

Causas y Consecuencias de la Falla de la Presa de Relaves en la Mina de Oro El Corazón de Agroindustrial el 4 de Noviembre de 2023, Provincia de Imbabura, Norte de Ecuador

Steven H. Emerman, Malach Consulting, 785 N 200 W, Spanish Fork, Utah 84660, USA,
E-mail: SHEmerman@gmail.com, Tel: 1-801-921-1228

Informe elaborado a solicitud de Asociación de Propietarios de Tierras Rurales del Norte y Frente Antiminero, presentado el 10 de junio de 2024

RESUMEN BREVE

El 4 de noviembre de 2023, una presa de relaves falló en la mina de oro El Corazón de Agroindustrial en la provincia de Imbabura, al norte de Ecuador, liberando relaves de grano fino y agua rica en cianuro en los cursos de agua aguas abajo. Una muestra de agua recolectada por un residente local en el punto de descarga mostró una concentración de cianuro total de 60,8 mg/L (más de 600 veces el límite máximo permisible de 0,1 mg/L). Por el contrario, las muestras de agua recolectadas por Agroindustrial desde el punto de descarga hasta 884 metros aguas abajo los días 4 y 6 de noviembre oscilaron entre 0,303 y 0,009 mg/L, mientras que las muestras recolectadas por la consultora GRUNTEC el 10 de noviembre oscilaron entre 0,009 mg/L y <0,001 mg/L. Dado que los análisis de GRUNTEC midieron sólo cianuro libre, que puede ser tan sólo el 1% del cianuro total, y Agroindustrial no aclaró lo que se midió, sus mediciones no pueden mostrar el cumplimiento de los estándares ecuatorianos. Además, el mapa, las coordenadas y las descripciones de los sitios son contradictorios, por lo que los conjuntos de datos de Agroindustrial y GRUNTEC deben considerarse totalmente inválidos. La causa próxima de la falla de la presa de relaves fue un desgarramiento en la geomembrana seguido de una erosión interna del terraplén exterior. La causa fundamental fue un diseño inadecuado, incluido un terraplén excesivamente empinado, la falta de un sistema de drenaje que obligaría al agua a salir por el pie de la presa y la falta de destrucción del cianuro antes de su depósito en la piscina de relaves. Se debe suponer que es probable que se produzcan fallas en el futuro porque cualquier desgarramiento adicional en una geomembrana tendrá el mismo resultado, con la posibilidad de impactos catastróficos en los peces, las especies acuáticas y el ganado.

RESUMEN EJECUTIVO

La madrugada del 4 de noviembre de 2023, una presa de relaves falló en la mina de oro El Corazón de Agroindustrial en la provincia de Imbabura, al norte de Ecuador, liberando relaves de grano fino y agua rica en cianuro en los cursos de agua aguas abajo. Los relaves y el agua se almacenaron en 20 piscinas de relaves sustentados por geomembranas impermeables y rodeados por presas de tierra. La falla se produjo en la Piscina Nro. 15, la cual se ubica a menos de 15 metros de la quebrada Los Monos, en violación de las regulaciones que exigen una separación de 30 metros de las corrientes. La quebrada Los Monos desemboca en la quebrada Verde Chico y luego en el río Verde, antes de unirse con el río Guayllabamba y luego desembocar en el río Esmeraldas y el océano Pacífico. Se observó un color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico, afluente del río Guayllabamba, el día de la falla de la presa de relaves, aunque no está claro el camino hidráulico desde la Piscina Nro. 15 hasta el río Manduriaco Chico. El mismo color verde

grisáceo también apareció repentinamente el 9 de junio de 2023. Los residentes locales creían que la muerte de 13 cabezas de ganado en 2020 se debió a un envenenamiento por cianuro.

Un residente local recogió una muestra de agua en el punto de descarga de la Piscina Nro. 15 el día en que falló la presa de relaves. El análisis de la muestra mostró una concentración de cianuro total de 60,8 mg/L (más de 600 veces el límite máximo permisible en Ecuador de 0,1 mg/L). Otras excedencias incluyeron la concentración de arsénico de 0,750 mg/L, la concentración de cobre de 1,88 mg/L, la concentración de hierro de 136 mg/L, la concentración de manganeso de 4,20 mg/L y la concentración de mercurio de 0,034 mg/L, las cuales son 7,5 veces, 1,88 veces, 13,6 veces, 2,1 veces y 6,8 veces los respectivos límites máximos permisibles en Ecuador. Por el contrario, la empresa minera recolectó cuatro muestras de agua en cada de los días 4 y 6 de noviembre en el punto de descarga (PM1), 391 metros aguas abajo (PM2), 581 metros aguas abajo (PM3) y 884 metros aguas abajo (PM4), y midió concentraciones de cianuro que varían desde 0,303 mg/L en el punto de descarga hasta 0,009 mg/L en el punto más alejado aguas abajo. El 10 de noviembre, la consultora GRUNTEC recolectó una muestra de agua a 200 metros aguas abajo del punto de descarga (P1) y en tres puntos adicionales P2, P3 y P4, idénticos a PM2, PM3 y PM4, respectivamente. El análisis de las muestras de GRUNTEC mostró concentraciones de cianuro libre <0,001 mg/L en los puntos P1 y P2, 0,012 mg/L en P3 y 0,009 mg/L en P4 sin exceder ningún límite máximo permisible, incluidos arsénico, cobre, hierro, manganeso y mercurio.

El objetivo de este informe fue responder las siguientes preguntas con respecto a la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón:

- 1) ¿Por qué existen discrepancias entre los análisis químicos de la muestra de agua recolectada por un residente local y las muestras recolectadas por Agroindustrial y GRUNTEC?
- 2) ¿Podría el incidente anterior de muerte de ganado haber sido resultado de envenenamiento por cianuro?
- 3) ¿Cuál es la causa del color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico?
- 4) ¿Fueron las fuertes lluvias un factor que contribuyó a la falla de la presa de relaves?
- 5) ¿Cuál fue la causa inmediata de la falla de la presa de relaves?
- 6) ¿Cuál fue la causa fundamental de la falla de la presa de relaves?
- 7) ¿Están actualmente estables las presas de relaves en la Piscina Nro. 15?
- 8) ¿Se ha eliminado la posibilidad de que se produzcan más fallas en las presas de relaves?

Para facilitar la lectura por parte de no especialistas, este informe incluye un tutorial sobre aspectos clave del procesamiento de mineral de oro, incluido el uso de cianuro, los documentos de orientación de la industria del Código Internacional del Cianuro y de los Principios de la Minería de Oro Responsable, las distinciones entre cianuro libre, cianuro WAD y cianuro total, el almacenamiento de relaves de oro piscinas de relaves, los mecanismos de falla de las presas de relaves y la distinción entre las causas proximales y fundamentales de las fallas de las presas de relaves.

La razón fundamental de las discrepancias entre las concentraciones de cianuro de la muestra de agua recolectada por un residente local y las muestras recolectadas por Agroindustrial y GRUNTEC es que la muestra de la comunidad analizó correctamente el cianuro total, mientras que GRUNTEC analizó sólo el cianuro libre. Las concentraciones de cianuro libre pueden ser tan pequeñas como el 1% de las concentraciones de cianuro total, por lo que las concentraciones de cianuro libre no pueden usarse para demostrar el cumplimiento de las regulaciones ecuatorianas que se basan en concentraciones de cianuro total. Agroindustrial no precisó si analizaron la concentración de cianuro libre o total o alguna otra medida de concentración de cianuro. Una

consideración adicional es que en realidad se desconoce la ubicación de los puntos de muestreo de Agroindustrial y GRUNTEC. Se comparó un mapa croquis de Agroindustrial con imágenes de Google Earth para determinar las coordenadas de los puntos de muestreo. Las coordenadas medidas no se correspondieron con las coordenadas declaradas por Agroindustrial con desajustes de 18 metros, 392 metros, 206 metros y 535 metros, para los puntos P1, P2, P3 y P4, respectivamente. Además, Agroindustrial indicó con ultra precisión las distancias medidas a lo largo del curso de la corriente como 678,45 metros desde PM1 (punto de descarga) a P2 (igual que PM2), 1017,24 metros desde PM1 a P3 (igual que PM3) y 2767,85 metros desde PM1 a P4 (igual que PM4), que son mucho mayores que las distancias medidas reales de 391 metros, 581 metros y 884 metros, respectivamente. La numeración de los puntos de muestreo se modifica en varios lugares del informe de Agroindustrial, pero ajustar la numeración no resuelve ninguna de las contradicciones anteriores. Una consideración final es que GRUNTEC recolectó muestras de agua seis días después de la falla de la presa de relaves, lo que dejó tiempo suficiente para que el pulso de agua contaminada migrara río abajo o para que el cianuro desapareciera de la columna de agua por precipitación, oxidación, volatilización, fotodisociación o biodegradación. En resumen, debido a la medición de los parámetros incorrectos al menos por parte de GRUNTEC, la falta de conocimiento de los lugares de muestreo por parte de Agroindustrial y GRUNTEC, y el tiempo transcurrido hasta la recolección de muestras por parte de GRUNTEC, los conjuntos de datos de Agroindustrial y GRUNTEC deben considerarse totalmente inválidos.

Dado un peso típico de ganado de 1000 kilogramos, un consumo típico de agua de 0,06 litros por kilogramo por día y la concentración de cianuro total que se midió en la reciente falla de presa de relaves (60 mg/L), la carga diaria de cianuro para una vaca que bebe agua contaminada con cianuro aguas abajo de la mina El Corazón sería de 3,6 mg/kg. Dado que la dosis letal para los grandes rumiantes es de 2 mg/kg, es posible que las recientes muertes de ganado se debieran a envenenamiento por cianuro. Sin embargo, no se puede determinar una causa definitiva de muerte sin más información. Dado que la Unidad Tortugo, la unidad geológica que alberga el yacimiento que es explotado por la mina El Corazón, tiene un color verde grisáceo, es probable que la aparición repentina de un color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico luego de la falla de la presa de relaves el 4 de noviembre de 2023 haya sido el resultado de la introducción de relaves de grano fino al río. También es posible que las apariciones anteriores de un color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico fueran el resultado de fallas no documentadas en presas de relaves. Hay muchas fuentes de coloración en las corrientes, por lo que no se puede determinar una causa definitiva de los cambios repentinos de color sin más información. Un factor que complica la situación es la falta de un camino hidráulico claro entre la Piscina Nro. 15 y el río Manduriaco Chico.

La posibilidad de fuertes lluvias antes de la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón fue examinada con base en datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de La Concordia (69 kilómetros al suroeste), Izobamba (73 kilómetros al sur-sureste), San Gabriel (116 kilómetros al noreste), y San Luis en Colombia (141 kilómetros al noreste), que son las estaciones meteorológicas más cercanas incluidas en la base de datos del (EE. UU.) Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC). Existen 11 estaciones meteorológicas en la base de datos del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) que se encuentran en un radio de 50 kilómetros de la mina El Corazón, incluyendo Apuela (33,5 kilómetros), Calacali (43,7 kilómetros), Chontal Bajo (6,9 kilómetros), García Moreno (19,8 kilómetros), Gualsaqui (44,2 kilómetros), Inguincho (44,7 kilómetros), Nanegalito (26,2 kilómetros), Nono (45,6 kilómetros), Pimampiro (20,5 kilómetros), San José de Minas (46,9 kilómetros) y Selva Alegre (25,2

kilómetros). En la actualidad, no hay datos disponibles de las 11 estaciones meteorológicas anteriores a 2013. Si el INAMHI responde a una solicitud de datos recientes de las 11 estaciones meteorológicas cercanas a la mina El Corazón, este informe se actualizará en consecuencia.

Gran parte de la información de la Auditoría Ambiental de 2020-2022 de la mina El Corazón realizada por Agroindustrial es inconsistente con la información disponible de otras fuentes, siendo la información meteorológica sólo un ejemplo. La Auditoría Ambiental señala que existen cinco estaciones meteorológicas (Apuela, Chontal Bajo, García Moreno, Inguincho, Selva Alegre) en las cercanías de la mina. Sin embargo, las estaciones meteorológicas de Calacali, Gualsaqui, Nanegalito y Pimampiro están todas más cerca que la estación meteorológica de Inguincho, y la estación meteorológica de Pimampiro está más cerca que la estación meteorológica de Selva Alegre. La Auditoría Ambiental además indica incorrectamente la ubicación de las estaciones meteorológicas en Chontal Bajo, García Moreno y Selva Alegre. La ubicación declarada de Chontal Bajo está a 9,4 kilómetros al oeste-suroeste de la ubicación correcta, mientras que la ubicación declarada de Selva Alegre está a 5,8 kilómetros al oeste-suroeste de la ubicación correcta. Finalmente, la elevación indicada de la estación meteorológica de Selva Alegre es de 1950 metros sobre el nivel del mar, mientras que la elevación correcta es de 1800 metros sobre el nivel del mar. En este informe no se hizo ningún intento de documentar toda la información de la Auditoría Ambiental que fuera inconsistente con la información disponible en otras fuentes.

Los datos de precipitación disponibles no son concluyentes en cuanto a si las fuertes lluvias podrían haber sido un factor que contribuyó a la falla de la presa de relaves. Septiembre y octubre fueron meses inusualmente húmedos en la estación de La Concordia, mientras que los primeros días de noviembre fueron inusualmente secos. Septiembre fue inusualmente húmedo y octubre inusualmente seco en la estación de Izobamba, mientras que se observó el patrón opuesto en las estaciones de San Gabriel y San Luis. Se sabe que no hubo precipitaciones en el sitio de la mina El Corazón durante la noche del 3 al 4 de noviembre. A pesar de la anterior falta de evidencia concluyente, cabe señalar que las fuertes lluvias no pueden ser la causa fundamental de la falla de una presa de relaves porque, según las regulaciones ecuatorianas, las presas de relaves deben estar diseñadas para soportar fuertes lluvias, excepto los eventos de precipitaciones más raras y extremas, como una tormenta de 1000 años.

La causa más probable de la falla de la presa de relaves fue un desgarramiento en la geomembrana seguido de una erosión interna del terraplén exterior, en la que el agua fluye tan rápido a través del terraplén que arrastra partículas sólidas, lo que puede resultar en la pérdida de la integridad estructural de la presa. El caudal a través de la presa de relaves de la Piscina Nro. 15 se midió en aproximadamente 2,5 litros por segundo el 4 de noviembre, con casi el mismo caudal medido el 6 y 7 de noviembre. Según técnicos de Agroindustrial, el mismo caudal persistía desde agosto de 2020 y el único cambio, el 4 de noviembre de 2023, fue la aparición de partículas sólidas en el agua que escapaba de la piscina de relaves. La observación anterior es inquietante porque implica que la presa de relaves había estado en un estado de falla continua durante más de cuatro años, lo que significa que se estaba liberando agua tóxica en cursos de agua aguas abajo sin tratamiento. Según el relato anterior, la erosión interna se inició durante la noche del 3 al 4 de noviembre, lo que podría haber provocado una falla catastrófica de la presa y la liberación de gran parte del contenido de la piscina de relaves si no se hubieran tomado medidas de emergencia para bajar el nivel del agua en la piscina.

La causa fundamental de la falla de la presa de relaves fue un diseño inadecuado porque una geomembrana impermeable no debería ser la única línea de defensa contra la falla. El primer

elemento de diseño inadecuado es que la inclinación del terraplén exterior debería haber sido mucho menor para alargar el camino hidráulico y disminuir la velocidad del flujo de agua a través del terraplén. Las fotos muestran que las inclinaciones de los terraplenes que rodean la Piscina Nro. 15 son aproximadamente 1V: 1H (1 metro vertical por 1 metro horizontal) o 45° desde la horizontal. Por el contrario, muchos documentos de orientación, como los del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU., recomiendan inclinaciones no superiores a 1V: 5H (11° desde la horizontal) para evitar fallas por erosión interna. De hecho, una inclinación de 1V: 1H se considera el ángulo crítico máximo para evitar la erosión interna, por lo que las presas de relaves en la mina El Corazón siempre han estado a la cúspide de falla. Una pendiente máxima de 1V: 3H (18° desde la horizontal) también se considera un ángulo máximo para garantizar la estabilidad de la pendiente y evitar la erosión de la superficie. El segundo elemento de diseño inadecuado es que el terraplén exterior debe incluir una combinación de un drenaje vertical y un drenaje horizontal para forzar la salida de cualquier filtración por el pie de la presa. Por el contrario, el flujo a través de la presa de relaves el 4 de noviembre apareció alto en la cara del terraplén. Finalmente, para minimizar las consecuencias de la falla, no debe haber cianuro presente en la piscina de relaves, lo que significa que todo el cianuro debe destruirse antes de que los relaves húmedos se depositen en la piscina de relaves.

Según un informe de inspección posterior a la falla del Ministerio del Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), las piscinas de relaves que rodean la Piscina Nro. 15 se encuentran actualmente estables. Sin embargo, esto fue sólo una evaluación visual sin justificación ni explicación de cómo debía entenderse la palabra “estable”. Aunque las regulaciones ecuatorianas sobre presas de relaves aclaran que la estabilidad física se refiere a la capacidad de operar en las condiciones de diseño con un factor de seguridad aceptable, no se realizó ninguna evaluación del factor de seguridad. De hecho, las regulaciones ecuatorianas describen con considerable detalle los pasos apropiados para evaluar el factor de seguridad, así como otros aspectos de la estabilidad de la presa de relaves. Es preocupante que haya tan poca información disponible sobre las presas de relaves en la mina El Corazón, incluyendo información tan básica como el material de construcción. En particular, las 432 páginas de la Auditoría Ambiental de 2020-2022 ni siquiera mencionan la existencia de piscinas de relaves o presas de relaves.

En la actualidad, no se han tomado medidas significativas para evitar más fallas en las presas de relaves en la mina El Corazón. Según el diseño actual, cualquier desgarramiento adicional en las geomembranas de cualquiera de las piscinas de relaves probablemente progresará hacia una erosión interna con la posibilidad de una falla catastrófica y la liberación de la mayor parte del contenido de una piscina de relaves. Aunque los volúmenes de las piscinas de relaves son relativamente pequeños (por ejemplo, alrededor de 50.000 metros cúbicos para la Piscina Nro. 15) en comparación con las piscinas de relaves de la mina Mirador o de la mina Fruta del Norte, se debe tener en cuenta la toxicidad de las piscinas al evaluar las posibles consecuencias de una falla catastrófica. Por ejemplo, en 2000 una falla de la presa de relaves en la mina de oro Aurul cerca de Baia Mare, Rumania, liberó 100.000 metros cúbicos de agua rica en cianuro (aproximadamente el doble del volumen de una piscina de relaves en la mina El Corazón). El derrame de agua rica en cianuro fluyó a través de los ríos Somes y Tisza hasta el río Danubio y hasta el mar Negro, provocando una matanza masiva de peces y la destrucción de especies acuáticas. Por analogía, una futura falla catastrófica de una presa de relaves en la mina El Corazón podría tener impactos catastróficos en los peces, las especies acuáticas y el ganado entre la mina y el océano Pacífico.

Este informe hace las siguientes recomendaciones:

- 1) Se deben realizar auditorías completas de seguridad de presas para todas las presas de relaves en la mina El Corazón, de acuerdo con las regulaciones de presas de relaves ecuatorianas.
- 2) Todas las presas de relaves en la mina El Corazón que no sean estables, según lo define en las regulaciones ecuatorianas, deben reforzarse adecuadamente para lograr estabilidad.
- 3) Todas las presas de relaves en la mina El Corazón que no puedan reforzarse adecuadamente para lograr estabilidad deben cerrarse de manera permanente y segura, lo que probablemente implicaría la transferencia de los relaves de oro a un lugar seguro.
- 4) Todas las presas de relaves en la mina El Corazón que violen la separación requerida de una corriente de 30 metros, incluido la Piscina Nro. 15, deben cerrarse de manera permanente y segura, lo que probablemente implicaría la transferencia de los relaves de oro a un lugar seguro.
- 5) Deben realizarse investigaciones para determinar las conexiones hidráulicas entre las piscinas de relaves y las corrientes locales, incluidos estudios de Lidar de alta precisión y el uso de trazadores químicos, incluidos isótopos estables de agua.
- 6) El procesamiento adicional de mineral y la producción adicional de relaves deben cesar hasta que se hayan completado los pasos anteriores.
- 7) Cualquier procesamiento futuro de mineral y producción futura de relaves debe incluir la destrucción del cianuro antes de la deposición de relaves húmedos en piscinas de relaves. De acuerdo con los requisitos de la Unión Europea, el cianuro debe destruirse al nivel más bajo posible utilizando las mejores técnicas disponibles y no más de 10 mg/L de cianuro WAD (Disociable con Ácido Débil).
- 8) Se debe esperar que Agroindustrial se convierta en una empresa signataria del Código Internacional del Cianuro.
- 9) Se debe esperar que Agroindustrial cumpla con todos los requisitos de los Principios de la Minería de Oro Responsable, los cuales fueron desarrollados por el Consejo Mundial del Oro y que incorporan el Código Internacional del Cianuro.
- 10) Se debe esperar que Agroindustrial cumpla plenamente con los requisitos del Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera como mínimo e, idealmente, con los requisitos más estrictos de La Seguridad ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves.

CONTENIDOS

RESUMEN RÁPIDO	1
RESUMEN EJECUTIVO	1
PERSPECTIVA GENERAL	8
<i>Falla de la Presa de Relaves</i>	8
<i>Muestreo de Agua por parte de la Comunidad, la Empresa Minera y sus Consultores</i>	14
<i>Objetivos Preliminares</i>	19
TUTORIAL SOBRE PROCESAMIENTO DE MINERAL DE ORO	19
<i>Uso de Cianuro para Procesar Mineral de Oro</i>	19
<i>Relaves y Piscinas de Relaves de Oro</i>	22
<i>Código Internacional del Cianuro y Principios de la Minería de Oro Responsable</i>	23
<i>Cianuro Libre, Cianuro WAD y Cianuro Total</i>	27
<i>Mecanismos de Falla de Presas de Relaves</i>	29
<i>Causas Próximas y Fundamentales de las Fallas en las Presas de Relaves</i>	34
RESUMEN DE PISCINAS DE RELAVES EN LA MINA DE ORO EL CORAZÓN	35
RESUMEN DE FALLA DE PRESA DE RELAVES EL 4 DE NOVIEMBRE DE 2023	39
<i>Cambios en la Coloración de las Corrientes y Muertes Previas de Ganado</i>	39
<i>Contención de la Falla e Intento de Reparación de la Presa Fallada</i>	44
METODOLOGÍA	46
RESPUESTAS	57
<i>Los Datos de Cianuro de la Empresa y sus Consultores no son Válidos</i>	57
<i>Las Muertes de Ganado podrían haber Resultado del Envenenamiento con Cianuro</i>	59
<i>El Color de las Corrientes Afectadas se debe a los Relaves de Grano Fino</i>	59
<i>La Falla de la Presa de Relaves no fue Precedida por Fuertes Lluvias</i>	60
<i>La Causa Próxima de la Falla de la Presa de Relaves fue la Erosión Interna</i>	67
<i>La Causa Fundamental de la Falla de la Presa de Relaves fue un Diseño Inadecuado</i>	68
<i>No hay Indicios de que las Presas de Relaves Existentes sean Estables</i>	71
DISCUSIÓN: SON PROBABLES OTRAS FALLAS EN LAS PRESAS DE RELAVES	74
CONCLUSIONES EN RESUMEN	76
RECOMENDACIONES	77
SOBRE EL AUTOR	78
REFERENCIAS	79

PERSPECTIVA GENERAL

Falla de la Presa de Relaves

En la madrugada del 4 de noviembre de 2023, una presa de relaves falló en la mina de oro subterránea El Corazón de Agroindustrial en la provincia de Imbabura, al norte de Ecuador, liberando relaves de grano fino y agua rica en cianuro en las corrientes aguas abajo (Agencia de Prensa Minera, 2023; Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a-b; Municipio de Cotacachi, 2023a) (ver Figs. 1-4). Los relaves de oro se almacenaron en 20 piscinas de relaves sustentados por geomembranas impermeables y rodeados por presas de tierra (ver Figs. 4-5) (Municipio de Cotacachi, 2023a). La falla ocurrió a partir de la Piscina Nro. 15, la cual se ubica a menos de 15 metros de la quebrada Los Monos (ver Fig. 4). La quebrada Los Monos desemboca en la quebrada Verde Chico y luego en el río Verde, antes de unirse con el río Guayllabamba y luego fluir hacia el río Esmeraldas y el océano Pacífico (ver Fig. 3).

La proximidad de la Piscina Nro. 15 a una corriente aguas abajo ha sido una violación de las regulaciones del cantón de Cotacachi, en el que se encuentra la mina El Corazón (ver Fig. 3). De acuerdo con un Informe Técnico por el Municipio de Cotacachi (2023a), “La piscina 15 ha sido construida a menos de 15 metros de la quebrada los monos, afluente de la Quebrada Verde Chico que desemboca en el Río Verde ... Se evidenció que la piscina de relave minero número 15 está construida a pocos metros de la Quebrada Los Monos”. El Municipio de Cotacachi (2023a) continúa, “Conforme lo estipula la ‘ORDENANZA SUSTITUTIVA QUE DELIMITA, REGULA, AUTORIZA Y CONTROLA EL USO DE RIBERAS Y LECHOS DE RÍOS, LAGOS Y LAGUNAS, QUEBRADAS, CURSOS DE AGUA, ACEQUÍAS Y SUS MÁRGENES DE PROTECCIÓN EN EL CANTÓN SANTA ANA DE COTACACHI’, en su Art. 12, Inciso 5, donde se establece que: ‘...los márgenes de todos los ríos y quebradas del cantón, tendrán una zona de protección según establece el PDOT cantonal: para la Zona de Intag 30 metros para ríos’ ... la empresa minera está incumpliendo con lo que establece la presente normativa ... por lo que deberá tomar acciones inmediatas, a fin de dar cumplimiento a la Ordenanza vigente” (mayúsculas en el original). La Zona de Intag que menciona la ordenanza es una zona montañosa de la provincia de Imbabura. Toda la parroquia García Moreno, en la que se ubica la mina El Corazón, está incluida dentro de la Zona de Intag. Un ingeniero del Municipio de Cotacachi confirmó a la Defensoría del Pueblo del Ecuador (2024) que “es común que en las concesiones mineras no consideren las ordenanzas que constituyen normativa local, en cuanto la distancia que deben conservar de quebradas, ríos o lagos”.

Según reporte de Agencia de Prensa Minera (2023), la piscina de relaves “explotó”. Agroindustrial El Corazón S.A. (2023c) calificó la noticia en Agencia de Prensa Minera (2023) como “sensacionalista” y la palabra “fuga” fue preferida en los informes de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), así como por MAATE (2023a-b) y MEM (2023). El Municipio de Cotacachi (2023, 2024) prefirió el término “filtración”, que también fue utilizado ocasionalmente en los informes de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), MAATE (2023a-b) y MEM (2023). Aunque se produjeron fugas y filtraciones, el término técnico en la literatura sobre seguridad de presa para el incidente es “falla”, y el incidente del 4 de noviembre se denominará “falla de la presa de relaves” en el resto de este informe.

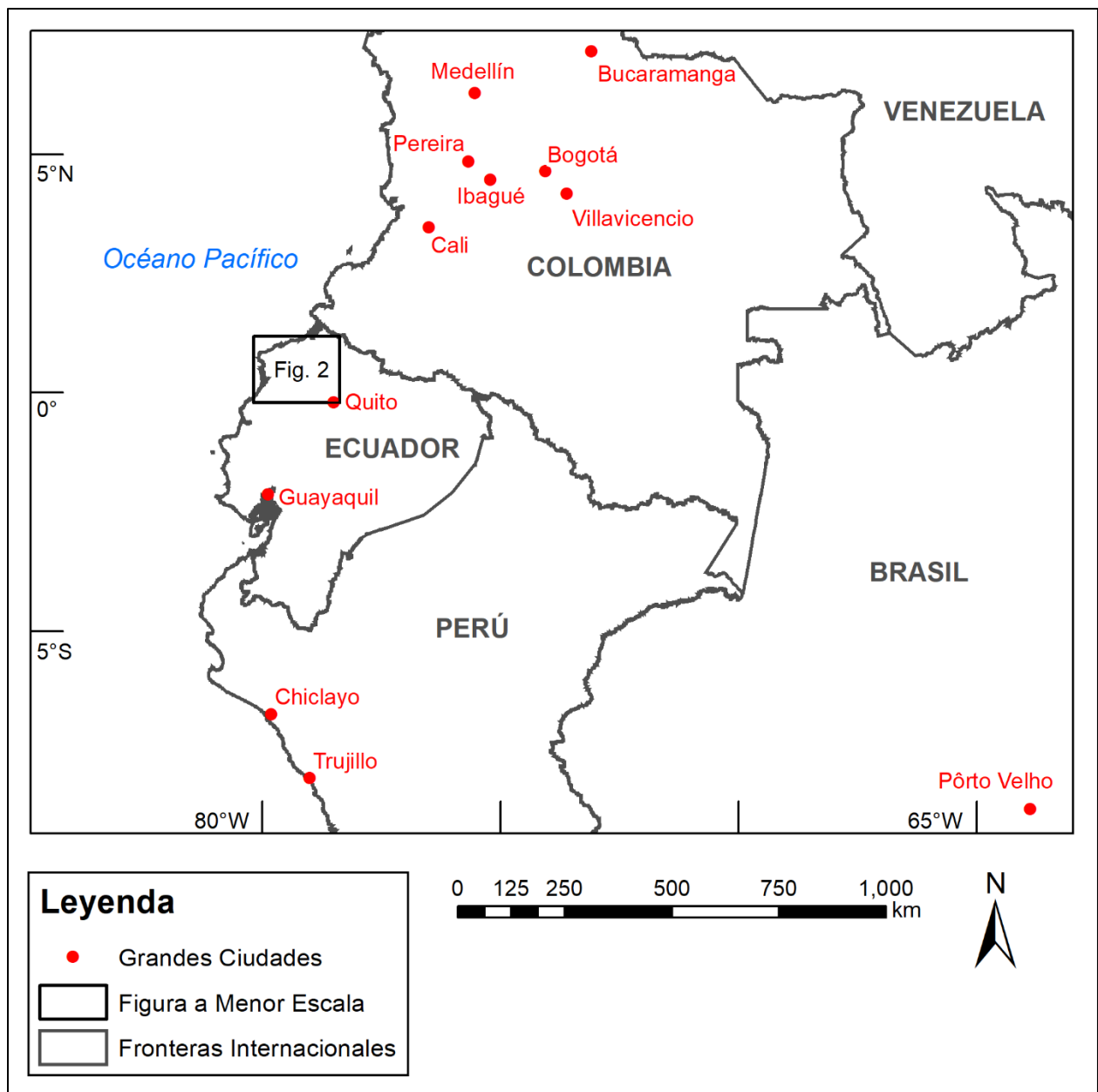


Figura 1. El 4 de noviembre de 2023 falló una presa de relaves en la mina de oro El Corazón de Agroindustrial en la provincia de Imbabura, norte de Ecuador. Ver los mapas a menor escala en Figs. 2-4.

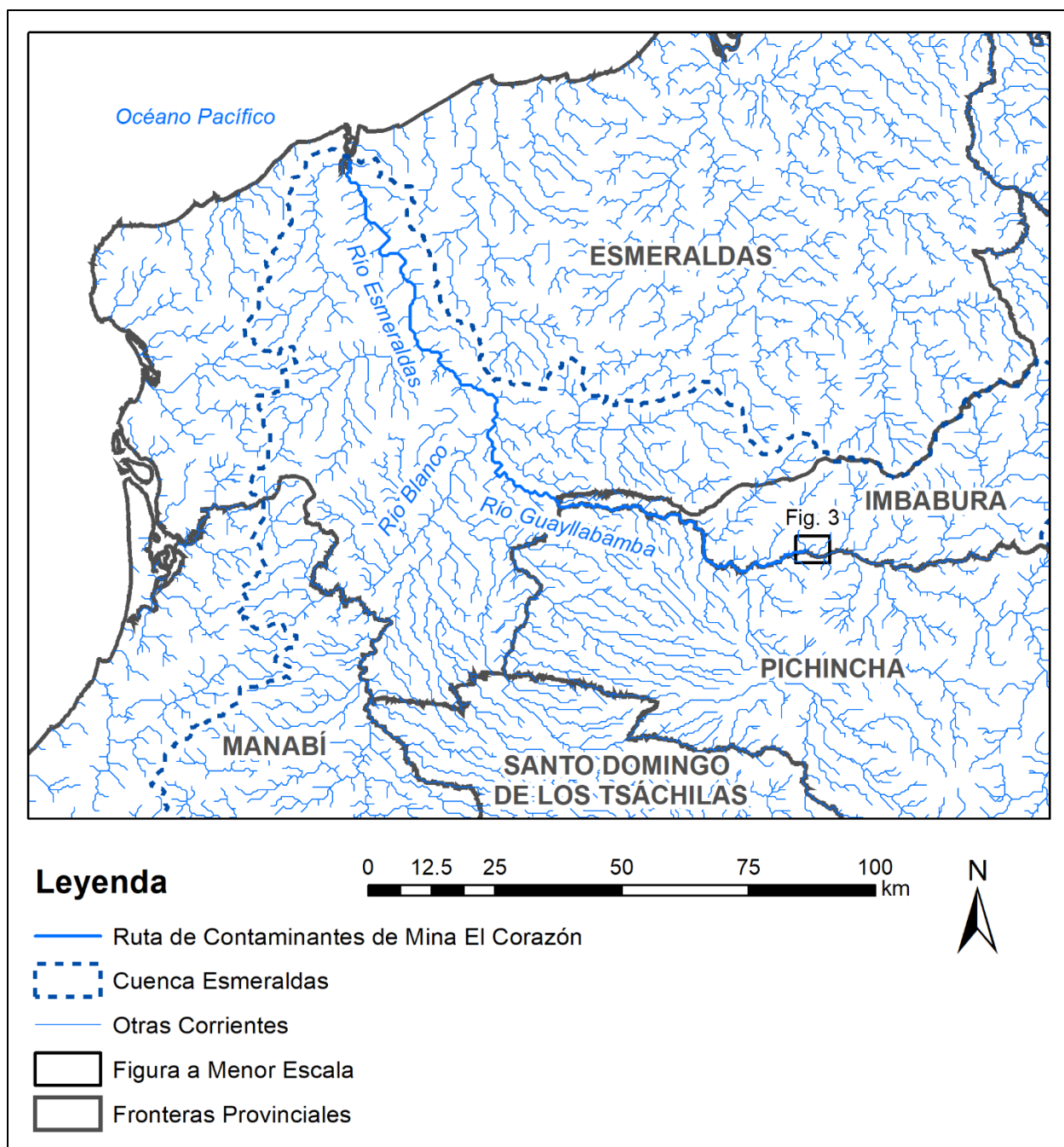


Figura 2. Los contaminantes liberados por la falla de una presa de relaves en la mina El Corazón finalmente fluirían hacia el río Guayllabamba, lo cual forma el río Esmeraldas en la confluencia con el río Blanco. El río Esmeraldas desemboca en el océano Pacífico. Ver el mapa a mayor escala en Fig. 1 y los mapas a menor escala en Figs. 3-4. Corrientes y cuenca Esmeraldas de HydroSHEDS (2024).

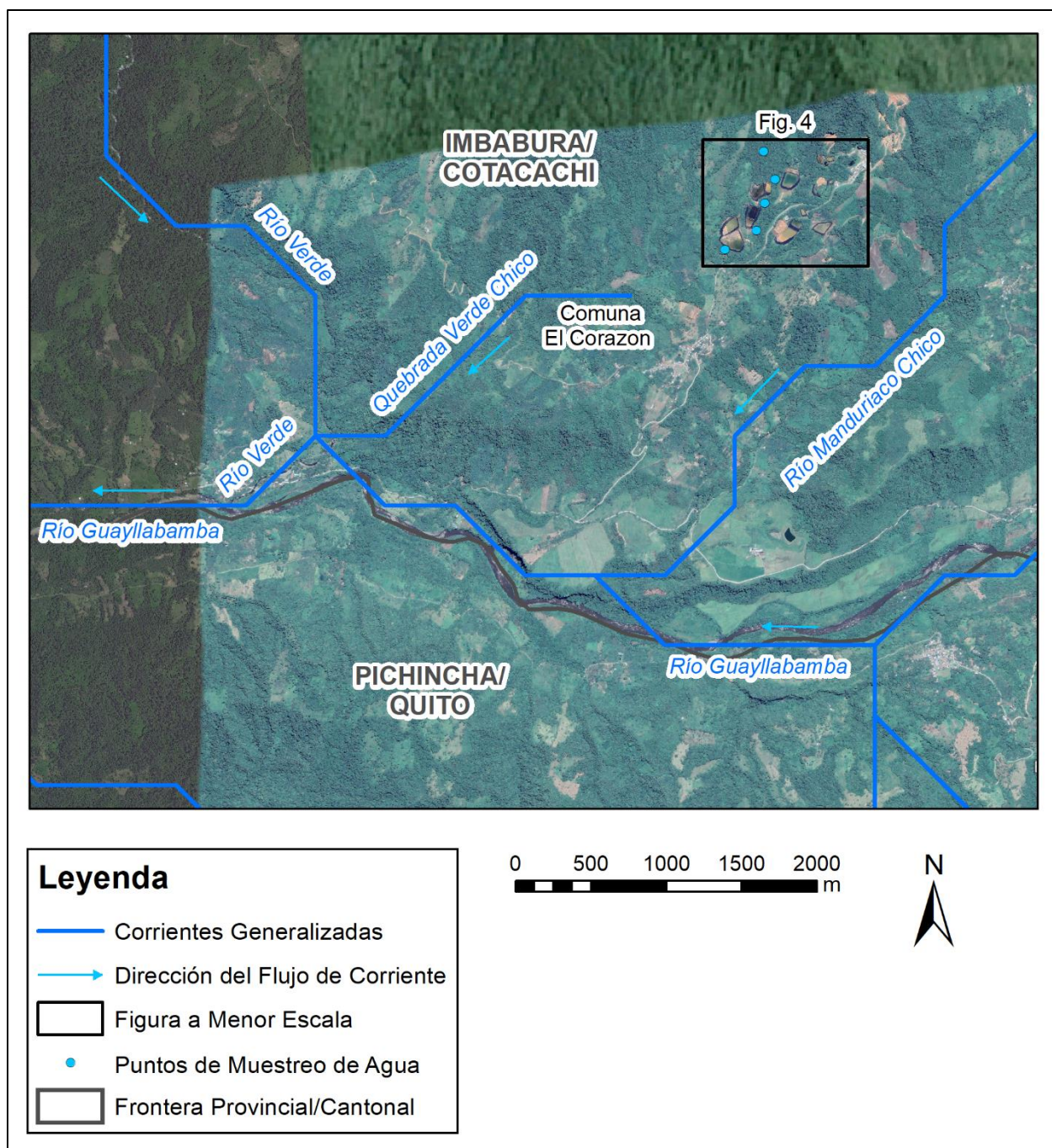


Figura 3. Los contaminantes liberados por la falla de la Piscina 15 en la mina El Corazón fluirían hacia la quebrada Verde Chico, luego hacia el río Verde, seguido por el río Guayllabamba (ver Fig. 2). Los contaminantes de la Piscina 15 u otras piscinas de relaves podrían potencialmente llegar al río Manduriaco Chico y luego fluir hacia el río Guayllabamba, aunque el camino desde el sitio de la mina hasta el río Manduriaco Chico no está claro en los mapas de corrientes, fotografías aéreas e imágenes satelitales disponibles. Ver los mapas a mayor escala en Figs. 2-3 y el mapa a menor escala en Fig. 4. El fondo son imágenes de Google Earth del 9 de abril de 2013, 24 de abril de 2016 y 27 de junio de 2019. Las corrientes de HydroSHEDS (2024) son más generalizadas de lo que se puede ver en las imágenes de Google Earth. Los puntos de muestreo de agua se determinaron comparando el mapa croquis de Agroindustrial El Corazón (2023a) (ver Fig. 19) con imágenes de Google Earth del 27 de junio de 2019 (ver Tabla 6).

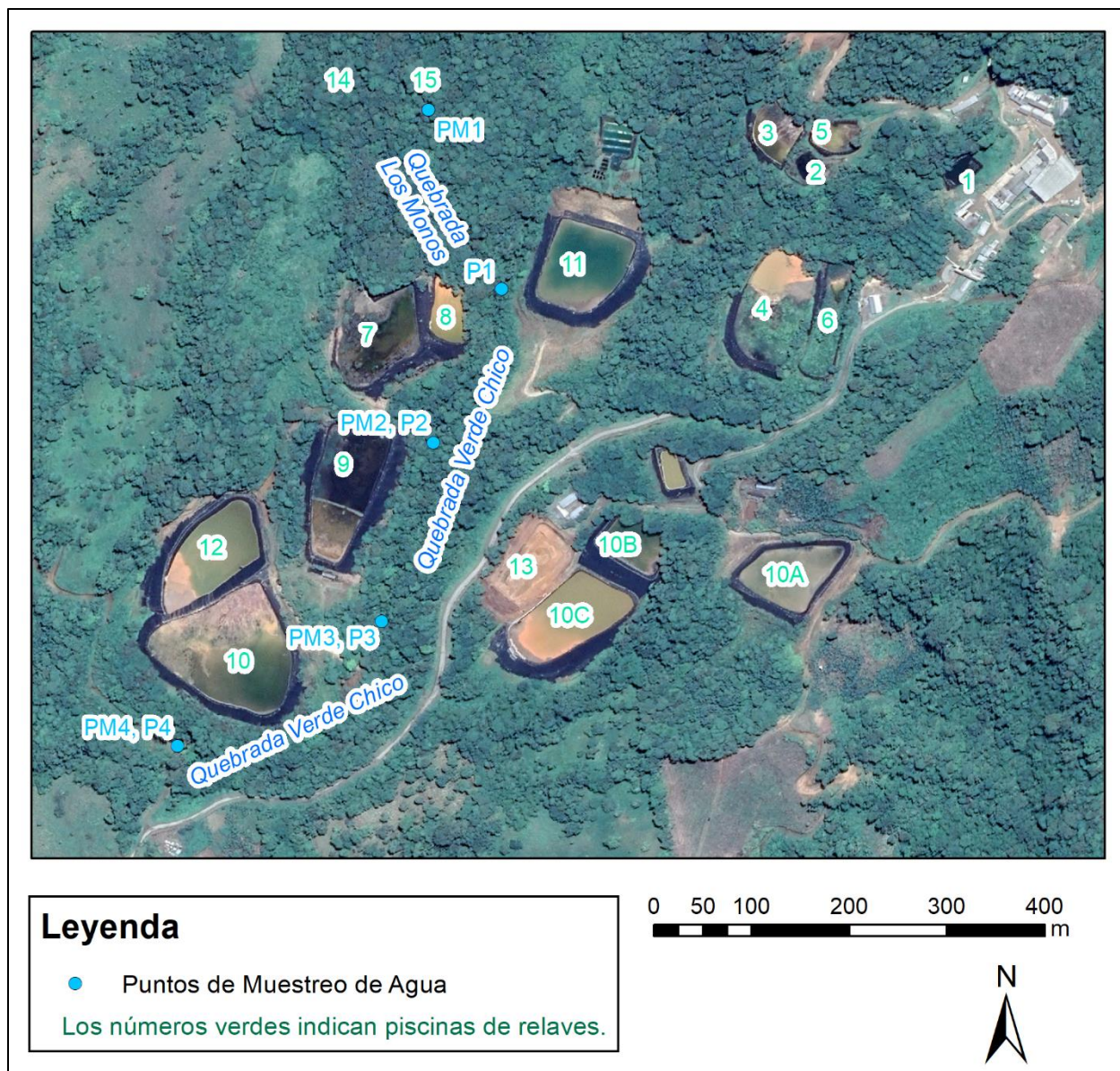


Figura 4. Las muestras de agua fueron recolectadas por la empresa minera en los puntos PM1, PM2, PM3 y PM4 y por la empresa consultora GRUNTEC en los puntos P1, P2, P3 y P4. El punto PM1 es también el punto de descarga de la Piscina 15. Los puntos de muestreo de agua se determinaron comparando el mapa croquis de Agroindustrial El Corazón (2023a) (ver Fig. 19) con imágenes de Google Earth del 27 de junio de 2019 (ver Tabla 6). Las coordenadas de los puntos de muestreo establecidas en Agroindustrial El Corazón (2023a) (ver Fig. 20) no corresponden a las coordenadas medidas (comparar Tabla 6 con Fig. 20). Las piscinas de relaves fueron etiquetadas en comparación con el mapa croquis (ver Fig. 19). El fondo son imágenes de Google Earth del 27 de junio de 2019. Notar que las Piscinas 14 y 15 se construyeron entre 2020 y 2021, por lo que no aparecen en las imágenes de fondo.



Figura 5. Los relaves húmedos que quedan del procesamiento del mineral de oro con cianuro en la mina El Corazón se almacenan en una sucesión de piscinas de relaves (ver Fig. 4). No hay indicios de que el cianuro se destruya (oxidado) antes de su depósito en las piscinas de relaves, por lo que se debe suponer que el agua de las piscinas de relaves está enriquecida en cianuro. Foto de Agencia de Prensa Minera (2023).

La falla de una presa de relaves no necesariamente se refiere a una falla catastrófica, la cual constituiría un colapso de la presa y la liberación de gran parte o la totalidad del contenido de la piscina de relaves. La falla se refiere a la incapacidad de cumplir los objetivos de desempeño, de los cuales el más importante es la contención de agua y relaves. Por lo tanto, cualquier pérdida involuntaria de contención constituye literalmente una falla. Por ejemplo, de acuerdo con la (U.S.) Federal Emergency Management Agency [(EE. UU.) Agencia Federal para el Manejo de Emergencias], *“Any malfunction or abnormality outside the design assumptions and parameters which adversely affect a dam’s primary function of impounding water is properly considered a failure. Such lesser degrees of failure can progressively lead to or heighten the risk of a catastrophic failure. They are, however, normally amenable to corrective action”* [Cualquier mal funcionamiento o anomalía fuera de los supuestos y parámetros de diseño que afecte negativamente la función principal de una presa de embalsar agua se considera apropiadamente una falla. Estos grados menores de falla pueden conducir progresivamente o aumentar el riesgo de una falla catastrófica. Sin embargo, normalmente son susceptibles de medidas correctivas] (FEMA, 2004). Aunque FEMA (2004) trata principalmente de presas de retención de agua, el mismo documento aclara que *“In addition to conventional structures, this definition of ‘dam’ specifically includes ‘tailings dams,’ embankments built by waste products disposal and retaining a disposal pond”* [Además de las estructuras convencionales, esta definición de “presa” incluye específicamente “presas de relaves”, terraplenes construidos mediante la disposición de productos de desecho y reteniendo una piscina de disposición]. ANCOLD (2021, 2019) define *“failure”* [falla] como *“the occurrence of an event outside the expectation of the design or facility licence conditions, that could range from the uncontrolled release of water including seepage, to a major instability of an embankment leading to loss of tailings and/or water”* [la ocurrencia de

un evento fuera de las expectativas de las condiciones de diseño o de la licencia de la instalación, que podría variar desde la liberación incontrolada de agua, incluida la filtración, hasta una inestabilidad importante de un terraplén que provoque la pérdida de relaves y/o agua]. Finalmente, según la Canadian Dam Association [Asociación Canadiense de Represas] (2021), “*a tailings dam failure can generally be defined as the inability of the dam to meet its design intent, whether in terms of management, operational, structural, or environmental function, resulting in potential loss of life, loss to the stakeholders, or adverse environmental effects*” [la falla de una presa de relaves generalmente se puede definir como la incapacidad de la presa para cumplir con su intención de diseño, ya sea en términos de gestión, operación, función estructural o ambiental, lo que resulta en una posible pérdida de vidas, pérdidas para las partes interesadas o efectos ambientales adversos].

Muestreo de Agua por parte de la Comunidad, la Empresa Minera y sus Consultores

En la mañana del 4 de noviembre de 2023, un residente local recogió una muestra del agua y los relaves que fluían a través de la presa fallada (ver Fig. 6). La muestra fue entregada al Laboratorio Anncy para su análisis el 22 de noviembre y el análisis se completó el 4 de diciembre (Laboratorio Anncy, 2023). El análisis mostró una concentración de cianuro total de 60,8 mg/L, la cual es más de 600 veces el límite máximo permisible para cuerpos de agua dulce en Ecuador de 0,1 mg/L (ver Tabla 1). Otras excedencias incluyeron la concentración de arsénico de 0,750 mg/L, la concentración de cobre de 1,88 mg/L, la concentración de hierro de 136 mg/L, la concentración de manganeso de 4,20 mg/L y la concentración de mercurio de 0,034 mg/L, las cuales son 7,5 veces, 1,88 veces, 13,6 veces, 2,1 veces y 6,8 veces los respectivos límites máximos permisibles en Ecuador (ver Tabla 1).

Cabe señalar que los estándares ambientales del agua dulce en Ecuador son mucho menos estrictos que en muchos otros países (ver comparación con Brasil, España y EE. UU. en Tabla 2). En comparación con los estándares ambientales de agua dulce en Brasil, las concentraciones máximas en Ecuador son 10 veces mayores para el arsénico, 20 veces mayores para el cadmio, más de 111 veces mayores para el cobre, más de 33 veces mayores para el hierro, 20 veces mayores para el plomo, 20 veces mayores para el manganeso, 25 veces mayores para el mercurio, 80 veces mayores para el níquel, 10 veces mayores para el selenio, 10 veces para la plata y casi 28 veces mayores para el zinc (ver Tabla 2). En comparación con los estándares ambientales de agua dulce en España, las concentraciones máximas en Ecuador son casi 28 veces mayores para el plomo, más de 71 veces mayores para el mercurio y 100 veces mayores para el selenio (ver Tabla 2). En comparación con los estándares ambientales de agua dulce en los EE. UU., las concentraciones máximas en Ecuador son 80 veces mayores para el plomo y más de 41 veces mayores para el zinc (ver Tabla 2). Así, además de las excedencias mencionadas anteriormente, la muestra de agua recolectada por el residente local habría excedido los límites máximos permisibles de cromo, plomo, níquel, selenio, plata y zinc en Brasil (comparar Tablas 1 y 2). Los estándares internacionales para el cianuro se compararán después de una explicación de la distinción entre cianuro libre y cianuro total en la sección “Tutorial sobre procesamiento de mineral de oro”.



Figura 6. El día de la falla de la presa de relaves (4 de noviembre de 2023), un residente local lucha por ganar pie en el empinado terraplén para recolectar una muestra de agua de la presa con fugas (ver los resultados del análisis de agua realizado por Laboratorio Anncy (2023) en Tabla 1). La alta inclinación del terraplén se indica además por la inclinación de la tubería, las raíces de las plantas expuestas y la caída casi vertical de agua contaminada de la piscina de relaves. Foto fija a las 0:04 del video proporcionado por la Asociación de Propietarios de Tierras Rurales del Norte y el Frente Antiminero (etiquetado Video 1 por el autor). Otra foto fija del mismo video está disponible en Municipio de Cotacachi (2023a).

Tabla 1. Comparación de muestra de comunidad con muestras de GRUNTEC¹

Parámetro	Muestra de Comunidad ² (mg/L)	Muestras de GRUNTEC ³ (mg/L)				Límites Permisibles ⁴ (mg/L)
		P1	P2	P3	P4	
Cianuro	60,8 ⁵	<0,001 ⁶	<0,001 ⁶	0,012 ⁶	0,009 ⁶	0,1 ⁵
Arsénico	0,750	0,025	<0,001	0,001	0,0018	0,1
Cadmio	<0,010	<0,0002	<0,0002	0,0004	0,0006	0,02
Cobre	1,88	0,02	0,05	0,55	0,75	1,0
Cromo	0,284	0,0096	0,0024	0,0005	<0,0002	N/A
Hierro	136	4,3	0,12	0,30	0,15	10,0
Manganeso	4,20	0,17	0,057	0,38	0,45	2,0
Mercurio	0,034	0,0009	<0,0002	0,0004	0,0002	0,005
Molibdeno	<0,050	0,0010	0,0006	0,0021	0,0019	N/A
Níquel	0,063	0,002	<0,002	0,006	0,012	2,0
Plata	0,033	0,0004	0,0009	0,0065	0,0073	0,1
Plomo	0,182	0,005	<0,001	<0,001	<0,0005	0,2
Selenio	0,015	<0,002	<0,002	<0,002	0,001	0,1
Zinc	0,323	0,01	<0,01	<0,02	<0,033	5,0

¹Valores en rojo exceden los límites máximos permisibles para descargas a cuerpos de agua dulce en Ecuador.

²Ver punto de muestra PM1 en Fig. 4 y Tablas. La muestra se recolectó el 4 de noviembre de 2023.

³Ver puntos de muestra en Figs. y Tablas. Notar que las distintas versiones de la ubicación de los puntos de muestra son contradictorias. Las muestras se recolectaron el 10 de noviembre de 2023

⁴Ministerio del Ambiente (2003, 2015)

⁵Cianuro total

⁶Cianuro libre

Tabla 2. Comparación de estándares ambientales de agua dulce seleccionados¹

	Ecuador ²	Brasil ³	España ⁴	EE. UU. ^{5,6}
Cianuro (µg/L)	100 ⁷	5 ⁸	40 ⁷	5.2 ⁸
Arsénico (µg/L)	100	10	50	150
Cadmio (µg/L)	20	1	0.08-0.25 ⁹	complejo ¹⁰
Cobre (µg/L)	1000	9	5-120 ⁹	complejo ¹⁰
Cromo (µg/L)	N/A	50	50	85
Hierro (µg/L)	10,000	300	N/A	1000
Manganeso (µg/L)	2000	100	N/A	N/A
Mercurio (µg/L)	5	0.2	0.07	0.77
Molibdeno (µg/L)	N/A	N/A	N/A	N/A
Níquel (µg/L)	2000	25	20	52
Plata (µg/L)	100	10	N/A	complejo ¹⁰
Plomo (µg/L)	200	10	7.2	2.5
Selenio (µg/L)	100	10	1	complejo ¹⁰
Zinc (µg/L)	5000	180	30-500 ⁹	120

¹Notar que 1000 µg/L = 1 mg/L (comparar con Tabla 1)

²Ministerio del Ambiente (2003, 2015)

³CONAMA (2005)

⁴Boletín Oficial del Estado (2015)

⁵EPA (2024)

⁶Valor máximo de exposición crónica de organismos en agua dulce

⁷Cianuro total

⁸Cianuro libre

⁹El valor depende de la dureza.

¹⁰El valor está bajo revisión o depende de la química del agua.

La empresa minera también recolectó muestras de agua el 4 de noviembre, aunque no se ha indicado la hora del día (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a) (ver Figs. 4 y 7). Se recolectaron muestras de agua en PM1 (el punto de descarga de la Piscina Nro. 15), PM2 (391 metros aguas abajo del punto de descarga), PM3 (581 metros aguas abajo del punto de descarga) y PM4 (884 metros aguas abajo del punto de descarga) (ver Fig. 4 y 7). La discrepancia entre las distancias indicadas anteriormente y las indicadas en Fig. 7 se discutirá en la subsección “Los Datos de Cianuro de la Empresa y sus Consultores no son Válidos”. El muestreo de agua de los mismos cuatro sitios se repitió el 6 de noviembre (ver Fig. 7). Las concentraciones de cianuro para las muestras recolectadas por Agroindustrial variaron desde 0,303 mg/L en el punto de descarga en ambas fechas de muestreo hasta 0,009 mg/L en el punto más alejado aguas abajo (PM4) el 6 de noviembre (ver Fig. 7).

La consultora GRUNTEC fue contratada por Agroindustrial para recolectar muestras de agua de cuatro sitios el 10 de noviembre. El sitio P1 estaba a 200 metros aguas abajo del punto de descarga (PM1), mientras que los sitios P1, P2 y P3 eran idénticos a los sitios PM2, PM3 y PM4, respectivamente (ver Fig. 4). Las muestras de agua recolectadas por GRUNTEC fueron analizadas en busca de 58 parámetros químicos, de los cuales 14 se muestran en Tabla 1. No se encontraron excedencias de los límites máximos permisibles en Ecuador para ningún parámetro químico (ver Tabla 1). Sin embargo, cabe señalar que la falta de excedencias se debe en parte a los estándares ambientales de agua dulce menos estrictos en Ecuador. Por ejemplo, las muestras recolectadas por GRUNTEC habrían excedido los estándares brasileños para arsénico, cobre y

hierro en el sitio P1, el estándar brasileño para manganeso en los sitios P1, P3 y P4, y el estándar de agua dulce en EE. UU. para plomo en el sitio P1 (comparar Tablas 1 y 2).

Monitoreo Ambiental (Realizado por AGROINDUSTRIAL EL CORAZÓN S.A.)					
Punto de Muestra	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Distancias
PM1. Salida del drenaje (Punto 0)	04-11-2023	0.303ppm	06-11-2023	0.303ppm	Origen
PM2. Quebrada Verde Chico – Paso Relavera 10 (Punto 1)	04-11-2023	0.128ppm	06-11-2023	0.018ppm	de Punto 0 a punto 1: 678.45m
PM3. Quebrada Verde Chico – Paso Flores (Punto 2)	04-11-2023	0.084ppm	06-11-2023	0.012ppm	de Punto 0 a Punto 2: 1017.24m
PM4. Quebrada Rio Verde Chico – Paso Molina (Punto 3)	04-11-2023	0.014ppm	06-11-2023	0.009ppm	de Punto 0 a Punto 3: 2767.85m

Tabla. Monitoreo de agua realizado por Agroindustrial El Corazón S.A.

Figura 7. Agroindustrial El Corazón recolectó muestras de agua en PM1, PM2, PM3 y PM4, mientras que la consultora GRUNTEC recolectó muestras en P1, P2, P3 y P4 (ver Fig. 4). Con base en el mapa croquis (ver Fig. 19) y las descripciones (ver Fig. 20) en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), el punto de muestreo PM1 (el punto de descarga de la Piscina 15) está al norte de P1, mientras que los sitios PM2, PM3 y PM4 son idénticos a los sitios P2, P3 y P4, respectivamente. El mapa croquis (ver Fig. 19) se comparó con imágenes de Google Earth del 27 de junio de 2019 (ver Fig. 4) para determinar las coordenadas de los puntos de muestreo (ver Tabla 6). Las distancias probablemente se midieron a lo largo de los senderos de las corrientes y no son distancias en línea recta. Sin embargo, según las imágenes de Google Earth (ver Fig. 4), las distancias deberían ser 391 metros desde el Punto 0 (igual que PM1) a PM2, 581 metros desde el Punto 0 a PM3 y 884 metros desde el Punto 0 a PM4. Por tanto, las distancias indicadas en la tabla anterior son demasiado grandes. El “valor” en la tabla se refiere al cianuro, aunque Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) no aclaró si la empresa minera midió el cianuro libre o el cianuro total. Figura de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a).

En resumen, el análisis de la muestra recolectada por la comunidad mostró concentraciones mucho más altas para cada parámetro que los análisis de las muestras recolectadas por Agroindustrial y GRUNTEC (ver Tabla 1 y Fig. 7). La discrepancia en las concentraciones de cianuro medidas es de particular interés, primero, porque el cianuro se usa en el procesamiento del mineral de oro y, por lo tanto, está presente en los relaves de oro, y porque Agroindustrial utilizó las bajas concentraciones de cianuro medidas para argumentar el impacto insignificante de la falla de presa de relaves. Respecto a sus propios análisis de muestras recolectadas el 4 de noviembre, Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) afirmó, “De acuerdo a los resultados del monitoreo realizados por la empresa el 4 de noviembre, y luego de compararlos con los valores establecidos en la normativa ambiental vigente (0.1 mg/l) ... se puede deducir que la afectación por CN [cianuro] no alcanzó el segundo punto de monitoreo”. Respecto a sus propios análisis de muestras recolectadas el 6 de noviembre, Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) afirmó, “De acuerdo a los resultados del monitoreo realizados por la empresa el 6 de noviembre, y luego de compararlos con los valores establecidos en la normativa

ambiental vigente (0.1 mg/l) ... se puede deducir que la afectación por CN pudo ser controlada y que los valores de CN en todos los puntos monitoreados se encontraron dentro de los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente”. Lo anterior sobre “todos los puntos monitoreados” es confuso porque la concentración de cianuro (0,303 mg/L) en el punto de descarga (PM1) no cambió entre el 4 y 6 de noviembre y aún excedió lo que Agroindustrial declaró como estándar ecuatoriano (0,1 mg/L) el 6 de noviembre (ver Fig. 7). Respecto a los análisis de las muestras recolectadas por GRUNTEC el 10 de noviembre, Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) manifestó, “Los resultados obtenidos demuestran que los valores de CN y metales pesados al momento del monitoreo realizado por GRUNTEC, se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente”.

Objetivos Preliminares

Los objetivos preliminares de este informe fueron responder las siguientes preguntas con respecto a la mina El Corazón:

- 1) ¿Por qué existen discrepancias entre los análisis químicos de la muestra de agua recolectada por un residente local y las muestras recolectadas por Agroindustrial y GRUNTEC?
- 2) ¿Cuál fue la causa de la falla de la presa de relaves?
- 3) ¿Se ha eliminado la posibilidad de que se produzcan más fallos en las presas de relaves?

Las preguntas se perfeccionarán más en la sección “Metodología”. Antes de abordar la metodología y las preguntas más detalladas, para facilitar la lectura a los no especialistas, este informe incluye un tutorial sobre aspectos clave del procesamiento del mineral de oro, incluido el uso de cianuro, los documentos de orientación de la industria del Código Internacional del Cianuro y de los Principios de la Minería de Oro Responsable, las distinciones entre cianuro libre, cianuro WAD y cianuro total, el almacenamiento de relaves de oro piscinas de relaves, los mecanismos de falla de las presas de relaves y la distinción entre las causas proximales y fundamentales de las fallas de las presas de relaves. Al tutorial le seguirán resúmenes de las piscinas de relaves de la mina El Corazón y una descripción detallada de la falla del 4 de noviembre de 2023 y sus antecedentes.

TUTORIAL SOBRE PROCESAMIENTO DE MINERAL DE ORO

Uso de Cianuro para Procesar Mineral de Oro

El cianuro se utilizó por primera vez como extractante de oro en 1889 en la mina Crown de Nueva Zelanda (Johnson, 2015). El cianuro es un extractante (también llamado lixivante) tan eficaz que puede extraer cantidades microscópicas de oro de una gran masa de mineral de oro, del orden de fracciones de un gramo de oro por tonelada de mineral (fracciones de una parte por millón). De esta manera, la industria minera del oro ha seguido siendo rentable, incluso cuando las leyes de los depósitos de oro restantes han disminuido de 50 gramos por tonelada a mediados del siglo XIX a alrededor de 1 gramo por tonelada en la actualidad (Mudd, 2010). De acuerdo con Laitos (2013), “*Nonetheless, by the 21st century, over 90% of gold extracted worldwide is the result of cyanide leaching techniques. Prior to the introduction of cyanide leaching operations, most low-grade ore deposits could not be profitably removed using traditional placer or lode mining techniques; to that end, the low capital costs associated with cyanide heap leaching have made profitability on low-grade ores a reality. By utilizing cyanide mineral*”

leaching techniques in large-tonnage mine projects, operators were able to extract small, sometimes microscopic flecks of gold and other precious minerals from low-grade ore with 90% to 95% efficiency. As a result of the efficiency of heap leaching, mountains full of low-grade ore have been transformed into profitable mineral extraction operations” [Sin embargo, en el siglo XXI, más del 90% del oro extraído en todo el mundo es el resultado de técnicas de lixiviación con cianuro. Antes de la introducción de las operaciones de lixiviación con cianuro, la mayoría de los depósitos de mineral de baja ley no podían eliminarse de manera rentable utilizando técnicas tradicionales de minería de placer o veta; con ese fin, los bajos costos de capital asociados con la lixiviación en pilas con cianuro han hecho realidad la rentabilidad de los minerales de baja ley. Al utilizar técnicas de lixiviación de minerales con cianuro en proyectos mineros de gran tonelaje, los operadores pudieron extraer pequeñas partículas, a veces microscópicas, de oro y otros minerales preciosos de minerales de baja ley con una eficiencia del 90% al 95%. Como resultado de la eficiencia de la lixiviación en pilas, montañas llenas de mineral de baja ley se han transformado en operaciones rentables de extracción de minerales].

El cianuro es altamente tóxico y puede ser letal para las aves, la vida silvestre, los organismos acuáticos, el ganado y los humanos si se libera accidentalmente al medio ambiente. El efecto letal del cianuro resulta de su tendencia a adherirse a los glóbulos rojos, de modo que las células sanguíneas ya no pueden liberar oxígeno a los tejidos y órganos, lo que provoca asfixia. Debido a su alta toxicidad, se han buscado alternativas al cianuro durante más de un siglo, o casi desde que se introdujo por primera vez el uso del cianuro en el procesamiento del mineral de oro. Cualquier lixivante alternativo al cianuro debería tener alguna combinación de las siguientes características (Laitos, 2013):

- 1) Debería ser relativamente económico.
- 2) Debe ser relativamente reciclable, lo que significa que después de extraer oro del mineral de oro, el lixivante se puede recuperar para poder aplicarlo a más mineral de oro.
- 3) Debe ser selectivo, es decir, extraer preferentemente oro y no cualquier otro metal.
- 4) Debería ser relativamente no tóxico.
- 5) Debería ser posible destruir o recuperar el lixivante de cualquier agua o residuo que pueda liberarse al medio ambiente.

Después de más de un siglo de investigación, no ha surgido ningún lixivante que satisfaga un número razonable de las características anteriores. El mercurio es tan eficaz para extraer oro como el cianuro, pero es mucho más tóxico y muy persistente en el medio ambiente. Sobre esa base, el World Gold Council [Consejo Mundial del Oro] (2019a) no recomienda el uso de mercurio para el procesamiento de oro bajo ninguna circunstancia. El tiosulfato es un lixivante eficaz y menos tóxico que el cianuro, pero es demasiado caro debido a su alta tasa de consumo durante el procesamiento del mineral de oro. La aglomeración de carbón y oro (CGA, por sus siglas en inglés) es mucho menos tóxica que el cianuro, pero es efectiva sólo para extraer partículas de oro libres (como las que se pueden encontrar en depósitos de ríos o playas), no para extraer oro de rocas duras (Laitos, 2013). En resumen, a pesar de su toxicidad, la industria minera de oro moderna no podría existir sin el uso de cianuro.

El proceso de procesamiento de mineral de oro utilizando cianuro implica disolver una sal de cianuro (como el cianuro de sodio) en agua, de modo que se disocia para formar el ion cianuro (CN⁻) y cianuro de hidrógeno (HCN). El mineral de oro se tritura y se coloca en una plataforma de lixiviación en pilas, donde se vierte una solución de cianuro sobre él, o se mezcla con la solución de cianuro en una tina. El ion cianuro extrae el oro del mineral para formar un complejo de oro-cianuro disuelto. La solución con el complejo de oro-cianuro se llama solución

impregnada. Luego, la solución impregnada se mezcla con carbón activado o se pasa sobre él, de modo que el complejo de oro-cianuro abandona la solución y se adhiere al carbón activado, después de lo cual la solución se denomina solución estéril. Otros pasos (llamados extracción o elución) eliminan el oro del carbón activado y devuelven el cianuro a la solución estéril. Cualquier cianuro perdido se reemplaza en la solución estéril y luego la solución se recicla para extraer oro adicional de más mineral de oro. Botz (2024) es una excelente referencia sobre el uso de cianuro para la extracción de oro.

Una parte considerable de la toxicidad ambiental que es consecuencia del uso de cianuro en el procesamiento de mineral de oro no es el cianuro en sí, sino los subproductos del uso de cianuro. El cianuro es igualmente eficaz para extraer mercurio del mineral triturado, de modo que cualquier mercurio presente en el mineral de oro también aparece como un complejo de mercurio-cianuro disuelto dentro de la solución impregnada. Hay un complejo de mercurio-cianuro que podría unirse al carbón activado junto con el complejo de oro-cianuro, pero no el complejo particular de mercurio-cianuro que se forma en las condiciones alcalinas que son necesarias para el procesamiento con cianuro. Parte del cianuro de hidrógeno que se forma cuando se disuelve el cianuro de sodio para formar la solución de cianuro permanece en forma disuelta, pero la mayor parte se volatiliza y escapa como gas de cianuro de hidrógeno. El gas cianuro de hidrógeno sería letal para los trabajadores mineros y sería económicamente indeseable, incluso si pudiera ventilarse, porque representa una pérdida de cianuro del circuito de procesamiento. Para minimizar la producción de cianuro de hidrógeno y maximizar la producción del ion cianuro, la solución de cianuro se mantiene en un estado muy alcalino, en el rango de pH de 10-11 (Botz, 2024). En un rango de pH tan alto, el complejo de mercurio-cianuro permanece en la solución estéril. Por lo tanto, cada paso de la solución de cianuro a través del circuito de procesamiento hace que la solución encuentre más mineral que puede contener mercurio adicional. Como consecuencia, la solución de cianuro se enriquece cada vez más con mercurio, que puede ser mucho más tóxico para el medio ambiente que el cianuro.

Otros contaminantes pueden movilizarse hacia la solución de cianuro únicamente como resultado del alto pH. Estos contaminantes incluyen elementos que forman oxianiones (iones cargados negativamente que incluyen oxígeno) en forma disuelta. Ejemplos de tales elementos son el arsénico, el antimonio, el molibdeno, el selenio y el uranio. Al igual que con el mercurio, dado que ninguno de los oxianiones anteriores se unirá al carbón activado, permanecerán en la solución estéril. Por lo tanto, cada paso de la solución de cianuro a través del circuito de procesamiento hará que la solución se enriquezca cada vez más en arsénico, antimonio, molibdeno, selenio y uranio, si esos elementos estén presentes en el mineral de oro. La coexistencia de arsénico y oro en yacimientos es muy común. De hecho, Rivera-Parra et al. (2021) escribió respecto al yacimiento El Corazón, “*This deposit also has very high concentrations of arsenic, chromium, copper, lead, mercury, molybdenum, nickel, silver, vanadium, zinc and antimony*” [Este yacimiento también presenta altísimas concentraciones de arsénico, cromo, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, plata, vanadio, zinc y antimonio]. La conexión entre el uso de cianuro en el procesamiento de mineral de oro y la aparición de cianuro (así como otros elementos que se movilizan como subproducto del procesamiento de cianuro) en la piscina de relaves se analiza en la siguiente subsección.

Relaves y Piscinas de Relaves de Oro

La gestión, el almacenamiento o la disposición de residuos mineros es un componente crítico de cualquier proyecto minero moderno a gran escala. Los escombros y los relaves constituyen la gran mayoría de los residuos mineros. Los escombros son las rocas que debe retirarse para llegar al cuerpo de mineral. El hecho de que un cuerpo de roca en particular se considere mineral o escombros puede variar a medida que varía la ley de corte, en la que la ley de corte es la concentración mínima de oro para la cual un cuerpo de roca en particular puede procesarse con ganancias en particulares circunstancias sociales, económicas y técnicas. Los relaves son las partículas de roca húmedas y trituradas que quedan después de que se ha extraído la mercancía de valor, como el oro. Por lo tanto, el mineral triturado que queda después de la interacción con la solución de cianuro en una instalación de procesamiento de cianuro constituye los relaves de oro.

A nivel mundial, para la minería de oro, se extraen 2,86 toneladas de escombros por cada tonelada de mineral de oro. Considerando una ley de mineral típica de 0,00008% (0,8 gramos de oro por tonelada de mineral) y tasas típicas de recuperación de concentrador y fundición/refinería, se generan 3.046.349 toneladas de residuos mineros (tanto relaves como escombros) por cada tonelada de oro refinado, la cual es la mayor proporción de residuos-metal para cualquier producto minero común (Nassar et al., 2022a-b). La ley del depósito de mineral en la mina El Corazón es de 2.5-3.0 gramos de oro por tonelada de mineral (MEM, 2023), por lo que la proporción residuos-metal es algo menor que el promedio mundial. Sin embargo, nunca se insistirá demasiado en que el principal producto de una mina de roca dura moderna, especialmente una mina de oro, son los residuos, lo cual es un resultado inusual para un proceso industrial moderno.

Debido al tamaño típico de los bloques, los escombros a menudo se pueden depositar como una escombrera independiente. Por el contrario, debido a que son húmedos y de grano fino, los relaves requieren confinamiento detrás de una presa. En la gestión de relaves convencional, los relaves húmedos se canalizan a una instalación de disposición de relaves sin deshidratación, de modo que el contenido de agua esté en el rango de 150 a 400%, donde el contenido de agua es la proporción entre la masa de agua y la masa de partículas sólidas secas. Por lo general, los relaves se asentarán fuera de la suspensión, dejando una capa suprayacente de agua sobrenadante que puede recuperarse y bombearse nuevamente a la operación minera. El agua sobrenadante puede incluir relaves de grano muy fino que pueden tardar mucho en sedimentarse o pueden permanecer en suspensión indefinidamente.

El cuerpo de agua y relaves depositado se conoce como “piscina de relaves”. A veces, toda la instalación, incluida la presa de confinamiento, se denomina “piscina de relaves” y, a veces, se utiliza la frase “presa de relaves” para referirse a toda la instalación. En cualquier caso, la falla de la presa de relaves constituiría una falla de la piscina de relaves, por lo que a menudo las frases “piscina de relaves” y “presa de relaves” se usan indistintamente. Es de destacar que todos los informes sobre la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón, ya sea por parte de la empresa (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a) o de agencias reguladoras gubernamentales (MAATE, 2023a-b; MEM, 2023a) utilizan exclusivamente la palabra “piscina” y nunca utilice la palabra “represa” o “presa” o “terraplén”, excepto para referirse a la presa que se construyó con saquillos de nailon para bloquear el flujo de agua y relaves después de la falla de la presa de relaves. Cabe advertir que la falta de uso de la frase “presa de relaves” podría ser una cuestión

estilística, pero también podría ser un intento de evitar el cumplimiento de las regulaciones ecuatorianas y los estándares internacionales en materia de presas de relaves.

En una operación de procesamiento de oro que utiliza cianuro, el agua que se exporta a la piscina de relaves junto con los relaves es simplemente la solución de cianuro estéril que quedó con los relaves, como la solución de cianuro dentro de los espacios porosos entre los relaves o la solución de cianuro que no se pudo separar desde los relaves. Esta agua no sólo retendrá algo de cianuro, sino que también podría incluir cualquier mercurio, arsénico, antimonio, molibdeno, selenio o uranio que haya sido movilizado del cuerpo de mineral mediante el procesamiento de cianuro. Las consecuencias de la falla de una piscina de relaves en una instalación de procesamiento de cianuro y los medios para reducir esas consecuencias se discutirán en la siguiente subsección.

Código Internacional del Cianuro y Principios de la Minería de Oro Responsable

En enero de 2000 falló una presa de relaves en la mina de oro Aurul S.A. cerca de Baia Mare, Rumania. La falla de la presa de relaves liberó 100.000 metros cúbicos de agua rica en cianuro a los ríos Somes y Tisza, los cuales luego desembocaron en el río Danubio y finalmente en el mar Negro, a una distancia de más de 2.000 kilómetros. El derrame de cianuro provocó la muerte masiva de peces y la destrucción de especies acuáticas (ICOLD y UNEP, 2001). Una falla anterior de la presa de relaves en la mina de oro Omai en Guyana en 1995 liberó 4,2 millones de metros cúbicos de agua contaminada con cianuro en el río Omai, afortunadamente, con sólo una pequeña muerte de peces (ICOLD y UNEP, 2001). La respuesta pública y gubernamental generó preocupación en la industria minera del oro de que los gobiernos comenzarían a prohibir el uso de cianuro, lo que efectivamente pondría fin a la industria minera del oro en esas jurisdicciones.

De hecho, tras la falla de la presa de relaves en Baia Mare, el uso de cianuro en el procesamiento de minerales fue prohibido en Costa Rica, República Checa, Alemania y Hungría (Laitos, 2013). Turquía ya había prohibido el uso de cianuro en 1997 (Laitos, 2012). En 2010, el Parlamento Europeo pidió la prohibición del uso de cianuro en el procesamiento de minerales en toda la Unión Europea, afirmando que una prohibición “*is the only safe way to protect our water resources and ecosystems against cyanide pollution from mining activities*” [es la única manera segura de proteger nuestros recursos hídricos y ecosistemas contra la contaminación por cianuro proveniente de las actividades mineras] (Environment and Natural Resources Law & Policy Program [Programa de Políticas y Leyes sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales], 2010). En Estados Unidos, el estado de Montana ya había prohibido el uso de cianuro en minas a cielo abierto en 1998 (Laitos, 2013). Los estados de Wisconsin y Virginia prohibieron el uso de cianuro en 2001 y 2024, respectivamente (Wisconsin State Legislature [Legislatura del Estado de Wisconsin], 2001; Virginia’s Legislative Information System [Sistema de Información Legislativa de Virginia], 2024). Ocho provincias de Argentina han prohibido el uso de cianuro en el procesamiento de minerales, aunque no existe una prohibición a nivel nacional (Laitos, 2013). Algunos países (por ejemplo, Burkina Faso, Camerún, Ghana, Kenia, Mongolia, Sudáfrica, Tanzania) prohíben el uso de cianuro por parte de mineros de oro artesanales y de pequeña escala, es decir, por operaciones de extracción de oro que carecen de capital y capacidad técnica para realizar el procesamiento de cianuro de forma segura (IGF, 2024).

En un esfuerzo por prevenir tales prohibiciones gubernamentales y su amenaza existencial para la industria, la industria minera de oro creó el Código Internacional para el Manejo del Cianuro para la Fabricación, el Transporte y el Uso del Cianuro en la Producción de

Oro (llamado Código Internacional del Cianuro en este informe) (El Código Internacional del Cianuro, 2024). El Código Internacional del Cianuro es un compromiso voluntario que incluye auditorías de terceros para una certificación completa. Hasta el momento, más de 200 empresas son signatarias del Código Internacional del Cianuro, incluidas empresas mineras, productoras de cianuro y transportadoras de cianuro. Las dos empresas signatarias en Ecuador son Transportes Noroccidental Cia. Ltda. y Ciateite S.A., ambas transportadoras de cianuro (El Código del Cianuro, 2024). Agroindustrial no es empresa signataria del Código Internacional del Cianuro. Los Principios de la Minería de Oro Responsable, que fueron desarrollados por el World Gold Council [Consejo Mundial del Oro], son incluso más amplios que el Código Internacional del Cianuro porque incorporan el Código Internacional del Cianuro, además de otros requisitos. De acuerdo con los Principios de la Minería de Oro Responsable, “*Where our operations use cyanide, we will ensure that our arrangements for the transport, storage, use and disposal of cyanide are in line with the standards of practice set out in the International Cyanide Management Code*” [Cuando nuestras operaciones utilicen cianuro, nos aseguraremos de que nuestras disposiciones para el transporte, almacenamiento, uso y eliminación de cianuro se ajusten a las normas de práctica establecidas en el Código Internacional para el Manejo de Cianuro] (World Gold Council, 2019a).

Esta revisión del Código Internacional del Cianuro y los Principios de la Minería de Oro Responsable se centrará en los aspectos del procesamiento de mineral de oro más relevantes para este informe, que son el uso de piscinas de relaves para el almacenamiento o disposición de cianuro, la construcción y operación adecuadas de las piscinas de relaves y los requisitos para la divulgación pública de información sobre el uso de cianuro. Los requisitos internacionales para la divulgación pública respecto de las piscinas de relaves se analizarán más detalladamente en la sección “Resumen de Piscinas de Relaves en la Mina de Oro El Corazón”. Debe tenerse en cuenta que el Código Internacional del Cianuro, así como los Principios de la Minería de Oro Responsable, fueron desarrollados casi en su totalidad por la industria minera con poca o ninguna aportación de otras partes interesadas, como organizaciones de la sociedad civil o comunidades afectadas por la minería. En otras palabras, los documentos de orientación de la industria deben considerarse como directrices que equilibran la protección del medio ambiente con la garantía de las ganancias de las empresas mineras de oro, no como directrices destinadas a maximizar la protección del medio ambiente y las comunidades aguas abajo. En la siguiente revisión, se darán algunos ejemplos de cómo el Código Internacional del Cianuro y los Principios de la Minería de Oro Responsable podrían haber sido más estrictos si hubieran tenido como objetivo maximizar la protección del medio ambiente. Cabe señalar que Agroindustrial no se ha comprometido ni siquiera con los requisitos mínimos del Código Internacional del Cianuro y los Principios de la Minería de Oro Responsable.

El Código Internacional del Cianuro se compone de nueve Principios de Minería, cinco Principios de Producción y tres Principios de Transporte, cada uno de los cuales se subdivide en múltiples Normas de Práctica. El Principio de Minería 4 (Operaciones) incluye la Norma de Práctica 4.2, que establece, “Introducir sistemas de gestión y operativos para minimizar el uso de cianuro, limitando así las concentraciones de cianuro en las colas de la planta [los relaves]” (International Cyanide Management Institute [Instituto Internacional para Manejo del Cianuro], 2021a). Dos Normas de Práctica de Minería relacionadas son 4.4 y 4.5, las cuales establecen, “Aplicar medidas para proteger a las aves, otros animales silvestres y al ganado de los efectos adversos de las soluciones de proceso de cianuro” y “Aplicar medidas para proteger a los peces y

la fauna silvestre de las descargas directas e indirectas de soluciones de proceso de cianuro a las aguas superficiales”, respectivamente (International Cyanide Management Institute, 2021a).

Debido a que cierta cantidad de cianuro quedará retenida dentro del agua que se mezcla con los relaves y, por lo tanto, se depositará dentro de la piscina de relaves, la piscina de relaves constituye una “instalación de cianuro”. De acuerdo con International Cyanide Management Institute (2021b), “Dado que el Código define la Solución de Proceso como cualquier solución con una concentración de 0,5 mg/l de cianuro WAD o superior, lo siguiente sería probablemente instalaciones de cianuro en la mayoría de las operaciones: ... Presas de jales [relaves].” El significado preciso de cianuro WAD (Disociable con Ácido Débil) se explicará en la siguiente subsección “Cianuro Libre, Cianuro WAD y Cianuro Total”. La intención del Código Internacional del Cianuro es minimizar el impacto en las aves, la vida silvestre y el ganado minimizando la concentración de cianuro en la piscina de relaves. La minimización del cianuro en la piscina de relaves minimiza el impacto tanto en los animales que interactúan directamente con la piscina de relaves como en los animales que podrían interactuar con el agua que se libera intencional o accidentalmente de las piscinas de relaves. De acuerdo con International Cyanide Management Institute (2021b), “Unas concentraciones más bajas de cianuro reducen los riesgos para la vida silvestre por la exposición a los jales y para la calidad del agua por las posibles filtraciones”. La concentración de cianuro en la piscina de relaves se minimiza minimizando el uso de cianuro en el procesamiento del mineral de oro y destruyendo el cianuro en el agua que se mezcla con los relaves antes de la deposición de agua y relaves en la piscina de relaves. Se podrían utilizar diversos procesos para destruir el cianuro antes de su deposición, como la luz ultravioleta o la adición de reactivos oxidantes.

El Código Internacional del Cianuro establece límites cuantitativos para las concentraciones de cianuro dentro de la piscina de relaves (50 mg/L de cianuro WAD), en las filtraciones de la piscina de relaves (0,5 mg/L de cianuro WAD) y en las corrientes aguas debajo de la piscina de relaves (0,022 mg/L de cianuro WAD). Por lo tanto, la auditoría de la Norma de Prácticas de Minería 4.4 plantea la pregunta “¿Puede la operación demostrar que la concentración de cianuro en aguas abiertas en las presas de jales, instalaciones de lixiviación y piletas no supera los 50 mg/l de cianuro WAD?” (International Cyanide Management Institute, 2021c). La protección de las corrientes aguas abajo se aplica tanto a la descarga directa de la piscina de relaves a las aguas superficiales como a la descarga indirecta, que podría implicar la filtración de agua enriquecida con cianuro a las aguas subterráneas con la posterior emergencia a una corriente. Así, la auditoría de la Norma de Práctica de Minería 4.5 también incluye las preguntas “¿La operación controla la presencia de cianuro en las aguas superficiales aguas abajo de la unidad y puede demostrar que las descargas directas a las aguas superficiales no hacen que la concentración de cianuro libre en el agua receptora supere los 0.022 mg/l aguas abajo de cualquier zona de mezcla establecida?” y “¿Puede la mina demostrar que las descargas indirectas a las aguas superficiales no provocan que la concentración de cianuro libre en el cauce supere los 0.022 mg/l aguas abajo de cualquier zona de mezcla establecida?” (International Cyanide Management Institute, 2021b). La distinción entre cianuro WAD y cianuro libre también se explicará en la siguiente subsección “Cianuro libre, cianuro WAD y cianuro total”, aunque cabe señalar que la concentración de cianuro WAD siempre excede la concentración de cianuro libre.

Es algo sorprendente que el Código Internacional del Cianuro permita que la concentración de cianuro en la piscina de relaves sea 100 veces mayor que en la filtración de la piscina de relaves. En la práctica, a menos que el agua de la piscina de relaves pase por un sistema de tratamiento de agua antes de la filtración, se debe esperar que la concentración de

cianuro en la filtración de la piscina de relaves sea aproximadamente idéntica a la concentración de cianuro dentro de la piscina de relaves. Dado que la filtración podría ser accidental y podría evitar un sistema de tratamiento de agua, incluso si existiera, el estándar más conservador (más protector del medio ambiente) sería requerir una concentración máxima de 0,5 mg/L de cianuro WAD dentro de la piscina de relaves, la misma como en la filtración de la piscina de relaves. En la misma línea, el Código Internacional del Cianuro permite que la concentración de cianuro WAD en la filtración de la piscina de relaves sea casi 23 veces mayor que la concentración de cianuro libre en las corrientes aguas abajo, con la salvedad de que las corrientes aguas abajo comienzan al final de la “zona de mezcla”. El Código Internacional del Cianuro aclara que “el Código no establece zonas de mezcla, pero reconoce que algunas jurisdicciones políticas las han establecido. Sin dicha zona de mezcla, la concentración de cianuro libre de 0,022 mg/l debe alcanzarse en el punto de descarga, aplicando efectivamente este valor a la propia descarga” (International Cyanide Management Institute, 2021b). Por lo tanto, incluso sin una “zona de mezcla” (que es un espacio definido por regulación), el Código Internacional de Cianuro permite una concentración de cianuro WAD dentro de la piscina de relaves que podría ser casi 2300 veces mayor que la concentración de cianuro libre en la filtración de la piscina de relaves. Como se indicó anteriormente, una norma más conservadora reconocería la posibilidad de filtración accidental con una concentración de cianuro igual a la concentración dentro de la piscina de relaves y requeriría una concentración máxima de cianuro libre de 0,022 mg/L dentro de la piscina de relaves.

Las regulaciones dentro de la Unión Europea para la eliminación de cianuro en piscinas de relaves en realidad son más estrictas que las que se encuentran en el Código Internacional del Cianuro. El artículo 13, apartado 6, de la Directiva Adoptada 2006/21/CE exige que “*the concentration of weak acid dissociable cyanide in the pond [be] reduced to the lowest possible level using best available techniques*” [la concentración de cianuro disociable en ácido débil presente en las balsas se reduzca al nivel más bajo posible utilizando las mejores técnicas disponibles] (Laitos, 2012). La Directiva establece además que las minas iniciadas después del 1 de mayo de 2008 no pueden depositar relaves que contengan más de 10 mg/L de cianuro WAD, mientras que a las minas construidas o autorizadas antes de esa fecha no se les permitió depositar más de 50 mg/L inicialmente, bajando a 25 mg/L en 2013 y 10 mg/L para 2018. Cabe señalar que la Unión Europea se ha negado a prohibir el uso de cianuro, aunque el Parlamento Europeo ha instado repetidamente a dicha prohibición.

El Principio de Minería 9 del Código Internacional del Cianuro aborda la necesidad de “Diálogo y Divulgación” con las partes interesadas y las comunidades afectadas (International Cyanide Management Institute, 2021a). La Norma de Práctica de Minería 9.1 requiere que las empresas signatarias “Promover el diálogo con las partes interesadas en relación con el manejo del cianuro y abordar responsablemente las preocupaciones identificadas”, mientras que la Norma de Práctica de Minería 9.2 requiere que las empresas “Poner a disposición de las partes interesadas la información operativa y del medio ambiente adecuada sobre el cianuro” (International Cyanide Management Institute, 2021a). Las preguntas para las auditorías de la Norma de Práctica de Minería 9.2 incluyen: “¿Ha desarrollado la operación descripciones escritas de cómo se realizan sus actividades y cómo se maneja el cianuro? ¿Están estas descripciones a disposición de las comunidades y otras partes interesadas? ¿Ha difundido la operación información sobre el cianuro de forma verbal cuando un porcentaje importante de la población local es analfabeta?” (International Cyanide Management Institute, 2021c).

Además del requisito de que las empresas mineras de oro se comprometan con la totalidad del Código Internacional del Cianuro, los Principios de Minería de Oro Responsable exigen el cumplimiento de las mejores prácticas en el diseño y operación de piscinas y de presas de relaves. El Principio 8 de los Principios de la Minería de Oro Responsable se titula “*Environmental stewardship: We will ensure that environmental responsibility is at the core of how we work*” [Cuidado del medio ambiente: Nos aseguraremos de que la responsabilidad ambiental sea el elemento central de nuestra forma de trabajar] (World Gold Council, 2019a). El Requisito 8.2 luego establece, “*We will design, build, manage and decommission tailings storage and heap-leaching facilities and large-scale water infrastructure using ongoing management and governance practices in line with widely supported good practice guidelines*” [Diseñaremos, construiremos, gestionaremos y desmantelaremos instalaciones de almacenamiento de relaves y lixiviación en pilas e infraestructura hídrica a gran escala utilizando prácticas continuas de gestión y gobernanza en línea con directrices de buenas prácticas ampliamente respaldadas] (World Gold Council, 2019a). World Gold Council (2019b) luego aclara que el Requisito 8.2 significa que las empresas mineras de oro deben “Asegurar que las prácticas de gestión y gobernanza se apliquen a las instalaciones existentes, y proporcionar pruebas de cómo éstas se ajustan a la guía de buenas prácticas ... En el caso de nuevas instalaciones, preparar especificaciones de diseño, construcción y gestión con referencias explícitas a directrices de buenas prácticas ampliamente reconocidas ... Analizar y revisar cómo se han tenido en cuenta las directrices de buenas prácticas ampliamente reconocidas en el diseño, la construcción y la gestión de las instalaciones”.

Aunque no se establecen en los Principios de Minería de Oro Responsable, las directrices de mejores prácticas actuales incluyen el Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (GISTM, por sus siglas en inglés) (ICMM-UNEP-PRI, 2020) y La Seguridad ante Todo—Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves (Morrill et al., 2022). Una forma en la que los Principios de Minería de Oro Responsable protegen más el medio ambiente que el GISTM es que los Principios de Minería de Oro Responsable prohíben la deposición directa de relaves en ríos o ambientes submarinos poco profundos para nuevas minas (World Gold Council, 2019a-b), lo cual no está prohibido en el GISTM (ICMM-UNEP-PRI, 2020), pero sí está prohibido para todas las minas en La Seguridad ante Todo (Morrill et al., 2022). De acuerdo con World Gold Council (2019a), “*We will not develop a new mine that would involve the use of riverine or shallow submarine tailings*” [No desarrollaremos una nueva mina que involucre el uso de relaves ribereños o submarinos poco profundos].

Cianuro Libre, Cianuro WAD y Cianuro Total

Los estándares ambientales para el cianuro pueden referirse al cianuro libre o al cianuro total y, a veces, al cianuro WAD (disociable con ácido débil) (ver Tabla 2). El cianuro libre se refiere al cianuro en forma de ion cianuro más cianuro de hidrógeno. El cianuro total se refiere a todas las formas de cianuro, incluido el cianuro libre y una amplia variedad de complejos de metal-cianuro. El cianuro WAD se refiere al cianuro libre más aquellos complejos de metal-cianuro que se disociarán en cianuro libre tras la aplicación de un ácido débil, incluidos los complejos de cianuro con cadmio, cromo, cobre, manganeso, mercurio, níquel, plata y zinc. El cianuro WAD no incluye los complejos fuertes de metal-cianuro, como oro-cianuro, cobalto-cianuro o hierro-cianuro, los cuales requieren la aplicación de ácidos fuertes para la disociación de los complejos de metal-cianuro en cianuro libre (Johnson, 2015; Botz, 2024). Por tanto, el

cianuro total siempre es igual o mayor que el cianuro WAD, lo cual siempre es mayor o igual que el cianuro libre.

La importancia medioambiental de las tres medidas de cianuro se relaciona con sus diferentes niveles de toxicidad. Así, el cianuro libre tiene una alta toxicidad, los complejos débiles de metal-cianuro tienen una toxicidad intermedia y los complejos fuertes de metal-cianuro tienen una baja toxicidad (Johnson, 2015). Debido a que el cianuro libre es una forma altamente tóxica de cianuro, en algunos países, como Brasil y Estados Unidos, sólo el cianuro libre está regulado (ver Tabla 2). Sin embargo, debido a que los ácidos débiles en los estómagos de animales y humanos convertirán los complejos débiles de metal-cianuro en cianuro libre (Laitos, 2013), algunas regulaciones y documentos de orientación se basan en el cianuro WAD. Se ha mencionado que el Código Internacional del Cianuro establece estándares para el cianuro WAD en piscinas de relaves y en filtraciones a partir de piscinas de relaves, pero estándares para cianuro libre en corrientes aguas abajo, aunque el mismo estándar para cianuro libre se aplica a las filtraciones a partir de piscinas de relaves en jurisdicciones que no defina una “zona de mezcla” (International Cyanide Management Institute, 2021b). Finalmente, debido a que todas las formas de cianuro, incluidos los complejos fuertes de metal-cianuro, pueden convertirse en cianuro libre bajo ciertas circunstancias, como la exposición a la luz solar (Johnson et al., 2001, 2002, 2008), sólo el cianuro total está regulado en algunos países, como Ecuador y España (ver Tabla 2).

Es fundamental que las concentraciones de cianuro libre, cianuro WAD y cianuro total no se utilicen indistintamente al comparar las concentraciones medidas con los límites reglamentarios, en particular porque el cianuro total puede ser mucho mayor que el cianuro libre. Por ejemplo, Ecuador y España, que regulan el cianuro total, tienen límites máximos permisibles de 0,1 mg/L y 0,04 mg/L, respectivamente (ver Tabla 2). Por otro lado, Brasil y Estados Unidos, que regulan el cianuro libre, tienen límites máximos permisibles de 0,005 mg/L y 0,0052 mg/L, respectivamente (ver Tabla 2), lo que sugiere que una concentración de cianuro total podría ser de 8 a 20 veces mayor que la concentración de cianuro libre. Hay muchos ejemplos de datos en la literatura geoquímica en los que el cianuro total en las aguas residuales de las minas era entre 10 y 100 veces mayor que el cianuro WAD o el cianuro libre (Smith y Mudder, 1999; Johnson et al., 2000, 2001, 2002, 2008; Johnson, 2015). Estos resultados deberían esperarse porque el cianuro libre se atenuará mucho más fácilmente en el agua superficial, mediante procesos como la volatilización o la biodegradación, que las formas más resistentes de cianuro.

Un factor adicional que minimiza la concentración de cianuro libre en las aguas residuales de una mina de oro es que la operación de procesamiento de cianuro está diseñada de tal manera que minimice la aparición de cianuro libre (ion cianuro más cianuro de hidrógeno) en la solución impregnada. La intención de una operación con cianuro es maximizar la conversión de la sal de cianuro (que se habría disociado en el ion cianuro y el cianuro de hidrógeno) en un complejo de oro-cianuro. Por lo tanto, cualquier ion cianuro o cianuro de hidrógeno que quede en la solución impregnada representa cianuro que no extrajo oro y que potencialmente podría perderse del circuito de procesamiento. El cianuro de hidrógeno podría perderse por volatilización, mientras que el cianuro libre restante podría convertirse en cianuro de hidrógeno y luego perderse.

Mecanismos de Falla de Presas de Relaves

Los principales mecanismos de falla de las presas de relaves son, sin ningún orden en particular (ICOLD y UNEP, 2001):

- 1) desbordamiento
- 2) inestabilidad de pendiente
- 3) licuefacción sísmica
- 4) licuefacción estática
- 5) falla de cimientos
- 6) erosión interna

Los mecanismos anteriores se revisarán en esta subsección, con especial atención a la erosión interna (también llamada canalización).

El desbordamiento ocurre cuando una piscina de relaves contiene una cantidad excesiva de agua, de modo que la precipitación adicional o el flujo de agua superficial hacia la piscina hace que el agua fluya sobre la cara del terraplén exterior. Para reducir costos, las presas de relaves casi siempre se construyen con material disponible localmente en el sitio de la mina, en lugar de hormigón o material que se compra en las canteras. El material disponible localmente podría ser roca o tierra o podrían ser los residuos que se generan en la operación minera, como los escombros o la fracción más gruesa de los propios relaves. Cualquier agua que fluya sobre un terraplén de tierra tenderá a erosionarlo y los barrancos resultantes podrían progresar hasta la ruptura del terraplén o su completa desaparición. Que un evento de desbordamiento progrese hasta una falla catastrófica depende de la velocidad y la duración del flujo y de si el terraplén tiene alguna capa protectora, como una capa de armadura de roca. El deslizamiento o hundimiento de una pendiente puede tener el mismo efecto y podría progresar hasta la ruptura o la desaparición completa de un terraplén una vez que el agua comience a fluir sobre el hundimiento. La inestabilidad de la pendiente puede ser promovida por un aumento en la presión del agua intersticial dentro de la presa o por un aumento en el nivel freático.

La actividad sísmica podría provocar la licuefacción de los relaves o del material de la presa. Los relaves en la piscina de relaves se depositan sin compactar y no se pudieron compactar porque están demasiado húmedos. El material de la presa podría compactarse durante la construcción de la presa, pero la compactación podría haber sido inadecuada. En cualquier caso, las sacudidas sísmicas u otras perturbaciones, como la perforación o la actividad vehicular, podrían promover una consolidación repentina de los relaves o del material de la presa. Si los materiales están saturados con agua y si la perturbación es tan repentina que el agua no puede escapar de los poros entre las partículas sólidas, entonces las partículas no podrán consolidarse, de modo que la tensión perturbadora provocará un aumento en la presión del agua de los poros. Este aumento de la presión del agua rompe los contactos entre las partículas. Dado que el agua ahora apoya todo el peso de los relaves o de la presa, la masa de partículas y el agua se comporta como un líquido casi sin resistencia, fenómeno conocido como licuefacción. La licuefacción normalmente deriva en una falla catastrófica de la instalación de relaves.

Si la licuefacción no se inicia mediante un movimiento cíclico, como en un temblor, el mecanismo de falla se llama licuefacción estática. La licuefacción estática puede iniciarse por cualquier evento no cíclico que pueda promover un intento repentino de consolidación de las partículas sólidas sin oportunidad de que escape el agua. Ejemplos de eventos no cíclicos podrían ser cualquier aumento repentino de la tensión sobre las partículas sólidas no compactadas, como lluvias intensas o la adición de nuevos relaves tan rápido que los relaves no puedan sedimentarse

fuera del agua y consolidarse. La falla de los cimientos debajo de una presa de relaves o una piscina de relaves también puede ser un tipo de licuefacción estática.

La erosión interna es el fenómeno en el que la filtración de agua a través de la presa o sus cimientos es lo suficientemente rápida como para arrastrar partículas finas, lo que puede provocar una pérdida de integridad estructural, seguida de una ruptura de la presa (ver Figs. 8-9). Hay tres formas principales de prevenir la erosión interna de presas de tierra o relaves mediante el diseño adecuado de la presa. El primer método es la instalación de una combinación de un drenaje vertical y un drenaje horizontal para forzar la salida de la filtración por el pie del terraplén, en lugar de salir por la cara del terraplén (ver Figs. 10-11 y comparar con Fig. 9). Los drenajes son vías preferenciales para el flujo de agua a través de una presa porque están contruidos con materiales con mayor conductividad hidráulica que el resto de la presa, como grava o roca triturada. El segundo método es la instalación de un filtro apropiado en el lado aguas arriba del sistema de drenaje para atrapar partículas finas y evitar su arrastre con la filtración a través de la presa (ver Fig. 11).

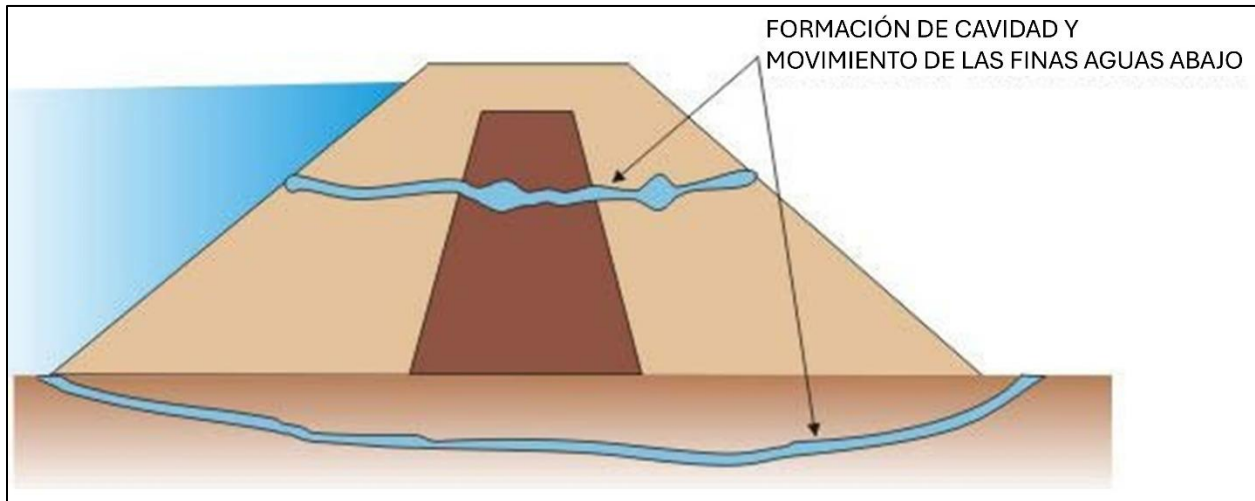


Figura 8. La erosión interna (también llamada canalización) es un mecanismo común de falla de presas de relaves. La erosión interna ocurre cuando la filtración de agua a través de la presa o sus cimientos es lo suficientemente rápida como para arrastrar partículas finas, lo que puede provocar una pérdida de integridad estructural, seguida de una ruptura de la presa. Figura de Bentahar (2012) con superposición de etiquetas en español.

El tercer método para diseñar presas para prevenir la erosión interna es reducir al máximo el caudal de agua que fluye a través de la presa. El caudal de agua es proporcional al gradiente hidráulico, lo que es la diferencia entre los niveles de agua en los lados aguas arriba y aguas abajo dividida por la longitud del camino hidráulico (ver Fig. 12). El gradiente hidráulico se puede reducir bajando el nivel del agua en el lado aguas arriba de la presa de relaves (ver Fig. 12), lo que también reduciría la probabilidad de que la presa se desborde. Otro enfoque para reducir el gradiente hidráulico es alargar el camino hidráulico, por ejemplo, disminuyendo la inclinación del terraplén exterior. Desde un punto de vista teórico, el ángulo crítico máximo para evitar la erosión interna es 1V: 1H (1 metro vertical por 1 metro horizontal) (Holtz et al., 2011). Un terraplén tan empinado no dejaría margen de error y no es recomendable.

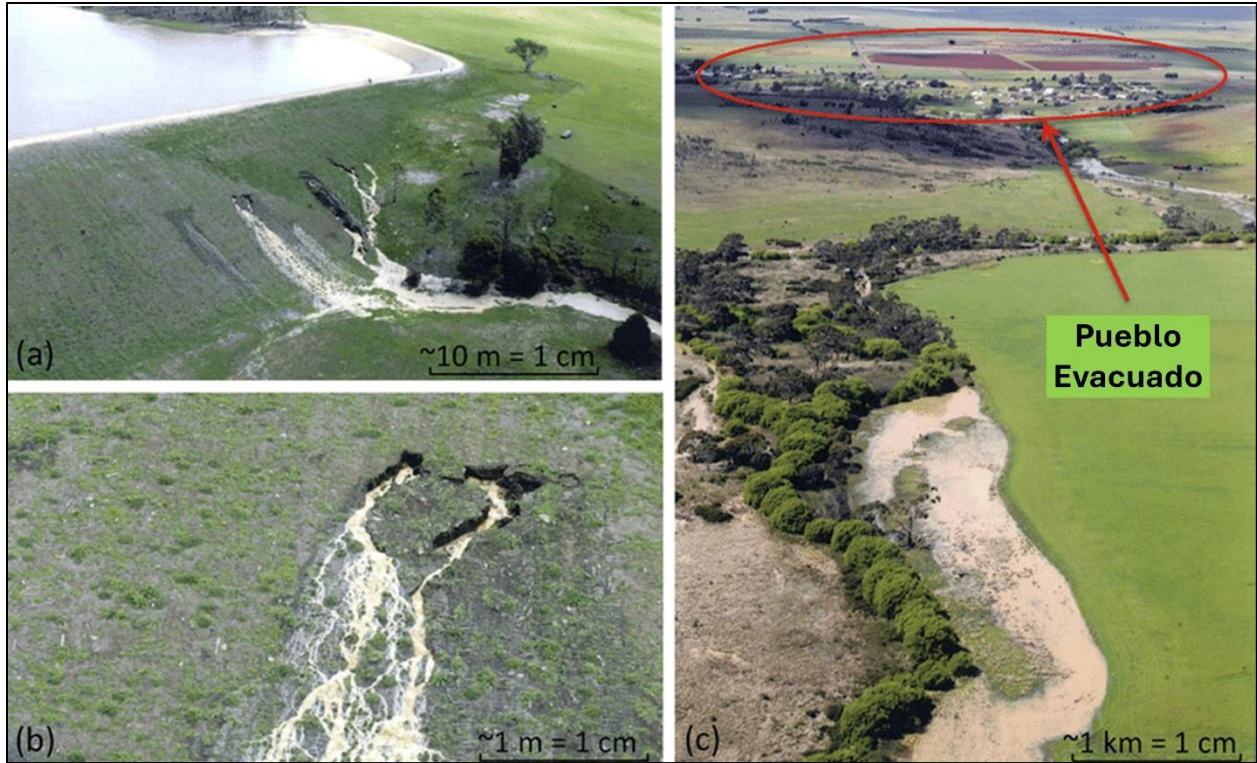


Figura 9. La erosión interna (también llamada canalización) es un mecanismo común de falla de presas de relaves. La erosión interna ocurre cuando la filtración de agua a través de la presa o sus cimientos es lo suficientemente rápida como para arrastrar partículas finas, lo que puede provocar una pérdida de integridad estructural, seguida de una ruptura de la presa. Las fotos muestran la falla por erosión interna de la presa Tunbridge en Tasmania, Australia, en 2005. Figura de Fisher et al. (2017) con superposición de etiquetas en español.

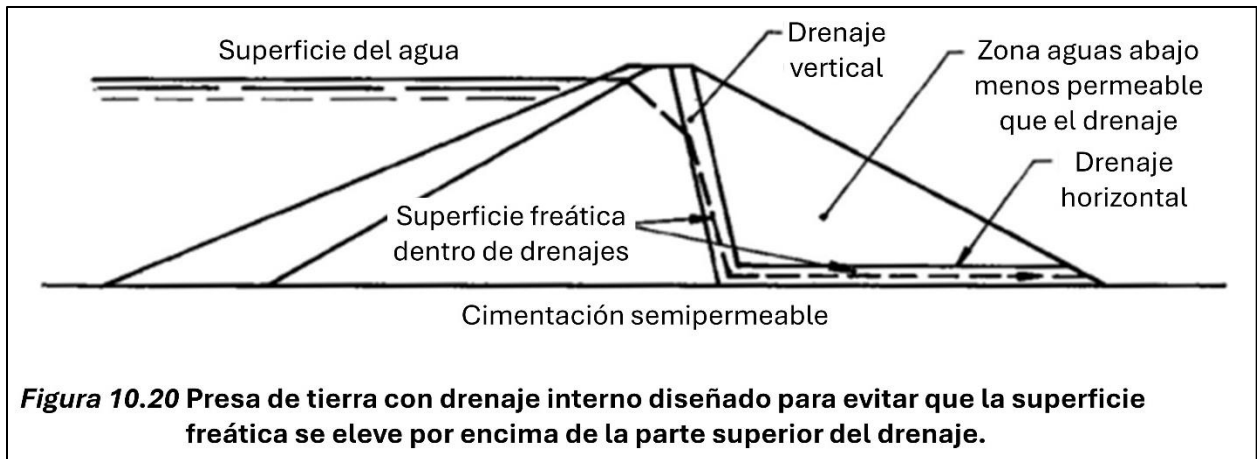


Figura 10.20 Presa de tierra con drenaje interno diseñado para evitar que la superficie freática se eleve por encima de la parte superior del drenaje.

Figura 10. Existen tres métodos principales para prevenir la erosión interna de presas de tierra o de relaves. El primer método es la instalación de una combinación de un drenaje vertical y un drenaje horizontal para forzar la salida de las filtraciones por la base del terraplén, en lugar de salir por la cara del terraplén (comparar con Figs. 8-9). Figura de Fell et al. (2015) con superposición de etiquetas en español.

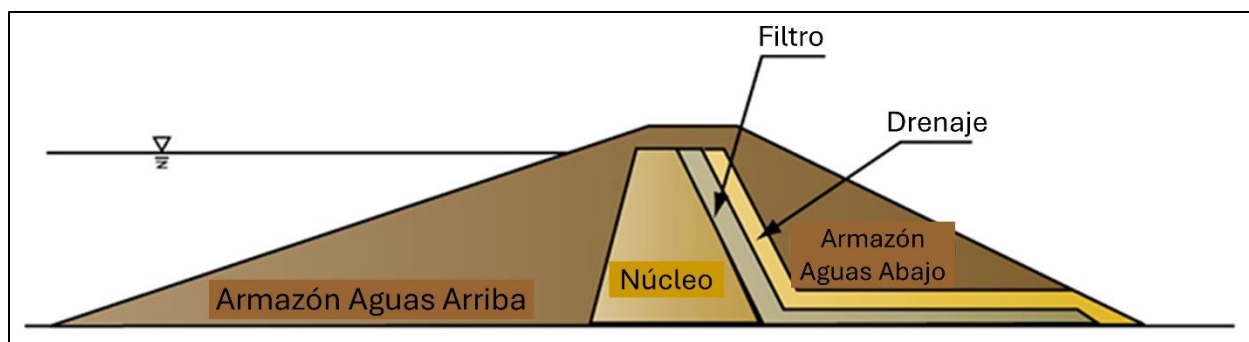


Figura 11. Existen tres métodos principales para prevenir la erosión interna de presas de tierra o de relaves. El segundo método es la instalación de un filtro adecuado para atrapar las partículas finas y evitar su arrastre con la filtración a través de la presa. El diagrama también muestra la combinación de un drenaje vertical y un drenaje horizontal que fuerza a las filtraciones a salir por la base del terraplén, en lugar de salir a lo largo de la cara del terraplén (ver Fig. 9). Figura de ASDSO (2024) con superposición de etiquetas en español.

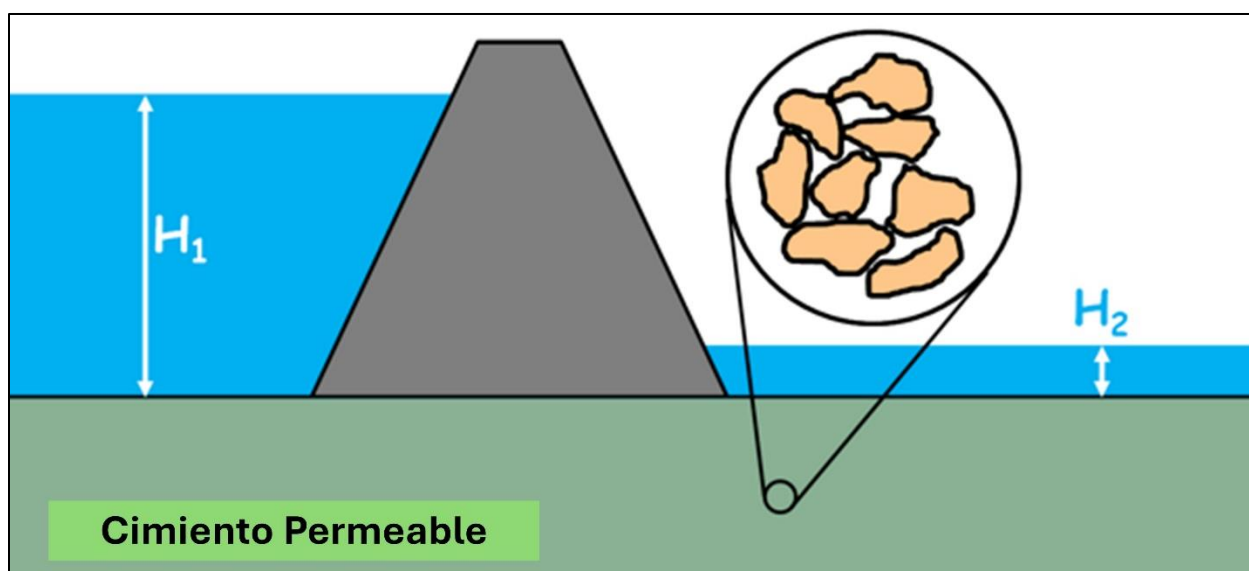


Figura 12. Existen tres métodos principales para prevenir la erosión interna de presas de tierra o de relaves. El tercer método es reducir la inclinación del terraplén exterior, para alargar el camino de filtración a través del terraplén. Alargar el camino reduce el gradiente hidráulico (relación entre la diferencia de altura ($H_1 - H_2$) y la longitud del camino), reduciendo así la velocidad de filtración a través de la presa. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. requiere ángulos de pendiente no mayores a 1V:5H (11° desde la horizontal) para evitar fallas por erosión interna (USACE, 2000). Figura de Elementary Engineering Library [Biblioteca de Ingeniería Primaria] (2024) con superposición de etiqueta en español.

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. recomienda que las pendientes no sean más empinadas que 1V: 5H (11° desde la horizontal) para evitar la erosión interna. De acuerdo con USACE (2000), “*For sand levees, a 1V on 5H landside slope is considered flat enough to prevent damage from seepage exiting on the landside slope*” [Para los diques de arena, una inclinación de 1V por 5H al lado de la tierra se considera lo suficientemente plano para evitar daños por filtraciones que salen del talud al lado de la tierra]. La Seguridad ante Todo acepta, por escrito, “La inclinación del terraplén exterior de la presa de relaves debe ser lo suficientemente baja para reducir la probabilidad anual de falla por tubificación, también conocido como erosión interna, a un nivel aceptable. Los nuevos terraplenes externos deben ser construidos con una inclinación de 1V:5H o menos. Se debe agregar un relleno adicional a terraplenes externos

existentes con una inclinación mayor a 1V:5H para cumplir con el nivel recomendado, de acuerdo con la orientación de USACE. Una propuesta de construcción o mantenimiento de un terraplén externo con inclinación mayor a 1V:5H debe ser justificada por escrita ante los reguladores y el público. Esta justificación no puede fundamentarse solamente en consideraciones económicas, sino debe demostrar que la probabilidad de falla por erosión interna para un diseño en particular es lo suficientemente baja, aún con la inclinación mayor” (Morrill et al., 2022).

Las pendientes suaves también pueden prevenir fallas por actividad sísmica o inestabilidad de la pendiente. Además, una inclinación suave del terraplén podría reducir la probabilidad de falla de los cimientos al distribuir el peso de la presa en un área mayor. Según el libro de texto Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities [Ingeniería Geotécnica para Instalaciones de Almacenamiento de Residuos Mineros], “*Considering the requirement that the storage capacity for tailings solids of a given site must be maximized, together with the requirements for overall shear stability and the requirement to limit rates of surface erosion, as well as the practical advantage of a slope that can be worked mechanically, an acceptable slope angle for tailings slopes appears to lie in the range of 15-20°. A round figure of 1 vertical on 3 horizontal or 18° appears to be a good compromise*” [Considerando el requisito de maximizar la capacidad de almacenamiento de relaves sólidos de un sitio determinado, junto con los requisitos de estabilidad general al corte y el requisito de limitar las tasas de erosión superficial, así como la ventaja práctica de una pendiente que se puede trabajar mecánicamente, un ángulo de pendiente aceptable para pendientes de relaves parece estar en el rango de 15 a 20°. Un número redondo de 1 vertical sobre 3 horizontales o 18° parece ser un buen compromiso] (Blight, 2010). Cabe destacar que la inclinación máxima de 1V: 3H no pretendía maximizar la protección del medio ambiente, sino lograr un equilibrio entre la necesidad de proteger el medio ambiente y la necesidad de almacenar el máximo volumen de relaves (lo que podría implicar reducir el espacio ocupado por la presa para crear más espacio de almacenamiento detrás de la presa). Ministry of Energy and Mines [Ministerio de Energía y Minas] (Columbia Británica) (2016) especifica una inclinación aguas abajo no superior a 1V: 2H (26,5° desde la horizontal). De acuerdo con las regulaciones de Columbia Británica, la cita anterior de La Seguridad ante Todo continúa, “La inclinación de la presa no debe ser mayor de 1V:2H en ninguna circunstancia” (Morrill et al., 2022).

La aparición de agua turbia emergiendo de una presa de relaves (ver Fig. 9) es una señal peligrosa porque indica que la erosión interna ha progresado hasta el punto en que la filtración está arrastrando pequeñas partículas, que podrían ser relaves de grano fino o el material de construcción de la presa o ambos. Por lo tanto, la aparición de filtraciones turbias podría indicar una última oportunidad para tomar medidas correctivas, lo que podría significar un descenso inmediato del nivel del agua detrás de la presa o la construcción de emergencia de un contrafuerte en el pie de la presa para aumentar la longitud del camino hidráulico, ambos de cuáles podrían reducir el caudal de filtración. Si la presa está en proceso de perder su integridad estructural, por ejemplo, si la grieta a través de la cual emerge la filtración se está expandiendo hacia arriba, entonces puede ser necesario tomar medidas para proteger a la comunidad aguas abajo, como evacuaciones (ver Fig. 9). La importancia de las acciones correctivas en la cadena de eventos que conducen a la falla de la presa de relaves se analiza con más detalle en la siguiente subsección.

Un factor adicional relacionado con el diseño, que se aplicaría a la erosión interna, así como a todos los demás mecanismos de falla, es que la piscina de relaves debe diseñarse de tal

manera que se minimicen las consecuencias de la falla. Por esta razón, el Código Internacional del Cianuro, los Principios de Minería de Oro Responsable (que incorporan el Código Internacional del Cianuro) y la Unión Europea exigen la destrucción del cianuro antes de que los relaves de oro se depositen en las piscinas de relaves. La única distinción es que el Código Internacional de Cianuro exige la destrucción de cianuro hasta 50 mg/L de cianuro WAD (International Cyanide Management Institute, 2021c), mientras que la Unión Europea exige la destrucción de cianuro “*to the lowest possible level using best available techniques*” [al nivel más bajo posible utilizando las mejores técnicas disponibles] y no más de 10 mg/L de cianuro WAD bajo ninguna circunstancia (Laitos, 2012).

Causas Próximas y Fundamentales de las Fallas en las Presas de Relaves

Es importante señalar que la lista anterior de mecanismos de falla de presas de relaves (desbordamiento, inestabilidad de pendiente, licuefacción sísmica, licuefacción estática, falla de cimientos, erosión interna) son todas causas próximas o últimas, es decir, las causas que ocurrieron más o menos inmediatamente antes de la falla de la presa. Sin embargo, las presas fallan debido a una cadena de eventos o causas, de las cuales la causa próxima es sólo el evento final o el desencadenante. El primer paso de la cadena, que pone en marcha los acontecimientos, es la causa fundamental. La causa fundamental también podría ser un evento continuo que, si se hubiera eliminado, habría evitado la falla de la presa. La causa próxima es casi siempre un evento físico, como el agua que desborda y erosiona una presa. Las causas fundamentales, así como muchas de las causas intermedias, son siempre acciones de los seres humanos. De esta manera, una presa es una construcción antropogénica, no simplemente una forma de relieve física.

La siguiente posible cadena de eventos, que podría aplicarse a la presa de relaves en la mina El Corazón, se presenta en este punto sólo para ilustrar la distinción entre causas fundamentales y próximas:

- 1) Una piscina de relaves está diseñada para una mina de oro cuyo terraplén es excesivamente empinado. Además, la presa no incluye un sistema de drenaje que forzaría la aparición de filtraciones en el pie de la presa y no incluye filtros para atrapar partículas finas. Finalmente, no existe ningún plan para la destrucción del cianuro antes de que los relaves y el agua enriquecida con cianuro se depositen en la piscina de relaves.
- 2) No se revisa el diseño de la piscina de relaves o la revisión es inadecuada, por lo que no se llama la atención sobre las deficiencias en el diseño.
- 3) La piscina de relaves se construye según la diseñada.
- 4) No se realizan inspecciones o revisiones de seguridad de presa o son inadecuadas, por lo que no se llama la atención sobre las deficiencias en el diseño.
- 5) La filtración (agua enriquecida con cianuro) aparece en lo alto de la cara de la presa. La filtración es clara y no turbia.
- 6) Nadie se da cuenta de la filtración o nadie comprende su significado.
- 7) La filtración se vuelve turbia (indicando que la erosión interna está en progreso) y el lodo y el agua enriquecida con cianuro aparecen en las corrientes aguas abajo.

En el Paso #7, la presa ha fallado, pero aún no ha sufrido una falla catastrófica. De hecho, la presa ya había fallado en el Paso #5 porque no estaba cumpliendo su función de evitar que agua enriquecida con cianuro ingrese a las corrientes aguas abajo. Lo importante es que, si bien el evento final (el arrastre de partículas finas hacia la filtración) fue puramente físico, la causa

fundamental fue el diseño inadecuado de la piscina de relaves, el cual reflejaba las acciones o la falta de acciones de los seres humanos. Si en algún punto de la cadena de eventos, la causa fundamental o las causas intermedias se hubieran revertido (ya sea que la instalación hubiera sido diseñada adecuadamente o alguien hubiera llamado la atención sobre lo inadecuado del diseño), la cadena de eventos se habría roto y la falla no se habría producido. La cuestión de si la hipotética cadena de eventos anterior es relevante para la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón se discutirá en la sección “Respuestas”.

RESUMEN DE PISCINAS DE RELAVES EN LA MINA DE ORO EL CORAZÓN

A pesar de los peligros que las piscinas de relaves representan para el medio ambiente y las comunidades aguas abajo, sorprendentemente hay poca información disponible públicamente sobre las piscinas de relaves en la mina El Corazón. Sorprende especialmente que las 423 páginas de la Auditoría Ambiental de 2020-2022 (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023b) ni siquiera mencionen la existencia de las piscinas de relaves ni proporcionen información alguna sobre lo que sucede con los relaves mineros. La Auditoría Ambiental 2020-2022 menciona la existencia de roca estéril, pero no que la gran mayoría del yacimiento está convertido en relaves, y que hay que hacer algo con los relaves. Ya se ha mencionado que la ley del yacimiento es de 2,5-3,0 gramos de oro por tonelada de mineral (MEM, 2023), por lo que el 99,99970-99,99975% del yacimiento se convierte en relaves. Según la Auditoría Ambiental de 2020-2022, “El método de explotación subterráneo empleado por Agroindustrial El Corazón S.A., permite el arranque selectivo de mineral, por lo que la mayor parte de material extraído en la mina es enviada a la planta de beneficio” (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023b). Es igualmente sorprendente que la Auditoría Ambiental de 2020-2022 no mencione que se utiliza cianuro en el procesamiento del mineral de oro ni proporcione información sobre cómo se almacena y gestiona el cianuro de manera segura. Además de la preocupación de la empresa de que se haya liberado cianuro en las corrientes aguas abajo (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a), la única información explícita de que el cianuro se utiliza para el procesamiento de mineral de oro en la mina El Corazón es la declaración en Defensoría del Pueblo del Ecuador (2024) que “La compañía explicó que el agua que se ocupa en la actividad industrial recircula, esta agua contiene cianuro”.

Una falta de transparencia tan extrema no es estándar en la industria minera. El Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera fue lanzado por el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), la Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y Principios de Inversión Responsable (PRI) en agosto de 2020 (ICMM-UNEP-PRI, 2020). El Principio 15 del GISTM llama a las empresas mineras “hacer pública y permitir el acceso a la información sobre instalaciones de relaves para respaldar la rendición de cuentas (accountability) al público general” (ICMM-UNEP-PRI, 2020). El Requisito 15.1 aclara que las empresas deben “publicar y actualizar regularmente información sobre el compromiso del operador con la gestión segura de las instalaciones de relaves, la implementación de su marco de gobernanza de relaves, las políticas a nivel de toda la organización, estándares y enfoques para el diseño, construcción, monitoreo y cierre de las instalaciones de relaves” (ICMM-UNEP-PRI, 2020). El Requisito 15.2 es aún más amplio, ya que exige que las empresas “responder de manera sistemática y oportuna a las solicitudes de información de las partes interesadas y afectadas, y proveer de material informativo importante para la seguridad pública y la integridad de una instalación de relaves” (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Finalmente, el Requisito 15.3 insta a las empresas “comprometerse a cooperar con iniciativas creíbles de transparencia mundiales para

crear bases de datos, inventarios u otros repositorios estandarizados de información sobre instalaciones de relaves, independientes, de acceso público y para todo el sector relacionadas con la seguridad y la integridad de instalaciones de relaves” (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Un ejemplo del Requisito 15.3 sería el Global Tailings Portal [Portal Global de Relaves] (GRID-Arendal et al., 2024), que no ha recibido ninguna información sobre las presas de relaves en la mina El Corazón.

Las Empresas Miembros del ICMM estaban obligadas a cumplir plenamente con el GISTM antes del 5 de agosto de 2023 (ICMM, 2021). Así como Agroindustrial no es signatario del Código Internacional de Cianuro, tampoco es Empresa Miembro del ICMM, ni ha asumido su propio compromiso de cumplir con el GISTM. Sin embargo, cabe destacar que entre las Asociaciones Miembros del ICMM se encuentra la Cámara de Minería del Ecuador (CME), la Asociación Colombiana de Minería (ACM), el Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) [Instituto Brasileño de Minería], el Instituto de Ingenieros de Minas del Peru (IIMP), la organización peruana Instituto de Seguridad Minera (ISEM) y el World Gold Council [Consejo Mundial de Oro] (ICMM, 2024). Por lo tanto, la expectativa de divulgación pública sobre las instalaciones de relaves está bien establecida a nivel nacional, regional y global.

En términos de transparencia respecto de las instalaciones de relaves, el GISTM debe considerarse como un estándar mínimo porque, en general, exige divulgaciones públicas sólo en forma resumida. Por ejemplo, el Requisito 15.1 detalla que las empresas deben proporcionar “Un resumen de los resultados de la evaluación de riesgos pertinentes a la instalación de relaves ... Un resumen de las evaluaciones de impacto y de la exposición y vulnerabilidad de los seres humanos ante los escenarios creíbles de fallas de flujo para la instalación de relaves ... Un resumen de los hallazgos importantes de las revisiones de desempeño anuales y de la RSP [Revisión de Seguridad de Presas], incluyendo la implementación de las medidas de mitigación para reducir riesgos hasta el nivel ALARP [Nivel Más Bajo Razonablemente Factible] ... Un resumen de los hallazgos importantes del programa de monitoreo ambiental y social, incluyendo la implementación de las medidas de mitigación ... Una versión resumida de los PPRE [Plan de Preparación y Respuesta ante Emergencias] de las instalaciones de relaves que tienen un modo o modos creíbles de falla que podrían causar un evento de falla de flujo” (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Por el contrario, el documento de orientación *La seguridad primero: Directrices para la gestión responsable de relaves* (Morrill et al., 2022) es mucho más amplio en términos de la información que debe divulgarse al público y no se limita a proporcionar información sólo de forma resumida. Por el contrario, el documento de orientación La Seguridad ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves (Morrill et al., 2022) es mucho más amplio en términos de la información que debe divulgarse al público y no se limita a proporcionar información sólo en forma resumida. Sin embargo, cabe señalar que el Requisito 15.2 del GISTM, citado anteriormente, exige que las empresas respondan “a las solicitudes de información adicional de las partes interesadas y afectadas” y no establece que sería aceptable proporcionar esta información sólo en forma resumida. En la subsección “Mecanismos de Falla de Presas de Relaves” se proporcionaron maneras adicionales en las que La Seguridad ante Todo protege más el medio ambiente y las comunidades afectadas por la minería que el GISTM.

Alguna información sobre la Piscina Nro. 15 está disponible en los diversos informes sobre la falla de la presa de relaves, pero no está claro en qué medida esta información se aplica a las otras 19 piscinas de relaves. Aun así, la información sobre la Piscina Nro. 15 no siempre es clara o consistente. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “La piscina Nro. 15 se encuentra en el sector de coordenadas: 743.895; 10.028.835 (en el punto de descarga de la

fuga de relave por fisuramiento de la geomembrana de la piscina 15), cuyo volumen de relaves almacenados alcanza los 51000 m³”. Por otro lado, de acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “En el caso de piscina número 15, [los representantes de Agroindustrial] señalaron que tenía una capacidad aproxima de 55 mil metros cúbicos, es decir capacidad para 55 millones de litros de agua”.



Figura 13. La Piscina No. 15 de la mina El Corazón contenía alrededor de 50.000 metros cúbicos de agua y relaves antes de la falla de la presa de relaves el 4 de noviembre de 2023. Foto de Municipio de Cotacachi (2023a).

Por lo tanto, no está claro si la Piscina Nro. 15 estaba almacenando menos de su capacidad total en el momento de la falla o si los volúmenes declarados se refieren al volumen de relaves o al volumen combinado de relaves y agua sobrenadante. Todas las fotos de la Piscina Nro. 15 muestran agua cubriendo los relaves (ver Fig. 13), pero se desconoce la profundidad del agua. El Municipio de Cotacachi (2023a) continúa “Técnicos de la empresa manifestaron que en la piscina sedimentada hay aproximadamente un 40% de metales pesados”. La afirmación anterior puede estar usando la frase “metales pesados” como sinónimo de “relaves sólidos” (lo cual sería incorrecto) y puede significar que el 40% de la Piscina Nro. 15 estaba lleno con una mezcla de agua y relaves, mientras que el 60% del volumen de la piscina era una cubierta de agua encima de los relaves. Dado que el agua llenará los espacios porosos entre los relaves, es difícil hablar de volúmenes separados para agua y relaves. Con respecto a la capacidad de la Piscina Nro. 15, representantes de Agroindustrial informaron a la Defensoría del Pueblo del

Ecuador (2024) que la Piscina Nro. 15 no sólo estaba llena, sino que se encontraba en capacidad de emergencia al momento de la falla. De acuerdo con la Defensoría del Pueblo del Ecuador (2024), “Adicional [representantes de Agroindustrial] señalan que desde octubre de 2023 la piscina estuvo suspendida, encontrándose 1 mes suspendida, se dio la fisura de la geomembrana, encontrándose la piscina de relave nro. 15 inactiva ... Debido a que su contenido llegó al punto de emergencia, teniendo en cuenta que cada piscina cuenta con una línea de seguridad y un punto de emergencia frente al cual la recomendación técnica es su suspensión”.



Figura 14. Relaves de oro húmedos de la mina El Corazón se depositan sobre una geomembrana impermeable. El problema fundamental del diseño es que una geomembrana no debe ser el único mecanismo de defensa contra la falla de la piscina de relaves. Según el diseño actual, cualquier desgarró en la geomembrana provocará la liberación de relaves y agua cargada de cianuro. Foto de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a).

El agua y los relaves de la Piscina Nro. 15 fueron depositados sobre una geomembrana impermeable con un espesor de 0,7 milímetros (ver Fig. 14). La geomembrana impermeable se colocó encima de un sistema de drenaje que se construyó para evitar que el agua de lluvia se estanque debajo de la geomembrana. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “La misma cuenta con drenajes artificiales de hasta 3 m. de profundidad, construidos con piedra, grava y arena y cubiertos con Geomembrana de 0,7 mm color negra, termo unida por el proveedor del material; los drenes son construidos para captar filtraciones de aguas lluvia bajo geomembrana de la piscina”. Durante la construcción de Piscinas Nros. 14 y 15, se descubrieron manantiales, por lo que los drenajes debajo de la geomembrana tienen la tarea adicional de evitar que el agua subterránea se estanque debajo de la geomembrana. De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “[Los representantes de Agroindustrial] señalaron que durante la construcción de estas 2 piscinas se encontraron vertientes de agua, mismos que han realizado obras para drenar el agua subterránea encontrada en la base de la piscina y luego de eso se ha colocado la geo-membrana que cubre toda la dimensión de las piscinas”. No hay información sobre si existen manantiales debajo de alguna de las otras piscinas de relaves.

Durante la inspección realizada por el Municipio de Cotacachi (2023a) del 6 al 7 de noviembre de 2023, se descubrió que el agua de la mina subterránea estaba descargando directamente al río Manduriaco Chico (a veces escrito como Manduriacu Chico) (ver Fig. 3). De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “De dos bocaminas se encontró que existe descarga de aguas subterráneas, sin tratamiento, al río Manduriaco Chico”. Los representantes de Agroindustrial incluso identificaron el flujo de agua a partir de la mina sin tratar como la fuente

de la coloración en el río Manduriaco Chico. De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “[Los representantes de Agroindustrial] señalan que en esta galería se encuentra una arcilla denominada Sericita y que ella sería la causante de la coloración verdosa del agua y que toma esta coloración más fuerte cuando al interior de los túneles hay movimientos”. El Municipio de Cotacachi (2023a) concluyó, “Se recomienda realizar el tratamiento de aguas subterráneas antes de realizar descargas por la salida de los túneles: Florencia y túnel 110 del nivel 3, que son afluentes del río Manduriaco Chico, para lo cual deberá tener medios de verificación”. La importancia de la coloración de las corrientes aguas abajo de la mina El Corazón se analizará con más detalle en la siguiente sección. En la sección “Respuestas” se proporcionará más información sobre las presas de relaves en la mina El Corazón.

RESUMEN DE FALLA DE PRESA DE RELAVES EL 4 DE NOVIEMBRE DE 2023

Cambios en la Coloración de las Corrientes y Muertes Previas de Ganado

La falla de la presa de relaves en la mina El Corazón ocurrió a las 2:00 am del sábado 4 de noviembre de 2023 (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a; MAATE, 2023b; MEM, 2023). Seis horas después, habitantes de las comunas de El Corazón y Río Verde notaron cambios pronunciados en el color y turbidez del río Manduriaco Chico, de la quebrada Verde Chico y del río Verde (ver Fig. 3). De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “Mediante llamada telefónica y videos enviados por la aplicación WhatsApp de pobladores de las comunidades de Río Verde y El Corazón el 06 de noviembre de 2023, ponen en conocimiento de la municipalidad una presunta contaminación al río Manduriaco Chico y al río Verde Chico, esto ya que visualmente se nota un cambio en la coloración del agua (turbidez) ... Habitantes de la comuna de Río Verde señalan que ellos se dieron cuenta del cambio de coloración del Río Verde el día sábado 4 de noviembre de 2023, aproximadamente a las 8h00 am, hora en la cual turistas y visitantes iban a visitar el río”. No está claro cómo conciliar la afirmación de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) de que “la afectación por CN no alcanzó el segundo punto de monitoreo” (391 metros aguas abajo del punto de descarga de la Piscina Nro. 15) cuando la turbidez (presumiblemente, relaves de grano fino) se observó en el río Verde, a más de 4 kilómetros aguas abajo del punto de descarga (ver Fig. 3), a menos que la empresa minera simplemente afirme que el agua rica en cianuro liberada de la Piscina Nro. 15 había suficientemente diluida por otras aguas de corriente.

El característico cambio de coloración de las corrientes aguas abajo de la mina El Corazón tiene un historial en esta área, lo que sugiere que ha habido fallas no documentadas en presas de relaves. Por ejemplo, hubo una aparición repentina de un color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico el 9 de junio de 2023 (ver Figs. 15a-b). De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023b), “En este lugar, el Sr. Landi Wilson, señala que el día viernes 09 de junio de 2023, a los 8h00 am bajo a observar el río, porque el día sábado 10 de junio de 2023 tenía un grupo de turista y les gusta visitar el río, en este recorrido se encontró con la novedad de que este río estaba totalmente de un color plomo ... Señala que los turistas, por las condiciones que estaba el río, el día sábado 10 de junio de 2023, ya no pudieron meterse a bañar, que en lo que va de este año es la segunda vez que ocurre este cambio repentino de coloración de este río”. Luego de realizar una inspección el 11 de junio de 2023, el Municipio de Cotacachi (2023b) observó que “El agua del Río Manduriaco Chico, aunque ha pasado tres días desde que se ha visibilizado el cambio repentino de color, aún permanece de una tonalidad ploma-verdosa”. La descripción del

color como “plomo” probablemente se refiere al característico color gris claro del mineral galena (sulfuro de plomo).



Figura 15a. El 11 de junio de 2023 se observó una coloración verde grisácea en el río Manduriaco Chico (ver Fig. 3), que había aparecido repentinamente dos días antes. Los colores grisáceos generalmente se asocian con partículas finas, como relaves de grano fino. Según los mapas de corrientes, fotografías aéreas e imágenes satelitales disponibles, el camino desde una de las piscinas de relaves hasta el río Manduriaco Chico no está claro (ver Figs. 3-4). Fotos de Municipio de Cotacachi (2023b).



Figura 15b. El 11 de junio de 2023 se observó una coloración verde grisácea en el río Manduriaco Chico (ver Fig. 3), que había aparecido repentinamente dos días antes. Los colores grisáceos generalmente se asocian con partículas finas, como relaves de grano fino. Según los mapas de corrientes, fotografías aéreas e imágenes satelitales disponibles, el camino desde una de las piscinas de relaves hasta el río Manduriaco Chico no está claro (ver Figs. 3-4). Fotos de Municipio de Cotacachi (2023b).



Figura 16. El 4 de noviembre de 2023, el mismo color verde grisáceo apareció en el río Manduriaco Chico (comparar con Figs. 16a-b) luego de la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón. Los colores grisáceos generalmente se asocian con partículas finas, como relaves de grano fino. Según los mapas de corrientes, fotografías aéreas e imágenes satelitales disponibles, el camino desde una de las piscinas de relaves hasta el río Manduriaco Chico no está claro (ver Figs. 3-4). Foto fija a las 0:30 del video proporcionado por la Asociación de Propietarios de Tierras Rurales del Norte y el Frente Antiminero (etiquetado Video 3 por el autor).



Figura 17. En 2020 se produjo la muerte de 13 cabezas de ganado aguas abajo de la mina El Corazón. Se cree que el ganado murió por envenenamiento con cianuro tras la falla de una presa de relaves. Foto proporcionada por Asociación de Propietarios de Tierras Rurales del Norte y Frente Antiminero. Una versión de menor resolución de la foto también está disponible en Asamblea de Unidad—Cantonal de Cotacachi (2023).

El color verde grisáceo que fue observado en el río Manduriaco Chico por el Municipio de Cotacachi (2023b) el 11 de junio de 2023 (ver Figs. 15a-b) parece bastante similar al color verde grisáceo que apareció en el mismo río el 4 de noviembre de 2023 (ver Fig. 16). Según el Municipio de Cotacachi (2023a), respecto a los cambios de color del río Manduriaco Chico y río Verde, los residentes locales, “manifiestan que por varias ocasiones ha pasado eso y que en la parte alta se encuentra la empresa minera El Corazón, que puede ser la causante de esto”. El descontento con las decoloraciones periódicas de las cursos de agua fue expresado con bastante fuerza por la Junta Administradora de Agua Potable (JAAP) “Río Manduriacu Chico” (2023) al quejarse el 12 de noviembre de 2023 sobre “las varias ocasiones que los Río Manduriacu Chico y Verde; así como, las Quebradas Los Monos y Verde Chico, Cuenca del Río Guayllabamba, Demarcación geográfica del Río Esmeraldas, fuentes importantísimas de agua segura y de calidad, han sufrido varios procesos de decoloración ploma-verdosa-lodosa arcillosa”. Se ha afirmado que la coloración verde grisácea de los ríos no se ha investigado y no se ha informado lo suficiente. De acuerdo con la Defensoría del Pueblo del Ecuador (2023), “Hasta la presente fecha el MAATE no ha realizado inspección sobre la repentina coloración ploma verdosa del río Manduriacu Chico para determinar las causas, afectaciones y responsables de las constantes presuntas contaminaciones de los Ríos Verde y Manduriacu y otros afluentes, así como para establecer medidas de mitigación, prevención y cese de vulneración de derechos constitucionales ... [El peticionario] señala que la coloración del agua en ploma verdosa se ha dado durante varias ocasiones, no obstante no ha sido denunciada por la comunidad pues esta es víctima de hostigamiento”.

Un problema relacionado es que 13 cabezas de ganado murieron repentinamente en la zona en 2020 (ver Fig. 17). Los residentes locales creen que el ganado murió por beber agua del río enriquecida con cianuro, aunque la causa de la muerte nunca ha sido investigada formalmente. De acuerdo con Asamblea de Unidad—Cantonal de Cotacachi (2023), “Recordamos lo sucedido en el año 2020 cuando en el mismo sector murieron 13 cabezas de ganado al beber agua contaminada con cianuro químico de uso común en la extracción de oro”. De acuerdo con la Defensoría del Pueblo del Ecuador (2023), “[El peticionario] indica que son varias ocasiones en la que han sido vertidas aguas residuales, lodos y otras sustancias en el Río Verde y Río Manduriacu debido a que las concesiones mineras el Corazón y los Manduriacus se desarrollan de forma inconsulta y sin seguir debida diligencia en el control, seguimiento y monitoreo por parte de autoridades competentes de ambiente y minería metálica, lo descrito ocasionó que ya en el 2020 haya muerte de animales vacunos provocados por derrames tóxicos en la Mina el Corazón”.

Contención de la Falla e Intento de Reparación de la Presa Fallada

A las 10 am del 4 de noviembre de 2023, ocho horas después del inicio de la falla de la presa de relaves, la falla se había contenido, ya que la descarga de la Piscina Nro. 15 estaba siendo recolectada en un contenedor de metal y luego canalizada por tubería a la Piscina Nro. 9 (ver Figs. 4 y 18). Agroindustrial determinó que la falla se había producido por un desgarró en la geomembrana e inició un procedimiento de bajada del nivel del agua en la Piscina Nro. 15 con el fin de localizar y reparar el desgarró. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “Para detectar el lugar donde se encuentra la fisura en la geomembrana de la piscina 15, se inició la evacuación del agua de la piscina 15, conduciéndola a la piscina 7 a través de 3 mangueras de 2” y a la piscina 17 con otra manguera también de 2” (ver Fig. 4). La intención de la empresa era

reparar la geomembrana “por termosellado y posteriores pruebas de impermeabilización”. El informe del MAATE del 8 de noviembre coincidió en que la falla había sido provocada por un desgarró en la geomembrana. De acuerdo con MAATE (2023b), “Se estima que el evento ambiental estaría dado por una fisura a nivel de la geomembrana de la piscina 15 de la relavera”.



Figura 18. El agua y los relaves que se descargaron de la Piscina No. 15 se recolectaron en un recipiente metálico y luego se transfirieron a la Piscina Nro. 9 (ver Fig. 4). Foto de Municipio de Cotacachi (2023a).

Al momento de redactar el informe de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), aún no se había localizado un desgarró en la geomembrana, por lo que el informe describía un plan de pasos a seguir para localizar el desgarró. Los pasos posteriores involucraron la remoción progresiva de relaves sólidos de la Piscina Nro. 15 junto con la necesidad de construir nuevas piscinas para almacenar los relaves de la Piscina Nro. 15. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “Debido que hasta el momento no se ha podido detectar la fisura por donde fuga el relave de la piscina 15. Se hace necesario construir una instalación (piscina de contingencia) para almacenar los sólidos que se vayan evacuando de la piscina 15, hasta ubicar la fisura en la geomembrana ... Como medida de carácter emergente ... al sur de la piscina 9, se encuentra construyendo una piscina de contingencias de pequeñas dimensiones con capacidad para almacenar aproximadamente 4.500 m^3 , que será debidamente impermeabilizada con geomembrana para almacenar una pequeña parte de los relaves que se evacúen de la piscina 15 cuyo volumen de relaves almacenados alcanza los 51000 m^3 ”.

Si el desgarró no se localizaba incluso después de retirar 4.500 metros cúbicos de relaves sólidos, entonces el plan era construir otra piscina para poder retirar más relaves de la Piscina Nro. 15. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “Para el caso que la medida antes indicada sea insuficiente para detectar la fisura en la geomembrana y se deba proseguir con la evacuación de adicional de relaves de la piscina 15, se deberá construir otra instalación (piscina emergente proyectada con capacidad para almacenar aproximadamente 20.000 m³) para poder seguir evacuando los restantes relaves de la piscina 15 hasta poder detectar la fisura en la geomembrana”. Si el desgarró en la geomembrana aún no se había localizado incluso después de llenar la segunda piscina de contingencia, el plan era pasar los relaves restantes a través de un filtro prensa para reducir el contenido de agua lo suficiente como para que los relaves pudieran compactarse y apilarse en la superficie sin colocarlos en una piscina construida. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “En el sistema de tratamiento de relaves las colas serán conducidas a un sistema de filtrado para obtener un relave filtrado con un contenido de humedad de hasta un 20%, para posteriormente ser transportado a la relavera para su compactación”. Cabe señalar que la construcción de una pila de relaves filtrados aún requeriría la construcción de una presa para el confinamiento de los relaves (también llamada zona estructural) (Klohn Crippen Berger, 2017; Morrill et al., 2022), lo cual no se menciona en el plan descrito en Agroindustrial El Corazón (2023a).

El informe de Agroindustrial no tenía fecha, pero describía pasos que se iniciarían el 11 de noviembre de 2023 (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a). Desde entonces, no ha habido informes de progreso disponibles públicamente sobre los intentos de localizar y reparar el desgarró en la geomembrana de la Piscina Nro. 15. Sin embargo, se sabe que, a partir de una inspección realizada el 26 de enero de 2024 y reportada en marzo de 2024, aún no se había localizado el desgarró. De acuerdo con la Defensoría del Pueblo del Ecuador (2024). “En el lugar el ing. Alex Ayala [un representante de Agroindustrial] explicó que el día de los hechos 4 de noviembre de 2023, se suspendió el bombeo del relave y procedieron a enviar a la piscina nro 9, 7000m³ ... con el objeto de verificar el lugar donde se dio la fisura. Realizada esta actividad no se encontró el lugar de la fisura , motivo por el cual se mantiene la hipótesis de que la fisura se pudo haber sellado por la misma arcilla”. Cualquier autosellado del desgarró mediante relleno con arcilla (relaves de grano fino) sería, por supuesto, muy temporal y muy diferente al termosellado y pruebas de impermeabilización previstas que se describieron en el informe de noviembre de 2023 de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a). Se proporcionará más información sobre los eventos de la falla de la presa de relaves en la sección “Respuestas”.

METODOLOGÍA

Con base en las secciones anteriores, los objetivos preliminares de este informe se pueden perfeccionar en las siguientes preguntas con respecto a la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón:

- 1) ¿Por qué existen discrepancias entre los análisis químicos de la muestra de agua recolectada por un residente local y las muestras recolectadas por Agroindustrial y GRUNTEC?
- 2) ¿Podría el incidente anterior de muerte de ganado haber sido resultado de envenenamiento por cianuro?
- 3) ¿Cuál es la causa del color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico?
- 4) ¿Fueron las fuertes lluvias un factor que contribuyó a la falla de la presa de relaves?
- 5) ¿Cuál fue la causa inmediata de la falla de la presa de relaves?

- 6) ¿Cuál fue la causa fundamental de la falla de la presa de relaves?
- 7) ¿Están actualmente estables las presas de relaves en la Piscina Nro. 15?
- 8) ¿Se ha eliminado la posibilidad de que se produzcan más fallas en las presas de relaves?

La primera pregunta sobre las discrepancias entre los análisis de agua realizados por la comunidad y los análisis de agua realizados por la empresa minera y sus consultores se abordó considerando si el mismo parámetro químico fue medido por las diferentes partes y considerando las ubicaciones de las muestras de agua. Las coordenadas de las muestras recolectadas por la empresa minera y sus consultores se determinaron comparando el mapa croquis proporcionado en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) (ver Fig. 19) con las últimas imágenes de Google Earth, que datan del 27 de junio de 2019 (ver Fig. 4). Al mapa de Fig. 19 se le refiere como “mapa croquis” porque carece de una barra de escala y no está claro si fue diseñado para ser dibujado a escala. Sin embargo, en comparación con las imágenes de Google Earth, el mapa croquis parece mostrar los canales correctos de las corrientes y las relaciones espaciales correctas entre los canales de las corrientes y las piscinas de relaves. Las piscinas de relaves en Fig. 4 fueron etiquetadas en comparación con el mapa croquis (ver Fig. 19), lo que era consistente con el etiquetado en otro mapa en MEM (2023). Notar que las Piscinas Nros. 14 y 15 se construyeron entre 2020 y 2021 (Municipio de Cotacachi, 2023) y, por lo tanto, no son visibles en las imágenes de Google Earth de 2019 (ver Fig. 4). El punto de descarga de la Piscina Nro. 15 (PM1) se ubicó utilizando las coordenadas UTM de la Zona 17S de 743.895 m E y 10.028.835 m N que fueron expresadas en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a). MEM (2023) describió la misma ubicación como las coordenadas UTM de la Zona 17N de 743.893 m E y 28.832 m N, o sólo 2 metros más al oeste y 3 metros más al sur. Las coordenadas UTM obtenidas de Google Earth y las distancias medidas entre puntos de muestreo se compararon con las coordenadas UTM y distancias entre puntos de muestreo establecidas en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) (ver Figs. 7 y 20). Todos los mapas de este informe se crearon con ESRI ArcMap v. 10.8.2.

La segunda pregunta sobre la posible causa del incidente anterior de muerte de ganado se abordó comparando el peso típico de ganado, el consumo diario típico de agua de ganado y la concentración de cianuro total que se midió a partir de la reciente falla de la presa de relaves en la muestra recolectada por a la comunidad con la dosis letal de cianuro para grandes rumiantes. Hay muchas causas posibles de muerte del ganado y no se puede determinar una causa definitiva sin más información. La tercera pregunta sobre la posible causa del color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico se abordó comparando el color de la corriente con el color del yacimiento. Como se indicó anteriormente, existen muchas causas posibles de la coloración de las corrientes y no se puede determinar una causa definitiva sin más información.

Respecto a la cuarta pregunta sobre si las fuertes lluvias fueron un factor que contribuyó a la falla de la piscina de relaves, se ha mencionado que el nivel del agua en la Piscina Nro. 15 ya se encontraba en nivel de emergencia desde octubre de 2023 (Defensoría del Pueblo, 2024), por lo que las precipitaciones adicionales podrían haber provocado un desbordamiento de la piscina de relaves. Por otro lado, también se sabe que no llovió en el sitio de la mina durante la noche del 3 al 4 de noviembre. De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “Habitantes de la comuna de Río Verde señalan que ellos se dieron cuenta del cambio de coloración del Río Verde el día sábado 4 de noviembre de 2023, aproximadamente a las 8h00 am ... no había llovido y el cambio de color repentino del río era extraño”. En este momento, no hay información disponible sobre el historial de precipitaciones en el sitio de la mina o incluso cuándo se produjeron las precipitaciones más recientes antes de la falla.

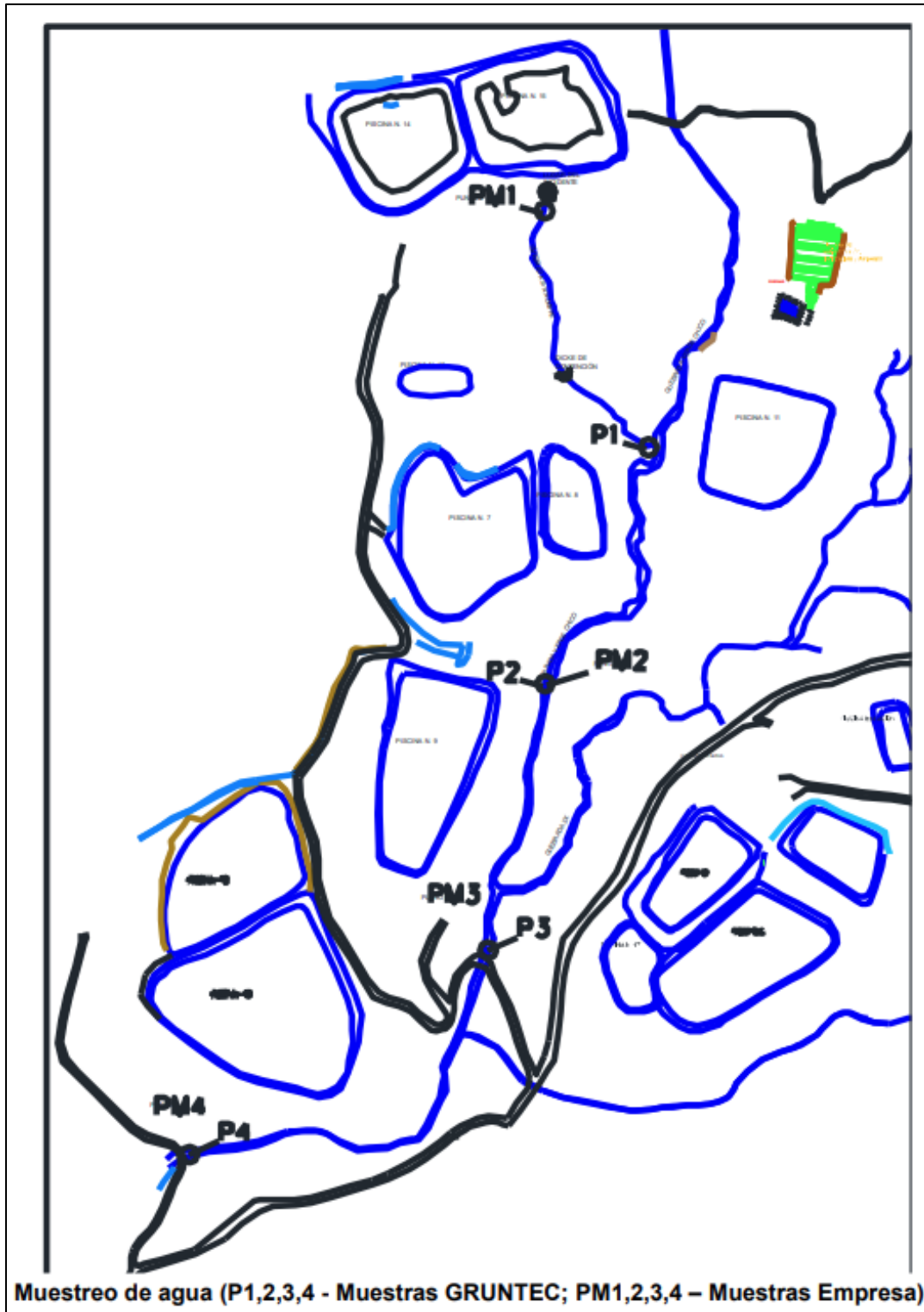


Figura 19. El mapa croquis anterior se comparó con imágenes de Google Earth del 27 de junio de 2019 para determinar las coordenadas de los puntos de muestreo de agua por parte de la empresa y sus consultores (ver Tabla 6 y Fig. 4). Las coordenadas medidas no corresponden a las coordenadas expresadas en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a). El desajuste para los puntos P1, P2, P3 y P4 son 18 metros, 392 metros, 206 metros y 535 metros, respectivamente (comparar Tabla 6 con Fig. 20). Figura de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a).

PUNTOS DE MUESTREO DE AGUA (GRUNTEC)				
PUNTOS	COORDENADAS UTM		DESCRIPCIÓN	DISTANCIAS
1	E 743.958	N 10°028.666	Quebrada Sin Nombre – Antes de desembocadura en Q. Verde Chico (Punto 4)	De punto 0 a punto 4: 200 m.
2	E 743.736	N 10°028.141	Quebrada Verde Chico – Paso Relavera 10 (Punto 1)	de Punto 0 a punto 1: 678.45m
3	E 743.898	N 10°028.515	Quebrada Verde Chico – Paso Flores (Punto 2)	de Punto 0 a Punto 2: 1017.24m
4	E 744.048	N 10°028.532	Quebrada Rio Verde Chico – Paso Molina (Punto 3)	de Punto 0 a Punto 3: 2767.85m

Tabla. Ubicación muestras de agua.

Figura 20. Las coordenadas indicadas en la tabla anterior no corresponden a las coordenadas determinadas al comparar el mapa croquis de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) (ver Fig. 19) con imágenes de Google Earth del 27 de junio de 2019 (ver Fig. 4). Los desajustes para los puntos P1, P2, P3 y P4 son 18 metros, 392 metros, 206 metros y 535 metros, respectivamente (comparar Tabla 6 con la tabla arriba). No está claro por qué se vuelven a numerar los puntos en la segunda columna desde la derecha, pero cambiar la numeración de las coordenadas no resuelve la contradicción anterior. Las distancias probablemente se midieron a lo largo de los senderos de las corrientes y no son distancias en línea recta. Sin embargo, según las imágenes de Google Earth (ver Fig. 4), las distancias deben ser 391 metros desde el Punto 0 (presumiblemente, el mismo que PM1) hasta P2 (Punto 2), 581 metros desde el Punto 0 hasta P3 (Punto 3), y 884 metros desde el Punto 0 hasta P4 (Punto 4) (puntos numerados como en la columna de la izquierda). Por lo tanto, las distancias correspondientes indicadas en la tabla anterior de 678,45 metros, 1017,24 metros y 2767,85 metros son demasiado grandes. Figura de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a).

Así, la cuarta pregunta podría reformularse de la siguiente manera: ¿Fueron septiembre de 2023, octubre de 2023 o del 1 al 4 de noviembre de 2023 períodos inusualmente húmedos en comparación con el registro histórico en la región de la mina El Corazón? La pregunta se abordó considerando los datos históricos de precipitación de cuatro estaciones meteorológicas en las cercanías de la mina El Corazón en la base de datos del (U.S.) National Climatic Data Center [(EE. UU.) Centro Nacional de Datos Climáticos] (NCDC), incluyendo La Concordia (69 kilómetros al suroeste), Izobamba (73 kilómetros al sur-sureste), San Gabriel (116 kilómetros al noreste) y San Luis en Colombia (141 kilómetros al noreste) (ver Tablas 3a-b y 4a-b y Fig. 21) (NOAA, 2024). La distancia desde la mina El Corazón se midió con base en el centro de la concesión minera El Corazón, según consta en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a).

El problema central con el uso de las estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente, además de la distancia desde el sitio de la mina y las diferencias de elevación, es la cantidad de días en los que faltan datos en la base de datos del NCDC. En particular, la cobertura es del 41% en Las Concordia, del 39% en Izobamba, del 50% en San Gabriel y del 46% en San Luis (ver Tablas 3b y 4b). El problema se resolvió parcialmente ponderando las cantidades de precipitación por el número de días con datos de precipitación. La precipitación ponderada para cada período de interés para cada año se calculó como la precipitación total dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 al 4 de noviembre. La precipitación media para cada período de interés se calculó como la precipitación total durante todo el registro histórico anterior a 2023 dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 al 4 de noviembre. Las precipitaciones máximas y

mínimas para septiembre y octubre se calcularon, basándose únicamente en años con al menos 33% de cobertura (10 días de datos de precipitación).

Tabla 3a. Estaciones meteorológicas de Ecuador en la base de datos del NCDC: Ubicación y elevación^{1,2}

Estación	Latitud (°N) ³	Longitud (°E) ³	Elevación (m)
Cañar	-2,55	-78,933	3083
Isla Galápagos	-0,43333	-90,28333	23,2
Isabel María	-1,83	-79,56	4
Izobamba	-0,35	-78,55	3058
La Concordia	0,017	-79,367	360
Loja La Argelia	-4,033	-79,2	2160
Macara Aeropuerto	-4,367	-79,933	430
Nuevo Rocafuerte	-0,917	-75,417	265
Pichilingue	-1,1	-79,467	73
Portoviejo	-1,033	-80,45	60
Puerto Ila	-0,49	-79,36	260
Puyo	-1,5	-77,9	960
San Cristóbal	-0,917	-89,617	18,9
San Gabriel	0,6	-77,817	2860
San Juan La Mana	-0,92	-79,22	223

¹NOAA (2024)

²En el análisis de este informe se utilizaron estaciones en rojo.

³WGS 84

Tabla 3b. Estaciones meteorológicas de Ecuador en la base de datos del NCDC: Rangos de fechas y cobertura^{1,2}

Estación	Fecha de Inicio ³	Fecha de Término ³	Cobertura (%)
Cañar	1/1/1973	31/5/2024	16
Isla Galápagos	1/4/1945	29/3/1946	73
Isabel María	1/1/1961	31/12/1986	95
Izobamba	20/9/2005	31/5/2024	39
La Concordia	20/9/2005	3/6/2024	41
Loja La Argelia	23/10/2001	31/5/2024	26
Macara Aeropuerto	3/10/1977	2/2/1984	68
Nuevo Rocafuerte	20/9/2005	31/5/2024	30
Pichilingue	1/1/1964	17/5/2022	58
Portoviejo	23/10/2001	31/5/2024	24
Puerto Ila	1/1/1965	31/12/1994	98
Puyo	4/7/2011	31/5/2024	39
San Cristóbal	18/4/1985	3/6/2024	32
San Gabriel	16/7/2011	31/5/2024	50
San Juan La Mana	1/4/1964	31/12/1992	93

¹NOAA (2024)

²En el análisis de este informe se utilizaron estaciones en rojo.

³día/mes/año

Tabla 4a. Estaciones meteorológicas de Ecuador en la base de datos del NCDC: Rangos de fechas y cobertura^{1,2}

Estación	Latitud (°N)³	Longitud (°E)³	Elevación (m)
Alfonso López Pumarejo	10,435	-73,25	147,2
Alfredo Vásquez Cobo	-4,193	-69,943	84,4
Almirante Padilla	11,526	-72,926	13,1
Antonio Roldan Betancourt	7,812	-76,716	14
Benito Salas	2,95	-75,294	446,2
Bogotá Eldorado	4,701	-74,15	2548
Cali Alfonso Bonilla	3,55	-76,383	969
Camilo Daza	7,928	-72,512	334,1
El Caraño	5,691	-76,641	62,2
El Edén	4,453	-75,766	1216,2
El Embrujo	13,357	-81,358	3
Ernesto Cortisoz	10,89	-74,781	29,9
José María Córdova	6,165	-75,423	2142,1
Las Gaviotas	4,55	-70,917	167
Los Garzones	8,824	-75,826	11
Matecaña	4,813	-75,74	1346
Olaya Herrera	6,22	-75,591	1505,7
Palonegro	7,127	-73,185	1187,8
Pasto Antonio Narino	1,417	-77,267	1836
Perales	4,422	-75,133	949,1
Puerto Carreño A.Gu	6,167	-67,5	55
Rafael Núñez	10,442	-75,513	1,2
San Andrés Isla S	12,583	-81,717	6
San Luis	0,862	-77,672	2976,4
Santa Rosa Amanadona	1,45	-66,92	667
Santiago Pérez	7,069	-70,737	128
Simón Bolívar	11,12	-74,231	6,7
Vanguardia	4,168	-73,614	424,9
Yariguíes	7,024	-73,807	125.6

¹NOAA (2024)

²En el análisis de este informe se utilizaron estaciones en rojo.

³WGS 84

Tabla 4b. Estaciones meteorológicas de Colombia en la base de datos del NCDC: Rangos de fechas y cobertura^{1,2}

Estación	Fecha de Inicio³	Fecha de Término³	Cobertura (%)
Alfonso López Pumarejo	20/8/69	3/6/2024	41
Alfredo Vásquez Cobo	23/8/67	3/6/2024	90
Almirante Padilla	3/1/73	3/6/2024	42
Antonio Roldan Betancourt	29/12/84	3/6/2024	40
Benito Salas	17/9/64	3/6/2024	61
Bogotá Eldorado	2/3/41	3/6/2024	79
Cali Alfonso Bonilla	1/1/61	3/6/2024	94
Camilo Daza	16/9/64	3/6/2024	69
El Caraño	21/1/63	3/6/2024	42
El Edén	17/9/64	3/6/2024	45
El Embrujo	23/4/79	3/6/2024	32
Ernesto Cortisoz	2/5/41	3/6/2024	79
José María Córdova	1/12/85	3/6/2024	96
Las Gaviotas	1/8/67	2/5/2002	86
Los Garzones	17/9/64	3/6/2024	36
Matecaña	22/3/63	3/6/2024	84
Olaya Herrera	2/1/58	3/6/2024	65
Palonegro	5/4/74	3/6/2024	86
Pasto Antonio Narino	1/1/57	3/6/2024	77
Perales	1/1/73	3/6/2024	54
Puerto Carreño A.Gu	14/3/68	3/6/2024	57
Rafael Núñez	25/11/63	3/6/2024	90
San Andrés Isla S	1/1/62	3/6/2024	88
San Luis	16/9/64	3/6/2024	46
Santa Rosa Amanadona	28/11/69	31/1/1992	98
Santiago Pérez	17/9/64	3/6/2024	46
Simón Bolívar	16/6/64	3/6/2024	75
Vanguardia	17/9/64	3/6/2024	53
Yarigués	16/9/64	3/6/2024	58

¹NOAA (2024)

²En el análisis de este informe se utilizaron estaciones en rojo.

³día/mes/año

En realidad, existen 11 estaciones meteorológicas en la base de datos del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) dentro sólo 50 kilómetros de la mina El Corazón, siendo la estación meteorológica más cercana Chontal Bajo, 6,9 kilómetros al sureste (ver Tabla 5 y Fig. 22). Los datos de precipitación de estas estaciones meteorológicas están disponibles públicamente únicamente como resúmenes mensuales de 1994 a 2013 (INAMHI, 1996, 1997, 2000a-b, 2001, 2002, 2006a-f, 2008, 2010a-b, 2012a-b, 2014, 2015, 2017). Así, por ejemplo, aunque se conoce la precipitación media mensual en Chontal Bajo para octubre, no hay precipitación disponible para octubre de 2023 para compararla con la media. Este aspecto del informe se actualizará si y cuando el INAMHI cumpla con una solicitud de datos de precipitación más recientes.

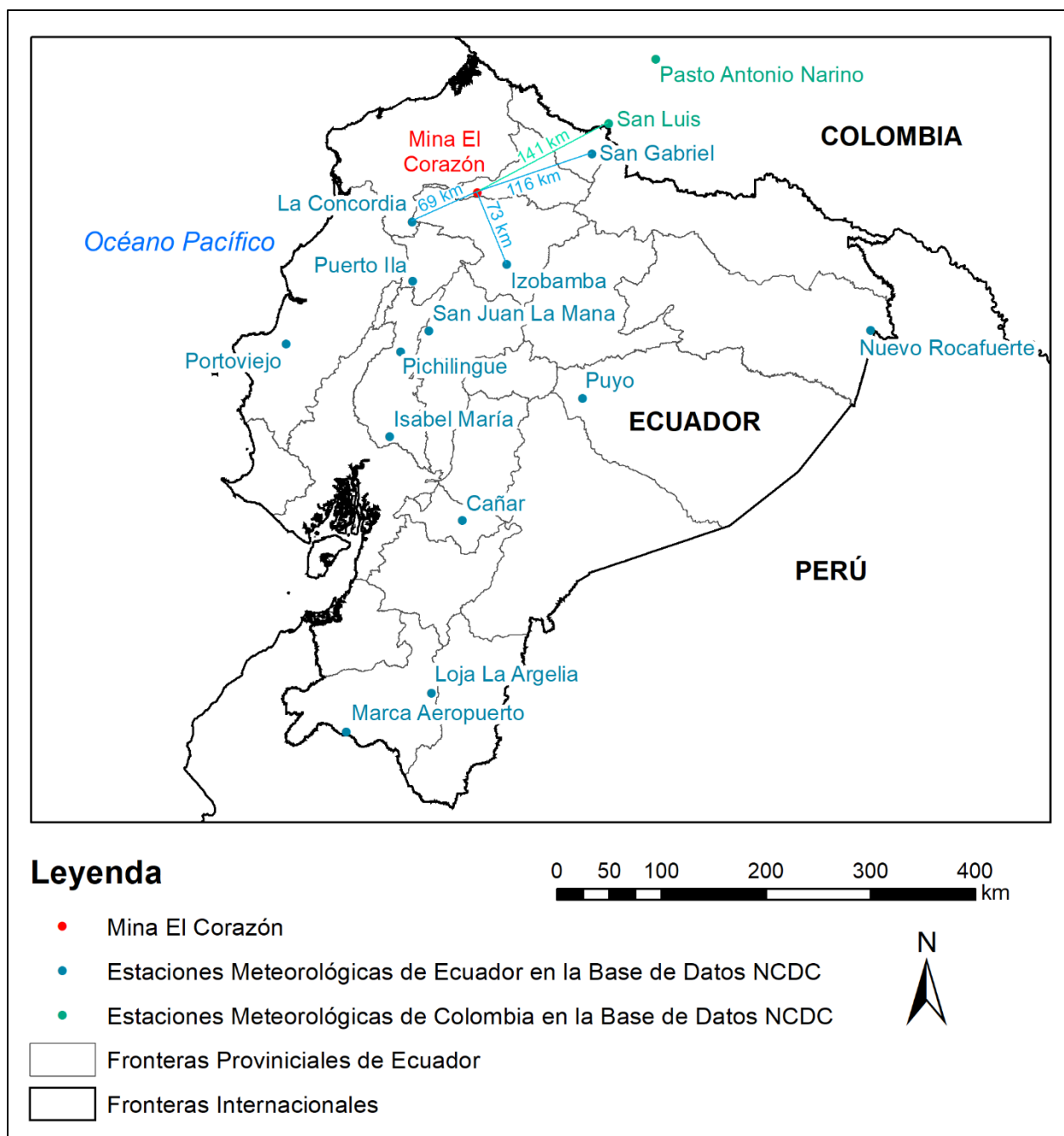


Figura 21. Las estaciones meteorológicas más cercanas a la mina El Corazón en la base de datos del National Climate Data Center [Centro Nacional de Datos Climáticos] (NCDC) son La Concordia al suroeste (distancia de 69 kilómetros), Izobamba al sur-sureste (distancia de 73 kilómetros), San Gabriel al noreste (distancia de 116 kilómetros), y San Luis en Colombia al noreste (distancia de 141 kilómetros) (ver Tablas 3a-b y 4a-b). La mina El Corazón está mapeada como el centro de la concesión minera, según lo establecido en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b). Ubicaciones de estaciones meteorológicas de NOAA (2024).

Tabla 5. Estaciones meteorológicas en la base de datos del INAMHI a 50 kilómetros de la mina El Corazón¹

Estación	Código	Latitud ^{2,3}	Longitud ^{2,3}	Elevación (m)	Distancia ⁴ (km)
Apuela	M0318	0° 21' 18" N 0,35500°N	78° 30' 49" W 78,51361°W	1620	33,5
Calacali	M0358	0° 0' 5" N 0,00139°N	78° 30' 45" W 78,51250°W	2810	43,7
Chontal Bajo	M0327	0° 14' 14" N 0,23722°N	78° 44' 57" W 78,74917°W	675	6,9
García Moreno	M0325	0° 14' 5" N 0,23472°N	78° 37' 38" W 78,62722°W	1950	19,8
Gualsaqui	M0909	0° 19' 15" N 0,32083°N	78° 24' 30" W 78,40833°W	2710	44,2
Inguincho	M001	0° 15' 30" N 0,25833°N	78° 24' 3" W 78,40083°W	3140	44,7
Nanegalito	M0339	0° 4' 0" N 0,06667°N	78° 40' 35" W 78,67639°W	1580	26,2
Nono	M0361	0° 4' 24" S 0,07333°S	78° 34' 22" W 78,57278°W	2710	45,6
Pimampiro	M0315	0° 23' 23" N 0,38972°N	78° 56' 28" W 78,94111°W	2090	20,5
San José de Minas	M0337	0° 10' 8" N 0,16889°N	78° 23' 35" W 78,39306°W	2440	46,9
Selva Alegre	M0326	0° 14' 47" N 0,24639°N	78° 34' 37" W 78,57694°W	1800	25,2

¹Datos del INAMHI (2015) excepto distancia a mina El Corazón

²La línea superior son grados minutos segundos. La línea inferior son grados decimales.

³WGS 84

⁴Distancia medida desde la estación meteorológica al centro de la concesión minera El Corazón según lo establecido en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b).

En este punto es oportuno señalar que gran parte de la información de la Auditoría Ambiental de 2020-2022 de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b) se puede comparar con los mismos datos disponibles en otras fuentes y que gran parte de los datos de la Auditoría Ambiental de 2020-2022 no coincide con los datos de otras fuentes. Los datos meteorológicos se utilizan como ejemplo. Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b) señala que la fuente de los datos meteorológicos es el INAMHI, por lo que los datos tomados directamente de las publicaciones del INAMHI deben considerarse como información correcta. En este informe no se intentó documentar todas las contradicciones entre la Auditoría Ambiental de 2020-2022 y otras fuentes de información.

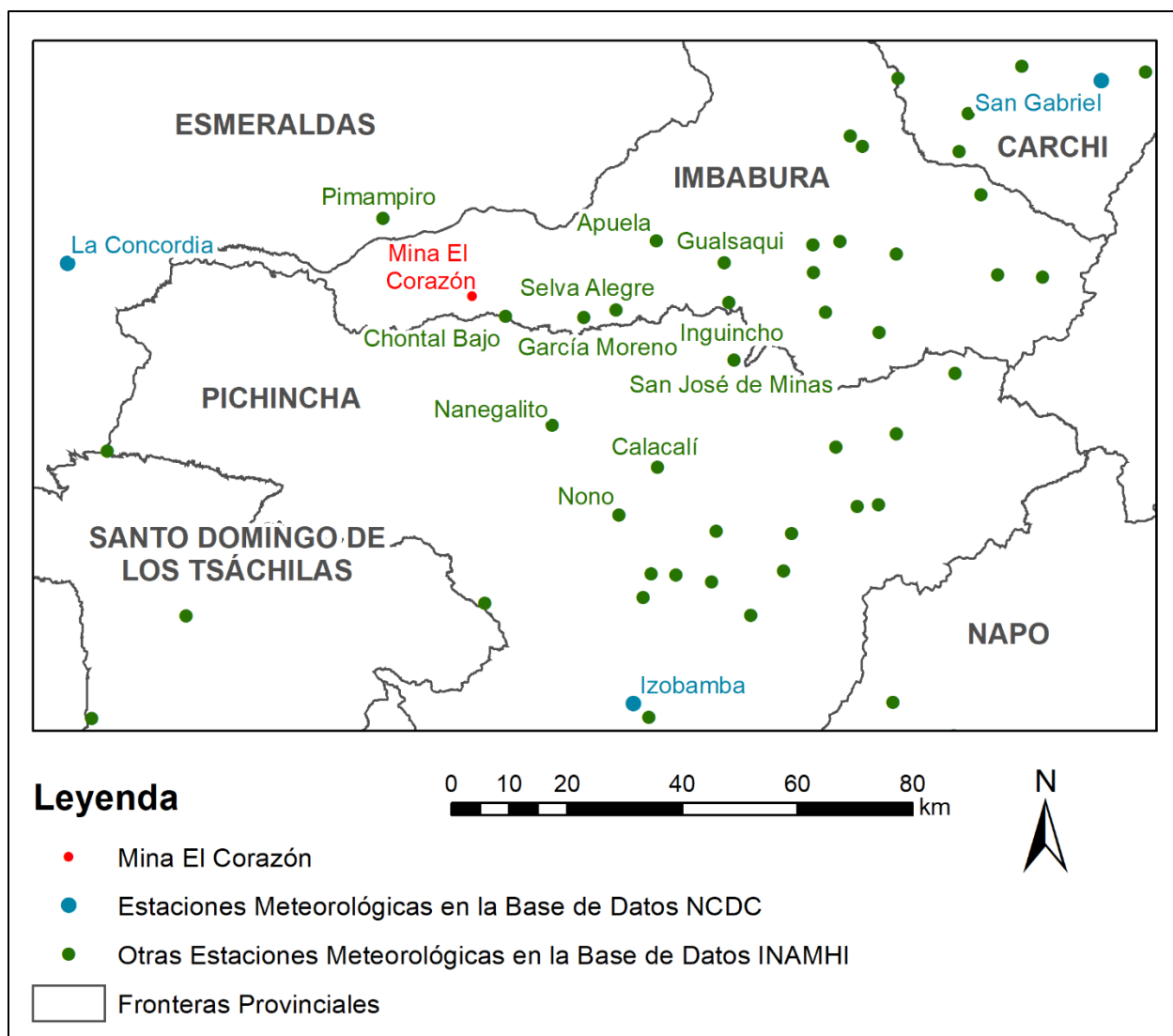


Figura 22. Existen 11 estaciones meteorológicas en la base de datos del INAMHI en un radio de 50 kilómetros de la mina El Corazón. La estación meteorológica más cercana es Chontal Bajo, 6,9 kilómetros al sureste (ver Tabla 5). La mina El Corazón está mapeada como el centro de la concesión minera, según lo establecido en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b). Ubicaciones de estaciones meteorológicas de INAMHI (2015).

Las descripciones de sitios de las estaciones meteorológicas listadas en la Auditoría Ambiental de 2020-2022 se pueden comparar con la misma información en INAMHI (2015). Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b) afirma que existen cinco estaciones meteorológicas cercanas a la mina El Corazón. Sin embargo, las estaciones meteorológicas de Calacali, Gualsaqui, Nanegalito y Pimampiro están todas más cerca que la estación meteorológica de Inguincho, y la estación meteorológica de Pimampiro está más cerca que la estación meteorológica de Selva Alegre (comparar Fig. 23 con Tabla 5 y Figs. 22). Además, las ubicaciones de las estaciones meteorológicas en Chontal Bajo, García Moreno y Selva Alegre están indicadas incorrectamente en la Auditoría Ambiental de 2020-2022 (ver Fig. 23). La ubicación declarada de Chontal Bajo está a 9,4 kilómetros al oeste-suroeste de la ubicación correcta, mientras que la ubicación declarada de Selva Alegre está a 5,8 kilómetros al oeste-suroeste de la ubicación correcta (comparar Fig. 23 con Tabla 5). Finalmente, la elevación

indicada de la estación meteorológica en Selva Alegre es de 1950 metros sobre el nivel del mar, mientras que la elevación correcta es de 1800 metros sobre el nivel del mar (comparar Fig. 23 con Tabla 5).

Nombre de la Estación	Código de la Estación	Localización		Elevación (msnm)	Tipo	Fuente
		Latitud	Longitud			
Chontal Bajo	M-327	0°14'0" N	78°50'0" W	675	Pv	INAMHI
García Moreno	M-325	0°14'2" N	78°37'37" W	1950	Pv	INAMHI
Selva Alegre	M326	0° 14 ' 5 " N	78 ° 37 ' 38 " W	1950	PV	INAMHI
Apuela	M318	0 ° 21 ' 18 " N	78 ° 30 ' 49 " W	1620	PV	INAMHI
Ingincho	M001	0 ° 15 ' 30 " N	78 ° 24 ' 3 " W	3140	CO	INAMHI

Tabla 8.1. Estaciones Meteorológicas.

Cp= Climatológica Principal Pg= Pluviográfica Pv= Pluviométrica
Fuente INAMHI

Tipo de Estaciones
Cp= Climatológica Principal
Co= Climatológica Ordinaria
Pg= Pluviográfica
Pv= Pluviométrica

Figura 23. Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b) afirma que existen cinco estaciones meteorológicas cercanas a la mina El Corazón. Sin embargo, las estaciones meteorológicas de Calacali, Gualsaqui, Nanegalito y Pimampiro están todas más cerca que la estación meteorológica de Inguincho, y la estación meteorológica de Pimampiro está más cerca que la estación meteorológica de Selva Alegre (ver Tabla 5 y Fig. 22). Las ubicaciones de las estaciones meteorológicas en Chontal Bajo, García Moreno y Selva Alegre están indicadas incorrectamente en la tabla arriba. La ubicación declarada de Chontal Bajo está a 9,4 kilómetros al oeste-suroeste de la ubicación correcta, mientras que la ubicación declarada de Selva Alegre está a 5,8 kilómetros al oeste-suroeste de la ubicación correcta (comparar con Tabla 5). La elevación indicada de la estación meteorológica en Selva Alegre es de 1950 metros sobre el nivel del mar, mientras que la elevación correcta es de 1800 metros sobre el nivel del mar (comparar con Tabla 5). Tabla de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b).

Las preguntas quinta y sexta sobre las causas próximas y fundamentales de la falla de la presa de relaves se abordaron comparando la descripción de la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón proporcionada en secciones anteriores con el conocimiento actual sobre las causas de las fallas de las presas de relaves y sus medios de prevención. La séptima pregunta sobre la estabilidad actual de las presas de relaves se abordó comparando lo afirmado en los informes de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) y MEM (2023) con las regulaciones de presas de relaves en Ecuador. La octava pregunta sobre si se ha eliminado la posibilidad de que se produzcan más fallas en las presas de relaves es lo suficientemente importante como para que la sección “Discusión” esté dedicada a responder esta pregunta. La pregunta final se abordó en

gran medida mediante una síntesis de las respuestas a las preguntas quinta, sexta y séptima sobre las causas próximas y fundamentales y el estado actual de estabilidad.

RESPUESTAS

Los Datos de Cianuro de la Empresa y sus Consultores no son Válidos

La razón fundamental de las discrepancias entre las concentraciones de cianuro de la muestra de agua recolectada por un residente local y las muestras recolectadas por Agroindustrial y GRUNTEC es que la muestra comunitaria analizó correctamente el cianuro total, mientras que GRUNTEC analizó sólo el cianuro libre (ver Tabla 1). Ya se ha mencionado que las concentraciones de cianuro libre pueden ser tan bajas como el 1% de las concentraciones de cianuro total, por lo que no hay absolutamente ninguna justificación para usar concentraciones de cianuro libre para demostrar el cumplimiento de las regulaciones ecuatorianas que se basan en concentraciones de cianuro total (ver Tabla 2). Por lo tanto, la afirmación de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) de que “Los resultados obtenidos demuestran que los valores de CN ... al momento del monitoreo realizado por GRUNTEC, se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente” es simplemente falsa porque las concentraciones de cianuro libre no se pueden comparar con las concentraciones de cianuro total. Es preocupante que Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) no aclare si se midió cianuro total o cianuro libre en las muestras de agua recolectadas por la empresa, lo cual es una información faltante crítica (ver Fig. 7). Aunque Fig. 7 indica sólo “Valor” y no qué parámetro químico se midió, el texto aclara que se midió alguna forma de cianuro. Por ejemplo, Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) afirma, “Los resultados de los análisis de laboratorio realizados por la empresa los días 04 y 06 de noviembre, demuestran que el relave que fugó por la fisura de la geomembrana de la piscina 15 en el punto del incidente tenía un contenido de 0.303 ppm de CN (0.303 mg/l)” (comparar con Fig. 7). Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) no aclara por qué decidieron medir sólo alguna forma no especificada de cianuro y ningún otro parámetro. Una consideración adicional es que GRUNTEC recolectó muestras de agua seis días después de la falla de la presa de relaves, lo que dejó tiempo suficiente para que el pulso de agua contaminada migrara aguas abajo o para que el cianuro desapareciera de la columna de agua por precipitación, oxidación, volatilización, fotodisociación o biodegradación.

Además de las discrepancias en los parámetros químicos y las fechas de muestreo, los conjuntos de datos de la empresa minera y de GRUNTEC pueden descartarse por completo porque se desconocen las ubicaciones de muestreo. Las coordenadas UTM que fueron declaradas por Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) como puntos de muestreo de GRUNTEC (Fig. 20) se compararon con las coordenadas UTM que fueron medidas desde Google Earth luego de comparar el mapa croquis en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) (ver Fig. 19) con imágenes de Google Earth (ver Fig. 4). Las coordenadas medidas no se correspondieron con las coordenadas declaradas por Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) con desajustes de 18 metros, 392 metros, 206 metros y 535 metros, para los puntos P1, P2, P3 y P4, respectivamente (ver Tabla 6). Las coordenadas UTM expresadas por Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) (ver Fig. 20) no pueden ser correctas, ya que no muestran una progresión hacia el sur y oeste desde P1 a P2 a P3 a P4 como lo muestra el mapa croquis (ver Fig. 19). Es bastante confusa la forma en que se reenumeran los puntos desde la columna “Puntos” a la columna “Descripción” en Fig. 20 tomada de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a). En particular, los puntos de muestreo P1,

P2, P3 y P4 en la columna “Puntos” se convierten en Punto 4, Punto 1, Punto 2 y Punto 3, respectivamente, en la columna “Descripción” (ver Fig. 20). Los intentos de ajustar la numeración de los puntos y corregir posibles errores tipográficos en las coordenadas indicadas (ver Fig. 20) no lograron resolver las discrepancias entre las coordenadas medidas y declaradas para los puntos de muestreo de GRUNTEC (ver Tabla 6).

Tabla 6. Coordenadas de puntos de muestreo de agua en base a comparación de mapa croquis de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b) con Google Earth

	Coordenadas Geográficas (WGS 84)		Coordenadas Proyectadas (Zona UTM 17S WGS 84)	
	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Este (m)	Norte (m)
Muestreo por Agroindustrial El Corazón				
PM1	0.260687	78.808693	743,894	10,028,834
PM2	0.257627	78.808650	743,900	10,028,497
PM3	0.25598	78.809127	743,847	10,028,315
PM4	0.254837	78.811004	743,638	10,028,188
Muestreo por GRUNTEC				
P1	0.259039	78.808022	743,970	10,028,653
P2	0.257627	78.808650	743,900	10,028,497
P3	0.255986	78.809127	743,847	10,028,315
P4	0.254837	78.811004	743,638	10,028,188

Una comparación entre las columnas “Distancias” de Fig. 7 y Fig. 20, así como de Fig. 19, muestra que los puntos de muestreo PM2, PM3 y PM4 de Agroindustrial son idénticos a los puntos de muestreo P2, P3, y P4 de GRUNTEC. La comparación también muestra que el “Origen” en Fig. 7 (el mismo que PM1) es el mismo que el Punto 0 en Fig. 20. Así, las ubicaciones de los puntos de muestreo PM2, PM3 y PM4 de Agroindustrial son tan desconocidas como las ubicaciones de los puntos de muestreo P2, P3 y P4 de GRUNTEC. Las distancias indicadas entre cada punto de muestreo y PM1 (ver Figs. 7 y 20) se miden presumiblemente a lo largo de las trayectorias de las corrientes y no son distancias en línea recta. Es desconcertante cómo se podrían haber medido estas distancias con la ultraprecisión de 1 centímetro (ver Figs. 7 y 20) y por qué la distancia desde el Punto 0 (PM1) a P1 se expresa simplemente como 200 metros (ver Fig. 20) con una precisión implícita de 1 metro o mayor.

Las distancias entre los puntos de muestreo indicadas en Figs. 7 y 20 tampoco son correctas. Basado en una comparación del mapa croquis (ver Fig. 19) con las imágenes de Google Earth (ver Fig. 4), las distancias deben ser 391 metros desde el Punto 0 (igual que PM1) hasta PM2 (igual que P2), 581 metros del Punto 0 al PM3 (igual que P3), y 884 metros del Punto 0 al PM4 (igual que P4). En otras palabras, las distancias entre puntos indicadas en Figs. 7 y 20 son demasiado grandes. Si las distancias indicadas en Figs. 7 y 20 son distancias en línea recta, entonces las discrepancias entre las distancias indicadas y las distancias medidas con Google Earth (ver Fig. 4) serían aún mayores.

En resumen, los conjuntos de datos de Agroindustrial y GRUNTEC deben considerarse completamente inválidos por las siguientes razones:

- 1) GRUNTEC midió sólo cianuro libre, lo que no se puede comparar con las regulaciones ecuatorianas que se basan en cianuro total.

- 2) Agroindustrial no especificó si se midió cianuro libre o cianuro total o alguna otra forma de cianuro (como el cianuro WAD).
- 3) Las muestras de agua fueron recolectadas por GRUNTEC seis días después de la falla de la presa de relaves.
- 4) Las ubicaciones de muestreo en el mapa croquis no corresponden a las coordenadas UTM indicadas.
- 5) Las distancias indicadas entre las ubicaciones de muestreo son mucho mayores que las distancias que se pueden medir comparando el mapa croquis con las imágenes de Google Earth.

Los dos últimos puntos se pueden resumir afirmando que los análisis de agua con ubicaciones de muestra desconocidas o contradictorias no pueden considerarse fiables.

Las Muertes de Ganado podrían haber Resultado del Envenenamiento con Cianuro

Dado un peso típico de ganado de 1000 kilogramos, un consumo típico de agua de 0,06 litros por kilogramo por día (University of Nebraska-Lincoln, 2015) y la concentración de cianuro total que se midió en la reciente falla de la presa de relaves (60 mg/L), la carga diaria de cianuro para un ganado que bebe agua contaminada con cianuro aguas abajo de la mina El Corazón sería de 3,6 mg/kg. Dado que la dosis letal para grandes rumiantes es de 2 mg/kg (Cope, 2021), es posible que las recientes muertes de ganado se debieran a envenenamiento por cianuro. Sin embargo, no se puede determinar una causa definitiva de muerte sin más información. En este caso, un dato fundamental que falta es la ubicación exacta de las muertes del ganado.

El Color de las Corrientes Afectadas se debe a los Relaves de Grano Fino

El color del río Manduriaco Chico ha sido descrito como “totalmente de un color plomo” el 9 de junio de 2023 (Municipio de Cotacachi, 2023b), como “una tonalidad ploma-verdosa” el 11 de junio de 2023 (Municipio de Cotacachi (2023b), y como “ploma verdosa” (Defensoría del Pueblo, 2023) y “ploma-verdosa-lodosa” (Junta Administradora de Agua Potable (JAAP) “Río Manduriacu Chico”, 2023) en múltiples ocasiones. Los colores del río Manduriaco Chico se pueden comparar con los de la Unidad Tortugo, la cual es la roca huésped del yacimiento que explota la mina El Corazón. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b), la Unidad Tortugo “definida por Boland et al. (2000), consiste en secuencias de sedimentos color gris-verdoso, silicificados, ricos en feldespatos, augitas, anfíboles y líticos de lavas riolíticas con textura bandeada”. Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b) señaló además que “rocas verdes de grano fino con alteración hidrotermal pertenecientes a la Unidad Tortugo se encuentran sobreyacidas por cherts de la Unidad La Cubera”. En otras palabras, el color del río parece tener la misma descripción que el color del yacimiento, lo que implica que el color del río podría resultar de la liberación de relaves de grano fino al río.

El eslabón perdido en la conexión anterior entre el color del río Manduriaco Chico y el color del yacimiento es que las imágenes de Google Earth (ver Figs. 3-4) y el mapa croquis (ver Fig. 19) no muestran ningún camino hidráulico obvio entre la Piscina Nro. 15 y el Río Manduriaco Chico. De hecho, según la información disponible, la Piscina Nro. 15 parece estar en la cuenca de la quebrada Verde Chico, no en la del río Manduriaco Chico (ver Figs. 3-4). Este punto no se puede profundizar más sin un conocimiento detallado de la topografía. Este conocimiento podría obtenerse simplemente caminando por el terreno aguas abajo desde de la

Piscina Nro. 15. Sin embargo, la base ideal para determinar si existe una conexión hidráulica sería un estudio de Lidar de alta precisión de la zona. También se podría evaluar una conexión hidráulica entre la Piscina Nro. 15 (u otras piscinas de relaves) y el río Manduriaco Chico utilizando una variedad de trazadores químicos. Por ejemplo, el agua de una piscina de relaves debería mostrar la firma isotópica estable de un período prolongado de evaporación y podría ser posible encontrar esa misma firma isotópica estable en muestras de agua del río Manduriaco Chico. En Emerman (2024) (disponible del autor en inglés y portugués) se puede encontrar una discusión detallada sobre el uso de isótopos estables del agua para identificar conexiones entre piscinas de relaves y corrientes aguas abajo en el contexto de la minería de oro. Cabe señalar que también se ha observado una decoloración verde grisácea en el río Verde y en la quebrada Verde Chico (Municipio de Cotacachi, 2023a; Defensoría del Pueblo, 2023, Junta Administradora de Agua Potable (JAAP) “Río Manduriacu Chico”, 2023) y que la conexión hidráulica entre estas corrientes y la Piscina Nro. 15 es lo suficientemente clara a partir de las imágenes de Google Earth (ver Figs. 3-4) y el mapa croquis (ver Fig. 19).

Se mencionó anteriormente que los representantes de Agroindustrial han identificado el flujo de agua sin tratar de las galerías subterráneas como la fuente de la coloración en el río Manduriaco Chico. De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “[Los representantes de Agroindustrial] señalan que en esta galería se encuentra una arcilla denominada Sericita y que ella sería la causante de la coloración verdosa del agua y que toma esta coloración más fuerte cuando al interior de los túneles hay movimientos”. La cita anterior supone una conexión hidráulica entre las obras mineras subterráneas y el río Manduriaco Chico, no entre las piscinas de relaves y el río Manduriaco Chico. Es posible que se produzca una conexión entre la Piscina Nro. 15 y el río Manduriaco Chico a través del sistema de agua subterránea, ya que los caminos del agua subterránea no siempre siguen los caminos del agua superficial. Sin embargo, se necesitaría más investigación para establecer tal conexión.

La Falla de la Presa de Relaves no fue Precedida por Fuertes Lluvias

Es conocido que la falla de la presa de relaves en la madrugada del 4 de noviembre de 2023 no fue precedida inmediatamente por fuertes lluvias en el sitio de la mina. De acuerdo con el Municipio de Cotacachi (2023a), “Habitantes de la comuna de Río Verde señalan que ellos se dieron cuenta del cambio de coloración del Río Verde el día sábado 4 de noviembre de 2023, aproximadamente a las 8h00 am ... no había llovido y el cambio de color repentino del río era extraño”. La cita anterior también confirma que la decoloración se observó en el río Verde y no sólo en el río Manduriaco Chico. Desafortunadamente, no hay información sobre si hubo lluvias en el sitio de la mina durante los tres días anteriores a la falla.

El registro de precipitaciones durante los primeros cuatro días de noviembre de 2023 es mixto en las cuatro estaciones meteorológicas cercanas en la base de datos NCDC (ver Fig. 21). La precipitación total en La Concordia del 1 al 4 de noviembre de 2023 fue de 2,0 mm, muy por debajo de la media de 30,2 mm (ver Tabla 7a). Desafortunadamente, faltan todos los datos de precipitación del 1 al 4 de noviembre de 2023 para las estaciones meteorológicas de Izobamba y San Gabriel (ver Tabla 7b-c). Por el contrario, la precipitación total en San Luis (Columbia) del 1 al 4 de noviembre de 2023 fue de 40,4 mm, muy por encima de la media de 10,2 mm e incluso mayor que la precipitación máxima para ese período de 39,6 mm, que se registró en 1993 (ver Tabla 7d). En resumen, debido a la falta de coherencia en las estaciones meteorológicas vecinas,

ciertamente no hay evidencia convincente de que la falla de la presa de relaves haya sido precedida por fuertes lluvias durante los tres días anteriores.

Tabla 7a. Precipitación histórica comparada con 2023 en la base de datos del NCDC: La Concordia (Ecuador)¹

Año	Septiembre		Octubre		1-4 de Noviembre	
	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)
2005	—	—	1	31,0	—	—
2011	12	43,8	13	129,5	2	38,2
2012	17	10,1	17	92,3	3	30,8
2013	19	10,9	12	14,2	2	0,0
2014	12	31,8	9	301,0	—	—
2015	22	85,1	22	459,9	—	—
2016	11	28,1	10	38,8	—	—
2017	1	123,0	5	14,3	1	1,2
2018	3	43,0	5	1,9	—	—
2020	1	1257	2	0,0	—	—
2021	24	74,6	23	97,6	3	92,1
2022	18	12,5	18	20,8	4	1,5
Media ³		49,9		141,4		30,2
Máxima ⁴		85,1		459,9		92,1
Mínima ⁴		10,1		14,2		0,0
2023	19	131,5	26	293,9	2	2,0

¹Datos de NOAA (2024)

²La precipitación ponderada para cada año se calculó como la precipitación total dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 y 4 de noviembre.

³La precipitación media se calculó como la precipitación total durante todo el registro histórico anterior a 2023 dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 al 4 de noviembre.

⁴Las precipitaciones máximas y mínimas para septiembre y octubre se calcularon basándose únicamente en años con al menos una cobertura del 33% (10 días de datos de precipitación).

Tabla 7b. Precipitación histórica comparada con 2023 en la base de datos del NCDC: Izobamba (Ecuador)¹

Año	Septiembre		Octubre		1-4 de Noviembre	
	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)
2011	12	134,3	20	289,5	3	13,6
2012	8	72,4	17	164,5	4	7,1
2013	10	67,8	17	222,5	2	12,2
2014	10	149,7	8	201,9	—	—
2015	6	9,0	22	97,4	2	12,2
2016	10	114,0	14	176,5	2	14,2
2017	2	391,5	4	94,6	1	16,4
2018	1	90,0	8	68,6	2	62,0
2019	—	—	9	201,5	1	3,2
2020	—	—	1	9,3	—	—
2021	19	147,0	22	267,9	1	4,0
2022	17	132,2	19	206,6	3	13,6
Media ³		153,0		193,6		15,9
Máxima ⁴		149,7		289,5		62,0
Mínima ⁴		67,8		97,4		3,2
2023	4	178,5	11	99,2	—	—

¹Datos de NOAA (2024)

²La precipitación ponderada para cada año se calculó como la precipitación total dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 y 4 de noviembre.

³La precipitación media se calculó como la precipitación total durante todo el registro histórico anterior a 2023 dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 al 4 de noviembre.

⁴Las precipitaciones máximas y mínimas para septiembre y octubre se calcularon basándose únicamente en años con al menos una cobertura del 33% (10 días de datos de precipitación).

Tabla 7c. Precipitación histórica comparada con 2023 en la base de datos del NCDC: San Gabriel (Ecuador)¹

Año	Septiembre		Octubre		1-4 de Noviembre	
	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)
2011	14	66,4	20	125,1	—	—
2012	15	52,6	15	108,1	—	—
2013	24	25,1	13	128,5	2	2,0
2014	12	30,3	14	126,7	—	—
2015	12	39,8	22	59,6	4	1,4
2016	5	16,8	6	108,0	1	24,4
2017	—	—	—	—	—	—
2018	6	53,5	8	103,9	—	—
2019	1	30,0	7	193,5	—	—
2020	—	—	1	158,1	—	—
2021	7	69,9	14	95,2	2	15,8
2022	8	136,1	8	203,8	—	—
Media ³		49,8		114,7		7,3
Máxima ⁴		66,4		128,5		24,4
Mínima ⁴		25,1		59,6		1,4
2023	7	23,6	3	136,4	—	—

¹Datos de NOAA (2024)

²La precipitación ponderada para cada año se calculó como la precipitación total dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 y 4 de noviembre.

³La precipitación media se calculó como la precipitación total durante todo el registro histórico anterior a 2023 dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 al 4 de noviembre.

⁴Las precipitaciones máximas y mínimas para septiembre y octubre se calcularon basándose únicamente en años con al menos una cobertura del 33% (10 días de datos de precipitación).

Tabla 7d. Precipitación histórica comparada con 2023 en la base de datos del NCDC: San Luis (Colombia)¹

Año	Septiembre		Octubre		1-4 de Noviembre	
	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)	Días de Datos	Precipitación Ponderada ² (mm)
1973	9	120,0	9	24,1	1	16,4
1974	8	46,9	14	99,0	3	3,3
1976	9	173,3	22	110,5	4	15,2
1977	29	115,6	30	53,5	4	6,0
1978	23	38,7	26	11,7	4	0,0
1979	21	55,6	28	69,8	3	9,5
1980	17	36,5	19	186,2	3	0,0
1981	10	10,5	19	25,6	—	—
1990	2	19,5	2	169,0	—	—
1993	9	11,0	4	38,8	1	39,6
1994	4	81,8	1	62,0	4	1,0
1995	—	—	3	0,0	—	—
1996	3	25,0	1	9,3	—	—
1997	6	211,5	4	171,3	—	—
1998	5	98,4	3	31,0	—	—
1999	2	118,5	2	217,0	2	2,0
2000	14	96,6	10	50,2	1	8,0
2001	10	15,6	2	12,4	1	12,0
2002	6	19,0	8	202,7	2	16,4
2003	12	58,5	13	95,6	—	—
2004	4	285,8	16	102,5	3	1,5
2005	12	17,5	18	105,2	4	5,6
2006	2	60,0	1	24,8	—	—
2007	1	30,0	3	148,8	—	—
2010	18	55,3	25	94,9	3	20,4
2011	11	48,3	13	99,4	1	24,4
2012	14	25,5	17	106,7	1	8,0
2013	23	23,5	17	122,0	1	0,0
2014	24	50,0	31	74,2	4	28,0
2015	22	21,8	30	43,2	4	18,8
2016	29	99,1	30	48,1	4	10,4
2017	29	21,1	30	73,3	4	12,1
2018	27	45,2	31	53,8	4	1,8
2019	28	19,9	31	108,3	4	18,0
2020	20	6,6	—	—	—	—
2022	15	24,8	24	127,7	—	—
Media ³		53,1		81,9		10,2
Máxima ⁴		115,6		186,2		39,6
Mínima ⁴		6,6		11,7		0,0
2023	4	7,5	4	232,5	3	40,4

¹Datos de NOAA (2024)

²La precipitación ponderada para cada año se calculó como la precipitación total dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 y 4 de noviembre.

³La precipitación media se calculó como la precipitación total durante todo el registro histórico anterior a 2023 dividida por el número de días con datos de precipitación y luego multiplicada por 30 para septiembre, 31 para octubre y 4 para el 1 al 4 de noviembre.

⁴Las precipitaciones máximas y mínimas para septiembre y octubre se calcularon basándose únicamente en años con al menos una cobertura del 33% (10 días de datos de precipitación).

Tabla 8. Precipitación mensual histórica (mm) en base de datos del INAMHI¹

Año	La Concordia		Izobamba		San Gabriel	
	Septiembre	Octubre	Septiembre	Octubre	Septiembre	Octubre
1994	25,3	39,1	86,8	75,2	38,3	62,3
1995	9,6	99,7	50,7	137,1	19,6	78,2
1996	12,3	19,8	45,6	163,6	40,5	84,2
1997	849,6	757,2	71,1	150,5	81,0	73,0
1998	82,6	13,9	57,4	192,5	44,3	309,1
1999	124,8	65,2	157,2	104,2	82,4	45,2
2000	64,4	79,1	167,7	49,9	45,9	54,4
2001	33,9	4,8	91,4	7,9	16,9	4,3
2002	108,0	86,1	22,9	129,6	3,7	138,8
2003	3,0	130,6	101,3	153,2	41,0	102,6
2004	81,7	99,0	98,7	136,3	61,9	63,3
2005	24,3	33,4	84,1	83,7	47,6	130,9
2006	48,9	25,1	51,6	76,5	50,7	72,3
2007	33,6	17,2	16,4	201,9	39,2	198,7
2008	152,0	55,4	103,1	199,5	45,1	211,0
2009	6,8	8,1	9,7	86,4	16,5	47,1
2010	45,2	13,2	79,5	89,7	78,7	134,0
2011	65,0	48,3	56,9	197,6	40,7	96,1
2012	4,9	73,7	20,5	167,0	25,9	77,0
2013	7,1	26,6	38,9	191,5	19,7	80,3
Media	89,2	84,8	70,6	129,7	42,0	103,1
Máxima	849,6	757,2	167,7	201,9	82,4	309,1
Mínima	3,0	4,8	9,7	7,9	3,7	4,3

¹Dados de INAMHI (1996, 1997, 2000a-b, 2001, 2002, 2006a-f, 2008, 2010a-b, 2012a-b, 2014, 2015, 2017).

El registro de precipitaciones de los dos meses anteriores a la falla de la presa de relaves también es mixto para las cuatro estaciones meteorológicas cercanas en la base de datos del NCDC (ver Fig. 21). En la estación meteorológica de La Concordia, las cantidades totales de precipitación para septiembre de 2023 y octubre de 2023 fueron 131.5 mm y 293.9 mm, respectivamente (ver Tabla 7a). En comparación con los datos de la base de datos NCDC (2005-2022), las precipitaciones de septiembre de 2023 estuvieron muy por encima tanto de la media de 49,9 mm como del máximo de 85,1 mm, lo cual se registró en 2015 (ver Tabla 7a). En comparación con los datos de la base de datos del INAMHI (1994-2013), la precipitación de septiembre de 2023 en La Concordia todavía estuvo por encima de la media de 89,2 mm, pero ni siquiera cerca del máximo de 849,6 mm de lluvia registrado en 1997 (ver Tabla 8). En

comparación con los datos de la base de datos del NCDC (2005-2022), las precipitaciones de octubre de 2023 estuvieron muy por encima de la media de 141,4 mm, pero no del máximo de 459,9 mm registrado en 2015 (ver Tabla 7a). En comparación con los datos de la base de datos del INAMHI (1994-2013), la precipitación de octubre de 2023 en La Concordia estuvo muy por encima de la media de 84,8 mm, pero no del máximo de 757,2 mm que se registró nuevamente en 1997 (ver Tabla 8). Por lo tanto, La Concordia estuvo inusualmente húmeda durante septiembre y octubre de 2023.

En la estación meteorológica de Izobamba, las precipitaciones totales para septiembre de 2023 y octubre de 2023 fueron de 178,5 mm y 99,2 mm, respectivamente (ver Tabla 7b). En comparación con los datos de la base de datos del NCDC (2011-2022), las precipitaciones de septiembre de 2023 estuvieron por encima tanto de la media de 153,0 mm como del máximo de 149,7 mm, que se registró en 2014 (ver Tabla 7b). Notar que, en este caso, el máximo es mayor que la media porque la media se calcula usando todos los datos, mientras que el máximo se calculó usando sólo años con al menos 10 días de datos de precipitación en el mes de interés (sólo 2011, 2013, 2014, 2016, 2021 y 2022; ver Tabla 7b). En comparación con los datos de la base de datos del INAMHI (1994-2013), la precipitación de septiembre de 2023 en Izobamba estuvo por encima tanto de la media de 70,6 mm como del máximo de 167,7 mm de lluvia que se registró en 2000 (ver Tabla 8). En comparación con los datos de la base de datos del NCDC (2011-2022), las precipitaciones de octubre de 2023 fueron muy inferiores a la media de 193,6 mm y sólo ligeramente superiores al mínimo de 97,4 mm registrado en 2015 (ver Tabla 7b). En comparación con los datos de la base de datos del INAMHI (1994-2013), la precipitación de octubre de 2023 en Izobamba fue inferior a la media de 129,7 mm, pero muy por encima del mínimo de 7,9 mm registrado en 2001 (ver Tabla 8). Así, Izobamba estuvo inusualmente húmedo durante septiembre de 2023 e inusualmente seco durante octubre de 2023.

El patrón opuesto se observó en la estación meteorológica de San Gabriel (ver Tablas 7c y 8). Las cantidades totales de precipitación para septiembre de 2023 y octubre de 2023 fueron 23,6 mm y 136,4 mm, respectivamente (ver Tabla 7c). En comparación con los datos de la base de datos del NCDC (2011-2022), las precipitaciones de septiembre de 2023 estuvieron muy por debajo de la media de 49,8 mm e incluso por debajo del mínimo de 25,1 mm registrado en 2013 (ver Tabla 7c). En comparación con los datos de la base de datos del INAMHI (1994-2013), la precipitación de septiembre de 2023 en San Gabriel estuvo muy por debajo de la media de 42,0 mm, pero aún mayor que el mínimo de 3,7 mm que se registró en 2002 (ver Tabla 8). En comparación con los datos de la base de datos del NCDC (2011-2022), la precipitación de octubre de 2023 fue mayor que la media de 114,7 mm y el máximo de 128,5 mm, lo cual se registró en 2013 (ver Tabla 7c). En comparación con los datos de la base de datos del INAMHI (1994-2013), la precipitación de octubre de 2023 en San Gabriel fue mayor que la media de 103,1 mm, pero mucho menor que el máximo de 309,1 mm que se registró en 1998 (ver Tabla 8). Así, San Gabriel estuvo inusualmente seco durante septiembre de 2023 e inusualmente húmedo durante octubre de 2023.

Para la estación meteorológica de San Luis (Colombia), las precipitaciones totales para septiembre de 2023 y octubre de 2023 fueron de 7,5 mm y 232,5 mm, respectivamente (ver Tabla 7d). En comparación con los datos de la base de datos del NCDC (1973-2022), las precipitaciones de septiembre de 2023 estuvieron muy por debajo de la media de 53,1 mm y sólo ligeramente superiores al mínimo de 6,6 mm observado en 2020 (ver Tabla 7d). En comparación con la misma base de datos, la precipitación de octubre de 2023 fue mayor que la media de 81,9 mm y el máximo de 186,2 mm, lo cual se observó en 1980 (ver Tabla 7d). Así, San Luis

(Colombia) siguió el patrón de San Gabriel al ser inusualmente seco durante septiembre de 2023 e inusualmente húmedo durante octubre de 2023.

En resumen, basándose en la falta de coherencia en las estaciones meteorológicas vecinas y el conocimiento de que no llovió en el sitio de la mina durante la noche del 3 al 4 de noviembre, no hay evidencia de que fuertes lluvias precedieran a la falla de la presa de relaves ni durante la noche anteriores a la falla, ni durante los tres días anteriores a la falla, ni durante los dos meses anteriores a la falla. Anteriormente, se señaló que la Piscina Nro. 15 se encontraba en un nivel de agua de emergencia al momento de la falla (Defensoría del Pueblo, 2024), pero el exceso de agua pudo haber resultado únicamente del agua que se mezcló con los relaves a medida que estos llegaban desde la planta de procesamiento, y no necesariamente estuvo relacionado con las precipitaciones. Dicho lo anterior, cabe señalar que las lluvias intensas pueden formar parte de la cadena de acontecimientos que conducen a la falla, pero las lluvias intensas nunca pueden ser la causa de la falla. En la provincia de Imbabura, las fuertes lluvias son una realidad. Según datos de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023b), las precipitaciones medias anuales en Apuela, Chontal Bajo, García Moreno, Inguincho y Selva Alegre (ver Fig. 22) son de 1414,2 mm, 1590,0 mm, 1569 mm, 1210,8 mm, y 1730,2 mm, respectivamente, mientras que la precipitación máxima anual en García Moreno fue de 3293 mm para el período 2000-2016.

Las regulaciones ecuatorianas de presas de relaves especifican que se supone que una presa de relaves debe estar diseñada para resistir un evento de precipitación particular, dependiendo de las consecuencias de una falla catastrófica en una escala de cinco niveles (MERNNR, 2020a-c). Por ejemplo, las regulaciones ecuatorianas definen una falla catastrófica como “Significativo” si la falla catastrófica resultará en “pérdida no significativa o deterioro del hábitat silvestre o acuático” con “sólo pérdida marginal del hábitat” (MERNNR, 2020b). Las regulaciones definen la falla catastrófica como “Alta” si la falla catastrófica resultará en “pérdida significativa o deterioro importante del hábitat silvestre o acuático” (MERNNR, 2020b). Las regulaciones establecen luego que una presa de relaves cuyas consecuencias de una falla catastrófica sean significativas debe diseñarse para resistir un evento de precipitación con un período de retorno de entre 100 y 1000 años. Una presa de relaves cuyas consecuencias de una falla catastrófica serán Alta debe diseñarse para resistir un evento de precipitación a un tercio del camino entre un evento de precipitación con un período de retorno de 1000 años y la Inundación Máxima Probable (IMP) (MERNNR, 2020b). Por lo tanto, se supone que las presas de relaves en la provincia de Imbabura deben estar diseñadas para soportar tanto las precipitaciones típicas como las extremas de la provincia, por lo que las causas de falla deben buscarse en la acción o falta de acción del ser humano, no en fenómenos meteorológicos. Las causas probables de la falla de la presa de relaves en la mina El Corazón se abordarán en las siguientes dos subsecciones.

La Causa Próxima de la Falla de la Presa de Relaves fue la Erosión Interna

Para determinar la causa próxima de la falla, la información clave es Fig. 6, la cual es una imagen fija de un video de 46 segundos. La imagen fija, así como el vídeo completo, muestra claramente agua turbia emergiendo de la cara del terraplén (ver Fig. 6 y comparar con Fig. 9). Por lo tanto, la causa próxima de la falla no fue el desbordamiento, lo que habría resultado en que el agua fluyera por encima de la cresta del terraplén. La causa próxima tampoco fue la falla de los cimientos, ya que el asentamiento de la piscina de relaves en los cimientos también habría

resultado en que el agua fluyera por encima de la cresta del terraplén. La actividad sísmica puede descartarse porque no hay registros de terremotos dentro de los 1000 kilómetros del sitio de la mina durante las 24 horas anteriores a la falla de la presa de relaves (USGS, 2024). La licuefacción estática y la inestabilidad de la pendiente pueden descartarse porque no hay evidencia de comportamiento del flujo o deslizamiento (ver Fig. 6).

De hecho, la aparición de agua lodosa desde la cara de un terraplén es el rasgo característico de la erosión interna (comparar Fig. 6 con Fig. 9). Ya se ha mencionado que la filtración de agua lodosa (a diferencia de agua clara) es una señal peligrosa porque significa que la filtración está arrastrando relaves o el material de construcción de la presa, o ambos, lo que eventualmente podría conducir a la pérdida de integridad estructural de la piscina de relaves. Con base en información proporcionada por un representante de Agroindustrial, el Municipio de Cotacachi (2023a) informó que el caudal de la presa fue de 2,57 litros por segundo a las 4:50 pm del lunes 6 de noviembre (dos días y medio después de la falla de la presa de relaves) con un caudal casi idéntico (2,48 litros por segundo) medido a las 10:00 am del martes 7 de noviembre. El Municipio de Cotacachi (2023a) luego informó la impactante información que “En la visita los técnicos de la empresa manifestaron que el caudal viene siendo similar desde aproximadamente agosto del año 2020, lo que ha variado es la turbidez”. En otras palabras, basándose en el hecho de que la Piscina Nro. 15 fue construido entre 2020 y 2021 (Municipio de Cotacachi, 2023a), los técnicos de la empresa informaban que la Piscina Nro. 15 había estado liberando agua enriquecida con cianuro de la piscina de relaves desde que se construyó la piscina sin que aparentemente se hubiera tomado ninguna medida por parte de la empresa minera. La falla de la piscina de relaves solo llamó la atención de la comunidad aguas abajo cuando se observaron relaves de grano fino en el río Verde (Municipio de Cotacachi, 2023a). Desde otra perspectiva, dado que el propósito de la presa era impedir el flujo de agua enriquecida con cianuro hacia las corrientes aguas abajo, la presa de relaves había estado en un estado continuo de falla desde su construcción. Lo que cambió en la madrugada del 4 de noviembre fue que la filtración comenzó a arrastrar partículas sólidas, por lo que la falla continua inició la progresión hacia una falla catastrófica, que afortunadamente fue interrumpida cuando finalmente la empresa minera tomó medidas.

La Causa Fundamental de la Falla de la Presa de Relaves fue un Diseño Inadecuado

Tanto la empresa minera como la agencia gubernamental responsable afirmaron que la causa de la falla de la presa de relaves fue un desgarro en la geomembrana. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “La fuga de relave de la piscina 15 se produjo debido a un fisuramiento en la geomembrana de la piscina 15”. De acuerdo con MAATE (2023b), “Se estima que el evento ambiental estaría dado por una fisura a nivel de la geomembrana de la piscina 15 de la relavera”. Por supuesto, un desgarro en la geomembrana es un paso necesario en la cadena de acontecimientos que termina en la erosión interna de la presa de relaves. Está claro que ninguna agua puede salir de la piscina de relaves sin un desgarro en la geomembrana, a menos que el agua fluya por encima de la cresta del terraplén, lo que no parece haber ocurrido (ver Fig. 6). Sin embargo, una geomembrana no debería ser la única línea de defensa contra la falla de la presa de relaves. Por lo tanto, es necesario considerar si el agua debiera fluir fuera del frente del terraplén simplemente porque hay un desgarro en la geomembrana. También cabe señalar las afirmaciones de los técnicos de la empresa de que se había observado el mismo caudal desde que se construyó la Piscina Nro. 15 (Municipio de Cotacachi, 2023a). Las

afirmaciones implican que la geomembrana estaba desgarrada cuando se instaló por primera vez y que el único cambio el 4 de noviembre fue que el flujo comenzó a arrastrar partículas sólidas.



Figura 24. MAATE (2023b) afirma que los taludes de la Piscina No. 15 son estables sin dar ninguna evidencia ni explicar cómo debe entenderse la palabra “estable”. Las fotos (especialmente la superior derecha) aclaran que los terraplenes son muy empinados y del orden de 1V: 1H (45°), que es el ángulo crítico máximo necesario para evitar fallas por erosión interna. Por el contrario, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. requiere ángulos de pendiente no mayores a 1V: 5H (11° desde la horizontal) para evitar fallas por erosión interna (USACE, 2000). Dado que hay dos vistas hacia el sureste y ninguna vista hacia el noreste, es posible que las direcciones estén mal etiquetadas. Figura de MAATE (2023b).

Una presa de tierra debería poder impedir el flujo de agua incluso si hay un desgarró en la geomembrana o incluso si no hay ninguna geomembrana. La subsección anterior “Mecanismos de Falla de Presas de Relaves” describió tres medios principales para prevenir la falla de las presas de relaves por erosión interna, ninguno de los cuales incluye geomembranas. En primer lugar, el terraplén necesita una pendiente suave para reducir el gradiente hidráulico y, por tanto, reducir el caudal de agua a través del terraplén. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (USACE, 2000) recomienda que el terraplén no tenga una inclinación superior a 1V: 5H (11° desde la horizontal). Por el contrario, las fotos de MAATE (2023b) aclaran que las inclinaciones de los terraplenes son de aproximadamente 1V: 1H (45°), lo cual es demasiado pronunciado (ver Fig. 24). De hecho, una inclinación de 1V: 1H se considera el ángulo crítico máximo para la prevención de la erosión interna (Holtz et al., 2000), lo que implica que los terraplenes de la Piscina Nro. 15 siempre han estado a la cúspide de falla. Por lo tanto, una vez que la geomembrana se desgarró, el agua de la piscina de relaves fluyó tan rápido a través del desgarró y luego a través del terraplén que pudo arrastrar partículas sólidas. La inclinación del terraplén también es evidente en la forma en que el residente local luchó por ganar pie para recolectar una muestra de agua de la presa de relaves con fugas (ver Fig. 6). La alta inclinación

del terraplén se indica además por la inclinación de la tubería, las raíces de las plantas expuestas y la caída casi vertical de agua contaminada de la piscina de relaves (ver Fig. 6).

El segundo medio para prevenir la falla de la presa de relaves por erosión interna es la instalación de un sistema de drenaje que forzaría la salida de las filtraciones por el pie de la presa, en lugar de a lo largo de la cara de la presa (ver Fig. 10). Sin embargo, los únicos drenajes que se mencionan en los documentos de la compañía minera son los drenajes que se construyeron en los cimientos de las piscinas de relaves debajo de la geomembrana (ver Fig. 25). Es decir, no se mencionan drenajes que pudieran controlar el flujo de agua después de que ésta emergiera de un desgarramiento en la geomembrana. El hecho de que la filtración apareciera en lo alto de la cara de la presa (ver Fig. 6), en lugar de en el pie de la presa, ciertamente cuenta como evidencia de que nunca se había instalado un sistema de drenaje apropiado o de que era completamente ineficaz. El tercer medio de prevención es la instalación de filtros para atrapar las partículas finas y evitar su arrastre en la filtración (ver Fig. 11). De la misma manera, no se mencionan filtros dentro de los terraplenes de las piscinas de relaves de la mina El Corazón. Aunque visualmente se aprecia la excesiva inclinación de los terraplenes (ver Fig. 24), es necesario cierta cautela respecto a la falta de drenajes y filtros, simplemente por la falta general de información que se revisó en la sección “Resumen de Piscinas de Relaves en la Mina de Oro El Corazón”.



Construcción de drenes en la base de la relavera (foto de archivo)

Figura 25. Se construyeron drenajes en los cimientos de las piscinas de relaves debajo de la geomembrana. Sin embargo, no hay drenajes que fuercen que el agua y los relaves que escapan de la geomembrana y fluyen contra la presa de relaves salgan de la presa de relaves por el pie (comparar con Figs. 10-11). Foto de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a).

En resumen, si bien la causa próxima de la falla de la presa de relaves fue la erosión interna, la causa fundamental fue un diseño inadecuado que permitió que un desgarramiento en la geomembrana progresara hacia la erosión interna. La falla de la presa de relaves no implicó sólo la liberación de agua en las corrientes aguas abajo, sino también la liberación de agua enriquecida en cianuro. Por lo tanto, un aspecto adicional del diseño inadecuado fue el hecho de no destruir el cianuro antes de que los relaves y el agua se descarguen en una piscina de relaves.

En otras palabras, el hecho de no destruir el cianuro convirtió un accidente relativamente menor en uno mucho más grave.

La posible cadena de eventos que se enumeró en la subsección “Causas Próximas y Fundamentales de las Fallas en las Presas de Relaves” ahora se puede revisar:

- 1) Una piscina de relaves está diseñada para una mina de oro cuyo terraplén es excesivamente empinado. Además, la presa no incluye un sistema de drenaje que forzaría la aparición de filtraciones en el pie de la presa y no incluye filtros para atrapar partículas finas. Finalmente, no existe ningún plan para la destrucción del cianuro antes de que los relaves y el agua enriquecida con cianuro se depositen en la piscina de relaves.
- 2) No se revisa el diseño de la piscina de relaves o la revisión es inadecuada, por lo que no se llama la atención sobre las deficiencias en el diseño.
- 3) La piscina de relaves se construye según la diseñada.
- 4) No se realizan inspecciones o revisiones de seguridad de presa o son inadecuadas, por lo que no se llama la atención sobre las deficiencias en el diseño.
- 5) La filtración (agua enriquecida con cianuro) aparece en lo alto de la cara de la presa. La filtración es clara y no turbia.
- 6) Nadie se da cuenta de la filtración o nadie comprende su significado.
- 7) La filtración se vuelve turbia (indicando que la erosión interna está en progreso) y el lodo y el agua enriquecida con cianuro aparecen en las corrientes aguas abajo.

No se puede establecer definitivamente que ocurrió la secuencia de eventos anterior, pero la secuencia es consistente con esta subsección y la subsección anterior, en la que cuatro aspectos de diseño inadecuado constituyen la causa fundamental (Paso #1), mientras que la erosión interna es la causa próxima (Paso #7). El desgarramiento en la geomembrana podría haber estado presente cuando la geomembrana se instaló por primera vez (Paso #3) o podría haber ocurrido justo antes de la aparición de la filtración (Paso #5). Al respecto, cabe recordar que, según técnicos de la empresa minera, las filtraciones de la presa comenzaron una vez fue construida la piscina de relaves (Municipio de Cotacachi, 2023a), lo que comprimiría los Pasos #3, #4 y #5 en un solo evento. No está claro qué provocó que la filtración se volviera lodosa la madrugada del 4 de noviembre de 2023. Podría ser que nada haya cambiado del 3 al 4 de noviembre, excepto que se necesitó tiempo suficiente para que el flujo a través del terraplén pudiera aflojar las partículas sólidas y enturbiar la filtración. A estas alturas debería quedar claro que una preocupación excesiva por la causa próxima puede ser contraproducente y que la atención debe centrarse en las causas fundamentales y en la prevención de futuras fallas.

No hay Indicios de que las Presas de Relaves Existentes sean Estables

Inmediatamente después de la falla de la presa de relaves, tanto la empresa minera como la agencia gubernamental responsable certificaron la estabilidad de las presas de relaves existentes en la mina El Corazón. De acuerdo con Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a), “En el transcurso del día el personal técnico de la empresa realiza la verificación de las condiciones de estabilidad de los taludes de la relavera, sin encontrarse anomalías”. A su vez, en su informe de inspección realizado el 7 de noviembre, MAATE (2023b) etiquetó cada una de cuatro vistas de la Piscina Nro. 15 como “taludes estables” (ver Fig. 24), pero sin ningún comentario. Considerando la rapidez con la que se llevaron a cabo estas inspecciones y ante la ausencia de datos que lo respalden, se debe suponer que las certificaciones de estabilidad se basaron únicamente en la apariencia visual de las presas de relaves.

A diferencia de las rudimentarias certificaciones de estabilidad que realizaron Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) y MAATE (2023b), las regulaciones ecuatorianas de presas de relaves ecuatorianas proporcionan información detallada sobre el significado de “estabilidad” y los métodos adecuados para determinar si una presa de relaves es estable. De acuerdo con MERNNR (2020a), “estabilidad física” se define como la “condición a la cual se encuentra sometida una estructura, bajo cargas estáticas, hidráulicas y sísmicas y que es capaz de cumplir con los criterios de aceptabilidad o factores de seguridad (estática, seudoestática, dinámico, post sísmico) frente a una condición de inestabilidad”. El factor de seguridad contra la inestabilidad es la relación entre la resistencia al corte de una presa y el esfuerzo cortante que actúa sobre ella. Una presa con un factor de seguridad igual a 1,0 está a la cúspide de falla y factores de seguridad más altos indican una mayor estabilidad. Para cargas estáticas (no sísmicas), MERNNR (2020b) especifica factores de seguridad mínimos de 1,3 durante o al final de la construcción de la presa y 1,5 durante la operación de la presa. MERNNR (2020b) especifica además factores de seguridad mínimos de 1,0 durante el terremoto de diseño y 1,2 después de la deformación resultante del terremoto de diseño. Dado que no hay discusión sobre el factor de seguridad ni en Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) ni en MAATE (2023b), no puede haber verificación de la estabilidad física.

MERNNR (2020a) proporciona más información general sobre el alcance y la profundidad del conocimiento que se requiere para demostrar estabilidad. El artículo 12 establece que la empresa minera “facilitará información generada del sistema de monitoreo en tiempo real para evaluar la estabilidad física” (MERNNR (2020a)). El artículo 15 establece que “la distancia entre la poza y la presa debe estar técnicamente justificada mediante un análisis hidráulico (nivel de aguas máximas extraordinarias) y geotécnico (estabilidad de la presa)” (MERNNR (2020a)). El artículo 21 establece que “El titular deberá realizar auditorías internas y externas de manera anual ... Para el caso de la inspección evaluación de la estabilidad física, la auditoría debe considerar criterios mínimos como revisión de documentos de aseguramiento y control de la calidad de construcción, operación y mantenimiento del depósito, gestión del manejo de agua, manejo e interpretación del sistema de monitoreo de la instrumentación geotécnica, así como la aplicación de alguna de las guías de Revisión de Seguridad de Presas enunciadas en los estándares señalados en el Artículo 4 de este instructivo” (MERNNR, 2020a). En resumen, la estabilidad física no se evalúa visualmente, sino a través del análisis de datos de monitoreo, análisis geotécnicos y la revisión de todos los documentos relacionados con la construcción y operación de la piscina de relaves. Debe quedar claro que los requisitos descritos en MERNNR (2020a) superan con creces las inspecciones visuales de Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) y MAATE (2023b).

Además de las directrices generales de MERNNR (2020a), MERNNR (2020b-c) son muy detalladas en términos de los pasos apropiados que se deben llevar a cabo para establecer la estabilidad física de una presa de relaves, especialmente en términos del cálculo adecuado del factor de seguridad. De hecho, la metodología para la evaluación de la estabilidad es el tema completo de la Sección 9 titulada “Análisis de Estabilidad Física” y gran parte de la Sección 10 titulada “Análisis y Gestión de Riesgos” en MERNNR (2020b). Por ejemplo, con respecto al cálculo del factor de seguridad, MERNNR (2020b) establece, “Se debe emplear métodos de análisis de estabilidad basados en métodos de equilibrio límite ... Complementariamente se deben realizar modelaciones numéricas con base en técnicas de elementos finitos (MEF) o diferencias finitas (MDF) a fin de estimar las deformaciones y presiones de poro. Se debe considerar la condición de carga según la condición física o un escenario que requiere ser

analizado con diferentes parámetros de resistencia, incluso para el mismo material. Las siguientes condiciones de carga deben ser analizadas: 1. Condiciones drenadas: Representa la estabilidad a largo plazo de una presa o muro de contención de los relaves bajo condiciones de flujo permanente. Sin cambios rápidos en la superficie del nivel freático ... 2. Condiciones no drenadas: La condición de carga no drenada o parcialmente drenada representa la estabilidad de una presa, muro o dique de contención donde la carga y/o falla ocurre lo suficientemente rápido como para que no haya suficiente tiempo para el drenaje del exceso inducido de poro presiones de agua, o donde se desarrollan presiones de poro debido a la naturaleza contractiva de los relaves y/o presa y materiales de cimentación”. Con respecto a los datos de entrada para el cálculo del factor de seguridad, MERNNR (2020b) afirma, “El Titular debe seleccionar adecuadamente los parámetros de la resistencia al corte del material que constituirá el relleno de la presa, dique o muro de contención, considerando que tanto las investigaciones de campo como de laboratorio para caracterizar la misma deben ser compatibles con el análisis asociado y debe tomar en cuenta que la resistencia al corte de los materiales de origen geológico ya sea en condiciones drenadas o no drenadas está en función de los esfuerzos efectivos”.

MERNNR (2020b) es especialmente detallado con respecto a la metodología para establecer que una presa de relaves será capaz de resistir el terremoto de diseño. Cabe señalar que la definición de estabilidad física en MERNNR (2020a) incluye la capacidad de resistir el terremoto de diseño. Por ejemplo, MERNNR (2020b) establece, “Para los análisis de estabilidad física, la determinación del coeficiente sísmico debe ajustarse a las características sísmicas del área y debe ser adoptado en forma criteriosa. La aceleración máxima de campo libre (PGA) debe obtenerse de un estudio de peligro sísmico según el Requisito 4.7.1. Como referencia puede consultarse la zonificación sísmica según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) en su versión más actualizada. La magnitud del coeficiente sísmico debe simular la naturaleza del evento que depende de la intensidad o aceleración del sismo, duración del movimiento y frecuencia”. Como último ejemplo, con respecto a la evaluación de la inestabilidad de pendientes, MERNNR (2020b) afirma, “Se deben realizar el o los análisis de estabilidad de taludes por métodos de equilibrio límite o numéricos y cálculos volumétricos que permitan predecir los escenarios de riesgo para las distintas situaciones en que puede producirse la desestabilización de las laderas situadas en el límite del vaso del depósito y de la presa para relaves. La metodología utilizada para la realización de este requisito debe complementarse con un análisis geológico-geomorfológico de la zona de la presa, muro o dique de contención, centrado en los aspectos referentes a la posible inestabilidad de las laderas, contando para ello con un estudio topográfico a detalle”.

En este punto, debe quedar claro que Agroindustrial El Corazón S.A. (2023a) y MAATE (2023b) en realidad no realizaron un análisis de estabilidad de acuerdo con las regulaciones ecuatorianas, sino que simplemente expresaron una opinión, probablemente basada únicamente en la apariencia visual de las presas de relaves. Como consecuencia, no hay razón para que las comunidades aguas abajo crean que las presas de relaves en la mina El Corazón sean estables. En particular, no existe ningún documento disponible públicamente que establezca el factor de seguridad, explique cómo se calculó el factor de seguridad, revise los datos de entrada para el cálculo del factor de seguridad, establezca las magnitudes del terremoto de diseño y la inundación de diseño, o evalúa la estabilidad de pendientes regionales. Según la empresa minera y las agencias gubernamentales responsables, la falla de la presa de relaves se produjo debido a un desgarramiento en una geomembrana y la solución ha sido intentar localizar el desgarramiento en la geomembrana de la Piscina Nro. 15. El tema de la siguiente sección es si las acciones de la

compañía minera y del gobierno son suficientes para evitar futuras fallas en la presa de relaves en la mina El Corazón.

DISCUSIÓN: SON PROBABLES OTRAS FALLAS EN LAS PRESAS DE RELAVES

A falta de mayor información, se debe asumir que cada una de las 20 piscinas de relaves de la mina El Corazón comparte las siguientes características en común con la Piscina Nro. 15:

- 1) Una geomembrana es la única línea de defensa contra la pérdida de agua y relaves de grano fino.
- 2) Si bien puede haber un sistema de drenaje debajo de la geomembrana, no existe ningún sistema de drenaje que obligue al agua que se escapa de la geomembrana a salir por el pie del terraplén.
- 3) No hay ningún filtro dentro del terraplén para evitar el arrastre de partículas finas por la fuga.
- 4) La inclinación del terraplén es 1V: 1H, lo que se considera la cúspide de falla por erosión interna.
- 5) No se destruye el cianuro antes de que los relaves y el agua se descarguen en la piscina de relaves.
- 6) La estabilidad física de la presa de relaves no ha sido evaluada en términos de la definición de estabilidad física y los procedimientos para evaluar la estabilidad física en las regulaciones ecuatorianas de presas de relaves.

Con base en las características anteriores, se deben considerar probables fallas adicionales en las presas de relaves de cualquiera de las otras piscinas de relaves porque cualquier desgarramiento en una geomembrana iniciará la progresión hacia la erosión interna. Incluso es posible que las geomembranas de otras piscinas de relaves ya estén desgarradas. Fue muy preocupante saber que el Municipio de Cotacachi (2023a) había sido informado por técnicos de Agroindustrial que la Piscina Nro. 15 había tenido fugas desde que fue construida. Habría valido la pena que el equipo municipal preguntara si otras piscinas de relaves tenían fugas en ese momento.

Ya se ha explicado que las causas fundamentales de las fallas de las presas de relaves nunca son fenómenos puramente físicos, como lluvias intensas, sino las acciones o la falta de acciones de los seres humanos. Por lo tanto, en el caso de la mina El Corazón, es muy importante considerar plenamente los factores humanos que están promoviendo la probabilidad de futuras fallas en las presas de relaves. Al respecto, un documento muy informativo es la carta de presentación de dos páginas que Agroindustrial El Corazón S.A. (2024) envió a la Defensoría del Pueblo del Ecuador el 23 de abril de 2024. La carta de presentación incluía otros cuatro documentos, los cuales fueron la aprobación gubernamental del componente biótico del programa de remediación ambiental (MAATE, 2024a), un conjunto de observaciones gubernamentales sobre el componente biótico del programa de remediación ambiental (MAATE, 2024b), un estudio sin fecha sobre fauna acuática (Ojeda, sin fecha), y el plan de acción que presentó la empresa minera en noviembre de 2023 (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a).

De acuerdo con la carta de presentación, “Dejamos constancia que a petición del ciudadano norteamericano Nicholas Peter Shear, director ejecutivo de APT Norte se han realizado 11 inspecciones al Proyecto Minero el Corazón por parte de distintas entidades administrativas, -a ninguna de ellas ha asistido- (desgastando la unidad procesal administrativa), nos ha acusado de varios delitos entre ellos de hostigamiento a miembros de la Comunidad El Corazón -no ha presentado una sola prueba-, haciendo tabla rasa de los principios de

participación y buena fe establecidos en el Código Orgánico Administrativo, gestando una conducta abusiva y premeditada con la intención de causarnos daño, generando una perturbación social hacia mi representado y violentando el interés general establecido en la Constitución de la República” (Agroindustrial El Corazón S.A., 2024). La ira de la empresa minera se ha dirigido no sólo contra la Asociación de Propietarios de Tierras Rurales del Norte (APT Norte), sino también contra la prensa pro-minera. Cabe recordar que Agroindustrial El Corazón S.A. (2023c) también acusó a la Agencia de Prensa Minera de conducta “sensacionalista”.

Respecto de la declaración anterior de Agroindustrial El Corazón S.A. (2024), se pueden hacer las siguientes observaciones:

- 1) El autor tiene conocimiento de sólo seis inspecciones que han sido relacionadas con las causas y consecuencias de la falla de la presa de relaves el 4 de noviembre de 2023 (Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a; MAATE, 2023b; MEM, 2023; Municipio de Cotacachi, 2023a; Defensoría del Pueblo del Ecuador, 2024; Armijos Ojeda, s.f.), uno de los cuales fue realizado por la empresa minera.
- 2) Dos de las inspecciones (Municipio de Cotacachi, 2023a; Defensoría del Pueblo del Ecuador, 2024) ciertamente no otorgaron un “certificado de buena salud” a las presas de relaves en la mina El Corazón. En particular, el Municipio de Cotacachi (2023a) informó sobre los perjudiciales hallazgos de que la Piscina Nro. 15 violaba la barrera requerida de 30 metros entre las piscinas de relaves y las corrientes, que el agua de mina sin tratar de las galerías subterráneas se estaba vertiendo directamente a los ríos y que la Piscina Nro. 15 habían tenido fugas desde que se construyó.
- 3) Ninguna de las inspecciones ha abordado la estabilidad física de las piscinas de relaves en términos de la definición de estabilidad física y los procedimientos para evaluar la estabilidad física en las regulaciones ecuatorianas de piscinas de relaves.
- 4) Ninguna de las inspecciones ha abordado el cumplimiento por parte de la empresa minera del Código Internacional del Cianuro o de los Principios de Minería de Oro Responsable del Consejo Mundial del Oro.
- 5) Las respuestas defensivas de la empresa minera, las cuales implican ataques personales a cualquiera que exprese preocupaciones, ya sea una asociación de propietarios rurales o una fuente de noticias a favor de la minería, han obstaculizado la capacidad de la empresa minera para aprender de la anterior falla de la presa de relaves y prevenir futuras fallas en presas de relaves. Esta negativa a aprender de su propia experiencia o de las experiencias de otros es un factor humano importante que aumenta la probabilidad de futuras fallas en las presas de relaves.

Dado que es probable que se produzcan futuras fallas en las presas de relaves, vale la pena considerar las posibles consecuencias de futuras fallas. Afortunadamente, la falla del 4 de noviembre de 2023 no avanzó hasta convertirse en una falla catastrófica. Si una falla futura llegara a ser catastrófica, podría implicar la liberación de unos 50.000 metros cúbicos de relaves y agua enriquecida con cianuro. El volumen anterior es relativamente pequeño en comparación con los volúmenes de relaves y agua almacenados en mega minas, como Mirador o Fruta del Norte. Sin embargo, el almacenamiento de agua enriquecida con cianuro en las piscinas de relaves de la mina El Corazón es un factor crítico. La falla de la presa de relaves cerca de Baia Mare, Rumania, en 2000, la cual provocó una muerte masiva de peces y la destrucción de especies acuáticas a lo largo de 2.000 kilómetros del río Danubio antes de llegar al mar Negro, liberó sólo 100.000 metros cúbicos de agua enriquecida con cianuro, o aproximadamente el doble de lo que contiene una piscina de relaves en la mina El Corazón. Por lo tanto, una futura

falla catastrófica de una piscina de relaves en la mina El Corazón podría potencialmente liberar agua enriquecida con cianuro que podría viajar por el río Verde hasta el río Guayllabamba y el río Esmeraldas antes de llegar al océano Pacífico (ver Fig. 2) con impactos catastróficos en peces, especies acuáticas y ganado entre la mina y el océano Pacífico.

CONCLUSIONES EN RESUMEN

A continuación se repiten las ocho preguntas planteadas en la sección “Metodología”, seguidas de respuestas muy breves. Se pueden encontrar respuestas más completas en las secciones “Respuestas” y “Discusión”.

1) *¿Por qué existen discrepancias entre los análisis químicos de la muestra de agua recolectada por un residente local y las muestras recolectadas por Agroindustrial y GRUNTEC?*

Se produjeron discrepancias porque, aunque los estándares ecuatorianos se basan en concentraciones de cianuro total, GRUNTEC midió concentraciones de cianuro libre, las cuales pueden ser tan sólo el 1% de las concentraciones de cianuro total. La muestra recolectada por el residente local fue correctamente analizada para cianuro total, mientras que Agroindustrial no especificó qué tipo de concentración de cianuro se midió. Además, debido a las numerosas contradicciones entre el mapa, las coordenadas indicadas y las descripciones indicadas de los sitios de muestreo, los conjuntos de datos de Agroindustrial y GRUNTEC deben rechazarse como totalmente inválidos.

2) *¿Podría el incidente anterior de muerte de ganado haber sido resultado de envenenamiento por cianuro?*

Con base en el peso típico del ganado, el consumo típico de agua por parte del ganado, la concentración de cianuro total que se midió a partir de la reciente falla de presa de relaves y la dosis letal de cianuro para los grandes rumiantes, es posible que las recientes muertes de ganado se deban al envenenamiento por cianuro. Sin embargo, no se puede determinar una causa definitiva de muerte sin más información.

3) *¿Cuál es la causa del color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico?*

Dado que la Unidad Tortugo que es explotada por la mina El Corazón tiene un color verde grisáceo, es probable que la aparición repentina de un color verde grisáceo en el río Manduriaco Chico luego de la falla de la presa de relaves se debiera a la introducción de relaves de grano fino al río. Hay muchas fuentes de coloración en las corrientes, por lo que no se puede determinar una causa definitiva de los cambios repentinos de color sin más información. Un factor que complica la situación es la falta de un camino hidráulico claro entre la Piscina Nro. 15 y el río Manduriaco Chico.

4) *¿Fueron las fuertes lluvias un factor que contribuyó a la falla de la presa de relaves?*

Los datos meteorológicos disponibles no son concluyentes sobre si se produjeron lluvias inusualmente fuertes durante los meses y días previos a la falla de la presa de relaves en la mina

El Corazón. Sin embargo, se sabe que no llovió en el sitio de la mina durante la noche anterior a la falla.

5) *¿Cuál fue la causa inmediata de la falla de la presa de relaves?*

La causa inmediata más probable fue un desgarro en la geomembrana seguido de una erosión interna del terraplén exterior.

6) *¿Cuál fue la causa fundamental de la falla de la presa de relaves?*

La causa fundamental más probable fue un diseño inadecuado, incluidos terraplenes exteriores excesivamente empinados, la falta de un sistema de drenaje que obligaría a las filtraciones a salir por el pie del terraplén y la falta de destrucción del cianuro antes de la deposición de relaves húmedos en las piscinas de relaves.

7) *¿Están actualmente estables las presas de relaves en la Piscina Nro. 15?*

No hay indicios de que las presas de relaves en la Piscina Nro. 15 estén actualmente estables. La inspección posterior a la falla fue puramente visual y no siguió los procedimientos descritos en las regulaciones de presas de relaves ecuatorianas.

8) *¿Se ha eliminado la posibilidad de que se produzcan más fallas en las presas de relaves?*

La posibilidad de que se produzcan más fallas en las presas de relaves no se ha eliminado porque cualquier desgarro futuro en una geomembrana probablemente progresará hacia la erosión interna, con la posibilidad de una falla catastrófica de una presa de relaves y la liberación de la mayor parte del contenido de la piscina de relaves.

RECOMENDACIONES

Este informe hace las siguientes recomendaciones:

- 1) Se deben realizar auditorías completas de seguridad de presas para todas las presas de relaves en la mina El Corazón, de acuerdo con las regulaciones de presas de relaves ecuatorianas.
- 2) Todas las presas de relaves en la mina El Corazón que no sean estables, según lo define en las regulaciones ecuatorianas, deben reforzarse adecuadamente para lograr estabilidad.
- 3) Todas las presas de relaves en la mina El Corazón que no puedan reforzarse adecuadamente para lograr estabilidad deben cerrarse de manera permanente y segura, lo que probablemente implicaría la transferencia de los relaves de oro a un lugar seguro.
- 4) Todas las presas de relaves en la mina El Corazón que violen la separación requerida de una corriente de 30 metros, incluido la Piscina Nro. 15, deben cerrarse de manera permanente y segura, lo que probablemente implicaría la transferencia de los relaves de oro a un lugar seguro.
- 5) Deben realizarse investigaciones para determinar las conexiones hidráulicas entre las piscinas de relaves y las corrientes locales, incluidos estudios de Lidar de alta precisión y el uso de trazadores químicos, incluidos isótopos estables de agua.

- 6) El procesamiento adicional de mineral y la producción adicional de relaves deben cesar hasta que se hayan completado los pasos anteriores.
- 7) Cualquier procesamiento futuro de mineral y producción futura de relaves debe incluir la destrucción del cianuro antes de la deposición de relaves húmedos en piscinas de relaves. De acuerdo con los requisitos de la Unión Europea, el cianuro debe destruirse al nivel más bajo posible utilizando las mejores técnicas disponibles y no más de 10 mg/L de cianuro WAD (Disociable con Ácido Débil).
- 8) Se debe esperar que Agroindustrial se convierta en una empresa signataria del Código Internacional del Cianuro.
- 9) Se debe esperar que Agroindustrial cumpla con todos los requisitos de los Principios de la Minería de Oro Responsable, los cuales fueron desarrollados por el Consejo Mundial del Oro y que incorporan el Código Internacional del Cianuro.
- 10) Se debe esperar que Agroindustrial cumpla plenamente con los requisitos del Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera como mínimo e, idealmente, con los requisitos más estrictos de La Seguridad ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves.

SOBRE EL AUTOR

El Dr. Steven H. Emerman tiene un *Bachelor of Science* (B.S.) en Matemáticas de la Universidad Estatal de Ohio, un Máster (M.A.) en Geofísica de la Universidad de Princeton, y es Doctor (Ph.D.) en Geofísica por la Universidad de Cornell. El Dr. Emerman tiene 31 años de experiencia en la enseñanza de hidrología y geofísica, incluida la enseñanza como profesor Fulbright en Ecuador y Nepal, y tiene más de 70 publicaciones revisadas por expertos en estas áreas. Desde 2018 Dr. Emerman ha sido el propietario de Malach Consulting, la cual se especializa en evaluar los impactos ambientales de la minería para las empresas mineras, así como para agencias gubernamentales y no gubernamentales. El Dr. Emerman ha evaluado instalaciones de almacenamiento de relaves propuestas y existentes en Norteamérica, Sudamérica, Europa, África, Asia y Oceanía, y ha testificado sobre cuestiones relacionadas con la minería y el agua ante el Subcomité de Pueblos Indígenas de los Estados Unidos de la Cámara de Representantes de los E.E. U.U., el Parlamento Europeo, el Foro Permanente para las Cuestiones Indígenas de las Naciones Unidas, la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, la Comisión Permanente de Derechos Humanos de la Cámara de Diputados de la República Dominicana, y el Comité de Medio Ambiente, Clima y Legado del Senado de Minnesota. El Dr. Emerman es el anterior presidente del Subcomité de Cuerpo de Conocimientos de la Sociedad de Presas de EE. UU. y es uno de los autores de La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves.

Steven H. Emerman

REFERENCIAS

- Agencia de Prensa Minera, 2023. Relavera rompió El Corazón—Explota relavera de la mina de El Corazón, ubicada en la parroquia García Moreno, sector El Corazón, cantón Cotacachi de la provincia de Imbabura: 6 de noviembre de 2023. Disponible en línea en: <https://prensaminera.org/relaver-rompio-el-corazon/>
- Agroindustrial El Corazón S.A., 2023a. Plan de acción para remediar afectaciones por fuga de relaves de Piscina 15. Concesión Minera: El Corazón (Cód. 401133), 58 p.
- Agroindustrial El Corazón S.A., 2023b. Auditoría Ambiental de Cumplimiento—Concesión Minera—El Corazón—Periodo—Diciembre/2020 - Diciembre/2022, 423 p.
- Agroindustrial El Corazón S.A., 2023c. A la opinión pública: Comunicado de prensa, 6 de noviembre de 2023, 1 p.
- Agroindustrial El Corazón S.A., 2024. Carta de J. Escobar Cisneros (Gerente General) a F.P. Calle Arias (Delegado Provincial Imbabura, Defensoría del Pueblo): Expediente 3549-2023, 23 de abril de 2024, 2 p.
- ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams [Comité Nacional Australiano de Grandes Represas]), 2012. Guidelines on tailings dams—Planning, design, construction, operation and closure [Directrices sobre presas de relaves—Planificación, diseño, construcción, operación y cierre], 84 p. Disponible en línea en: <https://www.resolutionmineeis.us/sites/default/files/references/ancold-2012.pdf>
- ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams [Comité Nacional Australiano de Grandes Represas]), 2019. Guidelines on tailings dams—Planning, design, construction, operation and closure—Addendum—July 2019 [Directrices sobre presas de relaves—Planificación, diseño, construcción, operación y cierre—Apéndice—julio de 2019], 11 p. Disponible en línea en: <https://www.ancold.org.au/wp-content/uploads/2019/07/Tailings-Guideline-Addendum-July-2019.pdf>
- Armijos Ojeda, D., sin fecha. Estudio de Fauna Acuática—Proyecto Minero “Agroindustrial El Corazón”, 42 p.
- Asamblea de Unidad—Cantonal de Cotacachi, 2023. Urgente—!Moratoria Minera Ya!: Publicación de Facebook del 11 de noviembre de 2023. Disponible en línea en: <https://www.facebook.com/100064691468864/posts/pfbid02vkyu78QZRDMYsKpWmbNrMi9NjUZajTXPwFW5kdesHxDx4Sir5LBrVn4rtJRBMUkVI/?mibextid=WC7FNe>
- ASDSO (Association of State Dam Safety Officials [Asociación de Funcionarios de Seguridad de Presas Estatales]), 2024. Lessons Learned—High and significant hazard embankment dams should have internal filter and seepage collection systems [Lecciones Aprendidas—Las presas de terraplén de altos y significativos peligros deben tener un filtro interno y un sistema de recolección de filtraciones]. Disponible en línea en:
- Bentaher, L., 2012. Prediction of peak breach outflow, and breach parameters for embankment dams using fuzzy logic and artificial neural network techniques [Predicción del flujo máximo de ruptura y parámetros de ruptura para presas de terraplén utilizando lógica difusa y técnicas de redes neuronales artificiales]: M.S. Thesis, Faculty of Irrigation and Hydraulics Engineering, Cairo University [Tesis para el Máster, Facultad de Ingeniería Hidráulica y de Riego, Universidad de El Cairo], 152 p. Disponible en línea en: https://www.researchgate.net/publication/330113598_Prediction_of_Peak_Breach_Outflow_and_Breach_Parameters_for_Embankment_Dams_Using_Fuzzy_Logic_and_Artificial_Neural_Network_Techniques

- Blight, G.F., 2010. Geotechnical engineering for mine waste storage facilities [Ingeniería geotécnica para instalaciones de almacenamiento de residuos mineros]: CRC Press/Balkema, AK Leiden, Los Países Bajos, 634 p.
- Boland, M.P., W.J. McCourt, y B. Beate, 2000. Mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0°-1°N, escala 1/200.000: Ministerio de Energía y Minas y British Geological Survey [Servicio Geológico Británico].
- Boletín Oficial del Estado, 2015. Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental, 96 p. Disponible en línea en: <https://www.boe.es/boe/dias/2015/09/12/pdfs/BOE-A-2015-9806.pdf>
- Botz, M.M., 2024. Basic cyanide chemistry—An essential guide for gold and silver leaching [Química básica del cianuro—Una guía esencial para la lixiviación de oro y plata]: Society for Mining, Metallurgy and Exploration [Sociedad de Minería, Metalurgia y Exploración], Englewood, Colorado, 112 p.
- Canadian Dam Association [Asociación Canadiense de Represas], 2021. Technical Bulletin—Tailings dam breach analysis [Boletín Técnico—Análisis de ruptura de presas de relaves], 68 p.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente [Consejo Nacional del Medio Ambiente]), 2005. Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005 [Resolución CONAMA N° 357, de 17 de marzo de 2005], 36 p. Disponible en línea en: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfeda_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf
- Cope, R.B., 2021. Cyanide Poisoning in Animals [Envenenamiento por Cianuro en Animales]: Merck Veterinary Manual [Manual Veterinario Merck]. Disponible en línea en: <https://www.merckvetmanual.com/toxicology/cyanide-poisoning/cyanide-poisoning-in-animals>
- Defensoría del Pueblo del Ecuador, 2023. Providencia Admisibilidad: CASO-DPE-1001-100101-204-2023-3549-MG, 27 de noviembre de 2023, 6 p.
- Defensoría del Pueblo del Ecuador, 2024. Informe de visita in situ compañía Agroindustrial El Corazón: marzo de 2024, 11 p.
- El Código del Cianuro, 2024. Bienvenido al Código del Cianuro. Disponible en línea en: <https://cyanidecode.org/languages/bienvenido-al-icmi/>
- Elementary Engineering Library [Biblioteca de Ingeniería Primaria], 2024. Piping Failure in Hydraulic Structures [Fallas de Canalización en Estructuras Hidráulicas]. Disponible en línea en: https://www.elementaryengineeringlibrary.com/civil-engineering/soil-mechanics/piping-failure-in-hydraulic-structures#google_vignette
- Emerman, S.H., 2024. A sustentabilidade de uma barragem proposta no Ribeirão Santa Isabel no contexto do consumo de água e contaminação de águas superficiais e subterrâneas pela mina Morro do Ouro da Kinross Gold, Minas Gerais, Brasil [La sostenibilidad de una presa propuesta en Quebrada Santa Isabel en el contexto del consumo de agua y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por la mina Morro do Ouro de Kinross Gold, Minas Gerais, Brasil]: Informe elaborado a solicitud de la Fundação Acangaú, 120 p.
- Environment and Natural Resources Law & Policy Program [Programa de Políticas y Leyes sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales], 2010. European Parliament Calls for

- “Complete Ban on Use of Cyanide Mining Technologies” in European Union and for EU States to Oppose Cyanide Use Elsewhere [El Parlamento Europeo Pide una “Prohibición Total del Uso de Tecnologías Mineras con Cianuro” en la Unión Europea y que los Estados de la UE se Opongán al Uso de Cianuro en Otros Lugares]: Environment & Natural Resources in the 21st Century—Environment21 [Medio Ambiente y Recursos Naturales en el Siglo XXI—Medio Ambiente21], University of Denver—Sturm College of Law [Universidad de Denver—Facultad de Derecho Sturm], 25 de junio de 2010. Disponible en línea en: <https://enrlgp.blogspot.com/2010/06/european-parliament-calls-for-complete.html>
- GRID-Arendal, UNEP (United Nations Environment Programme [Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas]), COE (The Church of England [La Iglesia de Inglaterra]), y CESNPF (Council on Ethics—Swedish National Pension Funds [Consejo de Ética—Fondos de Pensiones Nacionales de Suecia]), 2024. Global Tailings Portal [Portal Global de Relaves]. Disponible en línea en: <https://tailing.grida.no/>
- Fell, R., P. MacGregor, D. Stapledon, G. Bell, y M. Foster, 2015. Geotechnical engineering of dams [Ingeniería geotécnica de presas], 2^{da} ed.: CRC Press, 1348 p.
- FEMA ((U.S.) Federal Emergency Management Agency [(EE.UU.) Agencia Federal para el Manejo de Emergencias]), 2004. Federal guidelines for dam safety [Directrices federales para la seguridad de represas]: abril de 2004, 63 p. Disponible en línea en: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_dam-safety_P-93.pdf
- Fisher, W., T. Camp, y V. Krzhizhanovskaya, 2017. Anomaly detection in earth dam and levee passive seismic data using support vector machines and automatic feature selection [Detección de anomalías en datos sísmicos pasivos de presas y diques de tierra utilizando máquinas de vectores de soporte y selección automática de características]: Journal of Computational Science [Revista de Ciencia Computacional], vol. 20, pp. 143-153. Disponible en línea en: https://www.researchgate.net/publication/311357951_Anomaly_Detection_in_Earth_Dam_and_Levee_Passive_Seismic_Data_Using_Support_Vector_Machines_and_Automatic_Feature_Selection
- Holtz, R.D., W.D. Kovacs, y T.C. Sheahan, 2011. An introduction to geotechnical engineering [Una introducción a la ingeniería geotécnica], 2^{da} ed.: Pearson, 863 p.
- HydroSHEDS, 2024. Seamless hydrographic data for global and regional applications [Datos hidrográficos fluidos para aplicaciones globales y regionales]. Disponible en línea en: <https://www.hydrosheds.org/>
- ICMM (International Council on Mining & Metals), 2021. Conformance Protocols—Global Industry Standard on Tailings Management [Protocolos de Conformidad—Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera], 110 p. Disponible en línea en: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2021/tailings_conformance-protocols.pdf?cb=21097
- ICMM (International Council on Mining & Metals [Consejo Internacional de Minería y Metales]), 2024. Our Members [Nuestros Miembros]. Disponible en línea en: <https://www.icmm.com/en-gb/our-story/our-members>
- ICMM-UNEP-PRI (International Council on Mining & Metals-United Nations Environment Programme-Principles for Responsible Investment [Consejo Internacional de Minería y Metales-Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-Principios para la Inversión Responsable]), 2020. Estándar global de gestión de relaves para la industria

- minera—Agosto de 2020, 42 p. Disponible en línea en:
https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf
- ICOLD (International Commission on Large Dams [Comisión Internacional de Grandes Represas]) y UNEP (United Nations Environment Programme [Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas]), 2001. Tailings dams—risk of dangerous occurrences—Lessons learnt from practical experiences [Presas de relaves—Riesgo de sucesos peligrosos—Lecciones aprendidas de experiencias prácticas]: Boletín 121, 146 p. Disponible en línea en:
<https://ussdams.wildapricot.org/resources/Documents/ICOLD%202001%20Bulletin%20121.pdf>
- IGF (Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development [Foro Intergubernamental sobre Minería, Minerales, Metales y Desarrollo Sostenible]), 2024. ASGM tailings management and reprocessing governance—Global trends [Gestión de relaves y gobernanza del reprocesamiento de la ASGM] —Tendencias globales: The International Institute for Sustainable Development [El Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible], 152 p. Disponible en línea en:
<https://www.iisd.org/system/files/2024-05/igf-asgm-tailings-management-reprocessing-governance.pdf>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 1996. Anuario Meteorológico—1994: Nro. 34, Edición Especial, Quito – Ecuador, 100 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 1997. Anuario Meteorológico—1995: Nro. 35, Edición Especial, Quito – Ecuador, 168 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2000a. Anuario Meteorológico—1996: Nro. 36, Edición Especial, Quito – Ecuador, 160 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2000b. Anuario Meteorológico—1997: Nro. 37, Edición Especial, Quito – Ecuador, 160 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2001. Anuario Meteorológico—1998: Nro. 38, Edición Especial, Quito – Ecuador, 156 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2002. Anuario Meteorológico—1999: Nro. 39, Edición Especial, Quito – Ecuador, 158 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2006a. Anuario Meteorológico—2000: Nro. 40, Edición Especial, Quito – Ecuador, 212 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2006b. Anuario Meteorológico—2001: Nro. 41, Edición Especial, Quito – Ecuador, 192 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2006c. Anuario Meteorológico—2002: Nro. 42, Quito – Ecuador, 200 p. Disponible en línea en:
<https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>

- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2006d. Anuario Meteorológico— 2003: Nro. 43, Quito – Ecuador, 202 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2006e. Anuario Meteorológico— 2004: Nro. 44, Quito – Ecuador, 196 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2006f. Anuario Meteorológico— 2005: Nro. 45, Quito – Ecuador, 200 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2008. Anuario Meteorológico— 2006: Nro. 46, Edición Especial, Quito – Ecuador, 121 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2010a. Anuario Meteorológico— 2007: Nro. 47, Versión Preliminar, Quito – Ecuador, 121 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2010b. Anuario Meteorológico— 2008: Nro. 48, Versión Preliminar, Quito – Ecuador, 123 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2012a. Anuario Meteorológico— 2009: Nro. 49, Quito – Ecuador, 102 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2012b. Anuario Meteorológico— 2010: Nro. 50, Versión Preliminar, Quito – Ecuador, 139 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2014. Anuario Meteorológico: Nro. 51-2011, Quito – Ecuador, 149 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2015. Anuario Meteorológico: Nro. 52-2012, Quito – Ecuador, 153 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), 2017. Anuario Meteorológico: Nro. 53-2013, Quito – Ecuador, 165 p. Disponible en línea en: <https://inamhi.website/anuarios-metereologicos/>
- International Cyanide Management Institute [Instituto Internacional para Manejo del Cianuro], 2021a. El Código Internacional para el Manejo del Cianuro: junio de 2021, 15 p. Disponible en línea en: <https://cyanidecode.org/wp-content/uploads/2021/10/SPX-01-The-Cyanide-Code-JUNE-2021.pdf>
- International Cyanide Management Institute [Instituto Internacional para Manejo del Cianuro], 2021b. Guía para uso del Protocolo para la Verificación de Operaciones Mineras: junio de 2021, 104 p. Disponible en línea en: <https://cyanidecode.org/wp-content/uploads/2021/10/SPX-15-Mining-Guidance-JUNE-2021.pdf>
- International Cyanide Management Institute [Instituto Internacional para Manejo del Cianuro], 2021c. Protocolo para la Verificación de Operaciones Mineras: junio de 2021, 22 p. Disponible en línea en: <https://cyanidecode.org/wp-content/uploads/2021/10/SPX-14-Mining-VP-JUNE-2021.pdf>

- Johnson, C.A., D.J. Grimes, y R.O. Rye, 2000. Fate of process solution cyanide and nitrate at three Nevada gold mines inferred from stable carbon and nitrogen isotope measurements [El destino de la solución de proceso de cianuro y nitrato en tres minas de oro de Nevada se infiere a partir de mediciones de isótopos estables de carbono y nitrógeno]: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy [Transacciones de la Institución de Minería y Metalurgia], Sección C, vol. 109, pp. C68-78.
- Johnson, C.A., D.J. Grimes, R.W. Leinz, G.N. Breit, y R.O. Rye, 2001. The critical importance of strong cyanocomplexes in the remediation and decommissioning of cyanidation heap leach operations [La importancia crítica de los fuertes cianocomplejos en la remediación y desmantelamiento de operaciones de lixiviación en pilas por cianuración]: En C. Young (Ed.), Cyanide—Social, Industrial and Economic Aspects [Cianuro—Aspectos Sociales, Industriales y Económicos] (pp. 35-49), The Minerals, Metals & Materials Society [La Sociedad de Minerales, Metales y Materiales], Warrendale, Pensilvania, 582 p.
- Johnson, C.A., R.W. Leinz, D.J. Grimes, y R.O. Rye, 2002. Photochemical changes in cyanide speciation in drainage from a precious metal ore heap [Cambios fotoquímicos en la especiación de cianuro en el drenaje de una pila de minerales de metales preciosos]: Environmental Science and Technology [Ciencia y Tecnología Ambiental], vol. 36, pp. 840-845.
- Johnson, C.A., D.J. Grimes, R.W. Leinz, y R.O. Rye, 2008. Cyanide speciation at four gold leach operations undergoing remediation [Especiación de cianuro en cuatro operaciones de lixiviación de oro en proceso de remediación]: Environmental Science and Technology [Ciencia y Tecnología Ambiental], vol. 42, pp. 1038-1044.
- Johnson, C.A., 2015. The fate of cyanide in leach wastes—An environmental perspective [El destino del cianuro en los desechos de lixiviación—Una perspectiva ambiental]: Applied Geochemistry [Geoquímica Aplicada], vol. 57, pp. 194-205.
- Junta Administradora de Agua Potable (JAAP) “Río Manduriacu Chico”, 2023. Acta de la Primera Asamblea Extraordinaria: García Moreno, 12 de noviembre de 2023, 3 p.
- Klohn Crippen Berger, 2017. Study of tailings management technologies [Estudio de tecnologías de gestión de relaves]: Informe a Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program [Programa de drenaje neutral del medio minero], Informe MEND 2.50.1, 164 p. Disponible en línea en: http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf
- Laboratorio Anncy, 2023. Informe de Ensayos No. 29576-01: Informe a Asociación de Propietarios de Tierras Rurales del Norte del EC, 5 de diciembre de 2023, 1 p.
- Laitos, J.G., 2012. The current status of cyanide regulations [El estado actual de las regulaciones sobre cianuro]: Engineering and Mining Journal [Revista de Ingeniería y Minería], febrero de 2012. Disponible en línea en: <https://www.e-mj.com/features/the-current-status-of-cyanide-regulations/>
- Laitos, J.G., 2013. Cyanide, mining, and the environment [Cianuro, minería y medio ambiente]: Pace Environmental Law Review [Revisión de la Ley Ambiental de Pace, vol. 30, pp. 869-949. Disponible en línea en: <https://digitalcommons.pace.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1728&context=pehr>
- MAATE (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica), 2023a. Asunto—Minería-DCA—Notificación a la concesión minera El Corazón (Cód. 401133), ubicada en la provincia de Imbabura: Memorándum a J.E. Cisneros (Gerente General, Agroindustrial El Corazón S.A.), Oficio Nro. MAATE-SCA-2023-4410-O, 8 de noviembre de 2023, 4 p.

- MAATE (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica), 2023b. Informe Técnico de la inspección de control y seguimiento a la concesión minera El Corazón Cód. (401133), ubicada en la provincia de Imbabura: Informe Técnico—MAATE-DCA-INF-2023-39998 de noviembre de 2023, 24 p.
- MAATE (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2024a. Asunto—Minería—Pronunciamiento a las observaciones del plan de acción y programa de remediación ambiental del evento ambiental ocurrido el 04 de noviembre de 2023, en la concesión minera El Corazón (Cód. 401133), provincia de Imbabura (Aprobado): Carta de N.F. Sarrade Gastelu (Subsecretaria de Calidad Ambiental) a J. Escobar Cisneros (Gerente General, Agroindustrial El Corazón S.A.), Oficio Nro. MAATE-SCA-2024-0935-O, 5 de abril de 2024, 3 p.
- MAATE (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica), 2024b. Análisis a las observaciones del componente biótico al estudio de la fauna acuática del plan de acción y programa de remediación ambiental en la concesión minera “El Corazón” Código 401133: Informe Técnico—MAATE-DCA-INF-2024-245, 1 de abril de 2024, 12 p.
- MEM (Ministerio de Energía y Minas), 2023. Informe Técnico de inspección técnica de control y seguimiento al incidente referente a la descarga de efluentes de la Relavera Nro. 15 en la Concesión Minera “El Corazón” Código 491133: Informe N°. ARCERNNR-CZI-FSV-2023-0136-ME, Coordinación Zonal de Imbabura, noviembre de 2023, 9 p.
- MERNNR (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables), 2020a. Acuerdo Nro. MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM, 27 p. Disponible en línea en: <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/07/MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM-Instructivo-aprobacion-proyectos-relaves-mineria-FIRMADO.pdf>
- MERNNR (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables), 2020b. Anexo II—Guía técnica para la presentación de proyectos de diseño de los depósitos de relaves, 25 p. Disponible en línea en: https://www.rekursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/08/ANEXO-II_GUIA-TECNICA-PROYECTOS-DE-DISE%C3%91O.pdf
- MERNNR (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables), 2020c. Anexo III—Términos de referencia para la presentación del informe semestral de los depósitos de relaves, 4 p. Disponible en línea en: https://www.rekursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/08/ANEXO-III_TDR-INFORMES-SEMESTRALES.pdf
- Ministerio del Ambiente, 2015a. Reforma Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, Libro VI, Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial Suplemento 2, 31/03/2003: Acuerdo Ministerial 97, Registro Oficial Edición Especial 387 de 04-nov.-2015, Estado—Vigente, 75 p. Disponible en línea en: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- Ministerio del Ambiente, 2015b. Acuerdo Ministerial 097-A mediante el cual se expiden los Anexos del Texto Unificado del Ministerio del Ambiente, 4 de noviembre de 2015, 184 p. Disponible en línea en: <https://www.gob.ec/regulaciones/2156/informacion>
- Ministry of Energy and Mines (British Columbia) [Ministerio de Energía y Minas (Columbia Británica)], 2016. Guidance document—Health, safety and reclamation code for mines in British Columbia, Version 1.0 [Documento de orientación: Código de salud, seguridad y recuperación para minas en Columbia Británica, Versión 1.0]: Victoria, Columbia Británica, actualizado en julio de 2016, 37 p. Disponible en línea en: <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/mineral->

- [exploration-mining/documents/health-and-safety/part_10_guidance_doc_10_20july_2016.pdf](https://earthworks.org/wp-content/uploads/2022/09/La-seguridad-ante-todo-2da-vers..pdf)
- Morrill, J., D. Chambers, S. Emerman, R. Harkinson, J. Kneen. U. Lapointe, A. Maest, B. Milanez, P. Personius, P. Sampat, y R. Turgeon, 2022. La seguridad ante todo—Lineamientos para el manejo responsable de relaves: Earthworks, MiningWatch Canada, y London Mining Network: Versión 2.0, mayo de 2022, 55 p. Disponible en línea en: <https://earthworks.org/wp-content/uploads/2022/09/La-seguridad-ante-todo-2da-vers..pdf>
- Mudd, G.M., 2010. The environmental sustainability of mining in Australia—Key mega-trends and looming constraints [La sostenibilidad ambiental de la minería en Australia—Megatendencias clave y limitaciones inminentes]: Resources Policy [Política de Recursos], vol. 35, pp. 98-115.
- Municipio de Cotacachi, 2023a. Atención a denuncia ciudadana sobre presunta contaminación por parte de la empresa minera El Corazón hacia la quebrada Los Monos y río Manduriaco Chico: Dirección de Ambiente, Informe Técnico Nro. 005-GADMSAC-DBTA-2023, 23 de noviembre de 2023, 26 p.
- Municipio de Cotacachi, 2023b. Informe de inspección al río Manduriaco Chico— Informe de visita in situ para verificar cambio de color repentino de las aguas del Río Manduriaco Chico: Elaborado por Ángel Paul Gualotuña Pastrano (Director de Desarrollo de la Zona Subtropical-Municipio de Cotacachi, 11 de junio de 2023, 6 p.
- Municipio de Cotacachi, 2024. Proceso Administrativo Sancionador Nro. GADMSAC-DA-002-2024: 19 de febrero de 2024, 40 p.
- Nassar, N.T., G.W. Lederer, J.L. Brainard, A.J. Padilla, y J.D. Lessard, 2022. Rock-to-metal ratio—A foundational metric for understanding mine wastes [Relación roca-metal—Una métrica fundamental para comprender los residuos de mina]: Environmental Science & Technology [Ciencia y Tecnología Ambiental], vol. 56, pp. 6710-6721. Disponible en línea en: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acs.est.1c07875>
- Nassar, N.T., G.W. Lederer, J.L. Brainard, A.J. Padilla, y J.D. Lessard, 2022b. Supporting information for Rock-to-metal ratio—A foundational metric for understanding mine wastes [Información de apoyo para Relación roca-metal—Una métrica fundamental para comprender los residuos de mina]: Environmental Science & Technology [Ciencia y Tecnología Ambiental], vol. 56, pp. 6710-6721. Disponible en línea en: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acs.est.1c07875>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration [Administración Nacional Oceánica y Atmosférica]), 2024. Climate Data Online [Datos Climáticos en Línea]: National Centers for Environmental Information [Centros Nacionales de Información Ambiental]. Disponible en línea en: <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/>
- Rivera-Parra, J.L., B. Beate, X. Diaz, y M.B. Ochoa, 2021. Artisanal and small gold mining and petroleum production as potential sources of heavy metal contamination in Ecuador—A call to action [La minería artesanal y en pequeña escala de oro y la producción de petróleo como fuentes potenciales de contaminación por metales pesados en el Ecuador—Un llamado a la acción]: International Journal of Environmental Research and Public Health [Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública], vol. 18, 15 p. Disponible en línea en: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/6/2794>
- Smith, A.C.S. y T.I. Mudder, 1999. Chapter 11—The environmental geochemistry of cyanide [Capítulo 11—La geoquímica ambiental del cianuro]: En Plumlee, G.S. y M.J. Logsdon (Eds.), The environmental geochemistry of mineral deposits—Part A—Processes,

- techniques, and health issues [La geoquímica ambiental de los depósitos minerales— Parte A—Procesos, técnicas y cuestiones de salud] (pp. 229-248), *Reviews in Economic Geology* [Revisiones en Geología Económica], vol. 6, Parte A, 571 p.
- University of Nebraska-Lincoln [Universidad de Nebraska-Lincoln], 2015. Water Requirements for Beef Cattle [Necesidades de Agua para los Bovinos para Carne]. Disponible en línea en: <https://beef.unl.edu/water-requirements-for-beef-cattle>
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers [Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos]), 2000. Design and construction of levees [Diseño y construcción de diques]: Manual No. 1110-2-1913, 164p. Disponible en línea en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1913.pdf
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.]), 2024. National Recommended Water Quality Criteria - Aquatic Life Criteria Table [Criterios Recomendados Nacionales de Calidad de Agua - Tabla de Criterios de Vida Acuática]. Disponible en línea en: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table>
- USGS (U.S. Geological Survey [Servicio Geológico de EE. UU.]), 2024. Search Earthquake Catalog [Buscar Catálogo de Terremotos]. Disponible en línea en: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Virginia's Legislative Information System [Sistema de Información Legislativa de Virginia], 2024. HB 85 Mineral mining and processing; use of cyanide or a cyanide compound prohibited [HB 85 Minería y procesamiento de minerales; se prohíbe el uso de cianuro o un compuesto de cianuro]. Disponible en línea en: <https://lis.virginia.gov/cgi-bin/legp604.exe?ses=241&typ=bil&val=Hb85>
- Wisconsin State Legislature [Legislatura del Estado de Wisconsin], 2001. 2001 Assembly Bill 95 [Proyecto de Ley 95 de la Asamblea de 2001]. Disponible en línea en: <https://docs.legis.wisconsin.gov/2001/related/proposals/ab95>
- World Gold Council [Consejo Mundial del Oro], 2019a. Responsible Gold Mining Principles [Principios de la Minería de Oro Responsable]: septiembre de 2019, 19 p. Disponible en línea en: <https://www.gold.org/industry-standards/responsible-gold-mining>
- World Gold Council [Consejo Mundial del Oro], 2019b. Guía para la implementación y aseguramiento de los RGMPs—Suplemento al Marco de Aseguramiento: septiembre de 2019, 36 p. Disponible en línea en: <https://www.gold.org/industry-standards/responsible-gold-mining>