

Impacto de la implementación del protocolo de administración de relaves en la gestión de riesgos de relavera en mina Huaron, 2021

Impact of the implementation of the tailings management protocol on tailings dam risk management at Huaron mine, 2021

Erick Jesús Velásquez Méndez^{1,a}, Enrique Guadalupe Gómez^{1,2,b}

Recibido: 14/08/2023 - Aprobado: 18/10/2023 – Publicado: 15/12/2023

RESUMEN

El objetivo general del estudio fue determinar el impacto de la implementación del protocolo de administración de relaves en la gestión de riesgos de la relavera. Metodológicamente, fue una investigación aplicada, de nivel explicativo, diseño no experimental, de corte longitudinal. La muestra fue de seis análisis de modos de fallas. Los resultados revelan la diferencia antes y después de la implementación del protocolo de administración de relaves; antes de la implementación la probabilidad de ocurrencia era raro en 33.3%; y después la probabilidad de ocurrencia es rara (83.3%). La diferencia de la consecuencia de ocurrencia de las fallas detectadas es que antes de la implementación era en la mayoría de las fallas detectadas de carácter catastrófico (66.7%); y después en la mayoría de las fallas es de (0.00%). Y la diferencia en el nivel de riesgo en la relavera es que antes de la implementación era alto (33.3%); y después es alto (0.00%). En conclusión, se ha demostrado que el impacto de la implementación del protocolo de administración de relaves es significativo en la gestión de riesgos de la relavera en Pan American Silver Huaron, 2021. ($p < 0.05$).

Palabras claves: Administración, gestión, protocolo, relavera, relaves, riesgos

ABSTRACT

The general objective of the study was to determine the impact of the implementation of the tailings management protocol on the risk management of the tailings dam. Methodologically, it was an applied research, explanatory level, non-experimental design, longitudinal section. The sample was six failure mode analyses. The results show the difference before and after the implementation of the tailings management protocol; Before implementation the probability of occurrence was rare at 33.3%; and then the probability of occurrence is rare (83.3%). The difference in the consequence of the occurrence of the detected failures is that before implementation, the majority of the detected failures were catastrophic in nature (66.7%); and then in most failures it is (0.00%). And the difference in the level of risk in the tailings dam is that before implementation it was high (33.3%); and then it is high (0.00%). In conclusion, it has been shown that the impact of the implementation of the tailings management protocol is significant in the risk management of the tailings dam at Pan American Silver Huaron, 2021. ($p < 0.05$).

Keywords: Administration, management, protocol, tailings dam, tailings, risks

1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

2. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

a. Autor para correspondencia: erickjesus.velasquez@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0009-5440-40490001>

b. E-mail: eguadalupeg@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9583-8807>

I. INTRODUCCIÓN

En Pan American Silver los trabajos mineros dejan restos de roca estéril dispuestos en una presa de relaves, demostrándose que las fallas en instalaciones de relaves puede ser un daño potencial para los habitantes de comunidades aledañas, trabajadores y medio ambiente, razón por la cual es muy importante el manejo seguro de las instalaciones de relaves para la producción o explotación minera, así como para los gobiernos de países con riquezas mineras, también es prioritario para las aseguradoras e inversionistas. Las operaciones de Pan American Silver, pese a su arduo esfuerzo, aún no ofrecen garantías para una gestión estable de largo plazo en relaves y otros restos mineros. (Pan American Silver, 2017).

Actualmente, se tiene un estándar alineado con las guías de seguridad de presas canadiense y el protocolo de administración de relaves que brinda las guías de mejores prácticas para las operaciones mineras. Con este estudio se propone continuar con la implementación de este protocolo y verificar su impacto en la gestión de riesgos. (Pan American Silver, 2019).

Este estudio se justifica porque la minería es una de las actividades de mayor importancia, sin embargo, el extraer metales y otros minerales genera residuos tanto sólidos como líquidos, que en concentraciones elevadas son tóxicos, lo que significa un alto riesgo para el ecosistema, así como para los trabajadores y habitantes de las comunidades cercanas. Ante esta realidad, se hace necesario la implementación del protocolo de administración de relaves, pues la hipótesis es que habrá un impacto significativo en la gestión de la relavera.

Otro estudio similar fue el de Espín, Jarrín, y Escobar (2017); donde se evidenció que el manejo de los relaves en una minera aurífera se asocia a los problemas ambientales. Se hace necesario nuevas técnicas para la reducción de infiltración de los relaves con obras civiles, recubrimientos (geomembrana).

1.1 Implementación del protocolo de administración de relaves

El objetivo fue orientar a las empresas para que se asocien y evalúen los indicadores del protocolo, cuyas expectativas fueron establecidas por The Mining Association of Canada (MAC) para el manejo de relaves. Esta evaluación es también para apoyar a las empresas asociadas para que mejoren su desempeño y capacidad de monitoreo. (The mining Association of Canada, 2020).

Es necesario la participación de un equipo profesional para que evalúe el nivel de implementación con un indicador de calidad para todo el proceso de gestión y de intervención. Para aplicar este protocolo deben tener experiencia calificada en auditoría y evaluación de sistemas, además de conocimiento y práctica en manejo de relaves.

El protocolo evalúa el nivel de implementación de sistemas de manejo de relaves para la iniciativa del programa "Hacia una Minería Sostenible" (HMS) impulsada por The Mining Association of Canada (MAC).

Indicadores de desempeño:

La Asociación Minera de Canadá (2019) señala que son cinco los indicadores de desempeño para la administración de relaves:

1. Política y compromiso en el manejo de relaves.
2. Sistema de manejo de relaves.
3. Responsabilidades y obligaciones que fueron designadas para el manejo de relaves.
4. Revisión anual del manejo de relaves.
5. Manual de operación, mantenimiento y monitoreo (OMS).

Se entiende que los miembros de la MAC ya cumplen con todos los requisitos reglamentarios y legales. (Ver Tabla 1)

1.2 Gestión de riesgos de acuerdo con el protocolo HMS

De acuerdo con The Mining Association of Canada (2019) un principio fundamental es la identificación y mitigación del riesgo en estructuras que contienen relaves.

Para evaluar el riesgo se debe complementar con una frecuencia requerida, de manera que los objetivos planteados en el manejo de relaves se cumplan por cada depósito. Previamente, se debe establecer en el depósito de relaves la vida útil (Ministerio de Energía y Minas, 1997) (ONU, 2020).

Se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Riesgo químico y físico del depósito de relaves.
- Riesgo al medio ambiente posible en el depósito de relaves como, por ejemplo, derrumbes, terremotos o avalanchas.
- Más riesgos posibles externos al propietario y depósito de relaves, en la que se deben incluir riesgos en permisos y normativa, como por ejemplo permisos incompatibles con el diseño que se propuso.

En el plan de gestión de riesgo se debe describir los resultados y objetivos de la evaluación, así como las medidas de mitigación que se implementen. Los riesgos se deben eliminar, si es posible en su totalidad, de este modo se reducen las consecuencias. que se relacionen con un evento no deseado o riesgo inminente.

Gestión de riesgos de la relavera

1.3 Metodología Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

La metodología FMEA es el análisis de modos de falla y de efectos con el que se identifican los potenciales modos de falla. Nos permite también analizar sus impactos e identificar medidas de control, que reducirán el nivel del riesgo a límites aceptables ante una ocurrencia de dichos modos de falla en la infraestructura. (Anddes Asociados SAC, 2021).

Para el desarrollo del análisis FMEA se definieron tres etapas:

Etapas de revisión de la información existente y estudios disponibles a la fecha

Para detectar los modos de falla que pudieran ser catastróficos para la integridad del depósito de relaves que potencialmente pueden impactar la vida humana, el ámbito social, medio ambiente, economía, continuidad de operación y reputación en las etapas de operación, cierre y postcierre. (Anddes Asociados SAC, 2021).

Etapas de definición de modos de falla y análisis de efectos FMEA

Se definen los criterios a evaluarse para el taller como la probabilidad de ocurrencia y consecuencia. Luego se definen los niveles de riesgo de acuerdo con el cálculo del número de prioridad del riesgo (NPR). (Anddes Asociados

SAC, 2021). Posteriormente, los principales modos de falla se incluyen en un registro, lo cual fue coordinado por Anddes, en reuniones como el pretaller, previo al taller. (Anddes Asociados SAC, 2021).

Etapas del taller FMEA

En esta etapa se desarrolla el taller de análisis de riesgos, los modos de falla identificados previamente son analizados definiendo causas, consecuencias o severidad, probabilidad de ocurrencia del efecto de cada potencial falla, incluyendo las medidas de mitigación y recomendaciones asociados a los riesgos detectados. (Anddes Asociados SAC, 2021).

Identificación de los modos de falla

Se determinan modos de falla creíble para el depósito de relaves, los cuales se listan en la Tabla 2. (Anddes Asociados SAC, 2021).

Tabla 1

Requisitos de los miembros de MAC

Se tienen cinco niveles por cada indicador de desempeño y los criterios de evaluación del desempeño de manejo de relaves	
Nivel	Criterios
C	No existen sistemas de funcionamiento donde las actividades son reactivas, ya existen los procedimientos, pero aún no se integran en sistemas de gestión y políticas.
B	Ya existen los procedimientos, sin embargo, no son consistentes y tampoco están documentadas en su totalidad; existe planificación de los sistemas de procesos y ya están siendo desarrolladas.
A	El proceso, de acuerdo con el manejo de relaves está contenido en la "Guía hacia la gestión de las instalaciones de relaves" de MAC, además de ser desarrollada ya se está implementando.
AA	Se verifica el sistema de proceso por evaluaciones o auditorías internas.
AAA	Hay excelencia en el liderazgo y las auditorías validaron las evaluaciones externas.

Nota: Guía hacia la gestión de las instalaciones de relaves (Asociación Minera de Canadá, 2019)

Tabla 2

Modos de falla creíble para el depósito de relaves

N.º	Modo de falla creíble
1	Deslizamiento de taludes
2	Falla de muro reforzado (zona sur)
3	Erosión interna del depósito de relaves (tubificación)
4	Erosión externa de la presa
5	Rebose o sobrepaso (overtopping)
6	Falta de control de parámetros operacionales del DR5

Nota: Informe FMEA (Anddes Asociados SAC, 2021).

II. MÉTODOS

El estudio fue de tipo aplicado conocido como “investigación práctica o empírica”, consiste en utilizar todo el conocimiento profesional del fenómeno (Sierra Bravo, 1994).

El diseño corresponde a un estudio no experimental, el corte en el tiempo fue longitudinal, y el diseño panel. (Hernández & Mendoza, 2018).

De acuerdo al esquema presentado;

La población de acuerdo con la definición de Kerlinger (2002) puede ser censal, es decir igual a la población. En este estudio la población y muestra fue la unidad de análisis que corresponde a la relavera N,º 5 de Pan American Silver Huaron –Pasco. Muestra: 06 análisis de modos de falla creíble de la relavera en Pan American Silver, Huaron, como vemos en la Tabla 3

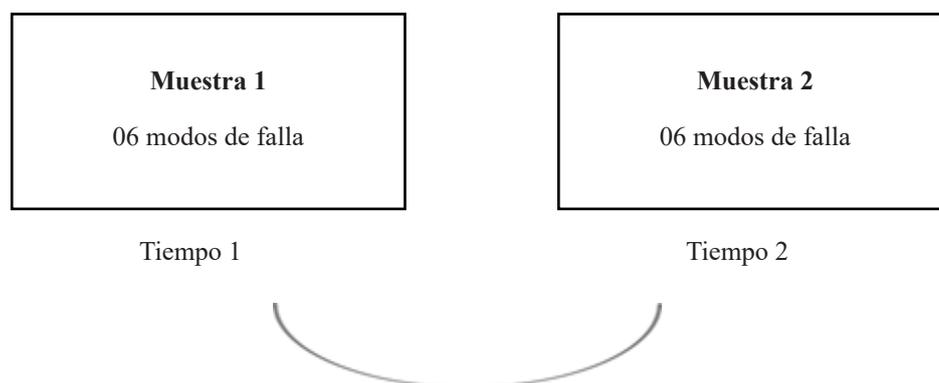


Tabla 3

Población

N.º	Modo de falla creíble	Fallas analizadas
1	Deslizamiento de taludes	03
2	Falla de muro de suelo reforzado (zona sur)	01
3	Erosión interna del depósito de relaves (tubificación)	01
4	Rebose o sobrepaso (overtopping)	01
Total		06

Nota: Informe FMEA (Anddes Asociados SAC, 2021).

III. RESULTADOS

3.1 Resultados técnicos

La implementación del protocolo de administración de relaves impacta en la gestión de riesgos de la relavera, este objetivo cumplió con la implementación de las siguientes acciones:

1. La actualización del estudio de estabilidad física de la presa de relaves es de gran importancia para determinar el estado de la cimentación, para este estudio se consideraron toma de muestras del suelo mediante calicatas y dos perforaciones en la margen izquierda de la relavera, en estas perforaciones se realizaron investigaciones geotécnicas y ensayos que determinaron que la presa de relaves es físicamente estable.
2. La definición de los niveles de alerta fue realizada por el ingeniero de registro, estos límites definidos permiten que el monitoreo tenga umbrales de alerta para tomar acciones en caso de superar el nivel de

alerta normal, gracias a estos niveles de alerta se puede verificar que el nivel freático no es un agente para que el modo de falla creíble de erosión interna se presente en la relavera.

3. La implementación de inclinómetro adicional a los cuatro existentes en la zona norte del dique de la presa de relaves era de suma importancia, ya que, de acuerdo con el perfil del macizo rocoso, es la zona donde a mayor profundidad se encuentra, y por lo tanto es una zona probable de falla. Actualmente el inclinómetro tiene 60 metros de profundidad y sus deflexiones se encuentran en nivel de alerta normal.
4. Era necesaria la adquisición de bombas de mayor capacidad, por ello se han reemplazado dos bombas de 58 HP por bombas de 75 HP y 95 HP, las cuales en conjunto evacúan 400 l/s, duplicando el caudal de las otras dos bombas; esto significa que la relavera actualmente tiene holgura en la evacuación de agua, disminuyendo que la probabilidad de ocurrencia del modo de falla por erosión interna se desencadene.

5. El control de calidad del proceso constructivo, es de suma importancia en las sucesivas etapas de recrecimiento de la relavera y es necesario un dossier de calidad del cumplimiento de los parámetros de construcción de la relavera, Pan American Silver Huaron tiene un dossier de calidad, donde se encuentran los ensayos realizados en las sucesivas capas que conforman el dique, garantizando que el proceso constructivo se lleve a cabo cumpliendo el diseño de construcción, ello conlleva a disminuir la probabilidad de ocurrencia del modo de falla de deslizamiento de taludes.
6. Se incrementó el número de hitos de control topográfico de 19 en la cota 4 452 m.s.n.m. a 41 hitos en la cota 4 455 m.s.n.m.; este instrumento geotécnico nos proporciona los desplazamientos horizontales y verticales del dique de la presa de relaves y muro de suelo reforzado, actualmente estos desplazamientos y sus velocidades se encuentran en el nivel de alerta normal, por lo que se concluye que el modo de falla de erosión interna del depósito no desencadenaría una catástrofe aguas abajo de la relavera.
7. Se han automatizado los acelerógrafos, actualmente la relavera tiene dos acelerógrafos con lecturas automatizadas y los reportes acelerográficos en tiempo real; tener esta información ayudará a tomar decisiones de operación, el ingeniero de registro (EoR) definió umbrales de aceleración para la presa de relaves. Al superar el umbral se tomarán las acciones predefinidas en el plan de preparación y respuesta a emergencias.
8. Proteger con geomembrana la cara interna de la estructura suelo reforzado, la cara interna del muro de suelo reforzado está en contacto con el espejo de agua formado en la zona sur de la presa de relaves, al ser este muro una acumulación de tierra compactada en geoceldas, era necesaria su impermeabilización para evitar su colapso; este muro colinda con una vía nacional, su colapso pone en riesgo el tránsito de personas y la afectación probable de vidas. Actualmente este muro se encuentra impermeabilizado desde una base cimentada hasta la parte superior, con ello se garantiza que la falla de muro de suelo reforzado en la zona sur no se presente, además para controlar la infiltración y desplazamientos horizontales y verticales se han implementado dos sensores de cuerda vibrante automatizados y seis hitos de control topográfico.
9. Elevación de la captación del canal de emergencia a la cota 4 455 m.s.n.m., evita el modo de falla de rebose o sobrepaso por causa de precipitaciones mayores a la PMP (precipitación máxima probable) por lo tanto elevar la zona de captación era necesario, se realizó el recrecimiento de la zona de captación a la misma cota de recrecimiento de la corona con una ventana de un metro por debajo, para que en caso se presente una PMP el agua no desborde por la corona sino que las aguas sean derivadas al canal de emergencia.
10. El plan de preparación y respuesta a emergencias ha sido alineado para dar respuesta a todos los modos de falla creíble, este documento describe las acciones a tomar en caso se pierda el control de uno o varios parámetros operativos o cuando los monitoreos de la instrumentación geotécnica presenten información anómala, con ello cerramos el círculo para no solo identificar y controlar los modos de falla sino también responder adecuadamente en caso de una emergencia.
- Estas diez acciones concretas han permitido gestionar el riesgo en la presa de relaves y cumplir el objetivo de la investigación.

Tabla 4Resumen de los valores de *t* de student y significancia de las dimensiones de gestión de riesgos

Dimensiones	Valor de <i>t</i> de student	Significancia (p valor)	Conclusión
Probabilidad de ocurrencia	-2.712	($p=0.042 < 0.05$)	Disminución significativa
Consecuencia de ocurrencia	-3.606	($p=0.015 < 0.05$)	Disminución significativa
Evaluación de riesgo	-2.712	($p=0.005 < 0.05$)	Disminución significativa

Nota: Se observan los valores de disminución significativa para probabilidad de ocurrencia ($t=-2.712$; $p=0.042 < 0.05$), para consecuencia de ocurrencia ($t=-3.606$; $p=0.015 < 0.05$) y para evaluación de riesgo ($t=-2.712$; $p=0.005 < 0.042$).

Tabla 5*T* de student para diferencia de la probabilidad ocurrencia de falla creíble

	Diferencias emparejadas				t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia			
Probabilidad Después - Probabilidad Antes	-,833	,753	,307	-1,623 -,043	-2,712	5	0,042

Nota: La tabla muestra que el valor de *t* negativo (-2,712) indica que la media de la probabilidad de ocurrencia de falla creíble ha disminuido y ($p=0.042 < 0.05$) que es significativa.

Tabla 6*T de student para diferencia de la consecuencia ocurrencia de falla creíble*

	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	Inferior	Superior			
Consecuencias Después - Consecuencias Antes	-2,167	1472	,601	-3,711	-,622	-3,606	5	0,015

Nota: La tabla muestra que el valor de t negativo (-3,606) indica que la media de la consecuencia ocurrencia de falla creíble ha disminuido y ($p=0.015 < 0.05$) que es significativa.

Tabla 7*T de student para diferencia del nivel de riesgos*

	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	Inferior	Superior			
Nivel Riesgo Después – Nivel Riesgo Antes	-,833	,753	,307	-1,623	-,043	-2,712	5	0,042

Nota: La tabla muestra que el valor de t negativo (-2,712) indica que la media del nivel de riesgo ha disminuido y ($p=0.042 < 0.05$) que es significativa.

IV. DISCUSIÓN

La investigación ha demostrado que el impacto de la implementación del protocolo de administración de relaves es significativo en la gestión de riesgos de la relavera en Pan American Silver Huarón, 2021. ($p < 0.05$).

Un estudio similar fue el de Castro (2018); donde la sensibilidad al ser analizada encuentra, que sin importar cual sea el nivel de tratamiento de relaves, se debería implementar la planta de filtros.

Otro estudio similar fue el de Espín, Jarrín, y Escobar (2017); donde se evidenció que el manejo de los relaves se asocia a los problemas ambientales en una minera aurífera. Se hace necesario nuevas técnicas para la reducción de infiltración de los relaves con obras civiles, recubrimientos (geomembrana).

Por su lado, la teoría menciona que la gestión de riesgo viene a ser el conocimiento, el manejo de riesgos y su evaluación en bien de la mejora para tomar decisiones en una empresa o compañía minera. (Anddes Asociados SAC, 2021). Se demostró en esta investigación que el conocimiento y evaluación de la gestión de riesgos disminuyó el nivel de riesgo de la relavera por lo que la toma de decisiones podrá llevarse adelante por la claridad de los resultados

V. CONCLUSIONES

Se ha determinado que la implementación del protocolo de administración de relaves tuvo un impacto significativo en la gestión de riesgos de la relavera en Pan American Silver Huarón, 2021. ($p < 0.05$), así como en la disminución de la probabilidad ocurrencia de falla ($t=-2.712$; $p=0.042 < 0.05$), con una probabilidad de ocurrencia de las fallas detectadas que antes era raro en 33.3% y después de la implementación es raro en 83.3%.

También la implementación del protocolo de administración de relaves tuvo un impacto significativo en la disminución de la consecuencia de ocurrencia de falla creíble ($t=-3.606$; $p=0.015 < 0.05$). Donde, la diferencia es que antes era en la mayoría de las fallas detectadas catastrófico (66.7%); mientras que después de la implementación en la mayoría de las fallas detectadas de carácter catastrófico es de (0.00 %).

Finalmente, la implementación del protocolo de administración de relaves tuvo un impacto significativo en la disminución del nivel de riesgos. ($t=-2.712$; $p=0.005 < 0.042$), la diferencia en el nivel de riesgo en la relavera es que antes de la implementación era alto (33.3%); mientras que después de la implementación el nivel de riesgo alto es (0.00%).

VI. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al asesor de la investigación por su apoyo para lograr los objetivos trazados en la investigación.

mining.ca/wp-content/uploads/2019/02/TSM-Primer-Spanish-Web.pdf.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses

VII. REFERENCIAS

- Anddes Asociados SAC. (2021). Informe FMEA. Perú.
- Anddes Asociados SAC. (2021). Ingeniero de registro. Perú.
- Asociación Minera de Canadá. (2011). Protocolo de evaluación de manejo de relaves. [Archivo PDF]. https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/02/TSM_Tailings_Management_Protocol_with_Checklist_December_2011_SP.pdf.
- Asociación Minera de Canadá. (2019). Guía para el manejo de depósitos de relaves.
- Castro, M. (2018). Nuevas tecnologías para el uso y disposición de relaves mineros aplicado a Codelco, división el teniente. Chile: http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/3592/4/Tesis_Nuevas_tecnologias_para_el_uso_y_disposicion_de_relaves.Image.Marked.pdf.
- Espín, D., Jarrín, J., & Escobar, O. (2017). Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto Río Blanco. Ecuador. Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa.
- Hernández, C., Fernández, & Baptista. (2014). Metodología de la investigación. Colombia: Editorial Mc. Graw Hill.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Mc Graw Hill.
- Kerlinger, F. (2002). Enfoque conceptual de la investigación del comportamiento. México: Editorial Interamerican.
- Ministerio de Energía y Minas. (1997). Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relaveminero.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas. Programa de medio ambiente. (2020). Nuevo estandar para empresas mineras ayudará a mejorar la seguridad de las instalaciones de relaves. <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/nuevo-estandar-para-empresas-mineras-ayudara-mejorar-la>.
- Pan American Silver. (2017). Relaves y gestión de residuos. <https://www.panamericansilver.com/sustainabilityreport2017/spanish/medio-ambiente/relaves-gestion-residuos/>.
- Pan American Silver. (2019). Reporte de sostenibilidad [Archivo PDF]. <https://www.panamericansilver.com/assets/documents/2019-Resumen-Ejecutivo.pdf>.
- Sierra Bravo, R. (1994). Técnica de investigación social. Editorial Paraninfo S.A.
- The mining Association. (2020). Hacia una minería sostenible. <https://mining.ca/towards-sustainable-mining/hacia-una-mineria-sostenible/>.
- The Mining Association of Canada. (2019). Hacia una minería sostenible 101: Manual básico [Archivo PDF]. <https://>