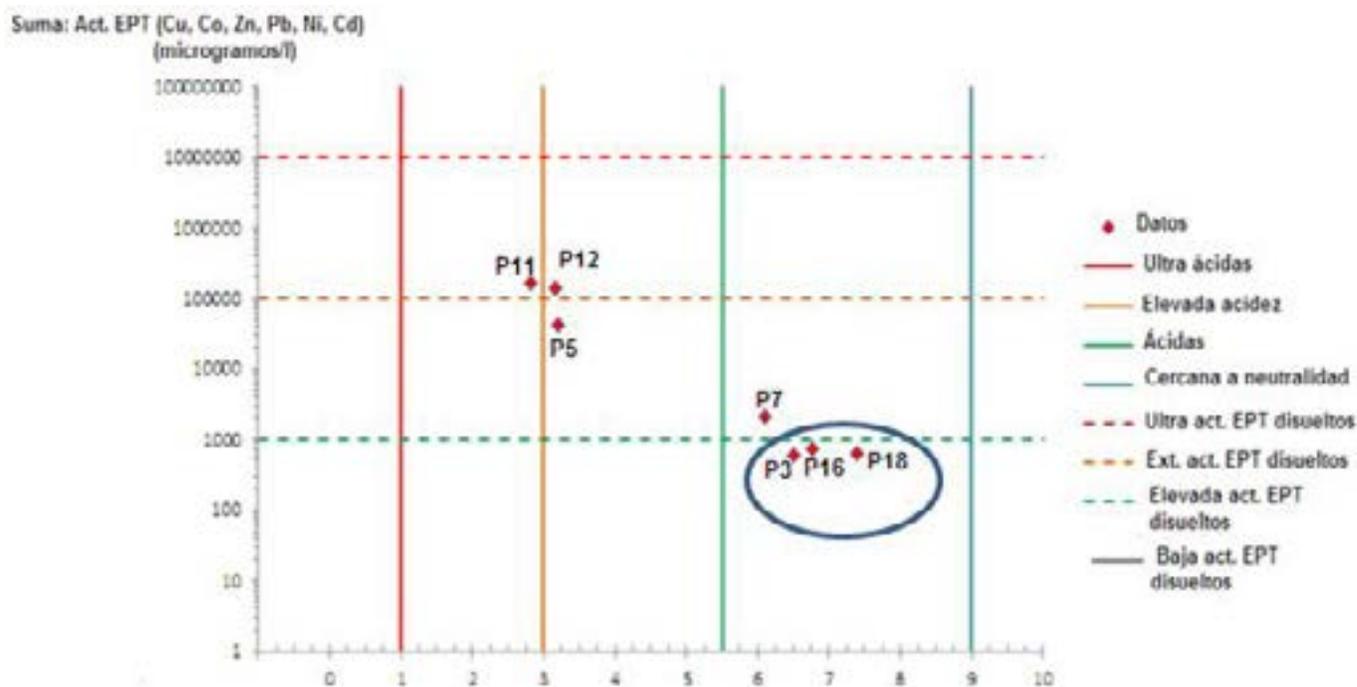


FIGURA 4. Diagrama de Ficklin y Mosier para el muestreo de aguas superficiales realizado por Ponce-Seoane et al. (1997)

Del análisis de la figura 4 se concluye que:

1 muestra (pto 11): Elevada acidez-extremas actividades de EPT en disolución ----- 14,28%.

1 muestra (pto 12): Aguas ácidas- extremas actividades de EPT en disolución ----- 14,28%.

1 muestra (pto 5): Aguas ácidas con elevadas actividades de EPT en disolución -----14,28%.

1 muestra (pto 7): Aguas cercana a la neutralidad y elevadas actividades de EPT en disolución (14,28%).

3 muestras (pto 3, 16 y 18): Aguas cercanas a la neutralidad y bajas actividades de EPT en disolución ----- 42,88%.

Tal como era de esperar, las aguas del río Santa Lucía, consideradas como aguas del drenaje de la mina (figura 3), presentan a su vez mayor grado de contaminación ácida (ver tabla III), dado que las mismas se encuentran bajo el radio de influencia de las menas pirotopolimetálicas hospederas de metales base del yacimiento "Santa Lucía" (puntos 11, 12 y 5). Para aguas más alejadas de la fuente principal

de contaminación, pero con cierto aporte de la carga contaminante del yacimiento (muestra 7) del curso superior del río Santa Lucía, las mismas clasifican como cercanas a la neutralidad (pH= 6.1) con elevadas actividades totales de EPT disueltos.

Por último, las muestras de aguas del río Nombre de Dios que corresponden con los puntos de muestreo 16 y 18, reciben la influencia del yacimiento "Castellano" y se consideran con valores de acidez cercanos a la neutralidad y moderadas actividades iónicas de EPT disueltos (< 1000 µg/l).

En relación al muestreo realizado por López-Kramer et al. (2007) los resultados se exponen en la tabla IV. Se demuestra que, para el caso específico del Zn, las muestras del punto de muestreo 1,4 y 6, sobrepasan la NC-27/2012, mientras que para el caso del Pb las muestras del punto 1 y 4 se encuentran fuera de norma. Por último, se señala la muestra del punto 6 que presenta valores anómalos de Cd que se justifican por la influencia directa del DAM de la mina Santa Lucía.

RESULTADOS

RESULTADOS

Muestra	pH	Cu (mg/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)	Cd (mg/l)	Co (mg/l)	Pb (mg/l)	Total (µg/l)
Pto 1	2,90	0.820	0.01	30.7	0.10	0.49	2.70	34082
Pto 2	6,70	0.010	0.01	0.22	0.005	0.01	0.1	355
Pto 3	7,90	0.011	0.01	0.01	0.005	0.01	0.1	146
Pto 4	3,20	0.790	0.13	45.0	0.050	0.11	1,10	47180
Pto 5	7,50	0.029	0.01	0.21	0.005	0.01	0.10	364
Pto 6	2,30	2.20	0.01	180.8	0.700	0.15	0.10	183960
Pto 7	6,70	0.015	0.01	0.20	0.005	0.010	0.10	340
NC 27/2012	6,0 - 9,0	< 5,0	-	5,0	< 0,3	-	1,0	-

TABLA 4.

Resultados del muestreo de aguas superficiales en el distrito metalogénico "Santa Lucía-Castellano" (López-Kramer et al. 2007).

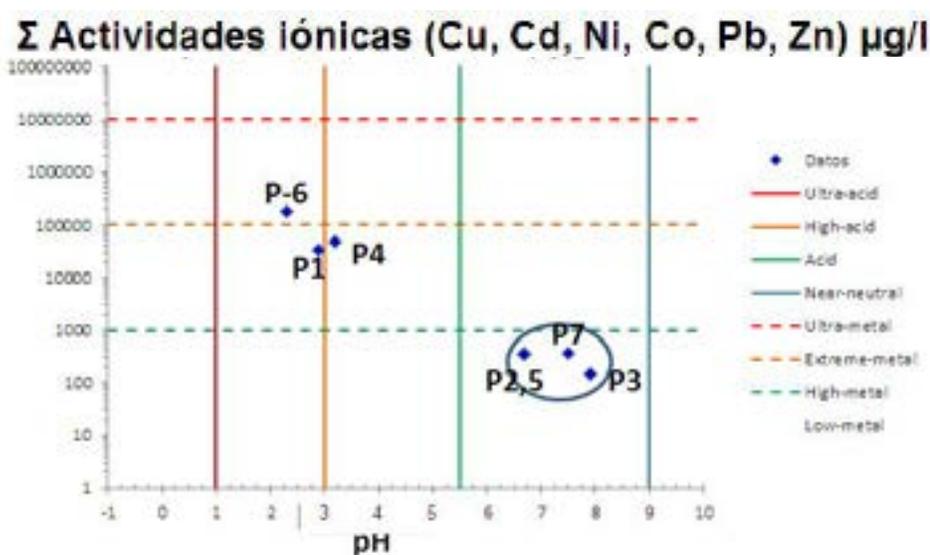


FIGURA 5.

Diagrama de Ficklin y Mosier para el muestreo de aguas superficiales realizado por López-Kramer et al. (2007)

RESULTADOS

Clasificación de aguas según el diagrama de Ficklin y Mosier (figura 5):

1 muestra (pto 6): Elevada acidez- extremas actividades de EPT disueltos (14,29%).

1 muestra (pto 1): Elevada acidez - elevadas actividades de EPT disueltos (14,29%).

1 muestra (pto 4): Agua ácida con elevadas actividades de EPT disueltos (14,29%).

4 muestras (ptos 2, 5, 7 y 3): Aguas cercanas a la neutralidad y bajas actividades de EPT disueltos (57,14 %).

Al igual que en el caso del muestreo del año 1997, los puntos 6 y 1 corresponden al tipo de aguas del drenaje de la mina (figura 1) y reciben aporte directo a la carga contaminante de los escurrimientos

de la cantera de las menas sulfuradas fundamentalmente piríticas deL Santa Lucía, con presencia de esfalerita y galena. En el caso del punto 4 de muestreo, el agua se clasifica como agua del drenaje de mina también con aporte de la carga contaminante de la colera reforestada del yacimiento "Castellano".

Con el objetivo de establecer el comportamiento del proceso DAR en función del tiempo de exposición a los procesos DAR en el yacimiento "Santa Lucía", se estableció la comparación entre el índice de contaminación que realizó Ponce en la campaña de muestreo de 1997 (punto 11; 163536 µg/l) y su similar (punto 6; 183960 µg/l) realizada por López-Kramer

RESULTADOS

### Σ Actividades iónicas (Cu, Cd, Ni, Co, Pb, Zn) µg/l

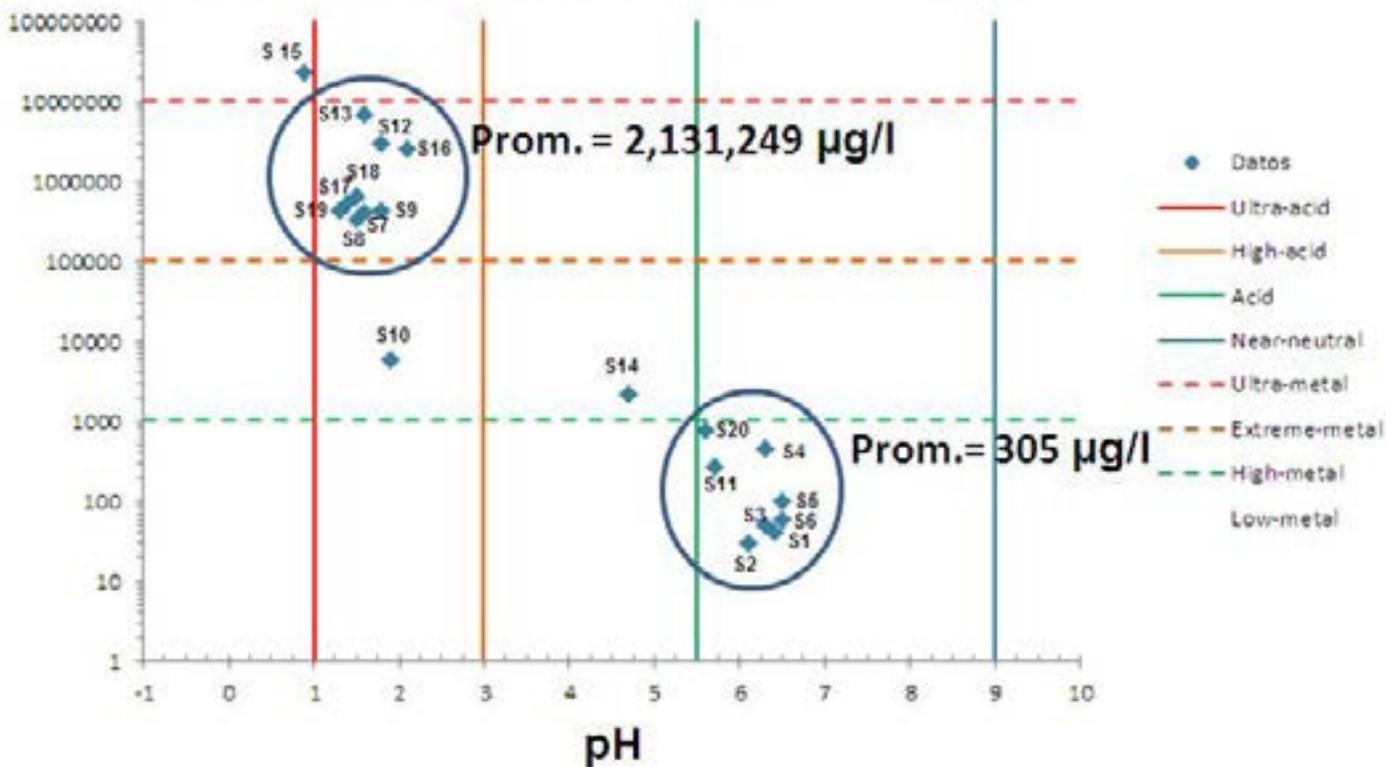


FIGURA 6. Diagrama de Ficklin para las muestras del río Santa Lucía (Cañete-Pérez, 2009)

RESULTADOS

et al. (2007), cuyo resultado fue la tendencia o razón de incremento del orden de 1,12 veces de contaminación DAR.

Con la finalidad de corroborar los resultados anteriores, se evaluaron los datos obtenidos por Cañete-Pérez (2009) en una misma campaña de muestreo (tabla V) en sus cuatro cuencas hidrográficas principales, pero con la ventaja adicional de una mayor población total de puntos evaluados (44 puntos).

En los diagramas Ficklin (figuras 6, 7, 8, 9 y 10) que se logran, se corroboran sin dudas los criterios anteriores respecto a la clasificación del tipo de aguas y su intensidad, arribándose a las siguientes conclusiones:

- Río Santa Lucía (influencia de las menas del yacimiento “Santa Lucía”)

1 muestra: Ultra acidez-ultra actividad de EPT disueltos (S-15) ----- 5%

9 muestras: Elevada acidez- extremas actividades de iones disueltos ----- 45% (S-13,12, 16, 18,17, 19, 9,7y 8)

1 muestra: Elevada acidez- elevadas actividades de EPT disueltos (S-10) ----- 5%

1 muestra: Ácidas- Elevadas actividades de EPT disueltos (S-14) ----- 5%

8 muestras: Cercanas a la neutralidad-Bajas actividades de EPT disueltos ---- 40% (S-20,4, 11, 5, 6, 3, 1 y 2)

RESULTADOS

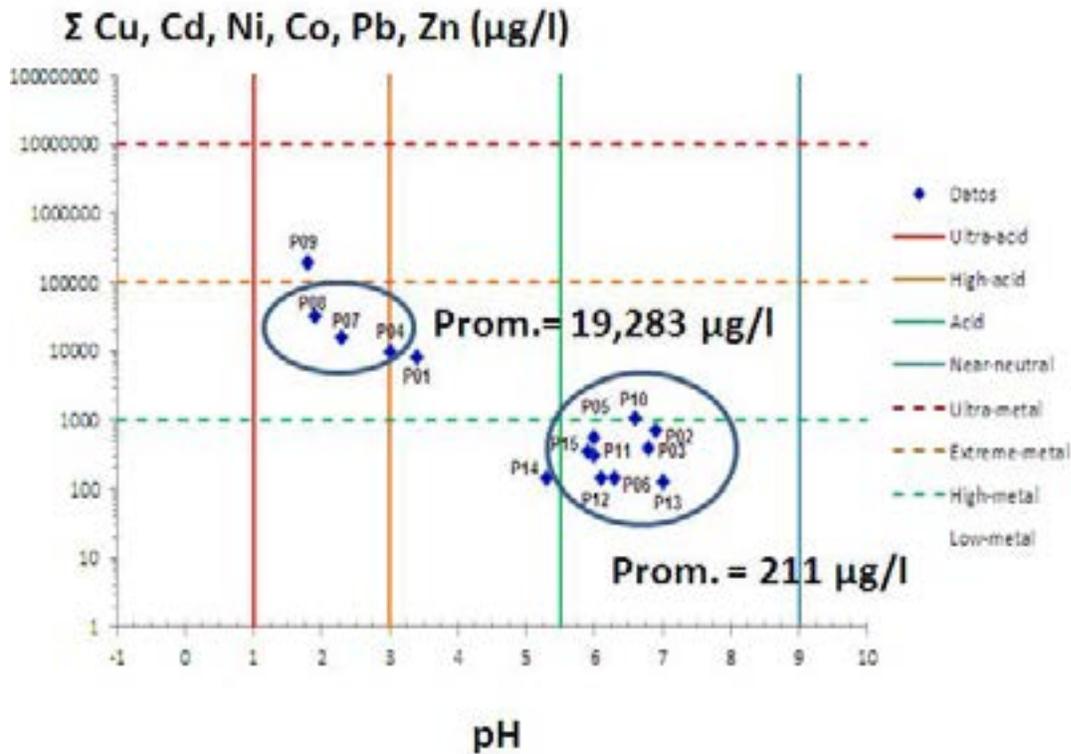


FIGURA 07.  
Diagrama de Ficklin para las muestras del río Palma (Cañete-Pérez, 2009)

• Río Palma (influencia de las menas del yacimiento “Castellano”)

1 muestra: Elevada acidez-extremas actividades de EPT disueltos (P-09) -----  
--- 6,67%

3 muestras: Elevada acidez- elevadas actividades de EPT disueltos (P-08,07y 04) ---  
20%

1 muestra: Ácidas- elevadas actividades de EPT disueltos (P-01)-----  
6,67%

9 muestras: Cercana a neutralidad-Bajas actividades de EPT disueltos -----  
60%

(P-10, 05, 02, 03, 11, 15, 12, 06, 13)

1 muestra: Ácida- Bajas actividades de EPT disueltos (P14) -----  
6,67%

A continuación, se estimó el incremento total de la contaminación para ambos acuíferos, dada la influencia directa que tienen con los yacimientos que se evalúan. Para ello se promediaron las actividades iónicas de las muestras que corresponden a la zona de elevada acidez

y extremas actividades iónicas de EPT, con aquellas que se relacionan a zonas cercanas a la neutralidad y bajas actividades iónicas de EPT en disolución, y sumándose las contribuciones de todas las muestras finalmente.

El resultado que se obtuvo, arrojó una razón de incremento de la contaminación de unas 113 veces en el río Santa Lucía en comparación con las aguas del río Palma. Al mismo tiempo se corrobora que el área de mayor influencia del DAR -según la zona de ubicación en el mapa hidroquímico (ver anexos)-, lo constituyen aquellas muestras que se tomaron en zonas cercanas a las menas primarias, coleras y escombreras de ambos yacimientos.

Como aspecto de interés se señala además los elevados tenores de acidez y actividades iónicas de metales en disolución para las muestras que se localizan en las lagunas de Santa Lucía (S-07, 08, 09, 10), las que a pesar de encontrarse alejadas de la zona de influencia del yacimiento “Santa Lucía” (aprox. 2000m), reciben aporte significativo de la mina a la carga contaminante, evidenciándose el alto grado de peligrosidad que generan los

RESULTADOS

RESULTADOS

procesos DAR en esta zona minera y una señal de alerta importante la cual ha sido señalada durante diferentes evaluaciones anteriores de impacto ambiental que se realizaron en dicho distrito metalogénico.

Tal comportamiento se justifica fundamentalmente por el carácter distal y proximal de los procesos de mineralización pirítica en ambos yacimientos SEDEX, lo cual se relaciona con velocidades de cristalización diferentes de los fluidos minerales, que van desde la fuente de alimentación hasta el sitio de deposición, los que en el caso de Santa Lucía, dado el carácter distal de formación de las menas, propiciaron menores velocidades del proceso de cristalización de la pirita, cuyo reflejo se constata en el predominio de variedades framboidales de pirita (menores tamaño de partícula y mayores áreas superficiales), los cuales favorecen los procesos DAR en su interacción con el dióxígeno y el agua

meteórica. De manera contraria para el caso del yacimiento “Castellano”, dado el carácter proximal de los fluidos al sitio de deposición de las menas, tuvieron lugar en consecuencia, mayores velocidades de cristalización de la pirita donde predominan las variedades recristalizadas (mayores tamaños de partícula y menor reactividad química) frente a los agentes de meteorización DAR.

Por su parte, el análisis de los diagramas de Ficklin para el río Biajaca y Nombre de Dios (figuras 8 y 9) arrojaron los siguientes resultados:

- Río Biajaca (influencia de las menas del yacimiento “Castellano”)

2 muestras: Ácidas- Bajas actividades iónicas de EPT disueltos (B-03, B-02) 66,67%.

1 muestra: Cercana a neutralidad-Bajas actividades iónicas de EPT disueltos (B-01) 33,33%.

RESULTADOS

RESULTADOS

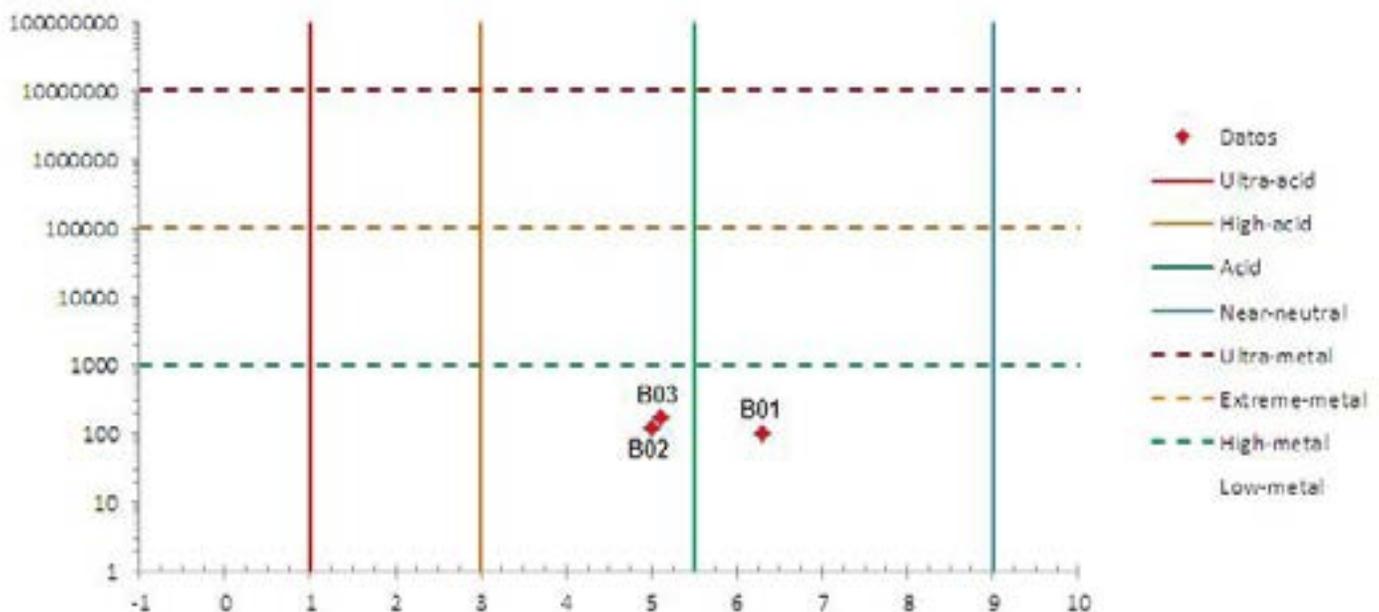


FIGURA 8. Diagrama de Ficklin para las muestras del río Biajaca (Cañete-Pérez, 2009)

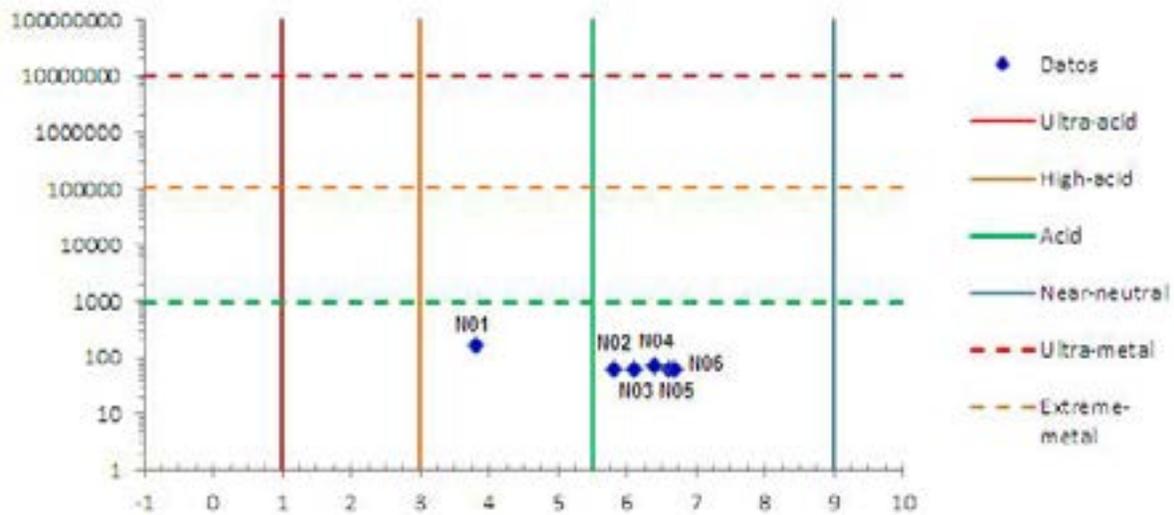


FIGURA 9. Diagrama de Ficklin para las muestras del río Nombre de Dios (Cañete-Pérez, 2009)

## RESULTADOS

• Río Nombre de Dios (influencia de las menas del yacimiento “Castellano”)

1 muestra: Ácida- Bajas actividades iónicas de EPT disueltos (N-01) 16,67%.

5 muestras: Cercanas a neutralidad-Bajas actividades iónicas de EPT disueltos, 83,33%. (N-04, N-02, N-03, N-05 y N-06).

Para el caso de los acuíferos Bijajaca y Nombre de Dios se procede de la misma forma, demostrándose que la razón de incremento de la contaminación entre ambos resultó del orden de 1,11 veces mayor en el caso del río Bijajaca, dada la mayor cercanía de este acuífero al yacimiento Castellano (ver anexos). Por último, se señala además, la coincidencia de los resultados obtenidos por Cañete-Pérez (2009) con relación a la estimación de riesgos ambientales a través del cálculo de la relación (PEC/PNEC), valores muy por encima de la unidad para los analitos seleccionados en las zonas de mayor influencia de la contaminación DAR.

## CONCLUSIONES

1. Se demuestra la utilidad del diagrama de Ficklin y Mosier propuesto por Plumlee et al. (1999) para la clasificación de acuíferos que se vinculan a yacimientos sulfurados cubanos exhalativo-sedimentarios (SEDEX), subtipo Selwyn del sistema mineral Zn-Pb-Ag ± (Au,

Ba) en el distrito metalogénico “Santa Lucía-Castellano”, lo cual pudiera extrapolarse a otros modelos de yacimientos reportados en el país, por lo que se propone su inclusión dentro del paquete actual de metodologías analítico-ambientales.

2. El aporte a la carga contaminante de los EPT (Pb, Zn, Cd, Co, Ni y Cu) en los ríos aledaños a las zonas circunmeníferas de los yacimientos “Santa Lucía” y “Castellano” se comporta en el siguiente orden: Santa Lucía >> Palma > Bijajaca > Nombre de Dios respectivamente, lo cual coincide con las evaluaciones de impacto ambiental realizadas por Ponce et al. (1998), López-Kramer et al. (2007) y Cañete et al. (2009) mediante la estimación de riesgos ambientales para cada uno de los analitos de interés.

3. Se confirma, al igual que en evaluaciones ambientales anteriores, cómo en la medida que las aguas se alejan de los yacimientos, las escombreras y los depósitos de colas, la carga contaminante disminuye, siendo mayor en el yacimiento “Santa Lucía” que en el depósito “Castellano”, hecho que se justifica fundamentalmente, por el carácter distal y proximal en que tuvieron lugar los procesos de cristalización de la piritita en ambos yacimientos.

## CONCLUSIONES

## TABLA 05.

Resultados del muestreo de aguas superficiales (Cañete-Pérez, 2009)

**Simbología:** S- aguas superficiales río Santa Lucía; P- aguas río Palma; N- aguas río Nombre de Dios; B- aguas río Biajaca

Muestra	pH	Cd (mg/l)	Co (mg/l)	Cu (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Total (µg/l)
S-01	6,3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,04	130
S-02 (bl)	6,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	110
S-03 (bl)	6,4	0,01	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	120
S-04	6,3	0,01	0,01	0,03	0,01	0,05	0,42	530
S-05	6,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,1	190
S-06	6,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,06	150
S-07	1,6	1,61	0,22	2,11	0,11	1,22	407,4	412,670
S-08	1,5	0,98	0,38	1,59	0,02	0,71	330,6	344,280
S-09	1,3	1,48	0,28	2,03	0,08	0,83	422,2	426,900
S-10	1,9	0,01	0,01	0,04	0,01	2,19	3,75	6,010
S-11	5,7	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,25	340
S-12	1,8	16,45	0,55	4,26	0,67	1,29	4319,3	4,342520
S-13	1,6	24,9	0,77	5,36	0,95	2,43	6770,6	6,805010
S-14	4,7	0,01	0,01	0,06	0,01	0,05	2,1	2,240
S-15	0,9	112,92	3,49	298,85	2,14	8,49	22887,7	23,313590
S-16	1,8	10	0,57	13,6	0,01	0,64	3030,6	3,055420
S-17	1,5	2,3	0,29	1,59	0,01	1,04	639,3	644,530
S-18	2,1	4,6	0,28	0,43	0,01	1,92	2614,5	2,621740
S-19	1,4	1,75	0,64	3,1	0,22	1,86	520,6	528,170
S-20	5,6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,78	870
P-01	3,4	0,27	0,57	0,77	1,05	1,57	3,79	8,020
P-02	6,8	0,01	0,01	0,02	0,01	0,1	0,24	390
P-03	6,0	0,01	0,01	0,03	0,01	0,1	0,15	310
P-04	3,0	0,01	0,03	0,2	0,03	0,15	0,59	1,010
P-05 (bl)	6,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05	140
P-06	6,3	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,04	140
P-07	2,3	0,07	0,23	0,83	0,26	1,94	12,22	15,550
P-08	1,9	0,10	0,43	0,43	0,43	1,9	29,18	32,470
P-09	1,8	0,79	0,46	0,45	0,3	1,61	190,7	194,310
P-10	6,6	0,01	0,01	0,05	0,01	0,05	0,96	1,090
P-11	5,9	0,01	0,01	0,04	0,01	0,05	0,22	340
P-12	6,0	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05	0,46	570
P-13	7,0	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,03	130
P-14 (bl)	5,3	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,04	140
P-15	6,9	0,02	0,02	0,01	0,02	0,05	0,58	700
N-01	3,8	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,08	160
N-02	5,8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	60
N-03	6,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	60
N-04	6,4	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	70
N-05	6,6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	60
N-06	6,7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	60
B-01	6,3	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	100
B-02 (bl)	5,0	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,06	120
B-03	5,1	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,12	180

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (1996). Standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell: ASTM D5744-96, 13 pp.
- Cabrera-Díaz I (2015). Influencia del pasivo sulfometales sobre el drenaje ácido y elementos potencialmente tóxicos en el manglar. Tesis de Maestría, Mención Geología Ambiental, Facultad de Geología. Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saiz-Montes de Oca”
- Cañete-Pérez C. Jornada A, Ponce-Seoane N (2007). Estudio de la degradación ambiental de la minería en la región de “Santa Lucía” en el Occidente de Cuba. Informe Técnico no. 5668. Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM. MINBAS. Cuba
- Cañete-Pérez C (2009). Evaluación de riesgos ambientales provocados por pasivos ambientales de minerales sulfurados. Tesis de Maestría, Centro Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas, La Habana
- Centro de Toxicología Edimburgo, con auspicio del PNUMA, OIT y la OMS. Módulo de capacitación No. 3 del PNUMA/IPCS, Parte B (1999). Evaluación de Riesgos Ambientales
- Colectivo de autores (2017). Metalogenia de Cuba. Memoria explicativa del Mapa Metalogénico de la República de Cuba a escala 1:250 000. Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, Editorial. Centro Nacional de Información Geológica.
- Delgado-Diez B, Alonso-Pérez J.A, Cabrera I, Casanova A, Lubián T (2015). Estudio geológico ambiental de los depósitos de cenizas de la planta sulfometales. Memorias del evento GEOCIENCIAS-2015, 6ta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. (CD-ROOM). La Habana, Cuba. ISBN 978-959-7117-19-3
- De la Nuez-Colón D, Santa Cruz Pacheco-Sarlabous M., Aguirre Guillot G., Toledo-Sánchez C., y otros (2015). Atlas de menas metálicas de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología (IGP). La Habana, 52 pag.
- du Bray, E.A ed. (1995). Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models. U.S Geological Survey Open-File Report. 95-831, 272 pp (also available online at <http://minerals.cr.usgs.gov>)
- Eppinger, R.G., Briggs P.H, Dusel-Bacon C y otros (2007). Environmental Geochemistry at Red Mountain, an unmined volcanogenic massive sulphide deposit in the Bonnifield district. Alaska Range, east-central. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. vol.7, p 207- 223
- Ficklin, W. H., Plumlee, G.S., Smith, K.S., and McHaugh J.B. (1992). Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas. Proceedings, 7th Internal Water Rock Interaction Conference. Park City. Utah 1992. pp 381-384
- Goldfarb, R.J., Taylor, C.D., d, Angelo, W.M., and O, Leary, R.M (1997). Hydrogeochemistry o mine-drainage waters associated with low-sulfide, gold-quartz veins in Alaska. In Domoulin, J.A., and Gray, J.E (eds.). Geological studies in Alaska by the U.S Geological Survey. 1995. U.S Geological Survey Professional Paper 1574. pp. 3-18
- Jacobs, J.A., Lehr J.H, Testa S. M (2014). Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils. Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation. Edit. John Wiley & Sons, Inc.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kelley, K.D and Taylor, C.D (1997). Environmental geochemistry of shale-hosted Ag-Pb-Zn massive sulphide deposits in northwest Alaska-Natural background concentrations of metals in water from mineralized areas. *Applied Geochemistry*, vol.12. pp 397-409.
- López Kramer J. M., Rodríguez Rubio J, Gonzalez Gonzalez M.L y otros (2007). Estudio de impacto ambiental para polimetálico "Castellano". Consultoría: CESIGMA S.A
- Norma Cubana NC 27:(2012). Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas
- Plumlee, G.S., Smith, K.S., Ficklin W. H., and Briggs, P.H (1992). Geological and geochemical controls on the composition of mine drainages in mineralized areas. *Proceedings, 7th Internal Water Rock Interaction Conference*. Park City, Utah 1992. pp 419-422
- Plumlee, G.S (1999). The Environmental Geology of Mineral Deposits. In: *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques and Health Issues* (Eds.: Plumlee, G.S., and M.J. Logsdon). *Reviews in Economic Geology*. vol. 6A. Society of Economic Geologists, Inc.
- Price, J.G., Shevenell, L., Henry, C.D., Rigby, J.G., Christensen, L.G., Lechler, P.J., and Disilets, M.O., (1995). Water quality at inactive and abandoned mines in Nevada. *Nevada Bureau of Mines and Geology. Open- File Report*. 95-4. 73 pp.
- Ponce-Seoane N Díaz J.L, Triff J, Iriarte M.A, Montero M, Rojas F y otros (1997). Reflejo del impacto minero en las aguas de las cuencas de los yacimientos "Santa Lucía" y "Castellanos". *Memorias del Congreso Cubano de Geología y Minería-98*. Ed. Centro Nacional de Información Geológica. IGP. MINBAS. La Habana. Cuba. pp. 583-585
- Smith, K.S., Plumlee, G.S., and Ficklin W. H., (1994). Predicting water contamination from metal mines and mining waste: Notes, Workshop 2. *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*. U.S Geological Survey Open-File Report. 94-264. 112 pp.
- Torres Zafra J.L., Cazañas-Díaz X., Lavaut-Copa W., (2017). Depósitos minerales metálicos de Cuba. *Memorias del evento GEOCIENCIAS. 7ma Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. (CD-ROOM). La Habana. Cuba. ISBN 978-959-7117-19-3
- White W. W., III, Cox, R.L., Lapakko, K.A., (1999). Static text methods most commonly used to predict acid-mine drainage- Practical guidelines for use and interpretation. In Plumlee, G. S., and Logsdon M.J (eds.). *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A. Processes, Techniques and Health Issues: Society of Economic Geologist. Reviews in Economic Geology*. vol. 6A, pp 325-338

# ANEXOS

FIGURA 10. MAPA HIDROQUÍMICO DE AGUAS SUPERFICIALES López-Kramer et al., (2007)

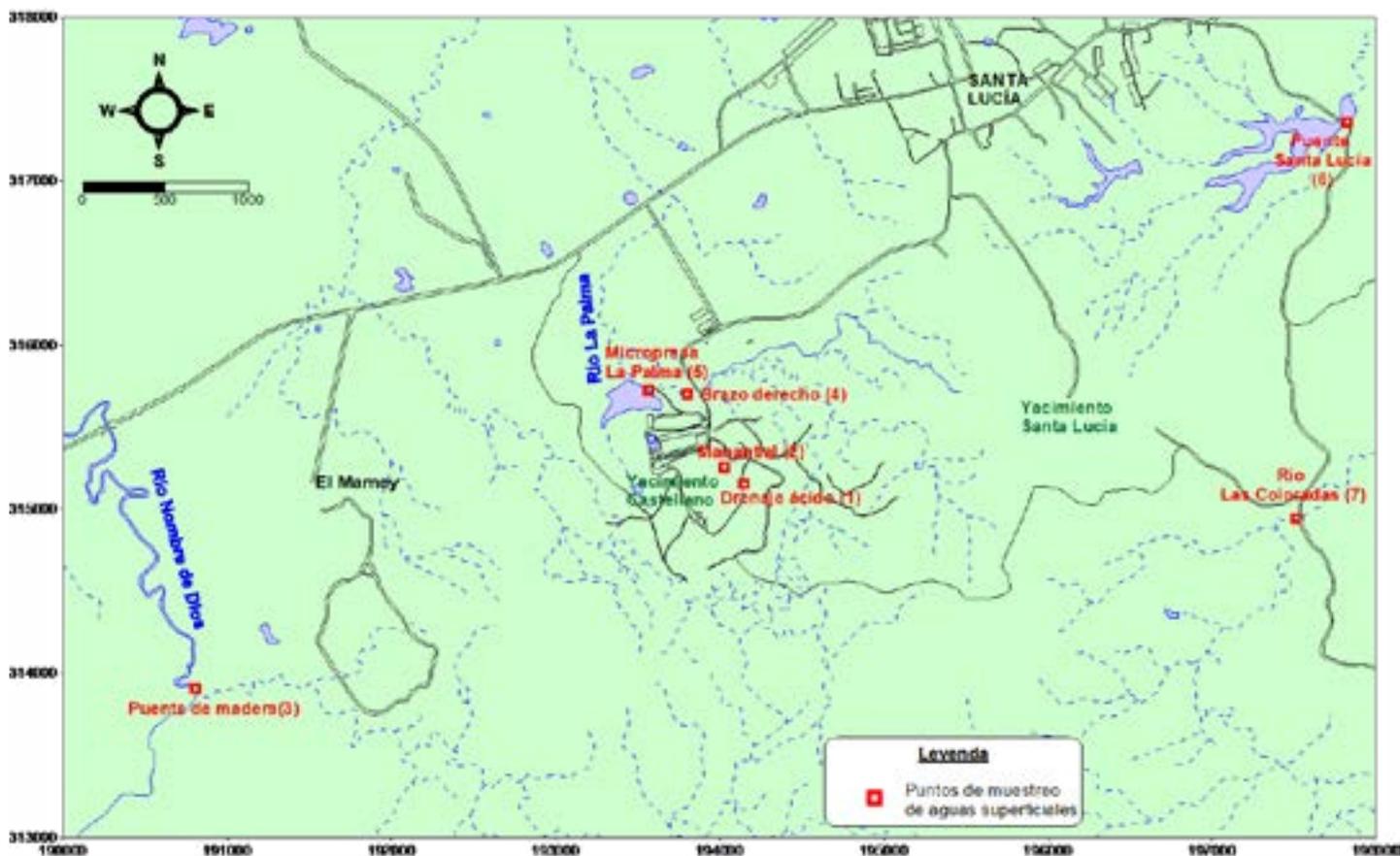


FIGURA 1.

