



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Identificación de especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) recibiendo un efluente ácido con trazas de Pb, Zn, Cu y Fe de la operación unitaria de flotación

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

DONOVAN ENRIQUE ÁLVAREZ MÁRQUEZ

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Durán Domínguez de Bazúa María del Carmen

VOCAL: García Gómez Rolando Salvador

SECRETARIO: García Reynoso José Agustín

1ER. SUPLENTE: Ramírez Burgos Landy Irene

2Do. SUPLENTE: Bernal González Marisela

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 04510. México.

ASESOR DEL TEMA:

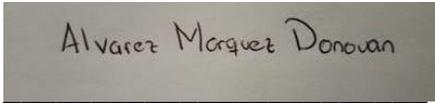
Dr.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa _____

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dra. en Ing. Marisela Bernal González _____

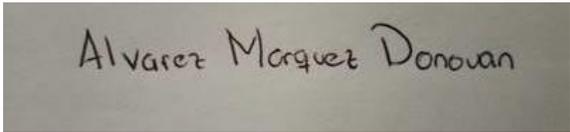
SUSTENTANTE:

Álvarez Márquez Donovan Enrique

A rectangular box containing a handwritten signature in black ink that reads "Alvarez Marquez Donovan".

DECLARATORIA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Alvarez Marquez Donovan

Sustentante

Álvarez Márquez Donovan Enrique

Reconocimientos institucionales

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM: Los reactivos, consumibles y materiales empleados en la parte experimental de esta investigación fueron adquiridos con el apoyo financiero parcial del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) para el proyecto “Desarrollo de un modelo cinético diferencial para un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) utilizado para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso unitario de flotación” Clave IN110022

También contribuyó con recursos financieros parciales el Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, PAIP, Clave 50009067

Finalmente, se agradece a la mina cooperante por el agua de su proceso de flotación, desde su recolección en sus instalaciones hasta su envío a los laboratorios de la UNAM y que está siendo usada en el sistema a escala de laboratorio donde se realiza la parte experimental

Estos agradecimientos se hacen porque la información consultada en este estudio bibliográfico estuvo soportada en tesis experimentales para las cuales se emplearon los fondos que se reconocen aquí

Agradecimientos

A la Dra. Marisela Bernal González por su apoyo durante la realización de esta tesis, por sus enseñanzas y dedicar su tiempo en ayudarme no solamente para tener un mejor entendimiento del tema sino también para mejorar mis habilidades de redacción y comprensión a través de nuestro trabajo diario

A la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa por confiar en mí y permitirme realizar este trabajo, así como mi estancia académica y cumplir con el servicio social, sin su ayuda esto no podría haber sido posible

Finalmente, quiero agradecerles a todos los profesores de la Facultad de Química que fueron un pilar en mi formación académica ya que sin sus enseñanzas no estaría donde estoy ahora y, en especial, a quienes conforman mi jurado y que tuvieron la gentileza de dar valiosos comentarios que enriquecieron este documento

Dedicatorias

A mi madre y hermana quienes estuvieron siempre a mi lado, dándome el apoyo necesario para poder lograr un sueño más, gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la valentía, no temo a las adversidades cuando ustedes están a mi lado

A mis profesores, asesores y compañeros, que me inspiraron a llegar más allá de mis límites y me demostraron que uno puede mejorar si se lo propone

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos, por apoyarme durante este trayecto, por estar ahí cuando más los necesitaba y por todo el amor y enseñanzas que me han brindado, los llevo a todos en el corazón

Índice

	Página
Declaratoria	ii
Resumen	1
Capítulo I. Planteamiento del problema	2
1.1. Introducción	2
1.2. Hipótesis	4
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivo	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos particulares	6
Capítulo II. Marco teórico	7
2.1. Proceso de flotación	7
2.2. Proceso de extracción de minerales de Pb, Zn, Cu y Fe	7
2.3. Principio del sistema de tratamiento biológico anaerobio: Diferencias entre los sistemas anaerobios en medios ácidos	9
2.4. Eficiencia de los microorganismos en la remoción de los sulfatos a sulfuros en diferentes sistemas anaerobios	10
2.5. Proceso de sulfato reducción y precipitación de metales por MSR	14
2.6. Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), responsables de realizar la precipitación del Pb	15
2.7. Revisión bibliográfica de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Zn	15
2.8. Revisión bibliográfica de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Cu	17
2.9. Revisión bibliográfica de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Fe	18
2.10. Revisión bibliográfica para evaluar la influencia de los parámetros de operación en la precipitación de metales Pb, Cu, Zn y Fe	20
Capítulo III. Metodología	23
3.1. Revisión bibliográfica	23
Capítulo IV. Resultados y discusión	24
4.1. Resultados	24
4.1.1. Revisión en la literatura de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), responsables de la precipitación de metales Pb, Zn, Cu	24

	Página
y Fe en un sistema anaerobio	
4.1.2. Mecanismos de precipitación de los metales disueltos como sulfuros metálicos en el agua proveniente de la operación unitaria de flotación y la eficiencia de remoción de cada metal en un sistema anaerobio	26
4.1.3. Parámetros de operación de mayor influencia en un sistema anaerobio para lograr la precipitación de metales como Pb, Zn, Cu y Fe	28
4.2. Discusión	29
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	31
5.1. Conclusiones	31
5.2. Recomendaciones	33
Referencias bibliográficas	35
Anexos	51
Anexo 1. Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación teórica	52
Anexo 2. Carta de aceptación de la Revista Colombiana de Biotecnología al artículo de revisión producto de esta investigación	53
Anexo 3. Artículo: Principales microorganismos sulfato reductores (MSR) de reactores anaerobios alimentados con efluentes ácidos, una revisión bibliográfica	54

Índice de Tablas

Tabla	Título	Página
Tabla 2.1.	Proceso utilizado para obtener concentrados de los minerales Pb, Zn y Cu, todos ellos acompañados de Fe	8
Tabla 2.2.	Taxonomía de la mayoría de las poblaciones microbianas detectadas durante el tratamiento anaerobia (Modificada de Di-Maria, 2017)	11
Tabla 2.3.	MSR responsables de la precipitación del Pb	15
Tabla 2.4.	MSR responsables de la precipitación del Zn	16
Tabla 2.5.	MSR responsables de la precipitación del Cu	17
Tabla 2.6.	MSR responsables de la precipitación del Fe	18-19

Índice de Figuras

Figura	Título	Página
Figura 1.1.	Reactor tipo RALLFA (Poblete-Mier, 2015)	5
Figura 1.2.	RALLFA a escala de laboratorio (Poblete-Mier, 2015)	5
Figura 1.3.	RALLFA completo (Poblete-Mier, 2015)	5

Glosario

Abreviaturas, símbolos químicos y nombres de compuestos químicos

Término	Significado
Acetil-CoA	Acetil coenzima A
ADN	Ácido desoxirribonucleico
Ag	Plata
Al	Aluminio
API	<i>Analytical Profile Index</i> (Por sus siglas en inglés)
As	Arsénico
ASR	Actividad sulfato reductora
BFQ	Biológico-físico-químico
C1	Vía del monóxido de carbono deshidrogenasa o vía Wood
CaCl ₂ .2H ₂ O	Cloruro de calcio dihidratado
CaO	Óxido de calcio
Cd	Cadmio
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CT	Convertidor teniente
Cu	Cobre
d	Días
DAM	Drenaje ácido de mina
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EMDP	Estudios Mineros del Perú
et al.	Abreviatura de los términos latinos <i>et altere</i> , literalmente 'y otros'. Se usa en español para poner más de dos autores en un texto. En la escritura va en su forma abreviada et al. (siempre con punto, como todas las abreviaturas y sin cursivas)

Término	Significado
	aunque venga del latín por su uso tan común en vez de usar y col., por 'y colaboradores')
etc.	Abreviatura de los términos latinos <i>et cetera</i> , literalmente 'y el resto, y las demás cosas'. Se usa en español para cerrar enumeraciones incompletas. En la escritura va siempre precedida de una coma y se emplea frecuentemente en su forma abreviada etc. (siempre con punto, como todas las abreviaturas y sin cursivas aunque venga del latín por su uso tan común)
Fe	Hierro
FISH	Fluorescence in situ hybridization (por sus siglas en ingles)
g	Gramo
g/L	Gramos por litro
H ⁺	Catión hidrógeno
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
HCO ₃ ⁻	Anión bicarbonato
HR	Horno de reverbero
in situ	Expresión latina que significa 'en el sitio' o 'en el lugar', y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar
KCl	Cloruro de potasio
kg	Kilogramo
kg DQO/d*m ³	Kilogramo de demanda química de oxígeno por día por metro cúbico
kg/t	Kilogramo por tonelada
KH ₂ PO ₄	Fosfato diácido de potasio
L	Litro
mg	Miligramo
mg/L	Miligramo por litro
mg S ²⁻ /L*d	Miligramos de sulfuro por litro por día
MgCl ₂	Cloruro de magnesio
MgCl ₂ .6H ₂ O	Cloruro de magnesio hexahidratado
MgSO ₄ .7H ₂ O	Sulfato de magnesio heptahidratado
mL	Mililitros
mM	Milimolar
Mn	Manganeso
MSR	Microorganismos sulfato reductores
N ₂	Nitrógeno
NaCl	Cloruro de sodio
NH ₃	Amoníaco
NH ₄ ⁺	Ión amonio
NH ₄ Cl	Cloruro de amonio
Ni	Níquel
nmol SO ₄ ²⁻ /cm ³ d	Nanomoles de ion sulfato por centímetro cúbico por día

Término	Significado
P	Fósforo
Pb	Plomo
pH	Logaritmo negativo de base 10 de la concentración de catión hidrógeno
ppm	Partes por millón
RALLFA	Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (<i>UASB reactor</i> , en inglés)
S	Azufre
S ²⁻	Anión sulfuro
S.A.C.	Sociedad Anónima Cerrada
SO ₄ ⁻	Anión sulfato
t	Tonelada
TCA	Ácido tricarboxílico (por sus siglas en inglés)
TRC	Tiempo de retención celular o de sólidos en general
TRH	Tiempo de residencia hidráulica o de fluidos en general
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i> (por sus siglas en inglés)
UAFF	<i>Upflow anaerobic fixed-film reactor</i> (por sus siglas en inglés) (Bayoumi et al., 1999)
Zn	Zinc
°	Grados
°C	Grados centígrados
%	Porcentaje
%V/V	Porcentaje volumen-volumen (volumen de soluto por 100 unidades de volumen de solución)
A	Factor usado para evaluar la alcalinidad “carbonatada” a dos diferentes valores de pH (5.75 y 4.3) que permite realizar el seguimiento de reactores anaerobios para evitar su acidificación
+	Más
-	Menos
±	Más / Menos
=	Igual
>	Mayor que

Siglas y definiciones

Término	Significado
BIDI	Biblioteca Digital de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
‘Chancado’	En Centro y Sudamérica significa triturar, machacar o moler, especialmente minerales (vocablo probablemente

Término	Significado
<i>DSpace</i>	castellanizado del quechua) <i>Open source repository software package typically used for creating open access repositories for scholarly and / or published digital content /</i> Paquete de software de repositorio de código abierto que normalmente se usa para crear repositorios de acceso abierto para contenidos académico y/o digital publicados
Elsevier	Empresa editorial existente desde que en el occidente se desarrolló la imprenta de Gutenberg
Espiral	Las bacterias en forma de espiral son aquellas que presentan más de una curvatura y nunca son rectas (Pedrique-de-Aulacio et al., 2008)
<i>Google Académico</i>	Repositorio de publicaciones en inglés y español
Intemperismo	No existe esta palabra sino solamente <i>intemperie</i> , del latín <i>intemperies</i> . 1. f. Desigualdad del tiempo. A la <i>intemperie</i> . 1. loc. adv. A cielo descubierto, sin techo ni otro reparo alguno (https://dle.rae.es/intemperie?m=form). Y de esta definición se usan en ciencias de la Tierra los términos <i>intemperismo</i> para aquellos fenómenos causados por el oxígeno y el vapor de agua de la atmósfera, la energía del sol, etc., el término <i>intemperización</i> y el verbo <i>intemperizar</i> para esta acción
IPICYT Repositorio	Repositorio del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, México
Redalyc	Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
<i>SciELO</i>	<i>Scientific Electronic Library Online</i> o Biblioteca Científica Electrónica en Línea
<i>Science Direct</i>	Repositorio de publicaciones en inglés
SEDICI	Servicio de Difusión de la Creación Intelectual
Tétradas	Son agrupaciones de cuatro microorganismos conocidos como cocos en una disposición cuadrada. Se dividen en dos direcciones perpendiculares (Pedrique-de-Aulacio et al., 2008)
UDES Repositorio	Repositorio digital de la Universidad de Santander, España

Notas:

Esta tesis usa el punto decimal de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana correspondiente (DOF, 2009)

No usa el '*ampersand*' (&) ya que las conjunciones copulativas son, en general, muy cortas en el idioma español, 'y', por ejemplo

Los guarismos van junto a los grados y el símbolo %

Se usan et al., etc., sin cursivas (ver Glosario)

RESUMEN

En esta investigación bibliográfica se encontraron reportes sobre una gran variedad de especies responsables de precipitar a cuatro metales de interés (Cu, Pb, Zn y Fe). En la mayoría de las investigaciones no solamente se considera la precipitación de estos metales, sino también la de otros elementos que están presentes en cada efluente estudiado. Los artículos aquí mencionados tienen una relación directa con el efluente proveniente de la operación unitaria de flotación. Aportan conocimiento acerca del proceso de sulfato reducción, comprendiendo el mecanismo mediante microorganismos con características específicas, especialmente su versatilidad pues se desarrollan en diferentes ecosistemas. Se muestra que varias especies, como *Desulfobacter* o *Desulfovibrio* son comunes pues tienen condiciones relativamente sencillas para desarrollarse. Los microorganismos sulfato reductores (MSR) son eficientes para reducir la acidez del agua (de la operación unitaria de flotación de una mina, de cocinas, de corrientes marinas, etc.). También lo son para precipitar diferentes elementos pues no requieren de algún agente externo salvo en contadas ocasiones donde debe actuar un catalizador. Hay investigaciones sobre los nutrientes que deben adicionarse para incrementar su actividad. Los reportes de investigación revisados identificaron las variables a controlar para obtener buenos resultados en la remoción de metales y menores impactos en el ambiente. Es de gran importancia el desarrollo de proyectos que tomen en cuenta un sistema natural, como la degradación anaerobia, para alcanzar un punto en el cual la tecnología y el ambiente puedan complementarse logrando bienes de consumo necesarios para la población sin causar daños irreparables a la naturaleza.

Palabras clave: Microorganismos sulfato reductores (MSR), reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA), efluente ácido con trazas de Pb, Zn, Cu y Fe, operación unitaria de flotación

Capítulo I

Planteamiento del problema

1.1. Introducción

Desde tiempos prehispánicos, “la minería ha sido un factor de enorme importancia en el suceder de la historia económica de México, en la apropiación del territorio y en la fundación de los principales centros urbanos del país durante la colonia” (Coll-Hurtado et al., 2002). Desde 1961, cuando la Ley de mexicanización de la minería fue expedida, “las riendas del sector minero fueron tomadas ya no por un dominio externo sino por el estado y capitales mexicanos y rápidamente se fue develando el trasfondo político que este cambio traería, el cual iba enfocado hacia la fortificación y potenciación del capital minero “mexicanizado” convirtiéndolo así en una de las actividades más exitosas del país” (Wise y Mendoza, 2001).

Fue a partir de 1990, que hubo una reestructuración de la legislación minera “aumentando la participación del sector privado, disminuyendo el papel del estado como inversionista y como rector de esta actividad económica ampliando así la participación de la inversión extranjera directa” (Guevara-González, 2016). Aunque el crecimiento de la actividad minera no necesariamente significa algo completamente positivo, pues trae consigo consecuencias en las condiciones de vida de las poblaciones en las cuales se ha asentado dicha actividad que son en su mayoría de carácter ambiental.

Uno de los principales problemas que la minería ha generado es “el despojo hídrico, en el cual se sobreexplotan los acuíferos y se contamina el agua, así como se genera una mayor producción de residuos sólidos y aguas ácidas” (Guzmán-López, 2016).

Para enfrentar esta problemática se han presentado varias opciones dentro de las cuales destaca el tratamiento de aguas residuales con microorganismos sulfato reductores, MSR, ya que se sabe que “en condiciones anaerobias oxidan compuestos orgánicos simples y liberan H_2S y HCO_3^- en presencia de SO_4^- y H^+ , los cuales son comunes en el agua ácida” (Dvorak et al., 1992).

El H_2S reacciona con los contaminantes metálicos precipitándolos como sulfuros metálicos. “Este proceso es de bajo costo y de gran importancia ya que remueve los metales del agua, aumenta el pH y debido a la alcalinidad que se genera por las bacterias se reduce la acidez” (Durán-Barrantes et al., 2000).

El medio ácido de interés en esta investigación son las aguas ácidas finales provenientes de la operación unitaria de flotación de la industria minera, las cuales son originadas mediante “la oxidación microbiológica de sulfuros metálicos gracias a las bacterias ferro-oxidantes de la familia *Thiobacillus*” (Durán-Barrantes et al., 2000).

El proceso de flotación es parte de un procedimiento de enriquecimiento de algunos minerales (sulfuros de Cu, Pb, Zn, etc.) y en el cual el mineral se ve separado debido tanto a interacciones fisicoquímicas como a procesos de reducción de tamaño. De esta forma “se puede concentrar el metal de interés mientras que el resto de material sin valor (relave) puede ser descartado”.

Este procedimiento es conocido como concentración y su finalidad es la de obtener un material concentrado, para que se pueda reducir el costo de su transporte y tratamiento. “Las etapas que conforman el mismo son la recepción de materiales, ‘chancado’ (ver Glosario), molienda, flotación y secado de concentrados” (EMDP, S.A.C., 2000).

1.2. Hipótesis

Las especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) convierten los sulfatos en sulfuros, precipitando las sales metálicas de Pb, Zn, Cu y Fe en las condiciones en que se encuentra un efluente ácido de la operación unitaria de flotación. Por tanto, es de suma importancia estudiar a las especies de MSR que no presenten una alta sensibilidad a los metales pesados y a valores de pH bajos.

1.3. Justificación

La contaminación ambiental causada por las aguas residuales que contienen altas concentraciones de metales pesados disueltos y pH bajo, provenientes de la operación unitaria de flotación de la industria minera, impactan negativamente a los organismos vivos. “Los efectos tóxicos de los metales pesados incluyen el desplazamiento de iones y/o sustitución de iones esenciales en sitios celulares y bloqueo de grupos funcionales de moléculas importantes” (Cañizares-Villanueva, 2000). “Esto da como resultado daño a la estructura del ADN, nervios, hígado y huesos” (Chocobar-Ponce, 2019). Por otro lado, “los contaminantes orgánicos pueden ser usados como nutrientes y transformados en especies químicas con menor impacto”. De esta forma, “los metales pueden transformarse de formas móviles y tóxicas en estables y menos tóxicas” (Martín-Moreno et al., 2004; Uhrie et al., 1996). Por ello, se han utilizado como base de varios métodos para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales. Entre los métodos clásicos fisicoquímicos están la absorción, el intercambio iónico y la formación de complejos. A pesar de que el tratamiento es eficaz, “estos métodos son costosos y generan grandes cantidades de lodos residuales” (Gallegos-García et al., 2008; Tekerlekopoulou et al., 2010). “La inmovilización de metales pesados que están disueltos en forma de sulfatos puede lograrse a través de su reducción a sulfuros y su precipitación mediante MSR” (Uhrie et al., 1996). Este es ahora considerado como un método de gran interés. La precipitación de metales mediante MSR es un tratamiento alternativo, prometedor y con mucho atractivo frente a los sistemas

fisicoquímicos. Este método consta de dos etapas: (i) Los MSR, en condiciones anaerobias, oxidan compuestos orgánicos simples (por ejemplo, lactato, acetato, propionato, butirato, etc.) utilizando al sulfato como aceptor de electrones y generando iones de sulfuro de hidrógeno y bicarbonato, y (ii) El sulfuro de hidrógeno producido biológicamente reacciona con metales pesados disueltos como Cu, Zn y Ni para formar el sulfuro de metal que precipita (Hulshof et al., 2006; Neculita et al., 2007). Esta transformación, realizada normalmente en reactores de lecho de lodos de flujo ascendente, conocidos como RALLFA y como *UASB reactors* en inglés (*Upflow anaerobic sludge blanket reactors*), no solamente elimina los metales pesados tóxicos de las aguas residuales, sino que también permite la recuperación de metales valiosos como sulfuros metálicos (Gallegos-García, 2009) (Figuras 1.1 a 1.3).

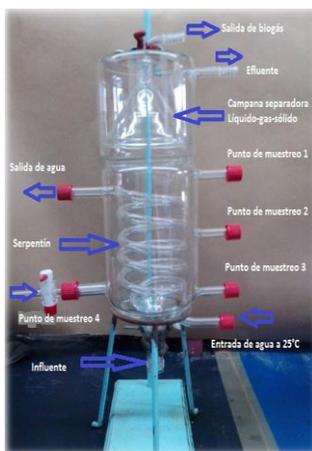


Fig. 1.1. Reactor tipo RALLFA (Poblete-Mier, 2015)



Fig. 1.2. RALLFA a escala de laboratorio (Poblete-Mier, 2015)



Fig. 1.3. RALLFA completo (Poblete-Mier, 2015)

Sin embargo, la resistencia de los microorganismos a los metales varía con la especie. Se sabe que cada especie desarrolla una variedad de mecanismos de resistencia específicos como: La exclusión de metales por barrera de permeabilidad, transporte activo del metal fuera de la célula, secuestro intracelular del metal por unión a proteínas, secuestro extracelular, desintoxicación enzimática del metal a una forma menos tóxica y reducción de la sensibilidad a los metales.

Finalmente, esta resistencia también depende de la movilidad, biodisponibilidad y efecto toxicológico de cada metal pesado con el que interactúen los MSR (Bruins et al., 2000). Por tanto, es de suma importancia estudiar a las especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) que no presenten una alta sensibilidad a los metales pesados y a un valor bajo de pH, que son características de un efluente proveniente de la operación unitaria de flotación de la industria minera

1.4. Objetivo

1.4.1. Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica de las especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) presentes en reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) dosificados con efluentes ácidos, que provienen de la operación unitaria de flotación de una mina cooperante, conteniendo bajas concentraciones de Pb, Zn, Cu y Fe aprovechando la capacidad de las especies MSR y convirtiendo los sulfatos en sulfuros, precipitando a estos metales como sulfuros metálicos y logrando así la recirculación del agua ya tratada a la operación unitaria de flotación.

1.4.2. Objetivos particulares

- ✓ Revisar en la literatura cuáles son las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), responsables de la precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe en un sistema anaerobio
- ✓ Distinguir cuáles son los parámetros de operación de mayor influencia en un sistema anaerobio logrando la mayor precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Proceso de flotación

“El proceso de flotación es parte de un procedimiento de enriquecimiento de algunos minerales (sulfuros de Cu, Pb, Zn, etc.) y en el cual el mineral se ve separado debido tanto a interacciones fisicoquímicas como a procesos de reducción de tamaño” (Pacheco-Gutiérrez, 2006). De esta forma “se puede concentrar el metal de interés mientras que el resto de material sin valor (relave o ganga) puede ser descartado”. Este procedimiento es conocido como concentración y su finalidad es la de obtener un material concentrado, pero al mismo tiempo de una masa reducida, para que se puedan disminuir los costos de transporte y de su tratamiento. “Las etapas que conforman el mismo son la recepción de materiales, ‘chancado’, molienda, flotación y secado de concentrados” (EMDP, S.A.C. et al., 2000).

2.2. Proceso de extracción de minerales de Pb, Zn, Cu y Fe

El Pb y Zn son obtenidos mayormente a partir de un mineral llamado galena que es el mineral de sulfuro más importante y generalmente se trata de forma pirometalúrgica. Sin embargo, la fundición de plomo enfrenta dificultades con respecto de las regulaciones ambientales. “Por lo tanto, la recuperación hidrometalúrgica de plomo de la galena puede ser un proceso prometedor con la formación de azufre elemental ambientalmente inerte en lugar de dióxido de azufre” (Cedillo-Salazar et al., 2017). En la Tabla 2.1 se muestran las publicaciones revisadas de la bibliografía relacionadas con los procesos utilizados a escala laboratorio para obtener concentrados de los minerales Pb, Zn y Cu, todos ellos acompañados de Fe.

Tabla 2.1. Diferentes procesos utilizados para obtener concentrados de los minerales Pb, Zn y Cu, todos ellos acompañados de Fe

Objetivo	Proceso	Eficiencia	Referencia
Determinar los parámetros que intervienen en el proceso de flotación de minerales en el circuito de Zn	Flotación	"Recuperación de zinc del 90.58% ¹ "	Castro-Chamorro, 2005
Evaluar la extracción de plomo y cadmio de vajilla cerámica vidriada	La lixiviación se aplicó en cuatro repeticiones, en cada una de las extracciones se utilizó ácido acético al 4% (v/v) durante 24 horas a 22°C	"Entre el 50 y el 93% de plomo en los lixiviados"	Flores et al., 2016
Recuperar óptimamente por flotación los metales de Pb y Zn	Flotación	"Recuperaciones máximas de Zn y Pb de 94 y 83%, respectivamente"	Gamarra-Maldonado, 2019
Plantear la hipótesis de que el Pb-210 está interactuando con los sulfuros de cobre y esta interacción está contribuyendo a la ineficacia aumentando el rechazo de la flotación	Flotación	"El plomo adsorbido por el azufre para formar sulfuro de plomo y especies de sulfito de plomo: 89.8% de recuperación por flotación"	Hamilton et al., 2020
Usar nanopartículas y micropartículas de lignina como recolectores sostenibles y amigables con el ambiente	Flotación	"Recuperaciones totales de hasta 91, 85 y 98% para Cu, Pb y Zn, respectivamente"	Hrúzová et al., 2020
Determinar los parámetros operativos que influyen en la recuperación por flotación de la galena a partir de un mineral de bajo grado de Pb - Zn	Flotación	"Incremento de la recuperación del mineral de plomo del 60 al 80%"	León-Arroyo y Dianderas-Mandujano, 2019
Recuperar los metales objetivo de un concentrado de sulfuro a granel (2.9% Cu, 7.4% Zn, 2.5% Pb, 67 ppm Ag y 37.2% Fe)	Proceso hidrometalúrgico integral que consta de dos etapas de lixiviación férrica, seguida de una etapa de lixiviación con salmuera caliente	"Se consiguen extracciones superiores al 95% para Zn, Cu y Pb, así como, la recuperación total de catalizador"	Lorenzo-Tallafigo et al., 2021
Recuperar cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación	Flotación	"A través de pruebas de flotación se lograron recuperaciones de 59.2% en escorias de horno de reverbero (HR) y 86,8% para la escoria de convertidor teniente (CT), cuyas leyes de cobre en el concentrado fueron de 3.7% y 23.6%, respectivamente"	Valderrama et al., 2018
Modificar el pH económica y eficazmente mediante la cal en el proceso de flotación selectiva de los principales minerales sulfurados	Flotación	"El consumo de la cal en la promoción de la separación selectiva entre diferentes minerales sulfurado puede ser elevado hasta 5 kg/t de mineral, especialmente para minerales con alto contenido de pirita y/o cuando la flotación se realiza con agua de mar"	Zanin et al., 2019
Obtener concentrados de 7.79% Cu, 22.00% de Pb, 4.81% de Zn, 8.24% de S y 12.15% de CaO; el sulfuro de cobre representó el 76.97% del cobre, el sulfuro de plomo el 25.55% de Pb y el sulfuro de zinc el 67.66% de Zn	Flotación	"En estas condiciones, los grados de lixiviación de Cu y Zn fueron 87.43% y 64.38%"	Zhang et al., 2019

¹ En esta investigación los °C y % van junto a los guarismos. Se usa el punto decimal de acuerdo con la normativa mexicana (DOF, 2009) como ya se mencionó en las primeras páginas

2.3. Principio del sistema de tratamiento biológico anaerobio:

Diferencias entre los sistemas anaerobios en medios ácidos

Existen diversas definiciones para la conversión anaerobia utilizadas por diferentes autores: van-Lier (2008) la considera como el proceso de biodegradación en el que la materia orgánica es transformada a otros compuestos y se produce biogás rico en metano y dióxido de carbono; Ward et al. (2009) como el proceso de descomposición de la materia orgánica por un consorcio microbiano en un ambiente libre de oxígeno; Fernández-Rodríguez et al. (2012) la han definido como un proceso biológico adecuado para el tratamiento de residuos orgánicos que degrada el material orgánico sin oxígeno, generando metano y un residuo digerido similar al compost producido aerobiamente; mientras que Jain et al. (2015) la exponen como un método para descomponer la materia orgánica con la ayuda de una variedad de microorganismos anaerobios en condiciones anaerobias o sin oxígeno cuyo producto final incluye biogás (compuesto por CH₄, CO₂ e impurezas) y un residuo orgánico. Recientemente, para Córdova-Mosquera et al. (2019) y Tyagi et al. (2018) es un proceso biológico de múltiples etapas que permite convertir varios tipos de residuos orgánicos en una energía renovable, el biogás (compuesto de CH₄ y CO₂) y un producto digerido (traducido por algunos autores de habla española del inglés como '*digestato*' porque se ve que no conocen los participios pasados de los verbos de su propia lengua). Para el presente trabajo, se entenderá como el proceso biológico de degradación de la materia orgánica por medio de un consorcio microbiano en condiciones libres de oxígeno a través del cual se producen biogás y subproductos digeridos.

El medio ácido de interés en esta investigación son las aguas ácidas residuales provenientes de la operación unitaria de flotación de la industria minera, las cuales son originadas mediante "la oxidación microbiológica de sulfuros metálicos gracias a las bacterias ferro-oxidantes siendo más frecuentes las pertenecientes a la familia *Thiobacillus* y durante este proceso son liberadas grandes cantidades de

SO_4^- , H^+ y Fe^{2+} (Durán-Barrantes et al., 2000; Pacheco-Gutiérrez, 2006). “Se sabe que en condiciones anaerobias los MSR son capaces de oxidar a los compuestos orgánicos simples y liberar H_2S y HCO_3^- cuando hay presencia de SO_4^- y H^+ ” (Durán-Barrantes et al., 2000). Esto resulta benéfico pues “el sulfuro de hidrógeno reacciona con numerosos contaminantes metálicos, precipitándolos y sacándolos así de la solución en forma de sulfuros metálicos sólidos” (Durán-Barrantes et al., 2000).

2.4. Eficiencia de los microorganismos en la remoción de los sulfatos a sulfuros en diferentes sistemas anaerobios

Formación de metano: La degradación anaerobia de la materia orgánica requiere de, al menos, cuatro consorcios microbianos específicos fisiológicamente diferentes: Microorganismos primarios que hidrolizan compuestos orgánicos complejos, generando principalmente alcoholes, ácidos grasos de cadena corta, ácidos orgánicos y ácidos grasos de cadena larga; microorganismos de biodegradación secundaria que oxidan estos productos a acetato, H_2 y CO_2 . El H_2 y el CO_2 se convierten en metano mediante metanógenos hidrogenotróficos, mientras que el acetato se mineraliza en CH_4 y CO_2 mediante metanógenos acetoclásticos. “Otras rutas metanogénicas son posibles, por ejemplo, basadas en el uso de otros ácidos grasos, como el formiato, pero son insignificantes en comparación con los anteriores. De acuerdo con la clasificación taxonómica, los grupos de microorganismos primarios y secundarios pertenecen al dominio *Bacteria*, mientras que los microorganismos metanogénicos pertenecen al dominio *Archaea*” (Di-Maria, 2017).

Formación de sulfuros: Alternativamente, “los MSR (arqueas, arqueobacterias, bacterias) usan los ácidos grasos de cadena corta como fuente de energía para formar sulfuros a partir de los sulfatos si estos están presentes” (Andrade-Tovar, 2010).

Los géneros de los MSR. Los más importantes involucrados en los procesos de la sulfatorreducción se presentan a continuación en la Tabla 2.2 y se describen prolijamente a continuación (Brenner et al., 2001).

Tabla 2.2. Taxonomía de la mayoría de las poblaciones microbianas detectadas durante el tratamiento anaerobia (Modificada de Di-Maria, 2017)

Dominio	Filo	Clase	Orden	Familia	Género
Bacteria	Actinobacteria	Actinobacteria	Acholeplasmatales	Acholeplasmataceae	<i>Acholeplasma</i>
	Bacteroidetes	Alphaproteobacteria	Actinomycetales	Anaerobrancaceae	<i>Ammoniflex</i>
	Firmicutes	Bacilli	Alteromonadales	Bacillaceae	<i>Anaerobranca</i>
	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Bacillales	Bacteroidaceae	<i>Bacillus</i>
	Spirochaetes	Clostridia	Burkholderiales	Clostridiaceae	<i>Caldicellulosiruptor</i>
	Synergistetes	Deltaproteobacteria	Chromatiales	Desulfovibrionaceae	<i>Clostridium</i>
	Tenericutes	Flavobacteria	Clostridiales	Dethiosulfovibrionaceae	<i>Desulfovibrio</i>
	Thermotogae	Gammaproteobacteria	Desulfovibrionales	Ectothiorhodospiraceae	<i>Desulfurispora</i>
		Methanomicrobia	Flavobacteriales	Flavobacteriaceae	<i>Dethiosulfovibrio</i>
		Mollicutes	Myxococcales	Flexibacteraceae	<i>Desulfococcus</i>
		Sphingobacteriia	Natranaerobiales	Heliobacteriaceae	<i>Desulfotomaculum</i>
		Synergistria	Oceanospirillales	Idiomarinaceae	<i>Desulfobacter</i>
		Thermotogae	Pseudomonadales	Paenibacillaceae	<i>Desulfobulbus</i>
			Sphingobacteriales	Peptococcaceae	<i>Desulfobacterium</i>
			Sphingomonadales	Pseudomonadaceae	<i>Emticia</i>
			Spirochaetales	Sphingomonadaceae	<i>Eubacterium</i>
			Synergistales	Thermoanaerobacteraceae	<i>Heliorestis</i>
			Syntrophobacteriales	Thermotogaceae	<i>Moorella</i>
			Thermoanaerobacteriales	Thermotogaceae	<i>Pedobacter</i>
			Thermotogales	Thermovenabulum	<i>Pelotomaculum</i>
				Veillonellaceae	<i>Peptococcus</i>
					<i>Petrogga</i>
					<i>Propionispora</i>
				<i>Pseudidiomarina</i>	
				<i>Pseudomonas</i>	
				<i>Selenomonas</i>	
				<i>Syntrophomonas</i>	
				<i>Thermoanaerobacter</i>	
				<i>Thermovenabulum</i>	
				<i>Treponema</i>	
Archaea	Euryarcheota	Methanobacteria	Methanobacteriales	Methanomicrobiaceae	<i>Methanobacterium</i>
		Methanomicrobia	Methanomicrobiales	Methanobacteriaceae	<i>Methanobrevibacter</i>
			Methanosarcinales	Methanosaetaceae	<i>Methanoculleus</i>
					<i>Methanogenium</i>
					<i>Methanosaeta</i>
					<i>Methanospirillum</i>
					<i>Methanothermobacter</i>
				<i>Methanosarcina</i>	

***Desulfococcus*:** El intervalo de temperatura óptimo para su desarrollo está entre 28 y 35°C, mientras que el intervalo de pH óptimo es de 6.7 a 7.6. El desarrollo ocurre en medios simples y definidos que contienen un compuesto reductor (generalmente sulfuro) y vitaminas. Las colonias en medios de agar anóxicos son

blanquecinas a amarillentas (a veces con apariencia grisácea) y tienden a ser viscosas. No se han descrito especies termófilas y se presentan en lodo anóxico de agua dulce, agua salobre y hábitats marinos; También se presentan en los lodos de los sistemas anaerobios de aguas residuales.

Desulfotomaculum: Su desarrollo ocurre en medios definidos simples que contienen sulfuro como reductor. Algunas especies requieren vitaminas o extracto de levadura. Estas especies pueden fijar N_2 . El intervalo de temperatura óptimo para su desarrollo es de 30 a 37°C para especies mesófilas y de 50 a 65°C para especies termófilas. Por otro lado, su pH óptimo para el crecimiento es de 6.5 a 7.5. Estas especies son comunes en sedimentos anóxicos de agua dulce, salobre o marinos.

Desulfobacter: Su proliferación ocurre en medios definidos simples que contienen sulfuro como reductor. La mayoría de las especies requieren vitaminas. Muchos miembros de este género pueden fijar N_2 . La adición de ≥ 7 g de NaCl y ≥ 1 g de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ por litro de medio, puede ser estimulante y/o necesario para su desarrollo. El intervalo de temperatura óptimo es de 28 a 34°C. No se han descrito especies termófilas. El pH óptimo es de 6.5 a 7.4. La oxidación de acetil-CoA y la fijación de CO_2 con H_2 como donante de electrones en *D. hydrogenophilus* se logran mediante un ciclo de ácido tricarboxílico modificado, TCA en inglés. Las especies de *Desulfobacter* son más comunes en sedimentos marinos o salobres anóxicos, pero algunos tipos pueden encontrarse en sedimentos anóxicos de agua dulce o en lodos activados.

Desulfobulbus: El sulfato y también el sulfito o el tiosulfato sirven como aceptores terminales de electrones y se reducen a H_2S . El azufre no se reduce. En ausencia de un aceptor de electrones externo, el desarrollo puede ocurrir por degradación de lactato, piruvato y etanol (+ CO_2), malato o fumarato. El intervalo de pH óptimo es de 6.6 a 7.5. En cuanto a la temperatura óptima es de 25 a 40°C.

No se conocen especies termofílicas. Se requieren medios que contengan un reductor y p-aminobenzoato para su proliferación. Las colonias en medio de agar anaerobio son blanquecinas a grisáceas y lisas. Se presentan en zonas anóxicas de agua dulce, agua salobre y hábitats marinos. También se han aislado del contenido del rumen, estiércol de animales y lodos de plantas depuradoras de agua.

Desulfobacterium: Las desulfobacterias se encuentran muy extendidas en sedimentos marinos y salobres. El sulfato y otros compuestos de azufre oxidados sirven como aceptores terminales de electrones y se reducen a H₂S. El azufre y el nitrato no se utilizan como aceptores terminales de electrones. Algunas especies pueden proliferar lentamente en ausencia de un aceptor de electrones externo por degradación de lactato, piruvato, malato y fumarato. Su temperatura óptima es de 26 a 29°C. Se requieren medios anóxicos (con sulfuro como reductor) y vitaminas para el crecimiento. Las especies de *Desulfobacterium* requieren concentraciones marinas o salobres de NaCl y MgCl₂. Las células contienen citocromos de tipo b y c. Se observa comúnmente la actividad del monóxido de carbono deshidrogenasa, lo que indica el funcionamiento de la vía anaerobia C1 (vía del monóxido de carbono deshidrogenasa o vía Wood) para la oxidación completa de la acetil-CoA o para la fijación de CO₂ durante el desarrollo autótrofo. Las especies de *Desulfobacterium* están muy extendidas en sedimentos marinos o salobres, pero ocurren con menos frecuencia en hábitats de agua dulce. La eficiencia de la reducción de sulfato es del 89, 91 y 91% utilizando valores de pH de 2, 4 y 6, respectivamente. Esto indica que la mayor reducción de sulfato está en el medio con valores de pH 4 y 6. Además, *Desulfobacterium* proliferando en medio a valor de pH de 4 tiene una mejor eficiencia de reducción de sulfato (93%) en comparación con otros aislados de MSR.

2.5. Proceso de sulfato reducción y precipitación de metales por MSR

Para llevar a cabo la precipitación de metales y la sulfato reducción es necesario utilizar un proceso anaerobio en el cual los MSR juegan un papel importante, ya que se presentan como grupos de microorganismos donde todos se involucran en el proceso.

Hay que definir el tipo de microorganismos que deberían ser analizados, así como su clasificación de acuerdo con sus necesidades y su tolerancia al oxígeno. Primero se tienen a los facultativos, los cuales proliferan en presencia o ausencia de oxígeno. Después los microaerófilos los cuales requieren una baja concentración de oxígeno (del 2 al 10%) y, en varios casos, una alta concentración de dióxido de carbono, siendo poco su crecimiento en condiciones anaerobias.

Finalmente, los que van a ser de mayor importancia para esta investigación son los microorganismos anaerobios obligados, ya que es dentro de este grupo que se encuentran los MSR. Éstos “no pueden desarrollar un metabolismo aerobio, pero poseen una tolerancia variable al oxígeno”; además de esto, los anaerobios obligados “se replican en sitios con potencial oxido-reductor bajo” (Bush y Vázquez-Pertejo, 2019).

Los MSR utilizan los sulfatos y otros compuestos oxidados de azufre como un aceptor final de electrones para llegar a la producción de H₂S. “Se sabe que se reproducen tanto heterótrofamente usando pequeñas moléculas orgánicas como autotróficamente usando H₂ como donante de electrones y CO₂ como fuente de carbono” (Nagpal et al., 2000).

2.6. Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) responsables de realizar la precipitación del Pb

En general, las especies más predominantes en la precipitación de Pb son *Desulfovibrio* y *Desulfosarcina* (Tabla 2.3), aunque ambas tienen formas distintas (espiral y tétradas, respectivamente, ver Glosario). “Ambas son anaerobias, utilizan SO_4^{2-} como aceptor de electrones y presentan sensibilidad al ser expuestas a temperaturas de 100°C durante 5 minutos, siendo esto último necesario para diferenciar al *Desulfovibrio* de *Desulfomonas*” (Palomino-Cadenas, 2007). Además, se ha reportado que “el grupo microbiano más competitivo en las desembocaduras en el mar y de ríos amplios es el *Desulfovibrio*, cuando forma parte del consorcio *Desulfobacter – Desulfobulbus*” (Laanbroek et al., 1984). “Este grupo posee una temperatura óptima de desarrollo entre 15 y 35°C” (Monroy-Cruz, 2014).

Tabla 2.3. MSR responsables de la precipitación del Pb

Objetivo	MSR	Eficiencia	Referencia
Evaluar la influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb^{2+}) mediante MSR	<i>Desulfovibrio</i> y <i>Desulfosarcina</i>	“A nivel de laboratorio se logró la remoción de 99.23% de Pb”	Basilio-Tavera, 2015
Precipitar metales pesados con sulfuro de hidrógeno biogénico	<i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfotomaculum</i> , <i>Archaeoglobus</i> , <i>Desulfomicrobium</i> , <i>Desulfomonile</i> , <i>Desulfobulbus</i> , <i>Desulfobotulus</i> , <i>Desulfobacula</i> , <i>Thermodesulfobacterium</i>	“Remoción de Cu del 92%, 90% de Pb y 95% de Zn”	Chávez-Lizárraga et al., 2006
Usar sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina mediante MSR	<i>Desulfovibrio</i> y <i>Desulfosarcina</i>	“La remoción anual para el Fe es de 85%, Pb de 69% y Zn de 92%”	Palomino-Cadenas, 2007
Evaluar la formación biológica de sulfuro y precipitación de metales pesados utilizando MSR	<i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfomonas</i> , <i>Desulfotomaculum</i> , <i>Desulfobulbus</i> , <i>Thermodesulfobacterium</i>	“La eficiencia de remoción de plomo soluble fue de 94%”	Velasco y Revah, 2007
Precipitar Pb^{2+} mediante MSR en un reactor en régimen continuo	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	“Se logró la remoción del 98.4% de Pb”	Velasco et al., 2005

2.7. Revisión bibliográfica de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Zn

En este caso “la temperatura óptima de crecimiento de los MSR que precipitan al Zn oscila entre los 25 y 40°C” (Tabla 2.4) (Castro et al., 2000).

Tabla 2.4. MSR responsables de la precipitación del Zn

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Remoción de metales pesados mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	“Las eficiencias de remoción alcanzaron el 100%. Las concentraciones iniciales fueron de 200 mg/L para Cu y 150 mg/L para Ni y Zn”	Bayoumy et al., 1999
Tratamiento de metales mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	“Remociones arriba del 95% para Al, Cd, Fe, Mn, Ni y Zn”	Dvorak et al., 1992
Remoción de sulfatos y metales pesados mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	“Remoción del 82% de sulfatos y del 97% de Cu, Zn y N”	Jong y Parry, 2003
Remoción biológica de sulfatos y precipitación del zinc	<i>Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfococcus, Desulfonema, Desulfosarcina, Desulfobarculus</i>	“Remoción de sulfatos del 89%, para Zn de 62.9% y 92.18% para el Pb”	Maree y Strydom, 1987
Uso de un sistema integrado por algas y bacterias sulfato reductoras	<i>Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfococcus, Desulfonema, Desulfosarcina, Desulfobarculus</i>	“Remoción de Pb del 99% y de Zn del 90%”	Rose et al., 1998
Desarrollo de un proceso de sulfato-reducción para remover metales pesados de un drenaje ácido de mina	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	“Remoción del 99% de Fe, Zn, Cu, Cd, As y Pb en un efluente sintético”	Steed et al., 2000
Biotratamientos del drenaje ácido de mina y recuperación de metales	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	“Remociones de Cu del 99.8% y 98% de Zn por medio de precipitación”	Tabak et al., 2003

En la mayoría de las investigaciones el microorganismo más común fue el *Desulfotomaculum*, el cual “tiene la característica de formar esporas permitiéndole así volverse resistente a condiciones adversas pudiendo subsistir en una gran cantidad de medios” (Junier et al., 2010, Castro et al., 2000; Londry et al., 1997).

Generalmente, “este subgrupo se encuentra en sedimentos, aguas e incluso en el tracto digestivo de algunos animales recién nacidos” (Deplancke et al., 2000).

2.8. Revisión bibliográfica de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Cu

Para el caso de la precipitación del cobre el género más común es el *Desulfobacterium*, el cual es un grupo bastante versátil con una forma ovalada casi esférica. “Tiene capacidades especiales en cuanto a degradación de compuestos orgánicos como, por ejemplo, la descomposición de hidrocarburos” (Tabla 2.5) (Sánchez-Alarcón, 2005; van der Maarel et al., 1996).

Tabla 2.5. MSR responsables de la precipitación del Cu

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Sistema de intercambio difusivo para el tratamiento de drenajes ácidos con elevadas concentraciones de cobre	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción del 49.4±8.8% de los metales totales del DAM, un 55±9% del Cu, 26±10% del Zn y 41±9% del Al”	Chaparro-Cárcamo, 2016
Biogénesis de sulfuro de hidrógeno empleando ácidos grasos volátiles producidos por la hidrólisis de vegetales y frutas en descomposición	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción del Zn del 96.75%, Cu del 98.45% y Pb del 100%, de acuerdo a mediciones en el equipo de absorción atómica”	Crespo-Melgar, 2009
Estudio de factibilidad del diseño de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento de drenajes ácidos de mina a escala laboratorio	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remociones de Cu (II) y Zn (II) mayores al 97% y un incremento de pH del drenaje ácido de mina sintético a 8.5”	Flor-Cevallos, 2012
Evaluación del funcionamiento de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Aumento del pH hasta valores de 8.5 en el efluente del sistema y una remoción de Cu (II) mayor al 98% durante 148 días de operación”	Gallardo-Lastra, 2011
Efecto del cobre para la remoción de sulfato en un reactor de lecho fijo	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción de Cu del 99.59±0.43% y una producción de sulfuro de 39.29 mg S ²⁻ /L*d”	Loreto-Muñoz et al., 2019
Bioprecipitación de cobre por sulfato-reducción en un reactor anaerobio de lodos granulares expandidos	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción de 98% de Cu ²⁺ /L”	Valenzuela, 2011

Las especies en este género son comúnmente marinas y requieren de elevadas concentraciones de cloruro de sodio. Además de esto, “el *Desulfobacterium* y el *Desulfobacter* comparten la característica de ser potencialmente importantes para la metilación del mercurio y no toleran las condiciones aerobias” (King et al., 2000; Sánchez-Alarcón, 2005).

2.9. Revisión bibliográfica de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Fe

Los MSR involucrados en el proceso de precipitación del hierro que fueron revisados en la literatura proliferan en condiciones bastante similares entre sí (Tabla 2.6), siendo la tecnología más utilizada para su uso la del reactor tipo UASB (RALLFA en español).

Tabla 2.6. MSR responsables de la precipitación del Fe

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Evaluación de bacterias sulfato reductoras presentes en reactores pasivos durante la remediación de drenajes ácidos de minas	<i>Desulfobacterium autotrophicum</i> , y tres especies de BSR (<i>Desulfovibrio vulgaris</i> , <i>Desulfomicrobium</i> sp. y <i>Desulfococcus</i> sp.)	“Remociones de Fe ²⁺ en los reactores 2 y 4 de 99.7±0.7 y 99.4±1.6%, respectivamente, mientras que para TRH de 1 día, la remoción de Fe ²⁺ fue 86.1±15.9%”	Escobar-Restrepo, 2015
Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Precipitación de Fe ²⁺ > 95%; Mn ²⁺ > 96%; Zn ²⁺ > 52% y remoción de sulfato > 50%”	Forigua-Quicasán et al., 2017
Procesos biológicos de sulfatorreducción en biopelículas para la precipitación de metales	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remociones de Fe, Zn y Cd mayores a 99.0%”	Gallegos-García, 2009
Optimización de las condiciones de cultivo de consorcios bacterianos sulfato-reductores en la bioprecipitación de Fe (II) del efluente Antequera, Departamento de Oruro, Bolivia	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción de Fe del 95%”	Guardia-Zurita, 2010
Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remociones de Cu del 99.99%, de Fe del 99.99%, de Pb de 96.67%, de Zn del 99.94% ,de los SO ₄ ²⁻ se consiguió remover el 97.55% y de Ca se removió el 99.96%”	Nina-Chambe, 2008

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Procesos de bioprecipitación de metales pesados y bio-reducción de hierro (III) para el tratamiento de aguas ácidas de minas a escala de laboratorio	Finalmente, se detectaron géneros sulfato reductores mediante la técnica molecular de hibridación fluorescente <i>in situ</i> (ver Glosario) (FISH), donde existió predominancia de <i>Desulfovibrio spp.</i> , <i>Desulfobotulus sapovorans</i> y <i>Desulfovibrio fairfieldensis</i> . Seguidos de: <i>Desulfobacter spp.</i> , <i>Desulfobulbus spp.</i> , <i>Desulfosarcina sp.</i> , <i>Desulfonema spp.</i> , <i>Desulfococcus sp.</i> , <i>Desulfobacterium spp.</i> , <i>Desulfobotulus sp.</i> , <i>Desulfostipes sp.</i> , <i>Desulfomusa sp.</i> , <i>Desulfofrigus</i> y <i>Desulfofaba spp.</i>	"Remoción del 70% de SO_4^{2-} , entre 60-80% de Fe y Zn y, 95-100% de remoción de Cd y Cu"	Quiroga-Flores, 2015

Las condiciones en las que éste trabaja son muy parecidas en la literatura consultada. Generalmente, se inyecta al reactor un medio mineral basal cuya composición varía un poco, por ejemplo: Gallegos-García et al. (2008) utilizaron la siguiente composición (g/L): NH_4Cl (0.3), $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (0.015), KH_2PO_4 (0.2), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.12), KCl (0.25) y extracto de levadura (0.02). A esto se le añadió un lodo granulado, también llamado lodo anaerobio, que en una gran parte de los textos se mantiene en refrigeración a temperaturas de alrededor de 4 o 5°C. Varios autores han intentado mejorar la producción de H_2S del proceso al introducir materiales semisólidos o sólidos para brindar materia orgánica a los MSR, tal como lo hicieron Forigua-Quicasán et al. (2017), quienes utilizaron compost de la producción de champiñón, teniendo éxito. Probaron tres proporciones de compost con material sólido estéril de una mina de carbón (25:75, 40:60 y 60:40, respectivamente) en un lapso de 6 semanas. La concentración de sulfuros inició en prácticamente cero y aumentó la producción de sulfuros con la actividad microbiana de hasta $8.1 \pm 2.4 \text{ mg L}^{-1}$ para 60:40 a las 2 semanas alrededor de 4 mg L^{-1} entre las semanas 3 a 6 y a 25:75 fue subiendo gradualmente de la semana 3 a la 6 llegando hasta $7.3 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$.

2.10. Revisión bibliográfica para evaluar la influencia de los parámetros de operación en la precipitación de metales Pb, Cu, Zn y Fe

Existen distintos parámetros que pueden llegar a influir dentro de la precipitación de metales, empezando por los compuestos donadores de electrones utilizados por los MSR. Algunos ejemplos de estos son: “H₂, lactato, piruvato, fumarato, malato, colina, acetato, propionato, butirato, ácidos grasos de cadena larga, benzoato, indol, hexadecano, etanol y otros alcoholes” (Andrade-Tovar, 2010). Esto es importante debido a que dependiendo del sustrato que se utilice se obtendrán diferentes productos de bioconversión. Por ejemplo, se ha encontrado que “en las aguas termales minerales en el depósito de Sukhunsok el organismo *Desulfotomaculum kuznetsovii* formaba como productos de bio-reacción CO₂ y H₂S al ser nutrido con formiato, acetato, propionato, alcoholes varios, sulfato, sulfito, tiosulfato” (Lowe et al., 1993). A su vez, la elección del donador de electrones es importante para la eficiencia del proceso de sulfato reducción. Este parámetro ya ha sido estudiado por varios autores. Tal es el caso de Karnachuk et al. (2005), quienes realizaron experimentos al norte de Siberia en los sedimentos de un área minera en los cuales utilizaron al acetato como donador de electrones y suministraron en concentraciones de 7.6 mM (0.5 g DQO/L). Los autores demostraron que las constantes cinéticas de reducción del sulfato oscilaron entre 0.05 y 30 nmol SO₄²⁻/cm³ d, aumentando la eficiencia.

Otro parámetro de gran importancia es el tiempo de residencia hidráulica (TRH) o bien el flujo que se tiene en la aplicación de los tratamientos basados en MSR para equipos que trabajen a flujos continuos. Por ejemplo, en las barreras reactivas permeables se ha encontrado que “si los tiempos de residencia hidráulicos son demasiado cortos no permitirán que los microorganismos

produzcan una cantidad suficiente de sulfuro para la precipitación de los metales, ni suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez” (Gibert et al., 2002).

En diversos estudios se ha demostrado la importancia de este parámetro, tal como lo hicieron Dvorak et al. (1992). Los autores demostraron que, al duplicar el flujo, se produce una reducción de la concentración de sulfuro generado por la actividad microbiana del 99%. Una buena alternativa para maximizar las actividades específicas de generación de sulfuro sería simplemente disminuir el flujo o incrementar el grosor del material de soporte de la barrera reactiva permeable. Sin embargo, esto no es posible en las barreras reactivas permeables, ya que “el caudal o flujo es fijado por la corriente del yacimiento de agua, mientras que aumentar las dimensiones significaría costos elevados por la cantidad de material requerido” (Gibert et al., 2002).

Una opción más viable en tratamientos con tiempos de residencia cortos es la estimulación y aceleración de la actividad bacteriana siendo sugerido por Hammack y Edenborn (1992), donde demostraron que la adición de lactato incrementó la actividad sulfato reductora, obteniendo así remociones de sulfato del 70% y remociones de níquel del 95%, comparadas con remociones muy bajas sin el uso de lactato. Hablando de otro tipo de proceso como lo es el reactor *UASB*, diversos autores han realizado investigaciones en cuanto a los parámetros responsables de la eficiencia de dicho proceso, tales como la velocidad de carga orgánica, el tiempo de residencia hidráulico, la temperatura de operación, tipo de inóculo, concentración de DQO y de sólidos suspendidos totales en el influente pues han demostrado ser de vital importancia (Rico et al., 2017; Sánchez et al., 2005; Santana y Oliveira, 2005; Tapia et al., 2018). Aunque aún no se ha logrado llegar a un acuerdo de condiciones en las cuales se puede llegar a optimizar el proceso pues las condiciones y materiales varían entre cada experimento (Pacco et al., 2018). Para poner un ejemplo de esto, Sánchez et al. (2005) trabajaron con un reactor *UASB* de 5 litros, a temperaturas de entre 30 a 35°C, tiempo de

residencia hidráulico de 3 días y una velocidad de carga orgánica promedio de 2.7 kg DQO/d*m³ y fueron capaces de obtener eficiencias de remoción promedio de DQO total y sólidos suspendidos totales de 56.7 y 52.1%, respectivamente. Al incrementar la velocidad de carga orgánica promedio a 8.1 kg DQO/d*m³ y reducir el tiempo de residencia hidráulico a 1 día se vieron disminuidas a tan solo 18.6 y 27.1%. Caso contrario fue el de Santana y Oliveira (2005), que obtuvieron eficiencias de remoción para dichos parámetros de 80.3 y 72.8%, utilizando un reactor *UASB* de 908 litros, trabajando con un tiempo de residencia hidráulico de 2.6 días y una velocidad de carga orgánica de 3.4 kg DQO/d*m³ y no vieron afectaciones negativas al reducir el tiempo de residencia hidráulico a 1.3 días y aumentar la velocidad de carga orgánica a 7.43 kg DQO/d*m³, obteniendo al final eficiencias de remoción de DQO total y sólidos suspendidos totales de 87.7 y 81.4%, respectivamente.

Capítulo III

Metodología

3.1. Revisión bibliográfica

Se revisaron muchos tipos de textos encontrados en la literatura científica, relacionados con el tema de MSR aunque no trataran en su totalidad sobre la precipitación de metales o el tratamiento de aguas residuales.

Debido a esta variedad se obtuvo una mejor comprensión del tema en cuestión ya que se abordó desde diferentes puntos de vista y se denotaron aspectos importantes dentro de cada situación.

La mayor parte de la investigación fue realizada en documentos digitales incluyendo tesis, artículos científicos, revistas, investigaciones y estudios en laboratorios en las plataformas BIDI (UNAM), Redalyc, Repositorio UDES (Universidad de Santander), DSpace, Science Direct, SEDICI, Google Académico, SciELO, Elsevier, Repositorio IPISYT, etc. (ver Glosario).

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1. Resultados

La capacidad de las MSR para poder precipitar metales presentes en el agua fue exitosa en la mayoría de los textos revisados pues se obtuvieron remociones por encima del 90%. Lo mismo se puede decir en el caso de tratamiento de aguas residuales donde la acidez se veía altamente disminuida y la reutilización del agua dentro de un mismo proceso era posible.

Hay otros aspectos importantes a destacar en cuanto a resultados, como, por ejemplo, la variedad de escenarios en los cuales las MSR resultan ser una opción viable para dar solución a problemas tanto ambientales como de rendimiento económico.

4.1.1.Revisión en la literatura de las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), responsables de la precipitación de metales Pb, Zn, Cu y Fe en un sistema anaerobio

Las especies de MSR capaces de precipitar a los metales presentes en un sistema anaerobio varían dependiendo del sistema en el que se trabaje. Hay muchas características que se toman en cuenta al momento de clasificarlas, aunque no hay una oficial que se use en toda la literatura. La forma más

tradicional y sencilla de clasificación es de acuerdo a su capacidad para degradar la materia orgánica en forma total y parcial, siendo así una división entre oxidantes completas y oxidantes incompletas. Una especie relevante es el *Desulfotomaculum* “la cual genera esporas que resisten el calor, el oxígeno y la desecación por lo que pueden crecer en ambientes donde las condiciones anóxicas no son permanentes” (Junier et al., 2010, Castro et al., 2000; Londry et al., 1997). Generalmente “esta especie se encuentra en cualquier tipo de ambiente natural, sedimentos, aguas e incluso en el tracto digestivo de algunos animales recién nacidos”, como ya se mencionó (Deplancke et al., 2000). Junto con *Thermodesulfobacterium*, *Desulfovibrio*, *Desulfomonas*, *Desulfobulbus* y forman parte del grupo de oxidantes incompletos y generan acetato como producto final. Además de esto si se encuentran en condiciones ideales “llegan a tener velocidades de crecimiento más altas que las oxidantes completas y pueden lograr tiempos de duplicación de 3 a 4 horas, si son alimentadas con los sustratos que los favorecen, como hidrógeno y lactato”. “Éstas generalmente utilizan lactato, piruvato, etanol y ciertos ácidos grasos como fuente de carbono y energía para reducir el sulfato a sulfuro” (Aeckersberg et al., 1998; Visser, 1995). Por otra parte, el segundo grupo, oxidantes completos, “utilizan ácidos grasos, especialmente acetato y tienen un crecimiento lento, frecuentemente con tiempos de duplicación mayores a 20 horas”. “El grupo está compuesto por *Desulfobacter*, *Desulfococcus*, *Desulfosarcina*, *Desulfonema* y *Desulfobacterium*” (Nagpal et al., 2000).

Dos de los géneros más comunes encontrados en la literatura son *Desulfovibrio* y *Desulfosarcina*. El primero de estos “a menudo se encuentra en sedimentos marinos y de aguas dulces. También pueden ser abundantes, tanto en ambientes con alto contenido de material orgánico, como en hábitats extremadamente oligotróficos” (Johnson y Hug, 2019). “La *Desulfosarcina* posee una forma en tétradas y el *Desulfovibrio* en espiral por lo que este último tiene mejor movilidad. Utilizan al SO_4^{2-} como aceptor de electrones y presentan sensibilidad a temperatura de 100°C durante cortos periodos de tiempo, siendo esta

característica lo que permite diferenciar al *Desulfovibrio* de *Desulfomonas*” (Palomino-Cadenas, 2007). “Ambas especies son mesofílicas por lo que su temperatura óptima de crecimiento es de entre 15 y 35°C” (Monroy-Cruz, 2014).

Otro grupo común es el *Desulfobacterium* el cual “es nutricionalmente versátil con una forma ovalada casi esférica, tiene capacidades especiales en cuanto a degradación de compuestos orgánicos como por ejemplo la descomposición de hidrocarburos” (Sánchez-Alarcón, 2005; van der Maarel et al., 1996). Las especies de este género son comúnmente marinas y requieren de elevadas concentraciones de cloruro de sodio. Además de esto, ambas especies, “el *Desulfobacterium* y *Desulfobacter*, comparten la característica de ser potencialmente importantes para la metilación del mercurio y no toleran las condiciones aerobias” (King et al., 2000; Sánchez-Alarcón, 2005).

4.1.2. Mecanismos de precipitación de los metales disueltos como sulfuros metálicos en el agua proveniente de la operación unitaria de flotación y la eficiencia de remoción de cada metal en un sistema anaerobio

El mecanismo mediante el cual los metales precipitan en el agua comienza desde un proceso de degradación llevado a cabo por las MSR. “Éste es realizado por grupos de bacterias en sistemas abiertos o cerrados generalmente conocidos como reactores” (Gallegos-García, 2009). Estos sistemas, “comprenden tres etapas para residuos sólidos o lodos, la hidrólisis, acidogénesis y la metanogénesis y para residuos líquidos solamente serían los últimos dos” (Lorenzo-Acosta y Obaya-Abreu, 2005). “Recientemente se ha utilizado un enfoque más novedoso constituido de cuatro etapas o niveles tróficos: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis” (Lorenzo-Acosta y Obaya-Abreu, 2005). La primera parte de este proceso corresponde a “la hidrólisis de los sólidos

insolubles, como partículas orgánicas o coloides orgánicos, en compuestos solubles más simples que pueden ser absorbidos a través de la pared celular, para que posteriormente, dichas moléculas hidrolizadas sean catalizadas por bacterias biodegradativas² en alcoholes y ácidos grasos, teniendo como resultado de este proceso, la producción de hidrógeno y dióxido de carbono” (Corrales et al., 2015). En la segunda etapa, acidogénesis “los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente” (Lorenzo-Acosta y Obaya-Abreu, 2005).

Posteriormente, durante la acetogénesis, “se produce ácido acético a través de la oxidación de ácidos grasos de cadena corta o alcoholes o a través de la reducción del CO₂, usando hidrógeno como donador de electrones para la reacción” (Schink, 1997). En la metanogénesis se da “la formación de metano por la descarboxilación de acetato por microorganismos metanogénicos acetotróficos y por la hidrogenación de dióxido de carbono por microorganismos hidrogenotróficos” (Gallegos-García, 2009). Cabe destacar que “no en todas las etapas de la degradación ocurre disminución de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)”. Así, la hidrólisis ocurre sin variación detectable de la DQO. En general, durante la acidificación la disminución de la DBO es mínima. Por tanto, “en la metanogénesis es donde ocurren la mayor disminución de la DBO” (Lorenzo-Acosta y Obaya-Abreu, 2005).

“Durante la degradación anaerobia de la materia orgánica, el consorcio genera CO₂, ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato), ácidos grasos, lactato, piruvato, malato y alcoholes” (Pérez et al., 2017; Rabus et al., 2013). “Con todos

² Persiste en algunos(as) autores(as) el uso de la palabra fermentación en vez de bio-reacción por la ignorancia de que la fermentación se refiere únicamente a la biorreacción de *Saccharomyces cerevisiae* en condiciones anaerobias para producir a partir de una molécula de glucosa una de alcohol etílico y una de bióxido de carbono nombrada así por Louis Pasteur. Esto fue decidido en una reunión a nivel mundial en los años 70 del siglo XX de NO usar las palabras fermentación, fermentador sino biorreacción, biorreactor a nivel genérico para erradicar estos continuos errores justamente cuando se migraba de la llamada hasta entonces ingeniería bioquímica a la nueva biotecnología con notabilidades como Aiba de Japón y Wilke de la U.C. Berkeley y fue en Boston [Nota de la asesora]

estos compuestos junto con la elevada concentración de sulfato (procedente del DAM) proporcionan los sustratos requeridos para el crecimiento de los MSR” (Costa et al., 2008; Pérez et al., 2017).

“Los MRS usan como aceptor final de electrones el sulfato y oxidan los productos de fermentación, incluyendo compuestos orgánicos e hidrógeno (donadores de electrones), para producir H₂S y bicarbonato” (Pérez et al., 2017). “Finalmente los metales catiónicos reaccionan con el H₂S, generando precipitados insolubles” (Neculita et al., 2007; Zagury et al., 2006). “Aún no se cuenta con un consenso sobre cuál fuente de carbono produce mejores tasas de reducción ni sobre las proporciones adecuadas en que deben usarse los materiales cuando se realizan las mezclas. La composición de ésta es fundamental para la eficiencia del proceso de reducción de sulfato” (Pérez et al., 2017).

4.1.3. Parámetros de operación de mayor influencia en un sistema anaerobio para lograr la precipitación de metales como Pb, Zn, Cu y Fe

Existen diferentes parámetros físicos y químicos que siempre están presentes en los procesos anaerobios; siendo los factores principales que influyen en el proceso, los siguientes (Lorenzo-Acosta y Obaya-Abreu, 2005):

- Composición del influente
- Sometimiento del proceso a cargas orgánicas y tiempos de residencia hidráulica y de retención celular compatibles con el residuo a ser digerido y con el tipo de digestor empleado
- Temperatura: Se evitan variaciones bruscas de temperatura. Se encuentra un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35°C

- Acidez: Se determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH debe oscilar entre 6.6 y 7.6, que se logra a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes
- Contenido de sólidos: Se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10% de sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad
- Nutrientes: Para el crecimiento y la actividad de los microorganismos, éstos tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales
- Existencia de cantidades de N_2 y P en el residuo, compatibles con la cantidad de carbono
- Tóxicos: No debe haber presencia, en el residuo a ser digerido, de cantidades elevadas de compuestos que pueden transformarse en tóxicos durante el proceso como N (NH_4^+ , NH_3), S (S^{2-}). Aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y plaguicidas, además de metales pesados, metales alcalinos y alcalinotérreos
- Se deben evitar sobrecargas orgánicas o tóxicas sobre el límite soportable por el proceso.

4.2. Discusión

Los MSR son capaces de mejorar el proceso de extracción de minerales reduciendo la cantidad de agua utilizada y precipitando los metales presentes en la misma pudiendo así ser recuperados. Sin embargo, hay que tomar algunos aspectos en cuenta al momento de intentar utilizar el tratamiento de aguas residuales con MSR ya que, como se observó en algunos de los textos revisados, la cantidad de metales en el agua puede llegar a ser un problema pues disminuye la actividad microbiana.

Considerando que en algunos casos sea aplicable a un estudio específico se necesita una revisión de la cantidad de metal en el agua a tratar y las condiciones en las que se trabaja, para poder delimitar las especies de MSR que puedan llegar a presentarse. Con esto último se tendrá una idea de que opciones de nutrientes se pueden adicionar para mejorar la actividad de los microorganismos para producir H_2S .

Sin embargo, como todo proceso tiene limitaciones pero dado que las condiciones para el crecimiento de microorganismos pueden ser fácilmente simuladas al lugar de origen como el caso de la extracción minera, cuyas aguas residuales tienen altos contenidos de sulfatos y además las temperaturas son altas, es relativamente sencillo que estas condiciones puedan reproducirse para llevar a cabo el proceso de sulfato reducción, como es el caso de los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA).

Finalmente, su uso en el tratamiento anaerobio significa un impacto positivo al ambiente, pues proporciona una buena calidad de agua lo que repercute en la capacidad de reutilizar el agua tratada y, además de esto, económicamente es factible la recuperación de los metales lo que puede justificar la inversión en una planta de tratamiento de las aguas provenientes de la operación unitaria de flotación.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Considerando que el objetivo general era: Realizar una revisión bibliográfica de las especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) presentes en reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) dosificados con efluentes ácidos, que provienen de la operación unitaria de flotación de una mina cooperante, conteniendo bajas concentraciones de Pb, Zn, Cu y Fe aprovechando la capacidad de las especies MSR y convirtiendo los sulfatos en sulfuros, precipitando a estos metales como sulfuros metálicos y logrando así la recirculación del agua ya tratada a la operación unitaria de flotación y que los particulares eran: Revisar en la literatura cuáles son las principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), responsables de la precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe en un sistema anaerobio y distinguir cuáles son los parámetros de operación de mayor influencia en un sistema anaerobio logrando la mayor precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe, a continuación se señalan las conclusiones:

La investigación bibliográfica realizada permitió observar una gran variedad de especies responsables de precipitar Pb, Cu, Zn, Fe. En la mayoría de lo reportado no se precipita solamente a esos cuatro metales, sino que también traen consigo otra gran variedad de elementos, los cuales están presentes dado el origen del agua de cada investigación. Si bien no todos los artículos revisados tuvieron una relación directa con el efluente proveniente de la operación unitaria de flotación, sí aportaron conocimiento acerca del proceso de sulfato reducción.

Además, se recabó información que permite comprender las características de cada especie de MSR. Se alcanzó a visualizar que estos microorganismos son bastante versátiles pues se desarrollan en varios tipos de ambientes y ecosistemas. Incluso se observó que especies como *Desulfobacter* o *Desulfovibrio* son bastante comunes dadas las condiciones relativamente sencillas que necesitan para desarrollarse.

De la misma manera se puede decir que ya se ha demostrado ampliamente que los MSR son altamente eficientes al momento de reducir la acidez del agua, proveniente de la operación unitaria de flotación de una mina, efluente de cocina, corrientes marinas, etc.

También son eficientes para precipitar diferentes elementos pues no requieren de algún agente externo salvo en contadas ocasiones donde la actividad microbiana se ve reducida y es necesario utilizar algún tipo de catalizador. Para ese tipo de casos ya se tienen igualmente investigaciones donde se debe adicionar nutrientes para incrementar esa actividad tal como lo hicieron Hurtado y Berastain (2012).

También gracias a la diversidad de artículos revisados ya se tiene una idea mucho más clara del proceso y las variables a controlar para poder obtener buenos resultados en cuanto a remoción de metales y, de la misma forma, el gran impacto que esto genera en el ambiente.

Es sumamente importante que se sigan desarrollando proyectos de este tipo que tomen un proceso tan común en la naturaleza como la degradación anaerobia y se pueda llevar a un punto en el cual la tecnología y el ambiente puedan convivir y el ser humano logre obtener un bien de consumo sin causar daños irreparables a la naturaleza.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar una investigación con la finalidad de llevar al límite las capacidades del reactor anaerobio seleccionado, buscando tener un tiempo de residencia mínimo evitando el efecto en la remoción de los metales, así como en la reducción de acidez ya que, aunque si existen investigaciones que varían el tiempo de residencia, no se enfocan en reducirlo para obtener una ganancia económica, sino que simplemente quieren ejemplificar la importancia de los parámetros de control durante el experimento
- Como una recomendación adicional podría mencionarse que en varios artículos no se profundiza en el proceso de sulfato reducción sino que se da por sentado que la persona ya conoce dicho proceso y meramente se enfocan en los resultados, sin embargo creo que si los artículos de divulgación científica pudieran dar una introducción, aunque sea un resumen pequeño, de cómo se realiza dicho proceso podría ser de ayuda para las personas que comienzan a investigar este tema, pues en esta investigación al no conocer completamente el contexto en ocasiones el lenguaje técnico era difícil de comprender y se tenía que realizar más investigaciones por cuenta propia, para poder visualizar lo que los autores querían transmitir.
- Por otro lado, se debe considerar que el hecho de que en varias editoriales usen diferentes tipos de formatos para la bibliografía resulta confuso pues no se tiene un sistema ya establecido para la misma. Aunque en diversos artículos sí se utiliza el formato APA que es más tradicional y sencillo para trabajar, en otras utilizan incluso un sistema propio de la editorial que en

ocasiones omite información relevante para el lector que necesita consultar una fuente directa.

- Finalmente, la bibliografía consultada en esta investigación refleja con claridad y simplicidad las ideas de sus tesis, artículos, etc., y se considera que con esta revisión bibliográfica se han adquirido conocimientos relevantes sobre el tema. De hecho, se envió esta revisión bibliográfica a una revista de un país fraterno para ser publicada y ya fue aceptada y publicada (Anexos 2, 3).

Referencias bibliográficas

- Aeckersberg, F., Rainey, F.A., Widdel, F. 1998. Growth, natural relationships, cellular fatty acids and metabolic adaptation of sulfate-reducing bacteria that utilize long-chain alkanes under anoxic conditions. *Archives of Microbiology*. 170(5): 361-369, Múnich, Alemania. <https://doi.org/10.1007/s002030050654>
- Andrade-Tovar, V.S. 2010. Evaluación del potencial de generación de sulfuro por la acción de las bacterias sulfato reductoras y sus posibles aplicaciones en el tratamiento de los drenajes ácidos de mina. Tesis para el Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. Quito, Ecuador. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/743>
- Basilio-Tavera, J.C. 2015. Influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb²⁺) utilizando dolomita como adsorbente. Tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria de La Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables. 89 pp. Tingo María, Perú. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1704>
- Bayoumy, M.E., Bewtra, J.K., Ali, H.I., Biswas, N. 1999. Removal of heavy metals and COD by SRB in UAFF reactor. *Journal of Environmental Engineering*. 125(6): 532-539. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1999\)125:6\(532\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:6(532))
- Brenner, D.J., Krieg, N.R., Stanley, J.T. Garrity, G.M. 2001. *Bergey's Manual® of Systematic Bacteriology*. Vol. 2. Springer Science & Business Media, pp. 925-937, 1021-1040. Online ISBN: 9781118960608 DOI: 10.1002/9781118960608
- Bruins, M.R., Kapil, S., Oehme, F.W. 2000. Microbial resistance to metals in the environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 45(3): 198-207. <https://doi.org/10.1006/eesa.1999.1860>
- Bush, L.M., Vázquez-Pertejo, M.T. 2019. Generalidades sobre las bacterias anaerobias. *MSD Manuals*. Idioma español. <https://www.msmanuals.com/es/professional/enfermedades-infecciosas/bacterias-anaerobias/generalidades-sobre-las-bacterias-anaerobias#>

- Cañizares-Villanueva, R.O. 2000. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología-México*. 42(3): 131-143. <https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi003f.pdf>
- Castro, H.F., Williams, N.H., Ogram, A. 2000. Phylogeny of sulfate-reducing bacteria, *FEMS Microbiology Ecology*. 31(1): 1-9. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2000.tb00665.x>
- Castro-Chamorro, J.A. 2005. Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la Compañía Minera "Yauliyacu" SA mediante diseños experimentales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minería, Metalúrgica y Geografía E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica. 77 pp. Lima, Perú. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/2638>
- Cedillo-Salazar, E., Carrillo-Pedroza, F., Berumen, C., Benavides, R., Almaguer-Guzmán, I. 2017. Lixiviación directa de concentrados de galena en ácido clorhídrico y cloruro de sodio con aplicación de ozono como agente oxidante. En *Memorias del Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales*, 38 CIMM. Pp. 301-309. Saltillo, Coahuila, México. <https://www.its.mx/memorias/38CIMM.pdf>
- Chaparro-Cárcamo, G.O. 2016. Sistema de intercambio difusivo para el tratamiento de drenajes ácidos con elevadas concentraciones de cobre. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. 83 pp. Concepción, Chile. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/2096>
- Chávez-Lizárraga, G.A., Álvarez-Aliaga, M.T., Giménez-Turba, A. 2006. Precipitación de metales pesados con sulfuro de hidrógeno biogénico producido a partir de la degradación 'anaeróbica'³ de material celulósico y

² Aerobio, bia. Del latín y este del griego *aero- y -bio*. 1. adj. Biol. Dicho de un ser vivo: Que necesita oxígeno para subsistir. U. t. c. s. m. 2. adj. [aeróbico](#) (|| que se produce con oxígeno). *Actividad aerobia*. Estas definiciones fueron tomadas del diccionario de la lengua española, dle. Esto resulta triste porque la segunda definición es un barbarismo como se llamaba a los anglicismos innecesarios (en inglés el adjetivo es *aerobic* pero teniendo el adjetivo derivado del griego resulta absurdo copiar del inglés un término que no es necesario). Lo mismo ocurre con anaerobio, que tiene la letra alfa privativa antes para señalar justamente lo opuesto: anaerobio, bia. *De an- y aerobio*. 1. adj. Biol. Dicho de un ser vivo: Que puede vivir sin oxígeno. U. t. c. s. m. 2. adj. [anaeróbico](#) (|| que se produce sin oxígeno). *Deportes anaerobios*, otro barbarismo innecesario [Nota de la asesora]

- xilanósico. Tesis de grado para optar al título de Magister Scientiarum Universidad Mayor de San Andrés, Maestría en Ciencias Biológicas y Biomédicas, Instituto de investigaciones Fármaco Bioquímicas. 109 pp. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/18098>
- Chocobar-Ponce, S. 2019. Estudio bioquímico y fisiológico de los efectos del pH del medio sobre la capacidad remediadora de Cr (VI) y Cr (III) de especies del género *Salvinia*, Tesis para optar por el Título de Doctora en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lilo, 182 pp, Tucumán, Argentina <http://hdl.handle.net/11336/83719>
- Coll-Hurtado, A., Sánchez-Salazar, M.T., Morales, J. 2002. La minería en México. UNAM. 126 pp. Ciudad de México, México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/82/83/252-1>
- Córdova-Mosquera, R.A., Riera, M., Ronquillo, S., Rodríguez-Díaz, J.M., Pereda-Reyes, I. 2019. Evaluación de la arrancada de filtros anaerobios para el tratamiento de aguas residuales de café instantáneo. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*. 50(1): 40-54. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181262827008>
- Correa-Lopez, R.E. 2022. Métodos de tratamiento alternos tanto biológicos como fisicoquímicos, para el reaprovechamiento de vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 103 pp. México
- Corrales, L.C., Antolínez, R.D.M., Bohórquez, M.J.A., Corredor, V.A.M. 2015. Bacterias anaerobias: Procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*. 13(24): 55-81. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007
- Costa, M.C., Martins, M., Jesus, C., Duarte, J.C. 2008. Treatment of acid mine drainage by sulphate-reducing bacteria using low cost matrices. *Water, Air, and Soil Pollution*. 189(1): 149-162.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-007-9563-1>

Crespo-Melgar, C.F. 2009. Biogénesis de sulfuro de hidrógeno empleando ácidos grasos volátiles producidos por la hidrólisis de vegetales y frutas en descomposición. Tesina elaborada para optar por el grado de Licenciatura en Bioquímica. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímica, Instituto de Investigaciones Fármaco-Bioquímicas. 188 pp. La Paz, Bolivia.

<https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/472>

Deplancke, B., Hristova, K.R., Oakley, H.A., McCracken, V.J., Aminov, R., Mackie, R.I., Gaskins, H.R. 2000. Molecular ecological analysis of the succession and diversity of sulfate-reducing bacteria in the mouse gastrointestinal tract. *Applied and Environmental Microbiology*. 66(5): 2166-2174. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.5.2166-2174.2000>

Di-Maria, F. 2017. The recovery of energy and materials from food waste by codigestion with sludge: Internal environment of digester and methanogenic pathway. In *Food Bioconversion*. Alexandru Mihai Grumezescu, Alina Maria Holban, Eds. Academic Press. Pp. 95-125. Nueva York, Estados Unidos. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811413-1.00003-6>

DOF. 2009. DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la Tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. México D.F., México.

Durán-Barrantes, M.M., Jiménez-Rodríguez, A.M., Martel-Villagrán, F.J. 2000. Tratamiento biológico de aguas ácidas de minería: Selección de una

- población bacteriana enriquecida en bacterias sulfatorreductoras. *Tecnología del Agua*. 21(209): 56-60. <http://hdl.handle.net/11441/44542>
- Dvorak, D.H., Hedin, R.S., Edenborn, H.M., McIntire, P.E. 1992. Treatment of metal-contaminated water using bacterial sulfate reduction: Results from pilot-scale reactors. *Biotechnology and Bioengineering*. 40(5): 609-616. <https://doi.org/10.1002/bit.260400508>
- EMDP, S.A.C. 2000. Manual de Minería. Estudios Mineros del Perú. http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria.Manual_Mineria.pdf.
- Escobar-Restrepo, M.C. 2015. Evaluación de bacterias sulfato reductoras presentes en reactores pasivos durante la remediación de drenajes ácidos de minas. Tesis para optar por el título de Magister en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. 115 pp. Bogotá, D.C., Colombia. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/20631>
- Fernández-Rodríguez, J., Pérez, M., Romero, L.I. 2012. Mesophilic 'anaerobic'⁴ digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Optimisation of the semicontinuous process. *Chemical Engineering Journal*. 193-194: 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.018>
- Flor-Cevallos, D.E. 2012. Estudio de factibilidad del diseño de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento de drenajes ácidos de mina a escala laboratorio. Tesis de grado para la obtención de pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. 102 pp. Quito, Ecuador. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1875/1/104923.pdf>
- Flores, M.E., Idrovo, M.M., Flores, D.V. 2016. Evaluación de la extracción de plomo y cadmio de vajilla cerámica vidriada. *Maskana*. 7(1): 97-106. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/919>

⁴ *Even in English there are conceptual errors: Digestion is inherently anaerobic. Definition of digestion: The action, process, or power of digesting; such as a: The process of making food absorbable by mechanically and enzymatically breaking it down into simpler chemical compounds in the digestive tract where no oxygen is available; b: The process in sewage treatment by which organic matter in sludge is decomposed by anaerobic bacteria / archaea with the release of a burnable mixture of gases* (<https://www.merriam-webster.com/dictionary/digestion>). Por tanto, no debe llevar el adjetivo *anaerobic*, pues representa un pleonasma hasta en inglés [Nota de la asesora]

- Forigua-Quicasán, D., Fonseca-Forero, N., Vásquez, Y. 2017. Acid mine drainage prevention using mushroom compost as organic amendment. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 19(1): 92-100.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v19n1.58904>
- Gallardo-Lastra, L.F. 2011. Evaluación del funcionamiento de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento. Tesis de grado para la obtención de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. 97 pp. Quito, Ecuador.
<https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1235>
- Gallegos-García, M. 2009. Procesos biológicos de sulfatorreducción en biopelículas para la precipitación de metales. Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales. División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. 120 pp. San Luis Potosí, S.L.P. México. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/85>
- Gallegos-García, M., Celis, L.B., Rangel-Méndez, R., Razo-Flores, E. 2008. Precipitation and recovery of metal sulfides from metal containing acidic wastewater in a sulfidogenic down-flow fluidized bed reactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 102(1): 91-99. <https://doi.org/10.1002/bit.22049>
- Gamarra-Maldonado, H.E. 2019. Flotación 'bulk' de minerales sulfurados de plomo-zinc refractarios de bajo grado en la Planta Concentradora de Huari de la UNCP. Tesis de Ingeniero Metalurgista y de Materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. 79 pp. Perú.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6490>
- Gibert, O., De Pablo, J., Cortina, J.L., Ayora, C. 2002. Treatment of acid mine drainage by sulphate-reducing bacteria using permeable reactive barriers: A review from laboratory to full-scale experiments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 1(4): 327-333.
<https://doi.org/10.1023/A:1023227616422>

- Guardia-Zurita, D. 2010. Optimización de las condiciones de cultivo de consorcios bacterianos sulfato-reductores en la bioprecipitación de Fe (II) del efluente Antequera, Departamento de Oruro, Bolivia. Tesis para acceder al grado de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímica, Instituto de Investigaciones Fármaco-Bioquímicas. 49 pp. La Paz, Bolivia.
<https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/19427>
- Guevara-González, B.X. 2016. La inversión extranjera directa en la minería en México: El caso del oro. *Análisis Económico*. 31(77): 85-113.
<https://www.redalyc.org/journal/413/41345703005/html/>
- Guzmán-López, F., 2016. Impactos ambientales causados por megaproyectos de minería a cielo abierto en el estado de Zacatecas, México. *Revista de Geografía Agrícola*. 57: 109-128.
<http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/1378>
- Hamilton, T., Huai, Y., Peng, Y. 2020. Lead adsorption on copper sulphides and the relevance to its contamination in copper concentrates. *Minerals Engineering*. 154(106381): 1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106381>
- Hammack, R.W., Edenborn, H.M. 1992. The removal of nickel from mine waters using bacterial sulfate reduction. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 37(5): 674-678. <https://doi.org/10.1007/BF00240748>
- Hrůzová, K., Matsakas, L., Sand, A., Rova, U., Christakopoulos, P. 2020. Organosolv lignin hydrophobic micro-and nanoparticles as a low-carbon footprint biodegradable flotation collector in mineral flotation. *Bioresource Technology*. 306(123235): 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123235>
- Hulshof, A.H.M., Blowes, D.W., Gould, W.D. 2006. Evaluation of *in situ* layers for treatment of acid mine drainage: A field comparison. *Water Research*. 40(9): 1816-1826. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.03.003>
- Hurtado, J., Berastain, A. 2012. Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración adicionando nutrientes y microorganismos. *Revista Peruana de*

- Biología. 19(2): 187-192. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1727-99332012000200010&script=sci_arttext
- Jain, I., Jain, P., Bisht, D., Sharma, A., Srivastava, B., Gupta, N. 2015. Comparative evaluation of antibacterial efficacy of six Indian plant extracts against *Streptococcus mutans*. Journal of Clinical and Diagnostic Research. 9(2): ZC50-ZC53.
<https://dx.doi.org/10.7860%2FJCDR%2F2015%2F11526.5599>
- Johnson, L.A., Hug, L.A. 2019. Distribution of reactive oxygen species defense mechanisms across domain bacteria. Free Radical Biology and Medicine. 140: 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2019.03.032>
- Jong, T., Parry, D.L. 2003. Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs. Water Research. 37(14): 3379-3389.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00165-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00165-9)
- Junier, P., Junier, T., Podell, S., Sims, D.R., Detter, J.C., Lykidis, A., Han, C.S., Wigginton, N.S., Gaasterland, T., Bernier-Latmani, R. 2010. The genome of the Gram-positive metal- and sulfate-reducing bacterium *Desulfotomaculum reducens* strain MI-1. Environmental Microbiology. 12(10): 2738-2754.
<https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02242.x>
- Karnachuk, O.V., Pimenov, N.V., Yusupov, S.K., Frank, Y.A., Frank, Y.A., Kaksonen, A.H., Puhakka, J.A., Ivanov, M.V., Lindström, B., Tuovinen, O.H. 2005. Sulfate reduction potential in sediments in the Norilsk mining area, northern Siberia. Geomicrobiology Journal. 22(1-2): 11-25.
<https://doi.org/10.1080/01490450590922523>
- King, J.K., Kostka, J.E., Frischer, M.E., Saunders, F.M. 2000. Sulfate-reducing bacteria methylate mercury at variable rates in pure culture and in marine sediments. Applied and Environmental Microbiology. 66(6): 2430-2437.
<https://doi.org/10.1128/AEM.66.6.2430-2437.2000>
- Laanbroek, H.J., Geerligs, H.J., Sijtsma, L., Veldkamp, H. 1984. Competition for sulfate and ethanol among *Desulfobacter*, *Desulfobulbus*, and *Desulfovibrio*

- species isolated from intertidal sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 47(2): 329-334.
<https://doi.org/10.1128/aem.47.2.329-334.1984>
- León-Arroyo, F.J., Dianderas-Mandujano, J.D. 2019. Efecto del porcentaje de sólidos en la flotación de la galena a partir de un mineral de bajo grado de plomo-zinc en la Compañía Minera Casapalca, S.A. Tesis de Ingeniería Metalurgista y de Materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. 81 pp. Perú.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6012>
- Londry, K.L., Fedorak, P.M., Suflita, J.M. 1997. Anaerobic degradation of m-cresol by a sulfate-reducing bacterium. *Applied and Environmental Microbiology*. 63(8): 3170-3175. <https://doi.org/10.1128/aem.63.8.3170-3175.1997>
- Lorenzo-Acosta, Y., Obaya-Abreu, M.C. 2005. La digestión 'anaerobia'⁵. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 39(1): 35-48. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- Lorenzo-Tallafigo, J., Romero-García, A., Iglesias-González, N., Mazuelos, A., Romero, R., Carranza, F. 2021. A novel hydrometallurgical treatment for the recovery of copper, zinc, lead, and silver from bulk concentrates. *Hydrometallurgy*. 200(105548): 1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105548>
- Loreto-Muñoz, C.D., Certucha-Barragán, M.T., Almendariz-Tapia, F.J., Ochoa-Herrera, V., Monge-Amaya, O. 2019. Efecto del cobre para la remoción de sulfato en un reactor de lecho fijo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 35: 37-44. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp03.05>
- Lowe, S.E., Jain, M.K., Zeikus, J.G. 1993. Biology, ecology, and biotechnological applications of anaerobic bacteria adapted to environmental stresses in temperature, pH, salinity, or substrates. *Microbiological Reviews*. 57(2): 451-509. <https://doi.org/10.1128/mr.57.2.451-509.1993>

⁵ Tristemente, estos autores también usan el pleonasma digestión 'anaerobia' en vez de usar digestión y/o degradación anaerobia [Nota de la asesora]

- Maree, J.P., Strydom, W.F. 1987. Biological sulphate removal from industrial effluent in an upflow packed bed reactor. *Water Research*. 21(2): 141-146.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(87\)90042-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(87)90042-X)
- Martín-Moreno, C., González-Becerra, A., Blanco-Santos, M.J. 2004. Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamientos de biorrecuperación. *Rev. Iberoam. Micol.* 21(1): 103-120.
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36857444/tratamiento_biologico_de_suelo_martin_moreno-with-cover-page-v2.pdf?
- Monroy-Cruz, Y.Y. 2014. Bacterias sulfato reductoras. Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales. Universidad Militar Nueva Granada, 28 pp. Bogotá, Colombia.
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/12039>
- Nagpal, S., Chuichulcherm, S., Livingston, A., Peeva, L. 2000. Ethanol utilization by sulfate-reducing bacteria: An experimental and modeling study. *Biotechnology and Bioengineering*. 70(5): 533-543.
[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1097-0290\(20001205\)70:5%3C533::AID-BIT8%3E3.0.CO;2-C](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1097-0290(20001205)70:5%3C533::AID-BIT8%3E3.0.CO;2-C)
- Neculita, C.M., Zagury, G.J., Bussièrre, B. 2007. Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors using sulfate-reducing bacteria: Critical review and research needs. *Journal of Environmental Quality*. 36(1): 1-16.
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2006.0066>
- Nina-Chambe, M. 2008. Evaluación de los métodos químico y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Caso: Mina Cerro de Pasco. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 105 pp. Lima, Perú. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/802>
- Pacco, A., Vela, R., Miglio, R., Quipuzco, L., Juscamaita, J., Álvarez, C., Fernández-Polanco, F. 2018. Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Scientia Agropecuaria*. 9(3): 381-391. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.03.09>

- Pacheco-Gutiérrez, L.A. 2006. Propuesta de reaprovechamiento integral del agua de proceso de una empresa minera empleando sistemas biológicos anaerobios. Tesis de Maestría en Ingeniería (Campo del conocimiento: Ingeniería Química, Campo disciplinario: Procesos). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Defensa: Junio 30. Mención honorífica. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/pd2006/0606818/Index.html>
- Palomino-Cadenas, E.J. 2007. Sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina o roca en Ancash-Perú. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Postgrado, Programa Doctoral en Ciencias Ambientales. 97 pp. Trujillo, Perú. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/5359>
- Pedrique-de-Aulacio, M., De-Castro, N. (2001). Garcés, A., Saravia, K. Actualización 2008. Guía de Teoría. Cátedra de Microbiología. Facultad de Farmacia, Universidad Central de Venezuela. http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_farmacia/catedraMicro/08ema_2_morfologia.pdf.
- Pérez, N., Schwarz, A., Urrutia, H. 2017. Tratamiento del drenaje ácido de minas: Estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas. Tecnología y Ciencias del Agua. 8(1): 53-64. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222017000100053
- Poblete-Mier, C.A. 2015. Arranque y operación de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso de flotación de una planta minera. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. 94 pp. Defensa: Noviembre 30. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2015/noviembre/0738039/Index.html>
- Quiroga-Flores, R. 2015. Procesos de bioprecipitación de metales pesados y bio-reducción de hierro (III) para el tratamiento de aguas ácidas de minas a escala laboratorio. Tesis para obtener el grado de *Magister Scientiarum* en

- Ciencias Biológicas y Biomédicas, Mención Biotecnología. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímicas, Maestría en Ciencias Biológicas y Biomédicas, Instituto de Investigaciones Farmaco-Bioquímicas "Luis Enrique Terrazas Siles". La Paz, Bolivia. 180 pp.
<https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/17429>
- Rabus, R., Hansen, T.A., Widdel, F. 2013. The Prokaryotes, Prokaryotic Physiology and Biochemistry. Springer. Berlin, Heidelberg. 19: 309-404.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30141-4_70
- Rico, C., Montes, J.A., Rico, J.L. 2017. Evaluation of different types of anaerobic seed sludge for the high-rate anaerobic digestion of pig slurry in UASB reactors. *Bioresource Technology*. 238: 147-156.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.014>
- Rose, P.D., Boschoff, G.A., van Hille, R.P., Wallace, L.C.M., Dunn, K.M., Duncan, J.R. 1998. An integrated algal sulphate reducing high-rate ponding process for the treatment of acid mine drainage wastewaters. *Biodegradation*. 9(3-4): 247-257. <https://doi.org/10.1023/A:1008352008353>
- Sánchez-Alarcón, S.R. 2005. Distribución de bacterias sulfato reductoras y metilmercurio en sedimentos de lagunas de inundación del río Beni, Amazonía boliviana. Tesis para optar el grado de Magister en Ciencias Biológicas y Biomédicas. Institución. Universidad Mayor De San Andrés Maestría en Ciencias Biológicas y Biomédicas Instituto de Biología Molecular y Biotecnología. La Paz, Bolivia. 108 pp.
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-11/010039204.pdf
- Sánchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martín, A., Colmenarejo, M.F. 2005. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. *Bioresource Technology*. 96(3): 335-344.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.04.003>

- Santana, M.A., Oliveira, R.A., 2005. Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura. *Engenharia Agrícola*. 25(3): 817-830.
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000300029>
- Schink, B. 1997. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 61(2): 262-280.
<https://journals.asm.org/doi/epdf/10.1128/membr.61.2.262-280.1997>
- Steed, V.S., Suidan, M.T., Gupta, M., Miyahara, T., Acheson, C.M., Sayles, G.D. 2000. Development of a sulfate-reducing biological process to remove heavy metals from acid mine drainage. *Water Environment Research*. 72(5): 530-535. <https://doi.org/10.2175/106143000X138102>
- Tabak, H.H., Scharp, R., Burckle, J., Kawahara, F.K., Govind, R. 2003. Advances in biotreatment of acid mine drainage and biorecovery of metals: 1. Metal precipitation for recovery and recycle. *Biodegradation*. 14(6): 423-436.
<https://doi.org/10.1023/A:1027332902740>
- Tapia, S., Vela, R., Miglio, R., Quipuzco, L., Juscamaita, J., Álvarez, C., Fernández-Polanco, F. 2018. Puesta en marcha de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales de la crianza intensiva de cerdos. *Agroindustrial Science*. 8(2): 137-145.
<https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2018.02.09>
- Tekerlekopoulou, A.G., Tsiamis, G., Dermou, E., Siozios, S., Bourtzis, K., Vayenas, D.V. 2010. The effect of carbon source on microbial community structure and Cr (VI) reduction rate. *Biotechnology and Bioengineering*. 107(3): 478-487. <https://doi.org/10.1002/bit.22837>
- Tyagi, V.K., Fdez.-Güelfo, L.A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C.J., Romero-Garcia, L.I., Nga, W.J. 2018. 'Anaerobic'⁶ co-digestion of organic fraction of municipal

⁶ *Even in English there are conceptual errors: Digestion is inherently anaerobic. Definition of digestion: the action, process, or power of digesting: such as a: the process of making food absorbable by mechanically and enzymatically breaking it down into simpler chemical compounds in the digestive tract where no oxygen is available; b: the process in sewage treatment by which organic matter in sludge is decomposed by anaerobic bacteria / archaea with the release of a burnable mixture of gases* (<https://www.merriam-webster.com/dictionary/digestion>). Por tanto, no debe llevar el adjetivo *anaerobic*, pues representa un pleonasma hasta en inglés [Nota de la asesora]

- solid waste (OFMSW): Progress and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 93: 380-399. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.051>
- Uhrie, J.L., Drever, J.I., Colberg, P.J., Nesbitt, C.C. 1996. *In situ* immobilization of heavy metals associated with uranium leach mines by bacterial sulfate reduction. *Hydrometallurgy*. 43(1-3): 231-239.
[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(95\)00087-W](https://doi.org/10.1016/0304-386X(95)00087-W)
- Valderrama, L., González, M., Santander, M., Zazzali, B. 2018. Recuperación de cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación. *Holos*. 5: 40-50.
<https://doi.org/10.15628/holos.2018.7118>
- Valenzuela, R.A. 2011. Bioprecipitación de cobre por sulfato-reducción en un reactor anaerobio de lodos granulares expandidos. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, División de Ingeniería, Universidad de Sonora. 116 pp. Hermosillo, Sonora, México.
<http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/unison/318?locale=es>
- van der Maarel, M.J.E.C., Jansen, M., Haanstra, R., Meijer, W. G., Hansen, T. A. 1996. Demethylation of dimethylsulfoniopropionate to 3-S-methylmercapto-propionate by marine sulfate-reducing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 62(11): 3978-3984.
<https://journals.asm.org/doi/epdf/10.1128/aem.62.11.3978-3984.1996>
- van-Lier, J.B. 2008. High-rate anaerobic wastewater treatment: Diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. *Water Science and Technology*. 57(8): 1137-1148.
<https://doi.org/10.2166/wst.2008.040>
- Velasco, J.A., de la Rosa, A., Volke-Sepúlveda. T. 2005. Precipitación de altas concentraciones de plomo por bacterias sulfato-reductoras en un reactor a régimen continuo. En XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. México.
https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_IV/OIV-01.pdf

- Velasco, J.A., Revah, S. 2007. Evaluación de la relación COD/sulfato para maximizar la formación biológica de sulfuro y precipitar metales pesados. XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
https://smbb.mx/congresos%20smbb/morelia07/TRABAJOS/Area_IV/CARTELES/CIV-69.pdf
- Visser, A. 1995. The anaerobic treatment of sulfate containing wastewater. Tesis Doctoral. Wageningen Agricultural University, Wageningen, Países Bajos. repositorio de la Universidad e Investigación de Wageningen. 146 pp.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/31750>
- Ward, N.L., Challacombe, J.F., Janssen, P.H., Henrissat, B., Coutinho, P.M., Wu, M., Xie, G., Haft, D.H., Sait, M., Badger, J., Barabote, R.D., Bradley, B., Brettin, T.S., Brinkac, L.M., Bruce, D., Creasy, T., Daugherty, S.C., Davidsen, T.M., DeBoy, R.T., Detter, J.C., Dodson, R.J., Durkin, A.S., Ganapathy, A., Gwinn-Giglio, M., Han, C.S., Khouri, H., Kiss, H., Kothari, S.P., Madupu, R., Nelson, K.E., Nelson, W.C., Paulsen, I., Penn, K., Ren, Q., Rosovitz, M.J., Selengut, J.D., Shrivastava, S., Sullivan, S.A., Tapia, R., Thompson, L.S., Watkins, K.L., Yang, Q., Yu, C., Zafar, N., Zhou, L., Kuske, C.R. 2009. Three genomes from the phylum *Acidobacteria* provide insight into the lifestyles of these microorganisms in soils. *Applied and Environmental Microbiology*. 75(7): 2046-2056. doi: 10.1128/AEM.02294-08
- Wise, R.D., Mendoza, R.D.P. 2001. Minería, Estado y gran capital en México. *Economía e Sociedade*, Campinas. 16(6): 105-127.
<http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/102>
- Zagury, G.J., Kulnieks, V.I., Neculita, C.M. 2006. Characterization and reactivity assessment of organic substrates for sulphate-reducing bacteria in acid mine drainage treatment. *Chemosphere*. 64(6): 944-955.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.001>
- Zanin, M., Lambert, H., du Plessis, C.A. 2019. Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*. 143(105922): 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105922>

Zhang, Q., Feng, Q., Wen, S., Cui, C., Liu, J. 2019. A novel technology for separating copper, lead and zinc in flotation concentrate by oxidizing roasting and leaching. *Processes*. 7(376): 376-389. <https://doi.org/10.3390/pr7060376>

ANEXOS

Anexo 1

Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación teórica

(Tomado de la tesis de Rosario Elizabeth Correa-López, 2022)

Esta investigación fue teórica y no se produjeron residuos, al menos por la parte de lo realizado en el tiempo en que se realizó.

Habría que considerar el uso de la electricidad para los equipos de cómputo y los contaminantes que se producen en las plantas que la generan, sean hidroeléctricas, termoeléctricas, carboeléctricas o nucleoeeléctricas y medir la huella de carbono de esta investigación en esta tesitura, pero esta sería trabajo a futuro otra tesis.

Por último, los equipos en que se trabajó (computadora personal, impresora para entregar los documentos al Departamento de Exámenes Profesionales de la Facultad de Química, etc., etc.) usan partes de recambio que deben disponerse al término de su vida útil. El papel en el que se imprimirá este documento y los que se requieran para la titulación fueron fabricados a partir de una fuente de celulosa y deberá también considerarse el impacto ambiental correspondiente, así como el de los cartuchos de tinta, etc. Esta investigación también sería otra tesis.

Es claro que cualquier actividad que realicen los seres humanos tiene un impacto ambiental y, por ello, debe siempre actuarse de manera responsable y consciente para minimizar este impacto. Esto es lo que se deja al(a) lector(a).

Anexo 2

Carta de Aceptación de la Revista Colombiana de Biotecnología al artículo de revisión producto de esta investigación

REF: 22-60 # 100963. CONCEPTOS UNO A TRES

Participantes

Ing. JAQUELINE RAMIREZ PIRAJAN (jramirezpi)

Donovan Enrique Álvarez Márquez (donovanalvarez)

Mensajes

Nota

De

Bogotá, marzo 10 de 2022
ART. 22-60

jramirezpi
2022-03-10 06:28

Investigador(a)
Donovan Enrique Álvarez-Márquez
Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM

Artículo: "Principales microorganismos sulfato reductores (MSR) de reactores anaerobios alimentados con efluentes ácidos, una revisión bibliográfica"

REGISTRO: 22-60 # 100963

Estimado investigador:

Agradecemos de antemano, el querer publicar en la Revista Colombiana de Biotecnología el artículo: "**Principales microorganismos sulfato reductores (MSR) de reactores anaerobios alimentados con efluentes ácidos, una revisión bibliográfica**" con Registro: 22-60; # 100963.

Para la revista Colombiana de Biotecnología es muy importante contar con autores como ustedes, le informamos que hemos recibido el concepto de **TRES** evaluador(es) y ha sido (P+C) publicable después de correcciones.

Igualmente deseo informarle que nuestros evaluadores son docentes especializados en el área de evaluación del artículo en referencia.

Adjunto las evaluaciones indicadas por los evaluadores, para realizar las correcciones del caso, sin embargo nos encontramos a la espera de nuevos conceptos de evaluadores (plazo máximo de recepción de evaluaciones: 15 de marzo de 2022, en el momento que nuestro comité de arbitraje nos remitan nuevos conceptos, se los iremos remitiendo para que usted y su grupo de trabajo, realicen las modificaciones indicadas, para continuar con el proceso de evaluación.

Igualmente solicito la versión corregida en word 2010 o 2013 a una sola columna el **25 DE MARZO DE 2022**, con carta dirigida al Consejo Editorial donde se informe cuáles de las observaciones que remitió el Comité Evaluador fueron tenidas en cuenta y justifique cuales no fueron tenidas en cuenta (la carta no debe venir firmada con el nombre de los autores, recuerde que nuestra evaluación utiliza el proceso doble ciego), para continuar con el proceso de evaluación.

*** PD. Recuerde que el artículo debe contener Título en español, título en inglés, título corto, autores y filiación de cada uno de ellos (incluido ORCID, correo electrónico y país), resumen en español, palabras claves (español), abstract (inglés), key words, (se solicita el abstract sea revisado por un experto en el idioma) y las referencias bibliográficas utiliza las normas APA. Si el artículo es totalmente en inglés, se solicita ser revisada la versión modificada por un experto en el idioma antes de ser remitida nuevamente a la revista y adicionalmente una carta que certifique al experto en el idioma. También se recuerda que si utiliza un referenciador bibliográfico dentro del artículo, este antes de ser remitido a la revista, la bibliografía no debe venir con vínculos al referenciador bibliográfico (ya que genera problemas al abrirse en word o se reporta al correo como archivo con virus).**

Solicito confirmación de esta comunicación.

Jaqueline Ramírez P., Ing., MSc
Directora Ejecutiva
Revista Colombiana de Biotecnología
Instituto de Biotecnología
Universidad Nacional de Colombia

Anexo 3

Artículo:

**Principales microorganismos sulfato reductores (MSR)
de reactores anaerobios alimentados con efluentes
ácidos, una revisión bibliográfica**

Principales microorganismos sulfato reductores (MSR) de reactores anaerobios alimentados con efluentes ácidos, una revisión bibliográfica

Main sulfate-reducing microorganisms (SRM) present in anaerobic reactors fed with acid effluents, a review

*Donovan Enrique Álvarez-Márquez**, *Marisela Bernal-González***,
*María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa****

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v24n1.100963

RESUMEN

En esta investigación bibliográfica se encontraron reportes sobre una gran variedad de especies responsables de precipitar a cuatro metales de interés (Cu, Pb, Zn y Fe). En la mayoría de las investigaciones no solamente se considera la precipitación de estos metales, sino también la de otros elementos que están presentes en cada efluente estudiado. Los artículos aquí mencionados tienen una relación directa con el efluente proveniente de la operación unitaria de flotación. Aportan conocimiento acerca del proceso de sulfato-reducción, comprendiendo el mecanismo mediante microorganismos con características específicas, especialmente su versatilidad pues se desarrollan en diferentes ecosistemas. Se muestra que varias especies, como *Desulfobacter* o *Desulfovibrio* son comunes pues tienen condiciones relativamente sencillas para desarrollarse. Los microorganismos sulfato reductores (MSR) son eficientes para reducir la acidez del agua (de la operación unitaria de flotación de una mina, de cocinas, de corrientes marinas, etc.). También lo son para precipitar diferentes elementos pues no requieren de algún agente externo salvo en contadas ocasiones donde debe actuar un catalizador. Hay investigaciones sobre los nutrientes que deben adicionarse para incrementar su actividad. Los reportes de investigación revisados identificaron las variables a controlar para obtener buenos resultados en la remoción de metales y menores impactos en el ambiente. Es de gran importancia el desarrollo de proyectos que tomen en cuenta un sistema natural, como la degradación anaerobia, para alcanzar un punto en el cual la tecnología y el ambiente puedan complementarse logrando bienes de consumo necesarios para la población sin causar daños irreparables a la naturaleza.

Palabras clave: Microorganismos sulfato reductores, tratamiento de agua, drenaje ácido de mina.

* Pas. I.Q. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Conjunto "E", Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, 04510 Ciudad de México, México.
Correo-e (e-mail): donovanalvarez11@comunidad.unam.mx, autor a quien debe dirigirse la correspondencia.

** Dra. en Ing. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Conjunto "E", Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, 04510 Ciudad de México, México.
Correo-e (e-mail): marisela_bernal2000@yahoo.com.mx.

*** Dr.-Ing. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Conjunto "E", Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, 04510 Ciudad de México, México.
Correo-e (e-mail): mcduran@quimica.unam.mx.

ABSTRACT

In this bibliographical research, reports were found on a great variety of species responsible for precipitating four metals of interest (Cu, Pb, Zn and Fe). In most of the investigations, not only the precipitation of these metals is considered, but also that of other elements that are present in each effluent studied. The items mentioned here have a direct relationship with the effluent from the flotation unit operation. They provide knowledge about the sulfate-reduction process, understanding the mechanism through microorganisms with specific characteristics, especially their versatility as they develop in different ecosystems. It is shown that several species, such as *Desulfobacter* or *Desulfovibrio*, are common because they have relatively simple conditions to develop. Sulfate-reducing microorganisms (SRM) are efficient in reducing the acidity of water (from the flotation unit operation of a mine, kitchens, ocean currents, etc.). They are also used to precipitate different elements since they do not require any external agent except on rare occasions when a catalyst must act. There is research on the nutrients that should be added to increase its activity. The research reports reviewed identified the variables to control to obtain good results in the removal of metals and less impact on the environment. The development of projects that take into account a natural system, such as anaerobic degradation, is of great importance in order to reach a point where technology and the environment can complement each other, achieving necessary consumer goods for the population without causing irreparable damage to nature.

Keywords: Sulfate-reducing microorganisms, water treatment, acid mine drainage.

Recibido: febrero 9 de 2022 **Aprobado:** mayo 3 de 2022

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos prehispánicos, “la minería ha sido un factor de enorme importancia en el suceder de la historia económica de México, en la apropiación del territorio y en la fundación de los principales centros urbanos del país durante la colonia” (Coll-Hurtado *et al.*, 2002). A partir de 1961, cuando la Ley de Mexicanización de la minería fue expedida, las riendas del sector minero fueron tomadas “ya no por un dominio externo sino por el Estado y capital mexicanos y rápidamente se fue develando el trasfondo político que este cambio traería, el cual iba enfocado hacia la fortificación y potenciación del capital minero ‘mexicanizado’ convirtiéndolo así en una de las actividades más exitosas del país” (Wise y Mendoza, 2001). Fue a partir de 1990, que hubo una reestructuración de la legislación minera “aumentando la participación del sector privado, disminuyendo el papel del Estado como inversionista y como rector de esta actividad económica ampliando así la participación de la inversión extranjera directa” (Guevara-González, 2016). Aunque el crecimiento de la actividad minera no necesariamente significa algo completamente positivo, pues trae consigo consecuencias en las condiciones de vida de las poblaciones en las cuales se ha asentado dicha actividad y sus consecuencias son en su mayoría de carácter ambiental.

Uno de los principales problemas que la actividad minera ha generado es el “despojo hídrico, en el cual se sobre-explotan los acuíferos y se contamina el agua así como se genera una mayor producción de residuos sólidos y aguas ácidas” (Guzmán, 2016). Para enfrentar esta problemática se han presentado varias opciones dentro de las cuales destaca el tratamiento de aguas residuales con microorganismos sulfato-reductores (MSR), ya que se sabe que “en condiciones anaerobias oxidan com-

puestos orgánicos simples y liberan H_2S y HCO_3^- en presencia de SO_4^- y H^+ , los cuales son comunes en el agua ácida” (Dvorak *et al.*, 1992).

El H_2S reacciona con los contaminantes metálicos precipitándolos como sulfuros metálicos. “Este proceso es de bajo costo y de gran importancia ya que remueve los metales del agua, aumenta el pH y, debido a la alcalinidad que se genera por las bacterias, se reduce la acidez” (Durán-Barrantes *et al.*, 2000).

El medio ácido de interés en esta investigación son las aguas ácidas finales provenientes de la operación unitaria de flotación de la industria minera, las cuales son originadas mediante la “oxidación microbiológica de sulfuros metálicos gracias a las bacterias ferro-oxidantes del género *Thiobacillus*” (Durán-Barrantes *et al.*, 2000). El proceso de flotación es parte de un procedimiento de enriquecimiento de algunos minerales (sulfuros de Cu, Pb, Zn, etc.) y en el cual el mineral se ve separado debido tanto a interacciones fisicoquímicas como a procesos de reducción de tamaño. De esta forma “se puede concentrar el metal de interés mientras que el resto de material sin valor (relave) puede ser descartado”. Este procedimiento es conocido como concentración y su finalidad es la de obtener un material concentrado, para que se pueda reducir el costo de su transporte y tratamiento. “Las etapas que conforman el mismo son la recepción de materiales, ‘chancado’, molienda, flotación y secado de concentrados” (EMDP, 2000).

Hipótesis

Las especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) convierten los sulfatos en sulfuros, precipitando las sales metálicas de Pb, Zn, Cu y Fe provenientes de

un efluente de la operación unitaria de flotación. Por tanto, es de suma importancia estudiar a las especies de microorganismos sulfato-reductores (MSR) que no presenten una alta sensibilidad a los metales pesados y a un valor de pH bajo, que son característicos de un efluente proveniente de la operación unitaria de flotación de la industria minera.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica de las especies de microorganismos sulfato-reductores (MSR) presentes en reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) alimentados con efluentes ácidos, que provienen de la operación unitaria de flotación de una mina cooperante, conteniendo bajas concentraciones de Pb, Zn, Cu y Fe aprovechando la capacidad de las especies MSR y convirtiendo los sulfatos en sulfuros, precipitando a estas sales como sulfuros metálicos y logrando así la recirculación del agua ya tratada a la operación unitaria de flotación.

Objetivos particulares

- Revisar en la literatura cuáles son las principales especies de microorganismos sulfato-reductores (MSR), responsables de la precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe en un sistema anaerobio.
- Comprender los mecanismos de precipitación de los metales disueltos como sulfuros metálicos en el agua proveniente de la operación unitaria de flotación interpretando la eficiencia de remoción de cada metal en un sistema anaerobio.
- Distinguir cuáles son los parámetros de operación de mayor influencia en un sistema anaerobio logrando la mayor precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe.

METODOLOGÍA

Se revisó todo tipo de textos encontrados en la literatura científica, relacionados con el tema de MSR aunque no trataran en su totalidad sobre la precipitación de metales o el tratamiento de aguas residuales. Debido a esta variedad se obtuvo una mejor comprensión del tema en cuestión ya que se abordó desde diferentes puntos de vista y se denotaron aspectos importantes dentro de cada situación. La mayor parte de la investigación fue realizada en documentos digitales incluyendo tesis, artículos científicos, revistas, investigaciones y estudios en laboratorios en las plataformas BIDI (UNAM), Redalyc, Repositorio UDES (Universidad de Santander), DSpace, Science Direct, SEDICI, Google Académico, SciELO, Elsevier, Repositorio IPISYT, etc. (ver Glosario).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Pb y Zn son obtenidos mayormente a partir de un mineral llamado galena que es el mineral de sulfuro más importante y generalmente se trata de forma pirometalúrgica. Sin embargo, la fundición de plomo enfrenta dificultades con respecto de las regulaciones ambientales. "Por lo tanto, la recuperación hidrometalúrgica de plomo de la galena puede ser un proceso prometedor con la formación de azufre elemental ambientalmente inerte en lugar de dióxido de azufre" (Cedillo-Salazar *et al.*, 2017). En la Tabla 1 se muestran las publicaciones revisadas de la bibliografía relacionadas con los procesos utilizados para obtener concentrados de los minerales Pb, Zn y Cu, todos ellos acompañados de Fe.

En la Tabla 2 se presenta la taxonomía de los géneros de los MSR más importantes involucrados en los procesos de la sulfatorreducción y más adelante se describen más ampliamente algunos de ellos (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfococcus: El intervalo de temperatura óptimo para su desarrollo está entre 28 y 35°C, mientras que el intervalo de pH óptimo es de 6.7 a 7.6. El desarrollo ocurre en medios simples y definidos que contienen un compuesto reductor (generalmente sulfuro) y vitaminas. Las colonias en medios de agar anóxicos son blanquecinas a amarillentas (a veces con apariencia grisácea) y tienden a ser viscosas. No se han descrito especies termófilas y se presentan en lodo anóxico de agua dulce, agua salobre y hábitats marinos; También se presentan en los lodos de los sistemas anaerobios de aguas residuales (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfotomaculum: Su desarrollo ocurre en medios definidos simples que contienen sulfuro como reductor. Algunas especies requieren vitaminas o extracto de levadura. Estas especies pueden fijar N₂. El intervalo de temperatura óptimo para su desarrollo es de 30 a 37°C para especies mesófilas y de 50 a 65°C para especies termófilas. Por otro lado, su pH óptimo para el crecimiento es de 6.5 a 7.5. Estas especies son comunes en sedimentos anóxicos de agua dulce, salobre o marinos (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfobacter: Su proliferación ocurre en medios definidos simples que contienen sulfuro como reductor. La mayoría de las especies requieren vitaminas. Muchos miembros de este género pueden fijar N₂. La adición de ≥7 g de NaCl y ≥1 g de MgCl₂·6H₂O por litro de medio, puede ser estimulante y/o necesario para su desarrollo. El intervalo de temperatura óptimo es de 28 a 34°C. No se han descrito especies termófilas. El pH óptimo es de 6.5 a 7.4. La oxidación de acetil-CoA y la fijación de CO₂ con H₂ como donante de electrones en *D. hydrogenophilus* se

Tabla 1. Diferentes procesos utilizados para obtener concentrados de los minerales Pb, Zn y Cu, todos ellos

Objetivo	Proceso	Eficiencia	Referencia
Determinar los parámetros que intervienen en el proceso de flotación del Zn	Flotación	Recuperación de zinc del 90.58% ¹	Castro-Chamorro, 2005
Evaluar la extracción de plomo y cadmio de vajilla cerámica vidriada	La lixiviación se aplicó en cuatro repeticiones, en cada una de las extracciones se utilizó ácido acético al 4%(V/V) durante 24 horas a 22°C	Entre el 50 y el 93% de plomo en los lixiviados	Flores et al., 2016
Recuperar óptimamente por flotación los metales de plomo y zinc	Flotación	“Recuperaciones máximas de Zn y Pb de 94 y 83%, respectivamente”	Gamarra-Maldonado, 2019
Plantear la hipótesis de que el Pb-210 está interactuando con los sulfuros de cobre y esta interacción está contribuyendo a la ineficacia aumentando el rechazo de la flotación	Flotación	“La recuperación por flotación (del Pb) fue de 89.8%”	Hamilton et al., 2020
Usar nanopartículas y micropartículas de lignina como recolectores sostenibles y amigables con el ambiente	Flotación	“Recuperaciones totales de hasta 91, 85 y 98% para Cu, Pb y Zn, respectivamente”	Hrůzová et al., 2020
Determinar los parámetros operativos que influyen en la recuperación por flotación de la galena a partir de un mineral de bajo grado de Pb - Zn	Flotación	Incremento de la recuperación del mineral de plomo del 60 al 80%	León-Arroyo y Dianderas-Mandujano, 2019
Recuperar los metales objetivo de un concentrado de sulfuro a granel (2.9% Cu, 7.4% Zn, 2.5% Pb, 67 ppm Ag y 37.2% Fe)	Hidrometalúrgico integral (a) Lixiviación férrica, (b) Lixiviación con salmuera caliente	“Las extracciones fueron superiores al 95% para Zn, Cu y Pb, así como, la recuperación total de catalizador”	Lorenzo-Tallafigo et al., 2021
Recuperar el cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación	Flotación	“Recuperaciones de 59.2% en escorias del horno de reverbero (HR) y 86.8% para la escoria de convertidor teniente (CT)”	Valderrama et al., 2018
Modificar el pH económica y eficazmente mediante la cal en el proceso de flotación selectiva de los principales minerales sulfurados	Flotación	“El consumo de la cal fue de 5 kg/t de mineral, especialmente para minerales con alto contenido de piritita y/o cuando la flotación se realiza en agua de mar”	Zanin et al., 2019
Obtener concentrados de 7.79% Cu, 22.00% de Pb, 4.81% de Zn, 8.24% de S y 12.15% de CaO; el sulfuro de cobre representó el 76.97% del cobre, el sulfuro de plomo el 25.55% del plomo y el sulfuro de zinc el 67.66% del zinc	Flotación	“En estas condiciones, los grados de lixiviación de Cu y Zn fueron del 87.43% y 64.38%, respectivamente”	Zhang et al., 2019

¹ En esta investigación los °C y % van junto a los guarismos. Se usa el punto decimal de acuerdo con la normativa mexicana (DOF, 2009).

logra mediante un ciclo de ácido tricarbóxico, TCA, modificado. Las especies de *Desulfobacter* son más comunes en sedimentos marinos o salobres anóxicos, pero algunos

tipos pueden encontrarse en sedimentos anóxicos de agua dulce o en lodos activados (Kuever et al., 2015).

Tabla 2. Taxonomía de la mayoría de las poblaciones microbianas detectadas durante el tratamiento anaerobio (Modificado de Di-Maria, 2017).

Dominio	Filo	Clase	Orden	Familia	Género
Archaea	Euryarchaeota	Methanobacteria Methanomicrobia	Methanobacteriales Methanomicrobiales Methanosarcinales	Methanomicrobiaceae Methanobacteriaceae Methanosaetaceae	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanobrevibacter</i> <i>Methanoculleus</i> <i>Methanogenium</i> <i>Methanosaeta</i> <i>Methanospirillum</i> <i>Methanothermobacter</i>
Bacteria	Actinobacteria Bacteroidetes Firmicutes Proteobacteria Spirochaetes Synergistetes Tenericutes Thermotogae	Actinobacteria Alphaproteobacteria Bacilli Betaproteobacteria Clostridia Deltaproteobacteria Flavobacteria Gammaproteobacteria Methanomicrobia Mollicutes Sphingobacteria Synergistria Thermotogae	Acholeplasmatales Actinomycetales Alteromonadales Bacillales Burkholderiales Chromatiales Clostridiales Desulfovibrionales Flavobacteriales Myxococcales Natranaerobiales Oceanospirillales Pseudomonadales Sphingobacteriales Sphingomonadales Spirochaetales Synergistales Syntrophobacteriales Thermoanaerobacteriales Thermotogales	Acholeplasmataceae Anaerobrancaceae Bacillaceae Bacteroidaceae Clostridiaceae Desulfovibrionaceae Dethiosulfovibrionaceae Ectothiorhodospiraceae Flavobacteriaceae Flexibacteriaceae Heliobacteriaceae Idiomarinaceae Paenibacillaceae Peptococcaceae Pseudomonadaceae Sphingomonadaceae Thermoanaerobacteriaceae Thermotogaceae Thermovenabulum Veillonellaceae	<i>Acholeplasma</i> <i>Ammoniflex</i> <i>Anaerobranca</i> <i>Bacillus</i> <i>Caldicellulosiruptor</i> <i>Clostridium</i> <i>Desulfovibrio</i> <i>Desulfurispora</i> <i>Dethiosulfovibrio</i> <i>Desulfococcus</i> <i>Desulfotomaculum</i> <i>Desulfobacter</i> <i>Desulfobulbus</i> <i>Desulfobacterium</i> <i>Emticicia</i> <i>Eubacterium</i> <i>Heliorestis</i> <i>Moorella</i> <i>Pedobacter</i> <i>Pelotomaculum</i> <i>Peptococcus</i> <i>Petrotoga</i> <i>Propionispora</i> <i>Pseudidiomarina</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Selenomonas</i> <i>Syntrophomonas</i> <i>Thermoanaerobacter</i> <i>Thermovenabulum</i> <i>Treponema</i>

Desulfobulbus: El sulfato y también el sulfito o el tiosulfato sirven como aceptores terminales de electrones y se reducen a H₂S. El azufre no se reduce. En ausencia de un aceptor de electrones externo, el desarrollo puede ocurrir por degradación de lactato, piruvato y etanol (+ CO₂), malato o fumarato. El intervalo de pH óptimo es de 6.6 a 7.5. En cuanto a la temperatura óptima es de 25 a 40°C. No se conocen especies termofílicas. Se requieren medios que contengan un reductor y p-aminobenzoato para su proliferación. Las colonias en medio de agar anaerobio son blanquecinas a grisáceas y lisas. Se presentan en zonas anóxicas de agua dulce, agua salobre y hábitats marinos. También se han aislado del contenido del rumen, estiércol de animales y lodos de plantas depuradoras de agua (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfobacterium: Las desulfobacterias se encuentran muy extendidas en sedimentos marinos y salobres. El

sulfato y otros compuestos de azufre oxidados sirven como aceptores terminales de electrones y se reducen a H₂S. El azufre y el nitrato no se utilizan como aceptores terminales de electrones. Algunas especies pueden proliferar lentamente en ausencia de un aceptor de electrones externo por degradación de lactato, piruvato, malato y fumarato. Su temperatura óptima es de 26 a 29°C. Se requieren medios anóxicos (con sulfuro como reductor) y vitaminas para el crecimiento. Las especies de *Desulfobacterium* requieren concentraciones marinas o salobres de NaCl y MgCl₂. Las células contienen citocromos de tipo b y c. Se observa comúnmente la actividad del monóxido de carbono deshidrogenasa, lo que indica el funcionamiento de la vía anaerobia C1 (vía del monóxido de carbono deshidrogenasa o vía Wood) para la oxidación completa de la acetil-CoA o para la fijación de CO₂ durante el desarrollo autótrofo. Las especies de *Desulfobacterium* están muy extendidas en sedimentos

marinos o salobres, pero ocurren con menos frecuencia en hábitats de agua dulce. La eficiencia de la reducción de sulfato es del 89, 91 y 91% utilizando valores de pH de 2, 4 y 6, respectivamente. Esto indica que la mayor reducción de sulfato está en el medio con pH 4 y pH 6. Además, *Desulfobacterium* proliferando en medio a valor de pH de 4 tiene una mejor eficiencia de reducción de sulfato (93%) en comparación con otros aislados de MSR (Kuever *et al.*, 2015).

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), responsables de realizar la precipitación del Pb

En general, las especies más predominantes en la precipitación de Pb son *Desulfovibrio* y *Desulfosarcina*, aunque ambas tienen formas distintas (espiral y tétradas, respectivamente), “ambas son anaerobias, utilizan SO_4^{2-} como aceptor de electrones y presentan sensibilidad al ser expuestas a temperaturas de 100°C durante 5 minutos, siendo esto último necesario para diferenciación al *Desulfovibrio* de *Desulfomonas*” (Palomino-Cadenas, 2007). Además de esto se ha reportado que “el grupo microbiano más competitivo en las desembocaduras en el mar y de ríos amplios es el *Desulfovibrio*, cuando ésta forma parte del consorcio *Desulfobacter - Desulfobulbus*” (Laanbroek *et al.*, 1984). “Este grupo posee una temperatura óptima de desarrollo de entre 15 y 35°C” (Monroy-Cruz, 2014). En la Tabla 3 se muestra la revisión bibliográfica de las diferentes especies de MSR responsables de la precipitación del plomo.

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Zn

En este caso, “la temperatura óptima de proliferación para la mayoría de bacterias que precipitan al zinc oscila entre los 25 y 40°C” (Castro *et al.*, 2000). En la mayoría de los trabajos estudiados el microorganismo más común fue el *Desulfotomaculum* el cual tiene la característica de “formar esporas permitiéndole así volverse resistente a condiciones adversas pudiendo subsistir en una gran cantidad de medios” (Londry *et al.*, 1997; Castro *et al.*, 2000). Generalmente este subgrupo “se encuentra en cualquier tipo de ambiente natural, sedimentos, aguas e incluso en el tracto digestivo de algunos animales recién nacidos” (Deplancke *et al.*, 2000). En la Tabla 4 se muestran los MSR encargados de realizar la precipitación de Zn.

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) encargados de realizar la precipitación del Cu

Para el caso de la precipitación del cobre el género más común es el *Desulfobacterium*. Es un grupo versátil con una forma ovalada casi esférica, “tiene capacidades especiales en cuanto a degradación de compuestos orgánicos como por ejemplo la descomposición de hidrocarburos” (Sánchez-Alarcón, 2005; Van der Maarel, 1996). Las especies en este género son comúnmente marinas y requieren de elevadas concentraciones de cloruro de sodio. Además de esto, “el *Desulfobacterium* y el *Desulfobacter* comparte la característica de ser potencialmen-

Tabla 3. MSR responsables de la precipitación del plomo.

Objetivo	MSR	Eficiencia	Referencia
Evaluar la influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb^{2+}) mediante MSR	<i>Desulfovibrio</i> y <i>Desulfosarcina</i>	“A nivel de laboratorio se logró la remoción de 99.23% de plomo”	Basilio-Tavera, 2015
Precipitar metales pesados con sulfuro de hidrógeno biogénico	<i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfotomaculum</i> , <i>Archaeoglobus</i> , <i>Desulfomicrobium</i> , <i>Desulfomonile</i> , <i>Desulfobulbus</i> , <i>Desulfobotulus</i> , <i>Desulfobacula</i> , <i>Thermodesulfobacterium</i>	“Remoción de Cu del 92%, 90% de Pb y 95 % de Zn”	Chávez-Lizárraga <i>et al.</i> , 2006
Usar sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina mediante MSR	<i>Desulfovibrio</i> y <i>Desulfosarcina</i>	“La remoción anual para el Fe es de 85%, Pb de 69% y Zn de 92%”	Palomino-Cadenas, 2007
Precipitar Pb^{2+} mediante MSR en un reactor en régimen continuo	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	“Se logró la remoción del 98.4% de Pb”	Velasco <i>et al.</i> , 2005
Evaluar la formación biológica de sulfuro y precipitación de metales pesados utilizando MSR	<i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfomonas</i> , <i>Desulfotomaculum</i> , <i>Desulfobulbus</i> , <i>Thermodesulfobacterium</i>	“La eficiencia de remoción de plomo soluble fue de 94%”	Velasco y Revah, 2007

Tabla 4. MSR responsables de la precipitación del zinc.

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Remoción de metales pesados mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Las eficiencias de remoción alcanzaron el 100%. Las concentraciones iniciales fueron de 200 mg/L para Cu y 150 mg/L para Ni y Zn	Bayoumy et al., 1999
Tratamiento de metales mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Remociones arriba del 95% para Al, Cd, Fe, Mn, Ni y Zn	Dvorak et al., 1992
Remoción de sulfatos y metales pesados mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	“Remoción del 82% de sulfatos y del 97% de Cu, Zn y N”	Jong y Parry, 2003
Remoción biológica de sulfatos y precipitación del zinc	<i>Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfococcus, Desulfonema, Desulfosarcina, Desulfobarculus</i>	Remoción de sulfatos del 89%, para Zn de 62.9% y 92.18% para el Pb	Maree y Strydom, 1987
Uso de un sistema integrado por algas y bacterias sulfato reductoras	<i>Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfococcus, Desulfonema, Desulfosarcina, Desulfobarculus</i>	Remoción de Pb del 99% y de Zn del 90%	Rose et al., 1998
Desarrollo de un proceso de sulfato-reducción para remover metales pesados de un drenaje ácido de mina	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Remoción del 99% de Fe, Zn, Cu, Cd, As y Pb en un efluente sintético	Steed et al., 2000
Biotratamientos del drenaje ácido de mina y recuperación de metales	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Remociones de Cu del 99.8% y 98% de Zn por medio de precipitación	Tabak et al., 2003

te importantes para la metilación del mercurio y no toleran las condiciones aerobias” (Sánchez-Alarcón, 2005; King et al., 2000). En la Tabla 5 se muestran los MSR encargados de realizar la precipitación de Cu.

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Fe

Los microorganismos sulfato reductores involucrados en el proceso de precipitación del hierro que fueron revisados en la literatura crecen en condiciones bastante similares entre sí, siendo la tecnología más utilizada para su uso la del reactor tipo UASB (RALLFA en español). Las condiciones en las que éste trabaja son muy parecidas dentro de la literatura consultada. Generalmente se inyecta al reactor un medio mineral basal cuya composición varía un poco, por ejemplo: Gallegos-García (2009)

utiliza la siguiente composición (g/L): NH₄Cl (0.3), CaCl₂·2H₂O (0.015), KH₂PO₄ (0.2), MgSO₄·7H₂O (0.12), KCl (0.25) y extracto de levadura (0.02). A esto se le añade un lodo granular también llamado lodo anaerobio que en una gran parte de los textos se mantiene en refrigeración a temperaturas de alrededor de 4 o 5°C. Además de este medio varios autores han intentado mejorar la producción de H₂S del proceso al cambiar el material orgánico utilizado por los MSR, como lo hizo Forigua-Quicasán et al. (2017), el cual utilizó ‘compost’ de champiñón teniendo éxito al aumentar la producción de sulfuro y de actividad microbiana siendo que la concentración del sulfato disminuyó en más del 50% en una celda con alto porcentaje de compost (60:40), mientras que en la celda con menor porcentaje de compost (25:75) la concentración de sulfuro incrementó en más del 70%. En la Tabla 6 se muestra la revisión bibliográfica

Tabla 5. MSR responsables de la precipitación del cobre.

Objetivo	MSR	Eficiencia	Referencia
Sistema de intercambio difusivo para el tratamiento de drenajes ácidos con elevadas concentraciones de cobre	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción del 49.4±8.8% de los metales totales del DAM, un 55±9% del Cu, 26±10% del Zn y 41±9% del Al”	Chaparro-Cárcamo, 2016
Biogénesis de sulfuro de hidrógeno empleando ácidos grasos volátiles producidos por la hidrólisis de vegetales y frutas en descomposición	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remoción del Zn del 96.75%, Cu del 98.45% y Pb del 100%	Crespo-Melgar, 2009
Estudio de factibilidad del diseño de un sistema biológico-físicoquímico (BFQ) para el tratamiento de drenajes ácidos de mina a escala laboratorio	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remociones de Cu (II) y Zn (II) mayores al 97% y un incremento de pH del drenaje ácido de mina sintético a 8.5	Flor-Cevallos, 2012
Evaluación del funcionamiento de un Sistema Biológico-físicoquímico (BFQ) para el tratamiento	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Aumento del pH hasta tener valores de 8.5 en el efluente del sistema y una remoción de Cu (II) mayor al 98% durante 148 días de operación	Gallardo-Lastra, 2011
Efecto del cobre para la remoción de sulfato en un reactor de lecho fijo	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remoción de Cu del 99.59±0.43% y una producción de sulfuro de 39.29 mg S ²⁻ /L*d.	Muñoz et al., 2019
Bioprecipitación de cobre por sulfato-reducción en un reactor anaerobio de lodos granulares expandidos	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remoción de más de 199 mg Cu ²⁺ /L dando un porcentaje de remoción superior al 98%	Valenzuela, 2011

ca sobre los MSR encargados de realizar la precipitación de Fe.

Influencia de los parámetros de operación en la precipitación de metales Pb, Cu, Zn y Fe

Existen distintos parámetros que pueden llegar a influir dentro de la precipitación de metales, empezando por los compuestos donadores de electrones utilizados por las bacterias sulfato reductoras. Algunos ejemplos de estos son: “H₂, lactato, piruvato, fumarato, malato, coli-

na, acetato, propionato, butirato, ácidos grasos de cadena larga, benzoato, indol, hexadecano, etanol y otros alcoholes” (Andrade-Tovar, 2010). Esto es importante debido a que dependiendo del sustrato que se utilice, se obtendrán diferentes productos de bioconversión. Por ejemplo, se ha encontrado que “en las aguas termales minerales en el depósito de Sukhunsk, el organismo *Desulfotomaculum kuznetsovii* formaba como productos de bio-reacción CO₂ y H₂S al ser nutrido con formiato, acetato, propionato, alcoholes varios, sulfato, sulfito,

Tabla 6. MSR responsables de la precipitación del hierro.

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Evaluación de bacterias sulfato reductoras presentes en reactores pasivos durante la remediación de drenajes ácidos de minas	<i>Desulfobacterium autotrophicum</i> , y tres especies de BSR (<i>Desulfovibrio vulgaris</i> , <i>Desulfomicrobium sp.</i> y <i>Desulfococcus sp.</i>),	Remociones de Fe ²⁺ en los reactores 2 y 4 de 99.7±0.7 y 99.4±1.6%, respectivamente, mientras que para TRH de 1 día, la remoción de Fe ²⁺ fue 86.1±15.9%	Escobar-Restrepo, 2015
Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remociones de Fe ²⁺ > 95%; Mn ²⁺ > 96%; Zn ²⁺ > 52% y de sulfato > 50%	Forigua-Quicasán et al., 2017
Procesos biológicos de sulfatorreducción en biopelículas para la precipitación de metales	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remociones de Fe, Zn y Cd mayores a 99.0%”	Gallegos-García et al., 2009
Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remociones de Cu del 99.99%, de Fe del 99.99%, de Pb de 96.67%, de Zn del 99.94%, de los sulfatos se consiguió remover el 97.55% y de Ca se removió el 99.96%	Nina-Chambe, 2008
Procesos de bioprecipitación de metales pesados y bio-reducción de hierro (III) para el tratamiento de aguas ácidas de minas a escala de laboratorio	Finalmente, se detectaron géneros sulfato reductores mediante la técnica molecular de hibridación fluorescente in situ (FISH), donde existió predominancia de <i>Desulfovibrio spp.</i> , <i>Desulfobotulus sapovorans</i> y <i>Desulfovibrio fairfieldensis</i> . Seguidos de: <i>Desulfobacter spp.</i> , <i>Desulfobulbus spp.</i> , <i>Desulfosarcina sp.</i> , <i>Desulfonema spp.</i> , <i>Desulfococcus sp.</i> , <i>Desulfobacterium spp.</i> , <i>Desulfobotulus sp.</i> , <i>Desulfostipes sp.</i> , <i>Desulfomusa sp.</i> Y <i>Desulfofrigus</i> y <i>Desulfofaba spp.</i>	Remociones del 70% de sulfatos entre -60-80% de Fe y Zn y, 95-100 % de remoción de cadmio (Cd) y cobre (Cu)	Quiroga-Flores, 2015
Optimización de las condiciones de cultivo de consorcios bacterianos sulfato reductores en la bioprecipitación de Fe (II) del afluyente Antequera, departamento de Oruro, Bolivia	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción de Fe del 95%”	Guardia-Zurita, 2010

tiosulfato” (Lowe et al., 1993). A su vez, la elección del donador de electrones es importante para la eficiencia de la sulfato-reducción. Este parámetro ya ha sido estu-

diado por varios autores. Tal es el caso de Karnachuk et al. (2005), quienes realizaron experimentos al norte de Siberia en los sedimentos de un área minera en los cua-

les utilizaron al acetato como donador de electrones en concentraciones de 7.6 mM (0.5 g DQO/L). Los autores demostraron que las constantes de reducción del sulfato oscilaron entre 0.05 y 30 nmol $\text{SO}_4^{2-}/\text{cm}^3\text{d}$, aumentando la eficiencia. Otro parámetro de gran importancia es el tiempo de residencia o bien el flujo que se tiene en la aplicación de los tratamientos basados en bacterias sulfato-reductoras para equipos que trabajen a flujos continuos. Por ejemplo, en las barreras reactivas permeables se ha encontrado que “si los tiempos de residencia hidráulicos son demasiado cortos no permitirán que los microorganismos produzcan una cantidad suficiente de sulfuro para la precipitación de los metales, ni suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez” (Gibert *et al.*, 2002). En diversos estudios se ha demostrado la importancia de este parámetro, tal como lo hicieron Dvorak *et al.* (1992). Los autores demostraron que al duplicar el flujo, se produce una reducción de la concentración de sulfuro generado por la actividad microbiana del 99%. Una buena opción para maximizar las actividades específicas de generación de sulfuro sería simplemente disminuir el flujo o incrementar el grosor del material de soporte de la barrera reactiva permeable. Sin embargo, esto no es posible en las barreras reactivas permeables ya que “el caudal o flujo es fijado por la corriente del yacimiento de agua, mientras que aumentar las dimensiones significaría costos elevados por la cantidad de material requerido” (Gibert *et al.*, 2002). Una opción más viable en tratamientos con tiempos de residencia cortos es la estimulación y aceleración de la actividad bacteriana siendo sugerido por Hammack y Edenborn (1992), donde demostraron que la adición de lactato incrementó la actividad sulfato-reductora, obteniendo así remociones de sulfato del 70% y remociones de níquel del 95%, comparadas con remociones muy bajas sin el uso de lactato. Hablando de otro tipo de proceso como lo es el reactor UASB, diversos autores han realizado investigaciones en cuanto a los parámetros responsables de la eficiencia de dicho procesos, tales como la velocidad de carga orgánica, el tiempo de residencia hidráulico, la temperatura de operación, tipo de inóculo, concentración de DQO y de sólidos suspendidos totales en el influente pues han demostrado ser de vital importancia (Foresti, 1995; Rico *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*, 2005; Santana y Oliveira, 2005). Aunque aún no se ha logrado llegar a un acuerdo de condiciones en las cuales se puede llegar a optimizar el proceso pues las condiciones y materiales varían entre cada experimento (Pacco *et al.*, 2018). Para poner un ejemplo de esto, Sánchez *et al.* (2005), trabajaron con un reactor UASB de 5 litros, a temperaturas de entre 30 a 35°C, tiempo de residencia hidráulico de 3 días y una velocidad de carga orgánica promedio de 2.7 kg DQO/d*m³ y fueron capaces de obtener eficiencias de remoción promedio de DQO

total y sólidos suspendidos totales de 56.7% y 52.1%, respectivamente. Al incrementar la velocidad de carga orgánica promedio a 8.1 kg DQO/d*m³ y reducir el tiempo de residencia hidráulico a 1 día se vieron disminuidas a tan solo 18.6 y 27.1%. Caso contrario fue el de Santana y Oliveira (2005), que obtuvieron eficiencias de remoción para dichos parámetros de 80.3 y 72.8%, utilizando un reactor UASB de 908 litros, trabajando con un tiempo de residencia hidráulico de 2.6 días y una velocidad de carga orgánica de 3.4 kg DQO/d*m³ y no vieron afectaciones negativas al reducir el tiempo de residencia hidráulico a 1.3 días y aumentar la velocidad de carga orgánica a 7.43 kg DQO/d*m³, obteniendo al final eficiencias de remoción de DQO total y sólidos suspendidos totales de 87.7 y 81.4%, respectivamente.

CONCLUSIONES

La investigación bibliográfica realizada permitió observar una gran variedad de especies responsables de precipitar Pb, Cu, Zn, Fe. En la mayoría de lo reportado, no se precipita solamente a esos cuatro metales, sino que también traen consigo otra gran variedad de elementos, los cuales están presentes dado el origen del agua de cada investigación. Si bien no todos los artículos revisados tuvieron una relación directa con el efluente proveniente de la operación unitaria de flotación, sí aportaron conocimiento acerca del proceso de sulfato reducción. Además, se recabó información que permite comprender las características de cada especie de MSR. Se alcanzó a visualizar que estos microorganismos son bastante versátiles pues se desarrollan en varios tipos de ambientes y ecosistemas. Incluso, se observó que especies como *Desulfobacter* o *Desulfovibrio* son bastante comunes dadas las condiciones relativamente sencillas que necesitan para desarrollarse. De la misma manera se puede decir que ya se ha demostrado ampliamente que los MSR son altamente eficientes al momento de reducir la acidez del agua, proveniente de la operación unitaria de flotación de una mina, efluentes de cocina, corrientes marinas, etc. También son eficientes para precipitar diferentes elementos pues no requieren de algún agente externo salvo en contadas ocasiones donde la actividad microbiana se veía reducida y era necesario utilizar algún tipo de catalizador. Para ese tipo de casos, ya se tienen igualmente investigaciones donde se debe adicionar nutrientes para incrementar esa actividad. También, gracias a la diversidad de artículos revisados, ya se tiene una idea mucho más clara del proceso y las variables a controlar para poder obtener buenos resultados en cuanto a remoción de metales y, de la misma forma, el gran impacto que esto genera en el ambiente. Es sumamente importante que se sigan desarrollando proyectos de este tipo que tomen un proceso tan común en la

naturaleza como la degradación anaerobia y se pueda llevar a un punto en el cual la tecnología y el ambiente puedan convivir y el ser humano logre obtener un bien de consumo sin causar daños a la naturaleza.

tratamiento de los drenajes ácidos de mina. Tesis de grado para la obtención de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. Quito, Ecuador. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/743>.

GLOSARIO

BIDI	Biblioteca Digital de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
'Chancado'	En Centro y Sudamérica significa triturar, machacar o moler, especialmente minerales (vocablo probablemente castellanizado del quechua)
<i>DSpace</i>	<i>Open source repository software package typically used for creating open access repositories for scholarly and/or published digital content</i> / Paquete de software de repositorio de código abierto que normalmente se usa para crear repositorios de acceso abierto para contenidos académico y/o digital publicados
Elsevier	Empresa editorial existente desde que en el occidente se desarrolló la imprenta de Gutenberg
Espiral	Las bacterias en forma de espiral son aquellas que presentan más de una curvatura y nunca son rectas (Pedrique-de-Aulacio et al., 2008)
Google Académico	Repositorio de publicaciones en inglés y español
IPICT Reppositorio	Repositorio del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, México
MSR	Microorganismos sulfato-reductores
RALLFA	Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente
Redalyc	Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
<i>SciELO</i>	<i>Scientific Electronic Library Online</i> o Biblioteca Científica Electrónica en Línea
<i>Science Direct</i>	Repositorio de publicaciones en inglés
SEDICI	Servicio de Difusión de la Creación Intelectual
Tétradas	Son agrupaciones de cuatro cocos en una disposición cuadrada. Se dividen en dos direcciones perpendiculares (Pedrique-de-Aulacio et al., 2008)
UDES Reppositorio	Repositorio digital de la Universidad de Santander, España

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT, clave IN110022, Desarrollo de un modelo cinético diferencial para un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) utilizado para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso unitario de flotación, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México, a cargo del Prof. Dr. Ángel Enrique Chávez-Castellanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade-Tovar, V.S. (2010). Evaluación del potencial de generación de sulfuro por la acción de las bacterias sulfato reductoras y sus posibles aplicaciones en el

Basilio-Tavera, J.C. (2015). Influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb^{2+}) utilizando dolomita como adsorbente. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria de La Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables. 89 pp. Tingo María, Perú. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1704>.

Bayoumy, M.E., Bewtra, J.K., Ali, H.I., Biswas, N. (1999). Removal of heavy metals and COD by SRB in UAFF reactor. *Journal of Environmental Engineering*. 125 (6):532-539.

Castro, H.F., Williams, N.H., Ogram, A. (2000). Phylogeny of sulfate-reducing bacteria. *FEMS Microbiology Ecology*. 31(1):1-9.

Castro-Chamorro, J.A. (2005). Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la Compañía

- Minera "Yauliyacu" SA mediante diseños experimentales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minería, Metalúrgica y Geografía E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica. 77 pp. Lima, Perú. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/2638>.
- Cedillo-Salazar, E., Carrillo-Pedroza, F., Berumen, C., Benavides, R., Almaguer-Guzmán, I. (2017). Lixiviación directa de concentrados de galena en ácido clorhídrico y cloruro de sodio con aplicación de ozono como agente oxidante. En Memorias del Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, 38 CIMM. Pp. 301-309. Saltillo, Coahuila, México. <https://www.its.mx/memorias/38CIMM.pdf>.
- Chaparro-Cárcamo, G.O. (2016). Sistema de intercambio difusivo para el tratamiento de drenajes ácidos con elevadas concentraciones de cobre. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. 83 pp. Concepción, Chile. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/2096>.
- Chávez-Lizárraga, G.A., Álvarez-Aliaga, M.T.T., Giménez-Turba, A.T. (2006). Precipitación de metales pesados con sulfuro de hidrógeno biogénico producido a partir de la degradación 'anaeróbica' de material celulósico y xilanósico. Disertación Doctoral. Universidad Mayor de San Andrés, Maestría en Ciencias Biológicas y Biomédicas, Instituto de investigaciones Fármaco Bioquímicas. 109 pp. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/18098>.
- Coll-Hurtado, A., Salazar, M.T.S., Morales, J. (2002). La minería en México. UNAM. 126 pp. Ciudad de México, México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/82/83/252-1>.
- Crespo-Melgar, C.F. (2009). Biogénesis de sulfuro de hidrógeno empleando ácidos grasos volátiles producidos por la hidrólisis de vegetales y frutas en descomposición. Tesina elaborada para optar por el grado de Licenciatura en Bioquímica. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímica, Instituto de Investigaciones Fármaco-Bioquímicas. 188 pp. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/472>.
- Deplancke, B., Hristova, K.R., Oakley, H.A., McCracken, V.J., Aminov, R., Mackie, R.I., Gaskins, H.R. (2000). Molecular ecological analysis of the succession and diversity of sulfate-reducing bacteria in the mouse gastrointestinal tract. *Applied and Environmental Microbiology*. 66(5):2166-2174.
- Di-Maria, F. (2017). The recovery of energy and materials from food waste by codigestion with sludge: Internal environment of digester and methanogenic pathway. In Food Bioconversion Pp. 95-125. Alexandru Mihai Grumezescu, Alina Maria Holban, Eds. Academic Press. Nueva York, Estados Unidos. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128114131000036>.
- DOF. (2009). DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la Tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. México D.F., México.
- Durán-Barrantes, M.D.L.M., Jiménez-Rodríguez, A.M., Martel-Villagrán, F.J. (2000). Tratamiento biológico de aguas ácidas de minería: Selección de una población bacteriana enriquecida en bacterias sulfatorreductoras. *Tecnología del Agua*. 203:56-60.
- Dvorak, D.H., Hedin, R.S., Edenborn, H.M., McIntire, P.E. (1992). Treatment of metal-contaminated water using bacterial sulfate reduction: Results from pilot-scale reactors. *Biotechnology and Bioengineering*. 40(5):609-616.
- EMDP. (2000). Manual de Minería. Estudios Mineros del Perú, S.A.C. http://www.iestpoyon.edu.pe/web/documentos/Manual_de_Mineria.pdf.
- Escobar-Restrepo, M.C. (2015). Evaluación de bacterias sulfato reductoras presentes en reactores pasivos durante la remediación de drenajes ácidos de minas. Tesis para optar por el título de Magister en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. 115 pp. Bogotá, D.C., Colombia. <https://repositorio.javeriana.edu.co/handle/10554/20631>.
- Flor-Cevallos, D.E. (2012). Estudio de factibilidad del diseño de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento de drenajes ácidos de mina a esca-

- la laboratorio. Tesis de grado para la obtención de pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. 102 pp. Quito, Ecuador. <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/handle/23000/1875>.
- Flores, M.E., Idrovo, M.M., Flores, D.V. (2016). Evaluación de la extracción de plomo y cadmio de vajilla cerámica vidriada. *Maskana*. 7(1):97-106.
- Foresti, E. (1995). Anaerobic treatment of piggery wastewater in UASB reactors. In Proceedings 7th International Symposium on Agricultural and Food Processing Wastes. June, 18-20, pp. 309-318. Chicago, Estados Unidos.
- Forigua-Quicasán, D., Fonseca Forero, N., Vásquez, Y. (2017). Acid mine drainage prevention using mushroom compost as organic amendment. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 19(1):92-100.
- Gallardo-Lastra, L.F. (2011). Evaluación del funcionamiento de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento. Tesis de grado para la obtención de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. 97 pp. Quito, Ecuador. <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1235>.
- Gallegos-García, M. (2009). Procesos biológicos de sulfatorreducción en biopelículas para la precipitación de metales. Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales. División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. 120 pp. San Luis Potosí, S.L.P. México. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/85>.
- Gallegos-García, M., Celis, L.B., Rangel-Méndez, R., Razo-Flores, E. (2009). Precipitation and recovery of metal sulfides from metal containing acidic wastewater in a sulfidogenic down-flow fluidized bed reactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 102(1):91-99.
- Gamarra-Maldonado, H.E. (2019). Flotación 'bulk' de minerales sulfurados de plomo-zinc refractarios de bajo grado en la Planta Concentradora de Huari de la UNCP. Tesis de Ingeniero Metalurgista y de Materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. 79 pp. Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6490>.
- Gibert, O., De Pablo, J., Cortina, J.L., Ayora, C. (2002). Treatment of acid mine drainage by sulphate-reducing bacteria using permeable reactive barriers: A review from laboratory to full-scale experiments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 1(4), 327-333.
- Guevara-González, B.X. (2016). La inversión extranjera directa en la minería en México: El caso del oro. *Análisis económico*. 31(77):85-113.
- Guardia-Zurita, D. (2010). Optimización de las condiciones de cultivo de consorcios bacterianos sulfato-reductores en la bioprecipitación de Fe (II) del efluente Antequera, Departamento de Oruro, Bolivia. Tesis para acceder al grado de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímica, Instituto de Investigaciones Fármaco-Bioquímicas. 49 pp. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/19427>.
- Guzmán-López, F. (2016). Impactos ambientales causados por megaproyectos de minería a cielo abierto en el estado de Zacatecas, México. 10.5154/r. rga. 2016.57. 010.
- Hamilton, T., Huai, Y., Peng, Y. (2020). Lead adsorption on copper sulphides and the relevance to its contamination in copper concentrates. *Minerals Engineering*. 154:106381.
- Hammack, R.W., Edenborn, H.M. (1992). The removal of nickel from mine waters using bacterial sulfate reduction. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 37 (5):674-678.
- Hrùzová, K., Matsakas, L., Sand, A., Rova, U., Christakopoulos, P. (2020). Organosolv lignin hydrophobic micro- and nanoparticles as a low-carbon footprint biodegradable flotation collector in mineral flotation. *Bioresource Technology*. 306:123235.
- Hurtado, J., Berastain, A. (2012). Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración adicionando nutrientes y microorganismos. *Revista Peruana de Biología*. 19(2):187-192.
- Jong, T., Parry, D.L. (2003). Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs. *Water Research*. 37(14):3379-3389.
- Karnachuk, O.V., Pimenov, N.V., Yusupov, S.K., Frank, Y.A., Frank, Y.A., Kaksonen, A.H., Tuovinen, O.H. (2005). Sulfate reduction potential in sediments in the Norilsk mining area, northern Siberia. *Geomicrobiology Journal*. 22(1-2):11-25.
- King, J.K., Kostka, J.E., Frischer, M.E., Saunders, F.M. (2000). Sulfate-reducing bacteria methylate mercury at variable

- rates in pure culture and in marine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 66(6):2430-2437.
- Kuever, J., Rainey, F. A., Widdel, F. (2015). Syntrophobacteraceae fam. nov. En *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*, Online© 2015 Bergey's Manual Trust. This article is © 2005 Bergey's Manual Trust. DOI: 10.1002/9781118960608.gbm01035. Published by John Wiley & Sons, Inc., in association with Bergey's Manual Trust. Nueva York, Estados Unidos.
- Laanbroek, H.J., Geerligs, H.J., Sijtsma, L., Veldkamp, H. (1984). Competition for sulfate and ethanol among *Desulfobacter*, *Desulfobulbus*, and *Desulfovibrio* species isolated from intertidal sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 47(2):329-334.
- León-Arroyo, F.J., Dianderas-Mandujano, J.D. (2019). Efecto del porcentaje de sólidos en la flotación de la galena a partir de un mineral de bajo grado de plomo-zinc en la Compañía Minera Casapalca SA. Tesis de Ingeniería Metalurgista y de Materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. 81 pp. Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6012>.
- Londry, K.L., Fedorak, P.M., Suflita, J.M. (1997). Anaerobic degradation of m-cresol by a sulfate-reducing bacterium. *Applied and Environmental Microbiology*. 63(8):3170-3175.
- Lorenzo-Tallafigo, J., Romero-García, A., Iglesias-González, N., Mazuelos, A., Romero, R., Carranza, F. (2021). A novel hydrometallurgical treatment for the recovery of copper, zinc, lead, and silver from bulk concentrates. *Hydrometallurgy*. 200:105548.
- Loreto-Muñoz, C.D., Certucha-Barragán, M.T., Almendáriz-Tapia, F.J., Ochoa-Herrera, V., Monge-Amaya, O. (2019). Efecto del cobre para la remoción de sulfato en un reactor de lecho fijo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 35:37-44.
- Lowe, S.E., Jain, M.K., Zeikus, J.G. (1993). Biology, ecology, and biotechnological applications of anaerobic bacteria adapted to environmental stresses in temperature, pH, salinity, or substrates. *Microbiological Reviews*. 57(2):451-509.
- Maree, J.P., Strydom, W.F. (1987). Biological sulphate removal from industrial effluent in an upflow packed bed reactor. *Water Research*. 21(2):141-146.
- Monroy-Cruz, Y.Y. (2014). Bacterias sulfato reductoras. Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales. Universidad Militar Nueva Granada, 28 pp. Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unimilitar.edu.co/handle/10654/12039>.
- Nina-Chambe, M. (2008). Evaluación de los métodos químico y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Caso: Mina Cerro de Pasco. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 105 pp. Lima, Perú. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/802>.
- Pacco, A., Vela, R., Miglio, R., Quipuzco, L., Juscamaita, J., Álvarez, C., Fernández-Polanco, F. (2018). Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Scientia Agropecuaria*. 9(3):381-391.
- Palomino-Cadenas, E.J. (2007). Sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina o roca en Ancash-Perú. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Postgrado, Programa Doctoral en Ciencias Ambientales. 97 pp. Trujillo, Perú. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/5359>.
- Pedrique-de-Aulacio, M., De-Castro, N. (2001). Garcés, A., Saravia, K. Actualización 2008. Guía de Teoría. Cátedra de Microbiología. Facultad de Farmacia, Universidad Central de Venezuela. http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_farmacia/catedraMicro/08_Tema_2_morfologia.pdf.
- Quiroga-Flores, R. (2015). Procesos de bioprecipitación de metales pesados y bioreducción de hierro (III) para el tratamiento de aguas ácidas de minas a escala laboratorio. Disertación Doctoral. Alvarez-Aliaga, M.T. Tutora. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/17429/TM-1895.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rico, C., Montes, J.A., Rico, J.L. (2017). Evaluation of different types of anaerobic seed sludge for the high-rate anaerobic digestion of pig slurry in UASB reactors. *Bioresource Technology*. 238:147-156.
- Rose, P.D., Bischoff, G.A., Van Hille, R.P., Wallace, L.C.M., Dunn, K.M., Duncan, J.R. (1998). An integrated algal sulphate reducing high-rate ponding process for the treatment of acid mine drainage wastewaters. *Bio-degradation*. 9(3):247-257.
- Sánchez-Alarcón, S.R. (2005). Distribución de bacterias sulfato reductoras y metilmercurio en sedimentos de lagunas de inundación del río Beni, Amazonía boliviana.

- na. Tesis para optar el grado de Magister en Ciencias biológicas y biomédicas, La Paz, Bolivia.
- Sánchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martín, A., Colmenarejo, M.F. (2005). Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. *Bioresource Technology*. 96(3):335-344.
- Santana, M.A., Oliveira, R.A., (2005). Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura. *Engenharia Agrícola*. 25(3):817-830.
- Steed, V.S., Suidan, M.T., Gupta, M., Miyahara, T., Acheson, C.M., Sayles, G.D. (2000). Development of a sulfate-reducing biological process to remove heavy metals from acid mine drainage. *Water Environment Research*. 72(5):530-535.
- Tabak, H.H., Scharp, R., Burckle, J., Kawahara, F.K., Govind, R. (2003). Advances in biotreatment of acid mine drainage and biorecovery of metals: 1. Metal precipitation for recovery and recycle. *Biodegradation*. 14 (6):423-436.
- Valderrama, L., González, M., Santander, M., Zazzali, B. (2018). Recuperación de cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación. *HOLOS*. 5:40-50.
- Valenzuela, R.A. (2011). Bioprecipitación de cobre por sulfato-reducción en un reactor anaerobio de lodos granulares expandidos. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, División de Ingeniería, Universidad de Sonora. 116 pp. Hermosillo, Sonora, México. <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/unison/318?locale=es>.
- Van der Maarel, M.J., Jansen, M., Haanstra, R., Meijer, W.G., Hansen, T.A. (1996). Demethylation of dimethylsulfoniopropionate to 3-S-methylmercaptopropionate by marine sulfate-reducing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(11), 3978-3984. <https://journals.asm.org/doi/epdf/10.1128/aem.62.11.3978-3984.1996>.
- Velasco, J.A., de la Rosa, A., Volke-Sepúlveda, T. (2005). Precipitación de altas concentraciones de plomo por bacterias sulfato-reductoras en un reactor a régimen continuo. En XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. México. https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_IV/OIV-01.pdf.
- Velasco, J.A., Revah, S. (2007). Evaluación de la relación COD/sulfato para maximizar la formación biológica de sulfuro y precipitar metales pesados. XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. https://smbb.mx/congresos%20smbb/morelia07/TRABAJOS/Area_IV/CARTELES/CIV-69.pdf.
- Wise, R.D., Mendoza, R.D.P. (2001). Minería, Estado y gran capital en México. *Economía e Sociedade*. 10 (1):105-127.
- Zanin, M., Lambert, H., du Plessis, C.A. (2019). Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*. 143:105922.
- Zhang, Q., Feng, Q., Wen, S., Cui, C., Liu, J. (2019). A novel technology for separating copper, lead and zinc in flotation concentrate by oxidizing roasting and leaching. *Processes*. 7(6):376-389.