Conservation Strategy Fund | Agosto, 2026

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO ECONÓMICO AL PROYECTO MINERO COBRE PANAMÁ

APLICACIÓN DEL

ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO

ECONÓMICO AL PROYECTO MINERO

COBRE PANAMÁ

Aplicación del Análisis de Costo-Beneficio Económico al Proyecto Minero Cobre Panamá

Agosto, 2026

Foto de portada y contraportada: José Carlos Anguizola.

Este documento fue elaborado por Conservation Strategy Fund.

Cita sugerida: Conservation Strategy Fund (2026). Aplicación del Análisis de Costo-Beneficio Económico al Proyecto Minero Cobre Panamá.

Capacitamos a las personas para construir economías que beneficien a la naturaleza. En colaboración con comunidades locales y socios globales, diseñamos las estrategias económicas necesarias para restaurar la biodiversidad, fortalecer la resiliencia climática y convertir la protección ambiental en un motor fundamental del crecimiento económico sostenible.

Bogotá · Brasilia · Durban · Jakarta · La Paz · Lima · Washington, D.C.

RESUMEN EJECUTIVO

La minería es una industria importante tanto para la economía global como para economías nacionales, al proveer materiales críticos. Sin embargo, cuando se negocia o gestiona de manera deficiente, y en sitios de alta fragilidad ecológica, los beneficios generados pueden no ser suficientes para compensar los costos ambientales y sociales, generando impactos negativos para la región o el país donde se desarrolla.

Antecedentes

El proyecto minero Cobre Panamá representa una de las mayores inversiones en la historia de Panamá, con aportes relevantes al PIB, empleo y generación de compras de bienes y servicios a empresas panameñas. Cobre Panamá es operado por la empresa concesionaria de la mina de cobre a cielo abierto, Minera Panamá, cuyos dueños son la empresa privada canadiense *First Quantum Minerals* (dueño de 90% de las acciones), y *Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation* (KOMIR), una corporación estatal de Corea del Sur (dueño del 10% restante de las acciones). No obstante, el proyecto ha estado marcado por controversias legales, conflictos sociales y violaciones a la legislación panameña, así como por los fallos de inconstitucionalidad del contrato-ley de concesión minera por parte de la Corte Suprema en 2017 y 2023, que resultó en el cierre de la mina desde finales de 2023. Pese a ello, el Gobierno de Panamá ha manifestado su intención de evaluar alternativas para una posible reactivación del proyecto.

Ante la complejidad de las decisiones que enfrenta Panamá en torno al proyecto, y dada la necesidad de información económica integral, rigurosa e independiente, *Conservation Strategy Fund*, referente global en el análisis económico de proyectos de gran envergadura, realizó un análisis costo-beneficio del proyecto minero Cobre Panamá, incluyendo aspectos ambientales y de salud humana, con el fin de contribuir con información rigurosa al debate público.

Resultados del estudio

Desde una perspectiva integral del país, los costos asociados al proyecto Cobre Panamá superan los beneficios económicos generados al horizonte de 2074. El balance agregado es negativo tanto bajo el escenario de cierre ordenado (−USD 23,107.36 millones) como bajo el escenario de falla catastrófica en presa de relaves (−USD 95,271.57 millones), y no refleja la distribución desigual de beneficios y costos entre actores.

La distribución de costos y beneficios resulta inequitativa: aunque tanto el Gobierno como la sociedad perciben ciertos beneficios económicos generados por el proyecto Cobre Panamá, la totalidad de los costos socioambientales que es asumida por la sociedad y por el capital natural del país es significativamente mayor. Esto genera una distribución desigual de los beneficios y las cargas entre Minera Panamá, el Gobierno y la población panameña. Además, el riesgo de una falla catastrófica de la presa de relaves recae íntegramente sobre la población panameña.

Figura A. Resumen de beneficios y costos totales según escenarios.

Ingresos y aportes económicos del proyecto Cobre Panamá (Beneficios brutos)

Entre 2019 y 2054[1], se proyecta que los beneficios acumulados de Minera Panamá ascenderían a USD 104,559.4 millones, que incluyen sus ingresos por ventas y USD 739.3 por concepto de subsidios (uso del agua y la ocupación del suelo terrestre y marino). Por otro lado, el Gobierno presenta beneficios por concepto de impuestos, regalías y otras contribuciones que ascienden a USD 13,670.8; mientras que la sociedad (la población panameña) recibiría beneficios brutos por USD 34,654.0 millones asociados a las compras locales y los empleos generados.

Costos para Panamá

El estudio estimó que, entre 2019 y 2074, los costos económicos en que incurre Minera Panamá ascienden a USD 75,477.6 millones (costos por ventas y pago de impuestos, regalías y otras contribuciones) y el Gobierno tendría costos de USD 739.3 millones, correspondientes a los subsidios establecidos a beneficio de Minera Panamá, para el uso del agua y la ocupación del suelo (terrestre y marino). Por su parte, los costos de la sociedad ascenderían a unos USD 86,843.2 millones, si no hay falla en la presa de relaves. Estos costos se desagregan en tres categorías principales:

- los costos de cierre y post-cierre del área minera (USD 13,672.94 millones), que incluyen el monitoreo y manejo de la presa de relaves, el tratamiento del drenaje ácido y de metales durante la etapa de post-cierre, así como las actividades de reforestación — todos descontados a la tasa diferenciada de 1.4% (Stern Review, 2006) por tratarse de pasivos sobre activos naturales irreemplazables;

[1] Se adopta el año 2074+ como horizonte temporal del análisis costo-beneficio, en concordancia con dos consideraciones principales. En primer lugar, la vida útil estimada del proyecto reportada en el informe técnico NI 43-101 de Cobre Panamá (*First Quantum Minerals*, 2025) el cual establece una vida de mina de 36 años, desde el inicio de las operaciones comerciales en 2019 hasta 2054. En consecuencia, el año 2054 se considera el límite para la estimación de los beneficios económicos asociados al proyecto. En segundo lugar, el periodo comprendido entre 2055 y 2074+ corresponde a las etapas de cierre y post-cierre de la mina, durante las cuales continúan generando costos y efectos ambiental y sociales relevante para la evaluación económica del proyecto.

- los impactos en la salud pública (USD 55,246.8 millones), principalmente asociados a la intoxicación por metales pesados y enfermedades respiratorias; y
- los impactos ambientales (USD 17,923.5 millones), derivados de la contaminación hídrica, la erosión del suelo, la sedimentación, la deforestación y la pérdida del servicio ecosistémico de secuestro de carbono.

En el escenario que haya una falla catastrófica en la presa de relaves, los costos totales aumentarían a USD 159,007.4 millones.

Balance neto para el País (Beneficios o pérdidas netas)

Considerando los beneficios y costos proyectados[2], se estimó un Valor Presente Neto (VPN) para ambos escenarios (con y sin falla catastrófica en presa de relaves), hasta el año 2074. En el escenario sin falla en la presa de relaves, el VPN se estima en −USD 23,107.36 millones (RBC - relación beneficio-costo = 0.9)[3], reflejando que los costos de cierre y post-cierre, los impactos ambientales y de salud del período, y los impactos a perpetuidad son suficientes para revertir el balance positivo acumulado durante la operación activa. En el escenario con falla catastrófica en presa de relave, el VPN se deteriora a −USD 95,271.57 millones (RBC = 0.6), lo que significa que un accidente de este tipo ampliaría drásticamente la pérdida neta del proyecto para Panamá. La diferencia entre ambos escenarios (USD 72,164.21 millones) recae íntegramente sobre la sociedad panameña.

Evaluaciones de sensibilidad y distribución

Los análisis de sensibilidad refuerzan las conclusiones: bajo distintos escenarios de tasa de descuento, precios del cobre y tasas de regalías, el balance social sigue siendo negativo en ambos escenarios y bajo todas las tasas analizadas —incluyendo la más alta del rango (12.21%)— lo que confirma el carácter estructural del déficit del proyecto para Panamá. Con el precio de referencia del cobre (USD 5.48/lb), las pérdidas netas de la sociedad alcanzan −USD 52,189.20 millones en el escenario sin falla y −USD 124,353.4 millones en el escenario con falla. Incluso al precio alto de USD 6.36/lb[4], la sociedad mantiene un déficit de −USD 45,963.1 millones sin falla

[2] Los beneficios y costos del Gobierno se muestran para identificar cómo se distribuyen los efectos entre los distintos actores. Sin embargo, cuando estos corresponden a transferencias entre la empresa y el Gobierno —por ejemplo, impuestos o subsidios— no se suman al resultado neto del país, porque lo que para un actor es un beneficio representa un costo para otro. Por esta razón, estas transferencias se tienen en cuenta para el análisis de cada actor, pero se excluyen del beneficio neto del país para evitar doble contabilización.

[3] Todos los beneficios y costos presentados en el análisis corresponden a valores presentes descontados utilizando una tasa de descuento real de 2.21%, correspondiente a la tasa libre de riesgo de referencia basada en bonos del Tesoro de Estados Unidos a largo plazo. Para los costos de reforestación y restauración, monitoreo y mantenimiento permanente de relaves —por tratarse de pasivos sobre activos naturales irreemplazables e irreversibles dentro del Corredor Biológico Mesoamericano— se aplica una tasa diferenciada de 1.4%, consistente con el Stern Review on the Economics of Climate Change (Stern, 2006), que establece esta tasa mediante la Regla de Ramsey con una tasa de preferencia temporal pura de 0.1% y una tasa de crecimiento per cápita de 1.3%. En consecuencia, el VPN equivale a la diferencia entre el valor presente de los beneficios y el valor presente de los costos, aplicando la tasa correspondiente a cada tipo de flujo.

[4] Precio en marzo 25 de 2026.

y −USD 118,127.4 millones con falla. Por su parte, aumentar las regalías del 2% al 10% incrementaría los ingresos estatales (de USD 12,931.5millones a USD 19,291.3 millones), pero el resultado para la sociedad seguiría siendo ampliamente negativo (−USD 49,148.3 millones sin falla, −USD 121,312.5 millones con falla) —una mejora de apenas el 5.8% y 2.4%, respectivamente. Ninguna tasa de regalías factible elimina este déficit en ninguno de los dos escenarios.

Respecto a la distribución de los beneficios netos acumulados a 2074, Minera Panamá obtiene USD 29,081.8 millones y el Gobierno USD 12,931.52 millones —idénticos en ambos escenarios. La sociedad —considerando las compras locales, los ingresos laborales y los impactos ambientales y de salud— registra un saldo neto negativo de −USD 52,189.2 millones en el escenario sin falla y de −USD 124,353.4 millones en el escenario con falla. En ambos casos, la sociedad panameña absorbe la totalidad de los costos socioambientales mientras que Minera Panamá y el Gobierno mantienen balances positivos e idénticos independientemente de si hay falla en la presa de relave o no.

Carácter conservador del estudio

Los resultados presentados corresponden a un escenario conservador en cuanto a la estimación de costos. Por una parte, no se incorporan todos los subsidios explícitos e implícitos considerados en el contrato de concesión. En el ámbito de la salud, las estimaciones se limitan a enfermedades con evidencia y parámetros disponibles y no se incluyen efectos asociados a la exposición prolongada a contaminantes y metales pesados. Tampoco se incluyeron valoraciones de todos los impactos ambientales, sino solo aquellos para los que fue posible obtener información.

Los beneficios se determinaron utilizando los estados financieros consolidados de First Quantum, y los reportes de informes de transparencia fiscal y contribuciones al Gobierno de First Quantum; utilizando la metodología del Consejo Nacional de la Empresa Privada (CoNEP) dispuesta en su “Estudio sobre las repercusiones socioeconómicas del cierre de operaciones de Cobre Panamá 2025”.

En este sentido, bajo el escenario de cierre ordenado, el VPN estimado es de −USD 23,107.36 millones al 2074, calculado utilizando beneficios de USD 139,213.42 millones y costos de USD 162,320.79 millones[5]. Este déficit podría profundizar si se consideran los aspectos que no fueron valorados, dado el enfoque conservador del estudio —y se intensifica significativamente bajo el escenario de falla catastrófica en presa de relaves, donde el VPN desciende a −USD 95,271.58 millones.

[5] Para estimar el balance total de beneficios netos, se consideran los beneficios y costos que afectan el bienestar del país (Minera Panamá + sociedad). Por esta razón, no se incluyen los beneficios netos percibidos por el Gobierno cuando estos corresponden a transferencias entre actores económicos, como impuestos, tasas, peajes, cánones, multas o regalías. Estos flujos no representan un beneficio adicional para la sociedad, sino una redistribución de recursos entre distintos agentes. Incluirlos simultáneamente como un costo para quienes realizan el pago y como un beneficio para el Gobierno implicaría contabilizar el mismo flujo dos veces, distorsionando el resultado del análisis.

Acerca de Conservation Strategy Fund

Conservation Strategy Fund es una organización sin fines de lucro que utiliza la economía para promover decisiones que beneficien tanto a las personas como a la naturaleza. Con 28 años de experiencia, desarrolla análisis económicos rigurosos para apoyar la formulación de políticas públicas, incluyendo una amplia experiencia en la valoración económica y cuantificación de los beneficios y costos asociados a proyectos de gran envergadura, como en Asia, Bolivia, Brasil, Colombia, Panamá, Perú y África.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS 12
1. **INTRODUCCIÓN** 14
2. **CONTEXTO DEL CASO DE ESTUDIO** 15
    2.1. Antecedentes 15
    2.2. Características técnicas y operativas principales 16
    2.3. Controversias ambientales 18
3. **METODOLOGÍA** 20
    3.1. Priorización de indicadores 21
    3.2. Valoración económica 22
        3.2.1. Impactos económicos 22
        3.2.2. Impactos ambientales 34
        3.2.3. Impactos en la salud 40
        3.2.4. Costos cierre y post-cierre del proyecto 85
4. **RESULTADOS** 90
    4.1. Flujo de caja 90
        4.1.1. Escenario sin falla de relaves 90
        4.1.2. Escenario con falla de relaves 91
    4.2. Indicadores de evaluación 93
    4.3. Análisis distributivo 95
    4.4. Análisis de sensibilidad 98
        4.4.1. Escenario sin falla de relaves 98
        4.4.2. Escenario con falla de relaves 101
5. **CONCLUSIONES** 104
6. **IMPLICACIONES DE POLÍTICA** 107
REFERENCIAS 108
ANEXOS 119

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen técnico del proyecto Cobre Panamá. 17
Cuadro 2. Indicadores priorizados para el ACB Cobre Panamá. 22
Cuadro 3. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-01. 22
Cuadro 4. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-02. 26
Cuadro 5. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-07. 27
Cuadro 6. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-05. 29
Cuadro 7. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-06. 32
Cuadro 8. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-08. 33
Cuadro 9. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-02a. 35
Cuadro 10. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-02b. 36
Cuadro 11. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-06. 38
Cuadro 12. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-03b. 39
Cuadro 13. Comparación de categorías de efectos en salud. 42
Cuadro 14. Parámetros y supuestos metodológicos: Hospitalizaciones respiratorias agudas. 45
Cuadro 15. Parámetros y supuestos metodológicos: Visitas a urgencias respiratorias. 46
Cuadro 16. Parámetros y supuestos metodológicos: Días de actividad restringida (RAD). 47
Cuadro 17. Parámetros y supuestos metodológicos: Crisis asmáticas. 48
Cuadro 18. Parámetros y supuestos metodológicos: Síntomas cardiovasculares agudos (arritmias / infarto agudo de miocardio). 49
Cuadro 19. Parámetros y supuestos metodológicos: EPOC crónica por $MP_{2.5}$. 50
Cuadro 20. Parámetros y supuestos metodológicos: Hospitalización cardiovascular crónica por $MP_{2.5}$. 52
Cuadro 21. Parámetros y supuestos metodológicos: Efectos neurológicos por plomo (Pb) en MP. 53
Cuadro 22. Parámetros y supuestos metodológicos: Cáncer de pulmón por arsénico (As) inhalado. 54
Cuadro 23. Parámetros y supuestos metodológicos: Hospitalización respiratoria crónica por $MP_{2.5}$. 55
Cuadro 24. Parámetros y supuestos metodológicos: Cambio en función pulmonar (FEV_1) por $MP_{2.5}$. 56
Cuadro 25. Estimación del Valor Estadístico de la Vida (VSL) para Panamá — Transferencia desde el valor de referencia OCDE (2025). 58
Cuadro 26. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad prematura por $PM_{2.5}$ — Todas las causas. 59
Cuadro 27. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad cardiovascular prematura por plomo (Pb). 60
Cuadro 28. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad por cáncer de pulmón — Arsénico (As) inhalado. 61
Cuadro 29. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad prematura por PM_{10}/TSP — Escenario alternativo. 62
Cuadro 30. Población expuesta por cuenca hidrográfica — Censo 2023. 65
Cuadro 31. Contaminantes identificados y su prioridad en el análisis de salud. 66
Cuadro 32. Parámetros y supuestos metodológicos: Arsénico (As) — Cáncer de vejiga y pulmón por ingestión de agua. 67
Cuadro 33. Parámetros y supuestos metodológicos: Plomo (Pb) — Daño neurológico en niños por ingestión de agua. 68

Cuadro 34. Parámetros y supuestos metodológicos: Manganeso (Mn) — Daño neurológico en niños por ingestión de agua. 69
Cuadro 35. Parámetros y supuestos metodológicos: Cadmio (Cd) — Enfermedad renal crónica por ingestión de agua. 70
Cuadro 36. Parámetros y supuestos metodológicos: Arsénico en peces (As). 73
Cuadro 37. Parámetros y supuestos metodológicos: Plomo en peces — Mortalidad cardiovascular en adultos (Pb). 74
Cuadro 38. Parámetros y supuestos metodológicos: Metilmercurio en peces (MeHg). 75
Cuadro 39. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad cardiovascular por plomo (Pb). Rutas 1 y 3 combinadas. 78
Cuadro 40. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad por cáncer de vejiga y pulmón — Arsénico (As). Rutas 1 y 3 combinadas. 79
Cuadro 41. Cuadro de priorización — Enfermedades vectoriales evaluadas. 81
Cuadro 42. Parámetros y supuestos metodológicos: Malaria. 82
Cuadro 43. Parámetros y supuestos metodológicos: Leishmaniasis cutánea. 83
Cuadro 44. Indicadores de evaluación del proyecto Cobre Panamá. Escenario sin falla de relaves. 93
Cuadro 45. Indicadores de evaluación del proyecto Cobre Panamá. Escenario con falla de relaves. 93
Cuadro 46. Distribución de beneficios y costos por actor (VPN - Millones USD 2025). 95
Cuadro 47. Distribución de beneficios y costos por actor. Escenario sin falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 96
Cuadro 48. Distribución de beneficios y costos por actor. Escenario con falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 97
Cuadro 49. Análisis de sensibilidad — Tasa de descuento. Escenario sin falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 98
Cuadro 50. Análisis de sensibilidad — Precio del cobre. Escenario sin falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 99
Cuadro 51. Análisis de sensibilidad — Tasa de regalías. Escenario sin falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 100
Cuadro 52. Análisis de sensibilidad — Tasa de descuento. Escenario con falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 101
Cuadro 53. Análisis de sensibilidad — Precio del cobre. Escenario con falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 102
Cuadro 54. Análisis de sensibilidad — Tasa de regalías. Escenario con falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 103

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del proyecto Cobre Panamá y evolución geográfica. 16
Figura 2. Flujo de caja anual. Escenario sin falla (2013-2074+). 91
Figura 3. Flujo de caja anual. Escenario con falla (2013-2074+). 92
Figura 4. Valor Presente Neto: 2013-2025 y 2013-2074+ (Millones USD 2025). 94
Figura 5. Relación Beneficio Costo: 2013-2025 y 2013-2074+ (Millones USD 2025). 94
Figura 6. Distribución de beneficios. Escenario sin falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 97
Figura 7. Distribución de beneficios. Escenario con falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025). 98
Figura 8. Priorización de indicadores ambientales y de salud. 123

TABLA DE ANEXOS

Anexo 1. Inventario de indicadores para priorización. 119
Anexo 2. Priorización de indicadores ambientales y de salud. 122
Anexo 3. Proyección de población por distrito, 2019-2074. 124
Anexo 4. Consolidado de Impactos en la salud por contaminación atmosférica 2019-2030 (continuación). 126
Anexo 5. Proyección de población expuesta a contaminación hídrica 2019-2074. 129
Anexo 6. Consolidado de intoxicación humana por contaminación hídrica 2019-2030 (continuación). 131
Anexo 7. Análisis costo beneficio proyecto Donoso (USD millones) 2013-2033 (continuación). 136

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ACB	Análisis Costo-Beneficio
AEI	Área de Exposición e Influencia
Ag	Plata
DAM	Drenaje Ácido de Mina (*Acid Mine Drainage* - AMD)
As	Arsénico
Au	Oro
B/.	Balboas
BAF	Factor de Bioacumulación (*Bioaccumulation Factor*)
BLL	Nivel de Plomo en la Sangre (*Blood Lead Level*)
Cd	Cadmio
CO_2	Dióxido de Carbono
CoNEP	Consejo Nacional de la Empresa Privada
CSF	Cancer Slope Factor
Cu	Cobre
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
EPOC	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
ERC	Enfermedad Renal Crónica
FEV_1	Volumen espiratorio forzado, en el primer segundo (*Forced Expiratory Volume*)
FQM	First Quantum Minerals Ltd.
Ha	Hectárea(s)
Hg	Mercurio
IAM	Infarto Agudo de Miocardio
IHD	Enfermedad Isquémica del Corazón (*Ischemic Heart Disease*)
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
KOMIR	Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation
LC	Leishmaniasis Cutánea
MeHg	Metilmercurio
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
MP	Material Particulado
MPSA	Minera Petaquilla S.A.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OMS	Organización Mundial de la Salud

PAF	Fracción Atribuible Poblacional (*Population Attributable Fraction*)
Pb	Plomo
PBN	Producción Bruta Negociable
PIB	Producto Interno Bruto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
RBC	Relación Beneficio-Costo
REDD+	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal
SDR	Relación de entrega de sedimentos (Sediment Delivery Ratio)
SIES	Sistema de Información de Estadísticas de Salud
MINSA	Ministerio de Salud
TIPS	*Treasury Inflation-Protected Securities*
TMB	Tasa Mortalidad Basal
TSF	*Tailings Storage Facility*
USD	Dólares de los Estados Unidos (*United States Dollar*)
VPN	Valor Presente Neto
VSL	Valor Estadístico de la Vida (*Value of a Statistical Life*)

_____

Nota del editor:

Para este análisis el precio del cobre utilizado es de USD 5.48/lb.

Asimismo, al revisar el documento tener en consideración los siguientes términos:

- Sociedad: corresponde a la población panameña en general, considerada como el conjunto de personas que pueden recibir beneficios del proyecto, por ejemplo, a través del empleo y las compras locales, pero que también pueden asumir costos asociados a sus impactos, como los relacionados con la salud, el ambiente u otros efectos del proyecto.
- País/Panamá/Proyecto: corresponde al conjunto conformado por Minera Panamá y la sociedad panameña. Este término se utilizará cuando se haga referencia a los efectos agregados del proyecto sobre ambos grupos.
- Sector privado / Empresa/Minera Panamá: corresponde específicamente a Minera Panamá, como empresa operadora del proyecto.
- Cobre Panamá: corresponde al proyecto minero Cobre Panamá, operado por Minera Panamá. Este término se utilizará para referirse al proyecto como tal y no a la empresa ni a sus propietarios.

1. INTRODUCCIÓN

La minería constituye una de las actividades económicas más relevantes a nivel global, desempeñando un papel fundamental en el desarrollo de los países, especialmente en aquellos con alta dotación de recursos naturales. Este sector no solo contribuye significativamente al crecimiento económico mediante la generación de ingresos fiscales y exportaciones, sino que también impulsa la creación de empleo directo e indirecto y garantiza el suministro de materias primas estratégicas esenciales para industrias clave como la construcción, la energía y la tecnología.

Sin embargo, pese a sus beneficios económicos, la minería presenta una problemática central relacionada con la divergencia entre el valor económico que genera y los costos reales que implica. Con frecuencia, los análisis tradicionales subestiman o excluyen los impactos ambientales y sociales asociados a esta actividad, tales como la degradación de ecosistemas, la contaminación de fuentes hídricas y los riesgos para la salud humana. Esta desconexión limita la comprensión integral de la verdadera rentabilidad de los proyectos mineros y puede conducir a decisiones que no reflejan el bienestar social en su conjunto.

En este contexto, el proyecto Cobre Panamá, ubicado en Donoso, Panamá, se presenta como un caso de estudio emblemático de minería a gran escala en América Latina. Se trata de una de las mayores inversiones mineras en la región centroamericana (Revista E&N, 2025), con impactos significativos tanto en términos económicos como ambientales y sociales. Su escala, complejidad y visibilidad lo convierten en un ejemplo representativo para analizar las tensiones entre desarrollo económico y sostenibilidad.

La evaluación integral de proyectos extractivos como el de Cobre Panamá requiere la aplicación de metodologías holísticas como el Análisis Costo-Beneficio (ACB). Este enfoque permite identificar, cuantificar y, en la medida de lo posible, monetizar los costos ocultos o externalidades que suelen quedar excluidos de los análisis financieros tradicionales. Al incorporar dimensiones ambientales, sociales y económicas, esta metodología resulta fundamental para orientar la toma de decisiones hacia criterios más informados, transparentes y coherentes con el desarrollo sostenible.

En este contexto, el objetivo general de este documento es presentar los resultados del ACB aplicado al caso de Cobre Panamá. Para ello, el documento se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se describe el contexto del caso de estudio, destacando las principales características del proyecto y su relevancia en el desarrollo de la minería metálica a gran escala. En segundo lugar, se presenta la metodología empleada, incluyendo el proceso de priorización de indicadores y los métodos de valoración económica utilizados para cuantificar en términos monetarios los principales impactos asociados a la actividad minera. En tercer lugar, se exponen los resultados del ACB, analizando los costos y beneficios generados por el proyecto desde una perspectiva social. Finalmente, se presentan las principales conclusiones del análisis y se discuten sus implicaciones para la toma de decisiones relacionadas con el futuro del proyecto y la evaluación de alternativas de política en materia de desarrollo minero.

2. CONTEXTO DEL CASO DE ESTUDIO

2.1. Antecedentes

El descubrimiento del yacimiento donde actualmente se desarrolla el proyecto Cobre Panamá (dentro del depósito denominado Petaquilla) se enmarca en el cuarto período de exploración mineral en Panamá (1956–1982), caracterizado por la ejecución de programas sistemáticos de exploración geoquímica regional impulsados por el Gobierno panameño, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y diversas empresas privadas. Estos esfuerzos permitieron identificar importantes yacimientos de pórfido de cobre en el país, entre ellos Cerro Colorado (1957) y Petaquilla (1968) (Redwood, 2021; UNDP, 1969).

El depósito de Petaquilla fue identificado en 1968, a partir de la detección de amplias anomalías geoquímicas de cobre y molibdeno —con valores superiores a 500 ppm de Cu y 12 ppm de Mo en zonas localizadas. Este hallazgo fue posteriormente confirmado mediante campañas adicionales de muestreo de suelos, estudios magnéticos y perforaciones exploratorias realizadas entre 1968 y 1969 (Redwood, 2021; UNDP, 1969).

Tras la confirmación del hallazgo, el Gobierno de Panamá (con apoyo técnico del PNUD y del Banco Mundial) promovió una serie de estudios regionales orientados a identificar el potencial minero del área y delimitar los principales cuerpos mineralizados de la región de Petaquilla. A inicios de la década de 1970 se desarrollaron mapeos geológicos detallados, levantamientos topográficos y evaluaciones preliminares de factibilidad que consolidaron el interés internacional en el yacimiento. Estos avances llevaron al Gobierno panameño a abrir un proceso de licitación pública con el propósito de atraer inversión extranjera y estructurar el proyecto bajo un esquema de asociación público-privada. Como resultado, el consorcio *japonés Panama Mineral Resources Development Co. Ltd.* (PMRD) asumió el desarrollo de la fase exploratoria avanzada y los estudios de prefactibilidad, hasta que el proyecto fue suspendido temporalmente en 1980 debido a la caída del precio internacional del cobre (Redwood, 2021; UNDP, 1969).

Tras un prolongado período de inactividad, el Gobierno panameño reactivó el interés en el yacimiento mediante la adjudicación de nuevos contratos de exploración y explotación, iniciando un segundo ciclo de desarrollo del proyecto, esta vez bajo el control de empresas nacionales. A partir de finales del siglo XX, el proyecto pasó por diversas manos y fases de exploración, evaluación y factibilidad (incluyendo a *Geo-Recursos Internacional*, *Minnova*, *Adrian*/*Petaquilla Minerals*, *Teck* e *Inmet*). Sin embargo, un hito clave fue la aprobación del Contrato de Concesión Minera a favor de Geo-Recursos Internacional (posteriormente *Minera Petaquilla, S.A.*) mediante la Ley 9 del 26 de febrero de 1997, promulgada por la Asamblea Nacional durante la presidencia de Ernesto Pérez Balladares (Praxis, 2023).

Geo-Recursos Internacional se transformó en *Minera Petaquilla, S.A.* (MPSA) con el fin de ejecutar el contrato de concesión otorgado en 1997. En ese momento, MPSA operaba como una empresa conjunta integrada por *Inmet Mining Corporation* (Canadá), *Teck-Cominco* (Canadá) y *Petaquilla Minerals Ltd.*, anteriormente conocida como *Adrian Minerals*. En 2005, el proyecto fue dividido en dos componentes: *Petaquilla Gold* y *Petaquilla Copper*. El primero permaneció bajo control de *Petaquilla Minerals Ltd.*, y más tarde fue transferido a *Petaquilla Gold, S.A.*; mientras que *Petaquilla Copper* continuó inicialmente dentro de la empresa conjunta, pero pasó a estar bajo control de *Teck* e *Inmet* en 2008 (Chandiramani, 2019).

Ese mismo año, *Inmet* adquirió la totalidad de *Petaquilla Copper*, consolidando así el control sobre el desarrollo del proyecto. Paralelamente, para evitar la caducidad de la concesión minera,

se reactivaron las actividades en la zona de *Petaquilla Gold*, donde los trabajos de construcción e inicio de explotación habían comenzado hacia 2005, marcando la transición del proyecto desde su fase exploratoria hacia el inicio de operaciones mineras a escala industrial (Chandiramani, 2019).

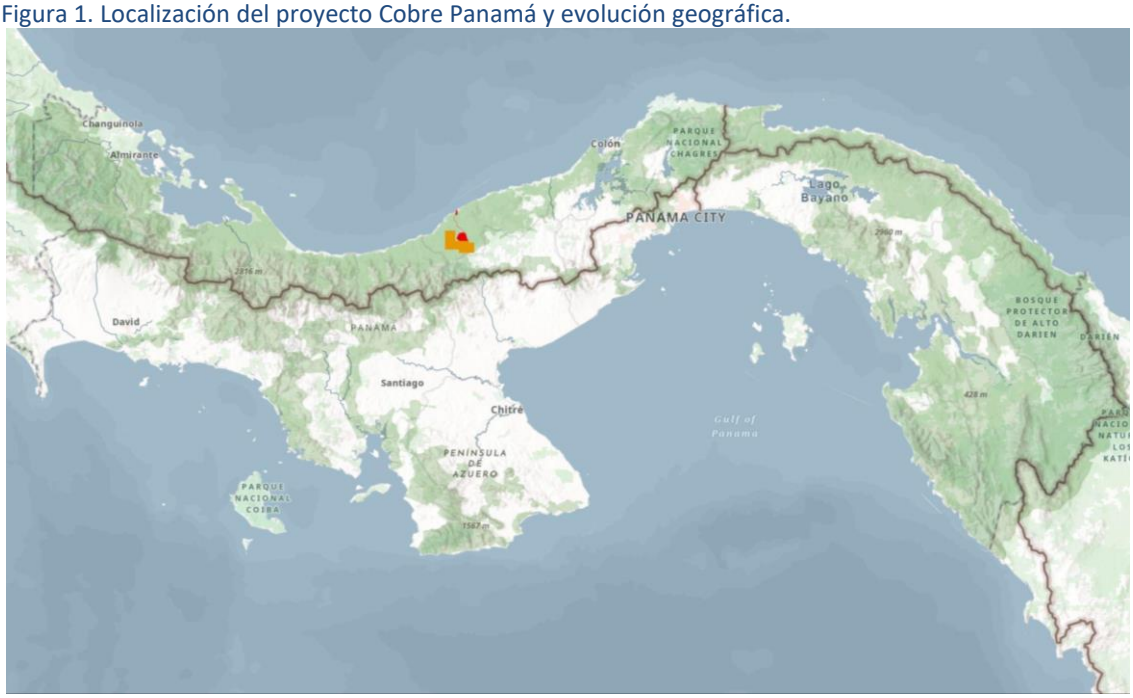
El desarrollo de la mina de cobre comenzó formalmente en 2011 bajo la dirección de *Inmet Mining*, que constituyó a *Minera Panamá, S.A.* (MPSA) como la empresa operadora del proyecto (Jordan, 2013). En 2013, *Inmet* fue adquirida por *First Quantum Minerals Ltd.* (FQM), compañía canadiense que asumió el control total de MPSA y la responsabilidad de culminar la construcción. Posteriormente, en 2016, la concesión minera fue extendida por 20 años, lo que permitió avanzar en la fase final de infraestructura, incluyendo la planta concentradora, el puerto de Punta Rincón, una central eléctrica de 300 MW y un oleoducto de 32 km para transportar el concentrado hasta el puerto.

En 2019, la mina Cobre Panamá inició oficialmente su producción comercial, consolidándose como una de las minas de cobre a cielo abierto más grandes del mundo y la más extensa de América Central. No obstante, el proyecto ha enfrentado importantes controversias legales, sociales y ambientales, especialmente tras la declaratoria de inconstitucionalidad del contrato de concesión en 2023, decisión que condujo a la suspensión de sus operaciones en 2024 por orden de la Corte Suprema de Justicia y del Gobierno de Panamá (Lorinc, 2024).

2.2. Características técnicas y operativas principales

El proyecto minero Cobre Panamá se encuentra ubicado en el Distrito de Donoso, provincia de Colón, Panamá, a aproximadamente 120 km al oeste de la Ciudad de Panamá y a unos 20 km de la costa Caribe (Lorinc, 2024) (Figura 1). El complejo y sus zonas asociadas abarcan los principales yacimientos de Botija, Colina (Petaquilla) y Valle Grande (Lorinc, 2024).

Figura 1. Localización del proyecto Cobre Panamá y evolución geográfica.



Consultar evolución en: https://www.youtube.com/watch?v=faFez8ZepFg&t=8s

Se trata de un depósito de pórfido Cu–Mo–Au–Ag, con mineralización principalmente de sulfuros y cuerpos asociados con mineralización aurífera secundaria. También se han

identificado minerales complementarios como oro, plata y molibdeno en diversas áreas del complejo (Redwood, 2021; Lorinc, 2024).

Las reservas reportadas ascienden a aproximadamente 3,100 millones de toneladas (probadas y probables), lo que lo posiciona como uno de los mayores yacimientos a cielo abierto desarrollados desde 2010 (Lorinc, 2024). La planta de procesamiento está diseñada para tratar 85 millones de toneladas de mineral por año, con planes para ampliar la capacidad en etapas posteriores. A plena capacidad, se estima una producción anual superior a 300,000 toneladas de cobre concentrado, junto con subproductos de oro, plata y molibdeno (Lorinc, 2024). La vida útil estimada del proyecto es de aproximadamente 36 años, según la planificación de reservas y tasas de procesamiento (Lorinc, 2024) (*Cuadro 1*).

Cuadro 1. Resumen técnico del proyecto Cobre Panamá.

Aspecto	Detalle (según el documento)
Ubicación	Distritos de Donoso y Omar Torrijos Herrera, provincia de Colón, Panamá; aproximadamente 120 km al oeste de Ciudad de Panamá. Centro del proyecto ubicado en las coordenadas 8°50'N, 80°38'O.
Extensión del proyecto	13,600 ha
Depósitos con Reserva Mineral	Botija, Colina & Medio, Valle Grande, Balboa y BABR (Botija Abajo/Brazo).
Tipo de depósito	Depósito tipo pórfido de cobre–oro–molibdeno (Cu-Au-Mo), con mineralización de sulfuros y plata como subproducto.
Reservas minerales (31 de diciembre de 2018)	3,147.1 Mt de reservas *in situ* (323 Mt probadas y 2,820 Mt probables) con una ley promedio de 0.38% Cu.
Capacidad de procesamiento	Incremento progresivo desde 47 Mtpa (2019) a 85 Mtpa (2021) y 100 Mtpa (2023), manteniendo esta capacidad hasta 2041. Posteriormente disminuye a 75 Mtpa entre 2042 y 2053.
Producción estimada	Producción anual de cobre de 310.0 kt durante los primeros cinco años; 377.0 kt durante los siguientes cinco años (a 100 Mtpa); y 275.1 kt/año en promedio durante el resto de la vida útil. Subproductos estimados: 2,717 t de molibdeno, 107,000 oz de oro y 1,701,000 oz de plata por año.
Vida útil estimada	36 años desde el inicio del procesamiento (2019–2054) y 39 años desde el inicio de la remoción de pre-estéril (2015).
Infraestructura energética	Central termoeléctrica a carbón de 300 MW ubicada en Punta Rincón, conectada mediante una línea de transmisión al complejo minero.
Planta de molienda y equipos principales	Dos líneas paralelas de procesamiento, cada una equipada con un molino SAG de 28 MW y dos molinos de bolas de 16.5 MW. Se contempla una tercera línea con un molino SAG adicional de 28 MW y un molino de bolas de 22 MW.
Inversión estimada	Capital total de desarrollo de USD 6

Fuente: elaboración propia a partir de Gray *et al*. (2019)

Para satisfacer las demandas energéticas del complejo, se construyó una central térmica de carbón de aproximadamente 300 MW en el puerto de Punta Rincón (Lorinc, 2024). La planta de molienda cuenta con tres molinos SAG de 28 MW cada uno y cuatro molinos de bolas de 16.5 MW, siendo de los más grandes instalados en minería a tajo abierto hasta 2020 (Lorinc, 2024).

La inversión acumulada del proyecto se ha estimado entre USD 6 y 10 mil millones, considerando diferentes etapas de desarrollo, construcción y operación (Lorinc, 2024).

Además de la mina y la planta de procesamiento, el complejo incluye infraestructura complementaria como puerto, planta eléctrica, instalaciones de manejo de relaves y proyectos logísticos (Lorinc, 2024). La operación alcanzó una producción anual de alrededor de 350,000 toneladas de cobre y generó más de 7,000 empleos directos e indirectos, convirtiéndose en un motor clave de exportación para Panamá (BE Global Infrastructure Magazine, s.f.; First Quantum Minerals, 2019).

Durante la construcción, en 2017 se registró un avance del 50%, y en 2018, la obra estaba completada en un 80% (BE Global Infrastructure Magazine, s.f.; First Quantum Minerals, 2019).

2.3. Controversias ambientales

El proyecto Cobre Panamá, operado por *Minera Panamá S.A.* bajo control de *First Quantum Minerals*, enfrenta cuestionamientos por su impacto ambiental en la región del distrito de Donoso, provincia de Colón. De acuerdo con El Clip (2025), los informes internos del Ministerio de Ambiente de Panamá documentaron en una década al menos 232 – 236 violaciones a obligaciones ambientales por parte de la empresa entre 2014 y 2024.

Las principales problemáticas documentadas por El Clip (2025) incluyen:

- Contaminación de ríos y cuerpos de agua: los informes de inspección recopilados por *El Clip* documentan la presencia de sedimentos, metales pesados y residuos peligrosos en áreas ambientalmente sensibles, así como alteraciones en el cauce de algunos ríos. También se reportan episodios de coloración turquesa del agua, alta turbidez y mortandad de peces en cuerpos de agua que abastecen a comunidades cercanas.
- Erosión, generación de sedimentos y estabilidad del terreno: el reportaje señala que el proyecto se ubica en una zona con precipitaciones superiores a 4,000 mm anuales, suelos predominantemente arcillosos y una topografía accidentada, condiciones que incrementan la susceptibilidad a procesos erosivos. Los informes de inspección citados identifican problemas asociados con escorrentía superficial, generación de sedimentos, modificación de quebradas y medidas insuficientes para el control de la erosión.
- Manejo de relaves y clasificación de consecuencia extrema: el proceso de beneficio del mineral genera grandes volúmenes de relaves que son almacenados en una instalación de manejo de relaves (*Tailings Storage Facility*, TSF). El reportaje cita un informe de *First Quantum Minerals* en el que esta instalación es clasificada con una categoría de "consecuencia extrema" (Extreme Consequence Classification) dentro del portafolio de la empresa. Esta clasificación se refiere a la magnitud de las posibles consecuencias en caso de una falla, pero no implica que la probabilidad de falla sea extrema.
- Deforestación y pérdida de biodiversidad: *El Clip* documenta hallazgos relacionados con la tala de áreas que excedían las autorizadas y con deficiencias en la implementación de programas de conservación y monitoreo de la biodiversidad establecidos como parte de los compromisos ambientales del proyecto, incluyendo observaciones sobre el cumplimiento de medidas de compensación y manejo forestal.
- Impactos sobre las comunidades cercanas: el reportaje recoge testimonios de habitantes de comunidades aledañas que afirman haber perdido la posibilidad de utilizar los ríos para actividades recreativas y de pesca debido al deterioro de la calidad del agua. Asimismo, se reporta que algunas escuelas almacenan agua embotellada para el consumo de los estudiantes, ante la desconfianza de la población sobre la potabilidad del agua disponible.
- Deficiencias en la gestión ambiental y cumplimiento de permisos: *El Clip* señala que informes de inspección del Ministerio de Ambiente identificaron diversas deficiencias

en la gestión ambiental del proyecto. Entre ellas, se destaca que en 2020 la empresa no contaba con el permiso de descarga de aguas correspondiente para un sistema de tuberías que vertía efluentes al ambiente, situación que, según las autoridades, debía regularizarse antes de autorizar dichas descargas.

En conjunto, estas evidencias describen un escenario de riesgo ambiental sistémico en el que la operación minera a gran escala se desarrolla en un corredor biológico de alta fragilidad ecológica (el Corredor Biológico Mesoamericano Atlántico Panameño), en un área montañosa de alta pendiente con aproximadamente 4.5 m de lluvia anuales, y en condiciones geológicas y climáticas que amplifican los daños potenciales.

La importancia de estos hallazgos radica en que, más allá de los impactos ambientales y sociales identificados, plantean desafíos para la gobernanza ambiental y la toma de decisiones sobre el futuro del proyecto. En este contexto, la evaluación de la continuidad de las operaciones requiere considerar de manera integral los costos y beneficios asociados, así como la eficacia de los mecanismos de supervisión, cumplimiento y mitigación ambiental y social establecidos por las autoridades competentes.

3. METODOLOGÍA

El ACB es un instrumento de evaluación económica que busca comparar, en términos monetarios y a lo largo de un horizonte temporal definido, la totalidad de los beneficios y costos generados por un proyecto o política pública sobre el conjunto de la sociedad —no únicamente sobre los agentes privados que lo ejecutan. A diferencia del análisis financiero convencional, el ACB empleado en este estudio incorpora efectos que los mercados no capturan espontáneamente: externalidades ambientales, impactos en la salud de terceros, pérdida de servicios ecosistémicos y costos de largo plazo que recaen sobre comunidades sin poder de negociación. Cada flujo —sea beneficio o costo— se expresa en términos de valor presente neto mediante una tasa de descuento social que refleja la preferencia social por el presente frente al futuro, y cuya elección tiene implicaciones distributivas entre generaciones.

El presente estudio aplica el ACB al proyecto Cobre Panamá identificando y monetizando cuatro categorías de impacto: económica, ambiental, de salud humana y de cierre y post-cierre. Los indicadores específicos de cada categoría traducen los impactos en magnitudes medibles y verificables, y su cuantificación monetaria se realiza mediante métodos estándar —precios de mercado, costos evitados, costos de reemplazo y transferencia de beneficios— siguiendo las prácticas recomendadas por los marcos señalados.

El ACB se desarrolló a precios constantes de 2025; por tanto, se empleó una tasa de descuento real para mantener la consistencia entre la valoración de los flujos de costos y beneficios y la tasa utilizada para descontarlos. El uso de una tasa real evita incorporar el efecto de la inflación, el cual ya ha sido eliminado de los flujos monetarios.

Como referencia para la tasa libre de riesgo de largo plazo, se utilizaron las *Daily Treasury Real Long-Term Rates* publicadas por el Departamento del Tesoro de los Estados Unidos, correspondientes al 4 de marzo de 2025. Estas tasas reflejan el rendimiento real de los bonos del Tesoro protegidos contra la inflación (*Treasury Inflation-Protected Securities*, TIPS) con vencimientos superiores a diez años. Con base en esta fuente, se adoptó una tasa real de descuento de 2.21% anual, correspondiente al rendimiento promedio de largo plazo observado para esa fecha.

El ejercicio presenta los flujos de costos y beneficios para un horizonte temporal de 62 años (2013–2074) complementado con el reporte de ingresos y costos a perpetuidad. En total, se pueden considerar tres bloques temporales que cubren el horizonte. Los primeros dos bloques (2013–2018 y 2019–2054) cubren el período de pre-construcción y construcción y operación activa de la mina, respectivamente. El tercer bloque cubre el período de cierre y post-cierre (2055–2074+[6]) bajo dos escenarios alternativos y mutuamente excluyentes: un escenario sin falla de la presa de relaves y un escenario con falla de la presa de relaves. Esta bifurcación responde a que el costo de cierre tiene dos componentes de naturaleza muy distinta —el cierre ordenado y planificado (extrapolación de la Mina Faro) y el riesgo contingente de un accidente catastrófico (extrapolación de Samarco/Fundão)— que no deben sumarse entre sí porque representan trayectorias alternativas del mismo evento de cierre, no costos acumulativos.

En el ACB se utilizan indicadores sintéticos —el Valor Presente Neto (VPN) y la relación Beneficio-Costo (B/C)— para evaluar la rentabilidad social del proyecto. Adicionalmente, incorpora un

[6] La notación 2074+ señala que el horizonte de evaluación no se cierra en 2074: el análisis incorpora, mediante su valor presente, los flujos que se extienden a perpetuidad, correspondientes a algunos costos que persisten indefinidamente.

análisis distributivo que desagrega los resultados por actor (empresa, Gobierno y sociedad), lo que permite identificar no solo si el proyecto genera valor social neto agregado, sino también quién captura los beneficios y quién asume los costos.

Asimismo, se presenta un análisis de sensibilidad de los resultados frente a cambios en parámetros clave, como el precio del cobre, las regalías y la tasa de descuento. Este análisis se realiza para distintos horizontes temporales (corto plazo: 2013- 2025 y largo plazo: 2013- 2075) y bajo diferentes escenarios de estos parámetros, con el fin de evaluar la robustez de las conclusiones del estudio.

3.1. Priorización de indicadores

Para el ACB se identificaron los impactos asociados a la mina Cobre Panamá, a partir de los cuales se definió un total de 60 indicadores viables para su medición (Anexo 1). Con base en este universo, el equipo realizó una priorización técnica basada en los siguientes criterios:

- Selección por nivel de prioridad: se consideraron únicamente los impactos clasificados como de prioridad máxima y alta. Estos presentan mayor magnitud, irreversibilidad y probabilidad de ocurrencia, lo que implica efectos más significativos sobre el bienestar humano y el costo social total. Su inclusión asegura que el análisis capture los cambios más relevantes para el bienestar y la sostenibilidad territorial.
- Evidencia verificable de afectación: se incorporaron aquellos impactos para los cuales existe evidencia verificable de afectación al bienestar humano. Esto incluye, por ejemplo, incrementos en las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} por encima de los umbrales recomendados, junto con la presencia de poblaciones expuestas en las áreas circundantes. Este criterio garantiza que la valoración económica se base en cambios reales y medibles en salud, medios de vida o calidad ambiental.
- Disponibilidad y calidad de la información: se priorizaron los impactos que contarán con información disponible a la fecha de realización de este análisis. Dado que algunos impactos requieren series temporales, datos epidemiológicos o registros ambientales de difícil acceso, la valoración se centró en aquellos con datos suficientes, consistentes y verificables, provenientes de informes compartidos, monitoreos ambientales, literatura técnica y registros institucionales.
- Metodologías de valoración disponibles: se incluyeron únicamente los impactos para los cuales existen metodologías probadas y estándares internacionales comparables. Aquellos con métodos consolidados —como costos evitados, costos de enfermedad, reposición de servicios ecosistémicos y transferencia de beneficios— fueron priorizados, con el fin de asegurar rigurosidad, replicabilidad y menor incertidumbre.
- Eliminación de doble contabilidad: se excluyeron los impactos que pudieran generar doble contabilidad, evitando así la sobreestimación de daños o beneficios. En particular, se descartaron aquellos que representan manifestaciones de un mismo fenómeno o que ya están incorporados indirectamente en otra categoría valorada.

Como resultado de este proceso, se obtuvo un conjunto final de 13 indicadores priorizados que se presentan en el Cuadro 2. Adicionalmente, en el Anexo 2 se amplía la información de la priorización de los indicadores ambientales y de salud.

Cuadro 2. Indicadores priorizados para el ACB Cobre Panamá.

Impacto	Código	Tipo	Prioridad	Indicador
Económico	ECO-01	Positivo	Máxima	Beneficio económico privado
	ECO-02	Positivo	Máxima	Regalías e impuestos efectivamente pagados
	ECO-07	Positivo	Máxima	Empleo directo e indirecto
	ECO-05	Positivo	Máxima	Subsidios implícitos del Gobierno
	ECO-06	Positivo	Alta	Contribución al PIB
	ECO-08	Positivo	Alta	Encadenamientos productivos locales
Ambiental	AMB-02a	Negativo	Máxima	Pérdida de *stock* de carbono
	AMB-02b	Negativo	Máxima	Reducción de secuestro de carbono
	AMB-06	Negativo	Máxima	Erosión y sedimentación acumulada
	AMB-03b	Negativo	Máxima	Contaminación hídrica por turbidez y sedimentos
Salud	SAL-01	Negativo	Máxima	Incidencia de enfermedades respiratorias asociadas a $PM_{2.5}$ y PM_{10}
	SAL-02	Negativo	Máxima	Niveles de As, Pb, Hg en agua, suelo y biomonitoreo
	SAL-04	Negativo	Alta	Incidencia y distribución espacial de dengue, malaria, etc.

3.2. Valoración económica

3.2.1. Impactos económicos

La estimación de los indicadores económicos asociados al proyecto Cobre Panamá se basa en la cuantificación de impactos que pueden observarse y valorarse directamente en el ámbito del mercado o mediante aproximaciones consistentes con precios económicos. En este sentido, se consideran indicadores como el beneficio económico privado, el beneficio fiscal (impuestos y subsidios), la contribución al Producto Interno Bruto (PIB), la generación de empleo y las compras locales.

ECO-01: BENEFICIO ECONÓMICO PRIVADO

Para la estimación del beneficio neto de la empresa se siguieron dos fases. La primera consistió en la estimación del beneficio operacional antes de impuestos obtenido por la empresa. Para ello, se aplicaron dos metodologías diferenciadas según el periodo de análisis: una basada en cifras reportadas (2013–2025) y otra basada en proyecciones (2026–2054). Un resumen de los parámetros y supuestos utilizados se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-01.

Variable	Valor/Fuente	Notas metodológicas
Beneficio operacional (2013–2025)	Estados Financieros Consolidados de First Quantum Minerals Ltd. (2015–2026)	Se utiliza el beneficio operacional antes de impuestos reportado por la empresa.

Variable	Valor/Fuente	Notas metodológicas
Depreciación (2013–2025)	Estados Financieros Consolidados de First Quantum Minerals Ltd.	La depreciación se adiciona nuevamente al beneficio operacional por tratarse de un gasto contable no monetario.
Precio del cobre (2026–2054)	USD 5,48/libra = USD 12,081.32/t (marzo de 2026)	Se mantiene constante durante todo el horizonte de proyección.
Producción proyectada	Gray *et al.* (2019); First Quantum Minerals Ltd. (2024)	Se re-escala el cronograma de extracción del informe técnico NI 43-101 utilizando las reservas remanentes reportadas en 2023.
Reservas base del cronograma	3,147.1 Mt	Reservas reportadas en el informe técnico NI 43-101 (2018).
Reservas remanentes	2,843.6 Mt	Reservas reportadas por First Quantum Minerals Ltd. para 2023 en https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2023-Presentation-FINAL.pdf
Costos directos	First Quantum Minerals Ltd. (2020, 2021, 2022, 2023, 2026)	El costo directo por tonelada se mantiene constante a partir del último dato disponible (2023).
Otros costos	First Quantum Minerals Ltd. (2020, 2021, 2022, 2023, 2026)	El costo por tonelada se mantiene constante a partir del último dato disponible (2023).
Depreciación proyectada	Promedio 2019–2023	Se utiliza el promedio aritmético de las depreciaciones reportadas y se mantiene constante durante 2026–2054.

Para el periodo 2013–2025 se tomaron las cifras de beneficio operacional e inversión reportadas en los *Consolidated Financial Statements* de *First Quantum Minerals Ltd.* correspondientes a los años 2013 a 2025 (First Quantum Minerals Ltd., 2015 a 2026).

A este valor reportado se le sumó nuevamente la depreciación del mismo año, debido a que la depreciación es un gasto contable no monetario (no representa una salida real de efectivo, sino la amortización contable de una inversión ya realizada en el pasado). Dado que el objetivo del análisis costo-beneficio es estimar el beneficio económico efectivo del proyecto —es decir, el flujo de caja generado—, y no la utilidad contable, se excluye la depreciación del resultado final. De esta forma, el indicador queda expresado, en esencia, como ingresos por ventas menos costos por ventas menos otros costos, sin descontar la depreciación.

A partir de 2026 el beneficio operacional se proyectó mediante la siguiente identidad contable:

$$Beneficio\ operacional\ =\ Ingresos\ -\ Costos\ -\ Otros\ costos\ -\ Depreciación$$

Al igual que en el periodo 2019–2025, una vez calculado el beneficio operacional proyectado, la depreciación se suma nuevamente al resultado, ya que constituye un gasto contable no monetario que no representa una salida real de efectivo. Esto deja al indicador final expresado como ingresos por ventas menos costos por ventas menos otros costos, consistente con un enfoque de beneficio económico (flujo de caja) y no de utilidad contable.

Cada uno de los componentes de la ecuación anterior se estimó como se expone a continuación, iniciando con los ingresos por ventas así:

$$Ingresos\ =\ Producción * Precio$$

Donde el precio corresponde al precio del cobre de marzo de 2026 (5.48 USD/libra, equivalente a 12,081.32 USD/tonelada), el cual se asume constante para toda la serie proyectada (2026–2054).

Por su parte, la producción anual proyectada (2026–2054) se construye reescalando el cronograma de extracción del informe técnico NI 43-101 de Cobre Panamá (Gray *et al.*, 2019) para que sea consistente con las reservas remanentes reportadas en 2023. La proyección de la producción utiliza los siguientes supuestos:

- Se asume que la secuencia relativa de extracción del plan minero reportado en el informe técnico NI 43-101 (qué proporción del total se extrae cada año, con qué ley y recuperación) sigue siendo válida, y que el único cambio frente a las reservas de 2023 es la magnitud total disponible, no el orden ni la velocidad relativa de extracción. En la práctica, una revisión de reservas suele venir acompañada de un re-diseño del plan minero (por ejemplo, priorizando primero las zonas de mayor ley), lo cual no está capturado aquí.
- El factor de ajuste se calibra comparando el cronograma planeado contra el desempeño reconstruido de 2019 a 2023.
- Se asume que la mina reanuda operación a capacidad plena desde 2026 sin periodo de arranque (*ramp-up*) ni nuevas interrupciones.
- La ley del mineral y la recuperación metalúrgica futuras se mantienen tal como fueron estimadas en el informe técnico de NI 43-101, sin incorporar actualizaciones geológicas o metalúrgicas más recientes (salvo el ajuste del volumen total de reservas).

La siguiente ecuación muestra la aproximación de cálculo usada:

$$Producción = 1.000 \times Reservas_{2023} * Factor\ de\ ajuste * Ley\ (\%\ Cu)\ *\%\ Recuperación * \left(\frac{Crusher\ Feed}{Reservas_2018}\right)$$

Donde, para cada año t de la proyección:

- Crusher Feed (Mt): tonelaje de mineral a procesar en el año t, según el cronograma de extracción del informe técnico NI 43-101 (Gray *et al*., 2019).
- Reservas_2018 (Mt): reservas totales reportadas en 2018 (3,147.1 Mt), base sobre la cual se construyó el cronograma original de extracción.
- Reservas_2023 (Mt): reservas remanentes reportadas en 2023 (2,843.8 Mt en First Quantum Minerals Ltd., 2024), que es el volumen real disponible a partir del cual se proyecta hacia adelante.
- Ley (% Cu) y % Recuperación: ley del mineral y eficiencia de recuperación metalúrgica del año t, tomadas directamente del cronograma del informe técnico NI 43-101 (Gray *et al*., 2019) (varían año a año según la secuencia geológica planeada).
- Factor de ajuste: constante que re-escala el cronograma original para que la extracción proyectada sea consistente con las reservas remanentes de 2023, y se calcula como:

$$Factor\ de\ ajuste\ = \frac{100}{Extracción\ proyectada\ acumulada\ de\ Crusher\ Feed\ (Mt)\ 2019-2023}$$

Se utilizan dos bases de reservas porque cumplen funciones distintas y complementarias dentro de la proyección, y no se cuenta con un cronograma de extracción actualizado posterior a 2018:

- Las reservas de 2018 se usan únicamente para construir la forma relativa del cronograma de extracción (es decir, qué fracción del total se extrae cada año, con qué ley y qué recuperación), tal como fue diseñado en el informe técnico NI 43-101. Esta es la única fuente disponible que define la secuencia año a año de la operación minera.
- Las reservas de 2023 se usan para fijar el volumen total real que queda por extraer, ya que es la cifra de reservas más reciente reportada por la empresa y refleja tanto lo ya extraído entre 2019 y 2023 como cualquier revisión geológica posterior a 2018.

En otras palabras, como no existe un cronograma de extracción oficial recalculado para las reservas de 2023, se reutiliza la forma del cronograma del informe técnico NI 43-101 (su perfil de leyes, recuperación y secuencia temporal) pero re-escalada en magnitud para que la suma total de lo extraído entre 2024 y el fin de la vida útil de la mina coincida exactamente con las reservas remanentes de 2023, en lugar de con las del informe técnico NI 43-101 (que ya están desactualizadas, pues no descuentan lo extraído ni la revisión de reservas hecha en 2023).

Esta calibración se validó verificando que la suma de la producción proyectada de *Crusher Feed* entre 2024 y 2054 sea igual a 2,843.6 Mt (las reservas de 2023), y que el horizonte de proyección (2026–2054) coincida con los 31 años de vida útil (desde 2014 hasta 2054) reportados junto con esa cifra de reservas.

Respecto a los costos por ventas, se calcularon así:

$$Costos\ por\ ventas\ =\ Producción\ \times\ Costo\ directo$$

El costo directo por tonelada se construyó a partir de los costos directos reportados por Cobre Panamá en los informes anuales y las presentaciones corporativas de resultados de *First Quantum Minerals Ltd.* correspondientes a los años 2019 a 2022, así como en su Annual Information Form más reciente (*First Quantum Minerals Ltd*., 2020, 2021, 2022, 2023, 2026). Dado que la información reportada de costos directos está disponible hasta 2023, dicho valor (en USD/tonelada) se mantiene constante para el periodo 2024–2054.

Por su parte, la estimación de los Otros costos se calculó así:

$$Costos\ por\ ventas\ =\ Producción\ \times\ Costo\ real$$

Al igual que con los costos directos, el costo real por tonelada se extrajo de los informes anuales y las presentaciones corporativas de resultados de *First Quantum Minerals Ltd*. correspondientes a los años 2019 a 2022, así como en su Annual Information Form más reciente (*First Quantum Minerals Ltd*., 2020, 2021, 2022, 2023, 2026). De igual forma, se mantiene constante a partir del último valor disponible (2023) para el resto del periodo proyectado.

Finalmente, la depreciación proyectada corresponde al promedio aritmético de las depreciaciones reportadas en los *Consolidated Financial Statements* entre 2019 y 2023, expresado en millones de dólares corrientes, y se mantiene constante para toda la serie de proyección (2026–2054).

En segunda instancia, y una vez obtenido el beneficio operacional antes de impuestos, se restaron los impuestos que se calcularon en el indicador ECO-02, que se explica a continuación.

ECO-02: REGALÍAS E IMPUESTOS EFECTIVAMENTE PAGADOS

Este indicador corresponde a la contribución total realizada por la empresa al Gobierno panameño a través de los diferentes tributos y pagos obligatorios derivados de sus operaciones. Los supuestos utilizados se resumen en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-02.

Variable	Valor/Fuente	Notas metodológicas
Impuestos, tasas, impuestos sobre nómina, impuestos al consumo/importación y pagos ESTMA (2019–2025)	First Quantum Minerals Ltd. (2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025). *Tax Transparency and Contributions to Government Report*	Se utilizan los valores efectivamente reportados por la empresa para cada año.
Impuestos, tasas, impuestos sobre nómina, impuestos al consumo/importación y pagos ESTMA (2026–2054)	Valor observado en 2023	Se mantienen constantes durante todo el horizonte de proyección por ausencia de información observada posterior.
Regalía minera	Ley 9 de 26 de febrero de 1997	La regalía se calcula como el 2% del valor de la Producción Bruta Negociable para minerales metálicos no preciosos (Clase II).
Ingresos por ventas	Estimación de ECO-01	Base utilizada para proyectar las regalías futuras.

Para este estudio, se estimó como la suma de los siguientes componentes tributarios:

$$Beneficio\ Fiscal_t = I_t + Regalı́a_t + Tasas_t + ESTMA_t + Imp_{No´mina,t} + Imp_{Consumo/Importacio´n,t}$$

Donde:

- I_t: Impuestos.
- $Regalı́a_t$: Regalías mineras.
- $Tasas_t$: Tasas.
- $ESTMA_t$: Otros pagos reportables conforme al Extractive Sector Transparency Measures Act (ESTMA).
- $Imp_{No´mina,t}$: Impuestos sobre la nómina.
- $mp_{Consumo/Importacio´n,t}$: Impuestos al consumo e importación.

Para el período 2019–2025, los valores de estas contribuciones se obtuvieron de los informes *Tax Transparency and Contributions to Government Report* publicados anualmente por *First Quantum Minerals (*First Quantum Minerals Ltd. 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025).

Para el período 2026–2054, debido a la ausencia de información observada, se asumió que todas las contribuciones fiscales, con excepción de las regalías, permanecen constantes en términos reales e iguales a los valores reportados para 2023. Este año se tomó como referencia por ser el último período en el que la mina operó bajo condiciones normales antes de la suspensión de sus actividades, constituyendo el escenario más representativo del comportamiento esperado de la operación.

A diferencia de los demás componentes fiscales, las regalías se proyectaron en función de los ingresos estimados por ventas de cobre. Para ello se aplicó la metodología establecida en el Contrato de Concesión Minera, aprobado mediante la Ley 9 de 26 de febrero de 1997, entre el Gobierno panameño y Minera Petaquilla, S.A. (Asamblea Legislativa de la República de Panamá. 1997).

De acuerdo con dicho contrato, las regalías se calculan sobre el valor monetario de la Producción Bruta Negociable (PBN). Dado que el cobre corresponde a un mineral metálico no precioso, se clasifica dentro de la Clase II, para la cual el contrato establece una regalía fija equivalente al 2% del valor de la PBN, independientemente del año de la concesión.

En consecuencia, las regalías anuales se estimaron mediante la siguiente expresión:

$$Regalía_t = Ingresos\ por\ ventas_t \times 0.02$$

donde:

- $Regalía_t$: corresponde al valor de las regalías en el año t.
- $Ingresos\ por\ ventas_t$: representa el valor proyectado de las ventas de cobre en el año t.
- 0.02: corresponde a la tasa de regalía del 2% establecida en el contrato de concesión.

ECO-07: EMPLEO DIRECTO E INDIRECTO

La contribución del proyecto a la generación de empleo se aproximó mediante el valor de las remuneraciones laborales. Para estimar este indicador a lo largo de todo el horizonte de análisis, se utilizó una aproximación basada en la producción de cobre, bajo el supuesto de que el nivel de empleo y, en consecuencia, las remuneraciones laborales, guardan una relación proporcional con el volumen de producción de la mina. Este supuesto permite proyectar la evolución de las remuneraciones en función de las variaciones esperadas en la actividad productiva, ante la ausencia de información detallada sobre empleo para todos los años del análisis. Otros supuestos son resumidos en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-07.

Variable	Valor/Fuente	Notas metodológicas
Remuneraciones directas 2023	First Quantum Minerals Ltd. (2024). *Tax Transparency and Contributions to Government Report*	Único año con información pública sobre remuneraciones laborales directas.
Producción de cobre	Estimación de ECO-01	Se utiliza como variable de escala para proyectar las remuneraciones.
Multiplicador salarial	1.87	CoNEP (2025), construido a partir del Cuadro de Oferta y Utilización del INEC (2017).
Costo laboral directo unitario	Calculado	Se obtiene dividiendo las remuneraciones directas de 2023 entre la producción estimada para ese año. Se mantiene constante durante todo el horizonte de análisis.

Variable	Valor/Fuente	Notas metodológicas
Costo laboral indirecto unitario	Calculado	Se obtiene dividiendo las remuneraciones indirectas estimadas para 2023 entre la producción de ese año. Se mantiene constante durante todo el horizonte de análisis.

En primer lugar, se calculó un costo laboral directo unitario para el año 2023, único año para el cual se dispone de información sobre remuneraciones directas en el *Tax Transparency and Contributions to Government Report* (2024). Posteriormente, se asumió que este costo permanece constante en términos reales durante todo el período de análisis.

$$CLD = \frac{RD_{2023}}{P_{2023}}$$

donde:

- CLD: es el costo laboral directo por unidad de producción;
- RD_{2023}: corresponde a las remuneraciones directas reportadas por la empresa para 2023;
- P_{2023}: es la producción de cobre estimada para ese mismo año de acuerdo con ECO-01.

Las remuneraciones directas de cada año se calcularon mediante:

$$RD_t = Producción_t \times CLD$$

donde $Producción_t$ corresponde a la producción anual estimada en el indicador ECO-01.

Las remuneraciones indirectas, por su parte, corresponden a los ingresos laborales generados en el resto de la economía como consecuencia de las compras locales hechas por la empresa. Dado el método de estimación utilizado para el indicador ECO-08 (compras locales) que se presenta más adelante, estas remuneraciones ya se encuentran incorporadas en el valor agregado capturado por dicho indicador. Por tanto, contabilizar las remuneraciones indirectas de manera separada implicaría una doble contabilización de los beneficios económicos asociados a las compras locales.

ECO-05: SUBSIDIOS IMPLÍCITOS DEL GOBIERNO

Con el fin de incorporar en el análisis las transferencias implícitas de recursos públicos hacia la operación minera del proyecto Cobre Panamá, se estimaron los subsidios económicos asociados al uso de factores productivos e infraestructura estratégica. En particular, se cuantificaron tres subsidios implícitos: (i) el asociado al uso del recurso hídrico, (ii) el relacionado con el uso de la tierra y (iii) el concerniente al uso de la infraestructura portuaria. Los supuestos de los cálculos se presentan en el Cuadro 6. Estas estimaciones buscan aproximar el valor económico de los beneficios derivados del acceso a estos recursos cuando su precio o contraprestación no refleja plenamente su costo de oportunidad.

Cuadro 6. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-05.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Intensidad de uso del agua	1.68 ML/t de cobre	Literatura técnica utilizada en el estudio	Se asume constante durante todo el horizonte de análisis.
Factor de conversión	1,000 m³/ML	Conversión física	Convierte megalitros a metros cúbicos.
Tarifa industrial del agua	USD 0,0033/m³	Tarifa industrial vigente	Se utiliza como aproximación conservadora al valor mínimo del recurso hídrico.
Área concesionada	13,600 ha	Contrato de concesión minera	Se mantiene constante durante el periodo analizado.
Canon anual de la concesión minera	USD 750,000/año	Contrato de concesión minera	Equivale aproximadamente a USD 0,5/ha-año.
Canon de referencia	USD 125/ha-año	Contrato ANAM–AES Changuinola	Se utiliza como aproximación al costo de oportunidad del uso de la tierra.
Área ocupada por el puerto	89,461 m²	Contrato de concesión portuaria	Corresponde a la suma de los dos polígonos autorizados.
Tarifa de mar rural	USD 0.96/m²-año	Tarifa oficial	Se utiliza para valorar el uso del fondo marino.
Canon fijo portuario	USD 22.2 millones/año	Contrato de concesión portuaria	Valor de referencia utilizado para estimar el subsidio implícito asociado al puerto.
Producción de cobre	Estimación de ECO-01	Elaboración propia	Variable utilizada para proyectar los subsidios dependientes de la actividad minera.

Estimación del subsidio implícito asociado al uso del agua

El subsidio implícito asociado al uso del agua se estimó como el valor económico del recurso hídrico utilizado por la operación de la mina, bajo el supuesto de que la empresa no realizó pagos por concepto de aprovechamiento del agua. En consecuencia, el subsidio corresponde al valor que habría debido pagarse si el volumen de agua utilizado hubiese sido remunerado al menos con la tarifa industrial vigente.

En primer lugar, se estimó el volumen anual de agua utilizado a partir de la producción de cobre y de la intensidad de uso del recurso hídrico:

$$UA_t = Producción_t \times I_{agua}$$

donde:

- UA_t: es el volumen de agua utilizado en el año t(ML);
- $Producción_t$: corresponde a la producción anual de cobre estimada en el indicador ECO-01;
- I_{agua}: es la intensidad de uso de agua (ML por tonelada de cobre producida), asumida constante durante todo el período de análisis.

El volumen obtenido se convirtió posteriormente a metros cúbicos, arrojando que el valor económico anual del agua se estimaría como:

$$S_t = UA_t \times 1{,}000 \times T$$

donde:

- $S_t$corresponde al subsidio implícito asociado al uso del agua en el año t;
- Tes la tarifa industrial del servicio de agua (USD/m³), utilizada como aproximación al valor mínimo del recurso.

Dado que la empresa no efectuó pagos por este concepto, el subsidio implícito es equivalente al valor económico estimado del agua utilizada.

Estimación del subsidio implícito asociado al uso de la tierra

El subsidio implícito asociado al uso de la tierra se estimó como la diferencia entre el canon anual establecido en el contrato de concesión minera y un valor de referencia por hectárea correspondiente al contrato suscrito entre ANAM y AES Changuinola (vLex, s.f.), utilizado como aproximación al costo de oportunidad del uso del suelo.

Durante el período analizado, la concesión minera comprende un área de 13,600 hectáreas. El contrato de concesión establece un canon anual equivalente a USD 750,000, lo que corresponde aproximadamente a:

$$C_{Contrato} = \frac{750,\ 000}{13\ ,600} = 0.5\ USD/ha - año$$

Como valor de referencia se utilizó el canon de USD 125 por hectárea por año establecido en el contrato ANAM–AES Changuinola. En consecuencia, el diferencial por hectárea se estimó como:

$$D = C_{Referencia} - C_{Contrato}$$

donde:

- D: es el diferencial del canon por hectárea;
- $C_{Referencia}$: corresponde al valor de referencia de USD 125/ha-año;
- $C_{Contrato}$: es el canon anual efectivamente establecido en el contrato de concesión minera.

Para el caso analizado:

$$D = 125 - 0.5 = 124.5\ USD/ha - año$$

El subsidio implícito anual asociado al uso de la tierra se estimó multiplicando este diferencial por el área concesionada:

$$S_t = A_t \times D$$

donde:

- S_t: es el subsidio implícito asociado al uso de la tierra en el año t;
- A_t: corresponde al área concesionada (ha);
- D: es el diferencial del canon por hectárea.

Para los años en los que el área concesionada corresponde a 13,600 ha, el subsidio anual asciende a:

$$S_t = 13,\ 600 \times 124.5 = 1\ ,693,\ 200\ USD/año$$

Estimación del subsidio implícito asociado al puerto

El subsidio implícito asociado al puerto se estimó considerando el valor económico de los derechos de uso de la infraestructura portuaria otorgados a la operación minera. Para ello se consideraron dos componentes: (i) el uso del fondo marino ocupado por las instalaciones portuarias y (ii) el canon fijo anual establecido en el contrato de concesión.

i) Subsidio implícito por uso del fondo marino

El valor económico del uso del fondo marino se estimó a partir del área ocupada por las instalaciones portuarias y de la tarifa oficial aplicable a áreas de mar rural.

El área ocupada por el proyecto se estimó mediante interpretación visual de imágenes satelitales disponibles en *Google Earth*. Para ello, se delimitó manualmente la huella observable de las áreas autorizadas utilizando las herramientas de medición de la plataforma, obteniendo una estimación de la superficie correspondiente a cada uno de los dos polígonos. El área total ocupada corresponde a la suma de los dos polígonos autorizados: $A_{Globo1} = 75,082\ m^2$ y $A_{Globo2} = 14,379\ m^2$. Por tanto, el área total ocupada corresponde a $89,461\ m^2$

El costo anual asociado al uso del fondo marino se estimó mediante:

$$UFM_t = A \times T_{mar}$$

donde:

- UFM_t: corresponde al valor anual del uso del fondo marino;
- A: es el área ocupada (m²);
- T_{mar}: corresponde a la tarifa anual para áreas de mar rural (USD 0,96/m²-año) (Asamblea Nacional de Panamá, 2017).

Para el área ocupada por el puerto:

$$UFM = 89,461 \times 0.96 = 85,883\ USD/año$$

ii) Subsidio implícito asociado al canon fijo

Adicionalmente, se consideró el canon fijo anual establecido en el contrato de concesión portuaria. El subsidio implícito anual asociado a este componente se estimó como:

$$SC_t = CF_t - Producción_t$$

donde:

- SC_t: corresponde al subsidio asociado al canon fijo;
- CF_t: es el canon anual establecido en el contrato;
- $Producción_t$: corresponde al pago efectivamente realizado al Gobierno.

De acuerdo con la información disponible, el canon fijo anual considerado en este estudio corresponde a USD 22.2 millones.

ECO-06: CONTRIBUCIÓN AL PIB

El aporte directo de la empresa por el proyecto Cobre Panamá al producto interno bruto (PIB) se estimó mediante una aproximación basada en el enfoque del ingreso, según el cual el valor agregado puede expresarse como la suma de la remuneración a los factores de producción, el excedente de explotación, el consumo de capital fijo y los impuestos netos sobre la producción.

La estimación se realizó mediante la siguiente expresión:

$$PIB_{Directo,t} = BO_t + Dep_t + ImpN_t + Sal_t$$

donde:

- BO_t: corresponde al beneficio operacional estimado en el indicador ECO-01;
- Dep_t: representa la depreciación o consumo de capital fijo, calculada en ECO-01;
- $ImpN_t$: corresponde a los impuestos y demás contribuciones fiscales estimados en ECO-02; menos los subsidios estimados en ECO-05.
- Sal_t: representa las remuneraciones directas al personal estimadas en ECO-07.

Los supuestos relacionados con el cálculo de este indicador se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-06.

Variable	Fuente	Notas metodológicas
Beneficio operacional	ECO-01	Corresponde al beneficio operacional antes de impuestos estimado para cada año.
Depreciación	ECO-01	Representa el consumo de capital fijo utilizado en la producción.
Impuestos y contribuciones fiscales	ECO-02 y ECO-05	Incluye impuestos, regalías, tasas y demás contribuciones fiscales pagadas al Gobierno; así como los subsidios recibidos por la empresa.
Remuneraciones directas	ECO-07	Corresponde a los salarios y prestaciones pagados directamente por la empresa a sus trabajadores.

Esta aproximación permite estimar el valor agregado generado directamente por la operación del proyecto Cobre Panamá y constituye la base para la estimación de los efectos indirectos siguiendo la metodología de CoNEP (2025).

ECO-08: COMPRAS LOCALES[7]

Los aportes indirectos de la empresa por cuenta del proyecto Cobre Panamá a la economía panameña se estimaron siguiendo la metodología propuesta por CoNEP (2025). Esta metodología parte del supuesto de que la actividad minera genera efectos indirectos sobre el resto de la economía mediante las compras de bienes y servicios realizadas a proveedores

[7] El análisis estima los efectos económicos directos e indirectos asociados al proyecto, incluyendo beneficios empresariales, compras de bienes y servicios, generación de empleo e ingresos fiscales. No incorpora efectos inducidos —como aquellos derivados del gasto de consumo de los hogares a partir de ingresos laborales generados por la actividad minera— debido a que su estimación requiere supuestos adicionales sobre patrones de consumo, propensión marginal al gasto y multiplicadores sectoriales, cuya incorporación excede el alcance metodológico del presente ejercicio.

nacionales (consumo intermedio) y las inversiones efectuadas por la empresa. Los supuestos para el desarrollo de este indicador se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Parámetros y supuestos metodológicos: ECO-08.

Variable	Fuente	Notas metodológicas
Compras locales	CoNEP (2025)	Corresponden a las adquisiciones de bienes y servicios realizadas por First Quantum Minerals a proveedores nacionales.
Inversión	CoNEP (2025); First Quantum Minerals Ltd.	Valores verificados con los Estados Financieros Consolidados de la empresa.
PIB del sector de minería metálica	INEC (2026)	Cuentas Nacionales para los años 2021–2023.
PIB directo	ECO-06	Valor agregado directo estimado para la operación minera.
Coeficiente de encadenamiento	Calculado	Promedio aritmético del período 2021–2023, aplicado a todo el horizonte de análisis.

En primer lugar, se estimó el coeficiente de encadenamiento asociado al consumo intermedio, el cual expresa la relación entre las compras locales efectuadas por la empresa y el PIB del sector de minería metálica:

$$CE_{CI,t} = \frac{CL_t}{PIB_{Mineri´a,t}}$$

donde:

- $CE_{CI,t}$: es el coeficiente de encadenamiento del consumo intermedio en el año t;
- CL_t: corresponde al valor de las compras locales realizadas por FQM en el año t;
- $PIB_{Mineri´a,t}$: es el Producto Interno Bruto del sector de minería metálica en el año t.

Las cifras de compras locales fueron obtenidas de CoNEP (2025), mientras que el PIB del sector minero proviene de las Cuentas Nacionales del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC, 2026) para los años 2021, 2022 y 2023, período para el cual se dispone de información completa y consistente.

Posteriormente, se estimó el coeficiente de encadenamiento asociado a la inversión:

$$CE_{Inv,t} = \frac{Inv_t}{PIB_{Mineri´a,t}}$$

donde:

- $CE_{Inv,t}$: es el coeficiente de encadenamiento de la inversión en el año t;
- Inv_t: corresponde a las inversiones realizadas por la empresa en el año t;
- $PIB_{Mineri´a,t}$: es el Producto Interno Bruto del sector de minería metálica.

Las cifras de inversión fueron obtenidas de CoNEP (2025) y verificadas con los *Consolidated Financial St*atements de *First Quantum Minerals Ltd.*

El coeficiente de encadenamiento total se estimó como la suma de ambos componentes:

$$CE_{Total,t} = CE_{CI,t} + CE_{Inv,t}$$

Posteriormente, se calculó el promedio aritmético de este coeficiente para el período 2021–2023. Este promedio se asumió constante y se aplicó a toda la serie analizada (2019–2054), bajo el supuesto de que la estructura de relaciones económicas de la actividad minera con el resto de la economía permanece relativamente estable durante el horizonte de análisis.

$$AI = \left(CE_{Total,t} * PIB_{Directo,t}\right) - PIB_{Directo,t}$$

Donde,

AI: es el aporte indirecto al PIB
$CE_{Total,t}$: es el coeficiente de encadenamiento
$PIB_{Directo,t}$: es el Producto Interno Bruto del sector de minería metálica en el año t calculado en ECO-08.

3.2.2. Impactos ambientales

La concesión del proyecto minero Cobre Panamá comprende aproximadamente 13,600 hectáreas. Dentro de esta superficie, se registró la deforestación de alrededor de 5,380 hectáreas de bosque para el inicio de operaciones en 2019. El área intervenida corresponde a un ecosistema de bosque tropical latifoliado siempre verde de tierras bajas del Caribe panameño, caracterizado por altas precipitaciones, elevada biomasa y una compleja estructura ecológica. Los estudios de línea base del proyecto identificaron la presencia de bosque primario intacto, bosque secundario maduro y bosque secundario perturbado dentro de la huella del proyecto (Minera Panamá, 2010). Estos ecosistemas, además de su extraordinaria biodiversidad, albergan altos niveles de carbono almacenado y prestan servicios ecosistémicos esenciales de regulación climática, hidrológica y edáfica.

La eliminación de esta cobertura forestal genera cuatro impactos ambientales finales que se valoran económicamente en este análisis: la pérdida del *stock* de carbono almacenado (AMB-02a), la reducción del flujo anual de secuestro de carbono (AMB-02b), el incremento de la erosión y sedimentación acumulada (AMB-06) y la contaminación hídrica por turbidez y sedimentos (AMB-03b). Adicionalmente, la deforestación genera una pérdida significativa de biodiversidad (AMB-05) que, si bien no se valora de forma independiente para evitar doble contabilización con los impactos finales ya seleccionados, representa una externalidad adicional que refuerza el carácter de cota inferior conservadora de los totales presentados.

AMB-02A: PÉRDIDA DE *STOCK* DE CARBONO

La deforestación libera a la atmósfera el carbono acumulado durante largos períodos ecológicos en la biomasa aérea, la biomasa subterránea y la materia orgánica del suelo. Este impacto constituye una emisión de golpe, irreversible en el corto y mediano plazo: aún bajo escenarios de restauración, los nuevos bosques no alcanzarán en décadas los niveles de almacenamiento de carbono característicos del bosque primario original.

Para la valoración se asume un escenario contrafactual en que el área intervenida hubiese podido incorporarse a un proyecto REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y

Degradación Forestal), evitando la pérdida del carbono almacenado. La densidad de carbono de referencia proviene de Mateo-Vega *et al*. (2019), quienes estudiaron mediante monitoreo participativo con comunidades Emberá y Wounaan los *stocks* de carbono de los bosques maduros del Darién, Panamá —el ecosistema tropical húmedo geográficamente más cercano y análogo al bosque de Donoso disponible en la literatura panameña. El estudio contextualiza que estudios previos con LiDAR (Asner *et al*., 2013) reportaron 277 Mg/ha de biomasa aérea (≈138 Mg C/ha) para los bosques del Darién, mientras que el inventario nacional de campo (Melgarejo *et al*., 2015) encontró ≈80 Mg C/ha (170 Mg/ha). El valor adoptado de 133 Mg C/ha corresponde al rango medio entre ambas estimaciones —se declara explícitamente como supuesto de transferibilidad geográfica desde el Darién hacia Donoso, dado que no existen inventarios de carbono específicos para la cuenca del río Caimito (Cuadro 9).

Cuadro 9. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-02a.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Área deforestada (A)	5,380 ha	Minera Panamá (2010) BirdLife International (2023)	Superficie intervenida para inicio de operaciones en 2019. Incluye bosque primario intacto, bosque secundario maduro y bosque secundario perturbado.
Stock de carbono (C)	133 Mg C/ha	Mateo-Vega *et al*. (2019) Conservation Science and Practice, 1, e42. STRI / McGill / NRC Canadá	Valor de referencia para bosques maduros del Darién panameño. Rango en la literatura: 80 Mg C/ha (Melgarejo *et al*., 2015) a 138 Mg C/ha (Asner *et al*., 2013). Se adopta el valor intermedio. Supuesto de transferibilidad Darién→Donoso declarado.
Factor estequiométrico	44/12 = 3.6667	Relación entre masas moleculares CO_2 (44 g/mol) y C (12 g/mol)	Convierte toneladas de carbono a toneladas de CO_2 equivalente.
Stock en tCO_2/ha	488 tCO_2/ha	Calculado: 133 × (44/12) = 487.67	Carbono almacenado expresado en CO_2 equivalente.
Precio REDD+ (PCO_2)	USD 6.02/tCO_2 (USD 2025)	Ecosystem Marketplace Forest Trends, 2024 Mercado voluntario de carbono	Precio medio de créditos REDD+ en el mercado voluntario de carbono para bosque tropical. Rango observado: USD 3–50/tCO_2. Se usa el valor conservador de referencia de mercado para bosque tropical. Nota: para AMB-02b se usa el precio sombra del carbono (SPC) porque ese impacto no es transaccionable en mercados REDD+ —se justifica en la sección correspondiente.

Fórmula general
$VCO_2 = A \times C \times (44/12) \times PCO_2$
Sustitución numérica:
$VCO_2 = 5{,}380\ ha \times 133\ Mg\ C/ha \times (44/12) \times 6.02\ USD/tCO_2$
Resultado: USD 15,794,352.93 — costo único de oportunidad ambiental en 2019

Nota de limitaciones y supuestos declarados
El valor de 133 Mg C/ha es una estimación de transferencia desde el Darién hacia Donoso —no existe un inventario de carbono de campo específico para las cuencas del Caimito y Botija. El precio REDD+ de USD 6.02/tCO_2 refleja el mercado voluntario de carbono de bosque tropical en 2024, que es volátil (rango USD 3–50). Este impacto (AMB-02a) se valora con el precio de mercado REDD+ porque representa el costo de oportunidad del carbono como activo transaccionable; AMB-02b se valora con el precio sombra del carbono (SPC) porque el flujo anual de secuestro perdido corresponde a una externalidad de bienestar social, no a un activo de mercado.

AMB-02B: REDUCCIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO

Además de la pérdida del *stock* de carbono (AMB-02a), la deforestación suprime la capacidad futura del ecosistema para capturar CO_2 atmosférico. Este es un impacto de flujo: mientras AMB-02a ocurre de golpe en el momento de la tala, AMB-02b se acumula año a año durante todo el horizonte de análisis (2019–2074). Ambos impactos miden dimensiones distintas del mismo evento —uno es un acervo perdido, el otro es un servicio suprimido— y su valoración conjunta no constituye doble contabilización, de la misma manera que el valor de un pozo de petróleo (*stock*) y el valor de su producción anual (flujo) son dos valoraciones legítimas y no redundantes.

La tasa de captura de referencia proviene de Phillips *et al*. (1998), quienes estimaron en parcelas permanentes de monitoreo de bosques amazónicos maduros un incremento neto de biomasa equivalente a 0.62 ± 0.37 t C/ha/año. Este valor se aplica como proxy para los bosques maduros de Donoso bajo el supuesto de que los bosques tropicales húmedos maduros del Caribe panameño presentan tasas de captura del mismo orden de magnitud que los bosques amazónicos estudiados por Phillips *et al*. Este supuesto de transferibilidad se declara explícitamente como limitación metodológica.

Para la monetización se utiliza el precio sombra del carbono (Shadow Price of Carbon, SPC) del Banco Mundial, que refleja el costo social de las emisiones de CO_2 —apropiado para valorar externalidades de bienestar vinculadas a cambio climático global— en contraste con el precio de mercado REDD+ usado en AMB-02a, que refleja el valor transaccional del carbono almacenado como activo. El Banco Mundial (2017) propone para 2026 un valor de USD 46/tCO_2e en dólares de 2017 bajo la trayectoria baja, actualizado a USD 59.11/tCO_2e en 2025 mediante el Índice de Precios al Consumidor (IPC) de Estados Unidos (Cuadro 10).

Cuadro 10. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-02b.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Área deforestada (A)	5,380 ha	Minera Panamá (2010) BirdLife International (2023)	Superficie intervenida para inicio de operaciones en 2019. Incluye bosque primario intacto, bosque secundario maduro y bosque secundario perturbado.
Tasa captura carbono (C)	0.62 t C/ha/año (IC 95%: ±0.37)	Phillips *et al*. (1998) Science, 282, 439–442 DOI: 10.1126/science.282.5388.439	Incremento neto de biomasa en parcelas permanentes de bosques amazónicos maduros. Supuesto de transferibilidad Amazonía→Donoso declarado. Se usa bosque maduro, no bosque secundario joven, porque el área intervenida incluía bosque primario y secundario maduro.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Factor estequiométrico	44/12 = 3.6667	Relación entre masas moleculares CO_2 (44 g/mol) y C (12 g/mol)	Convierte toneladas de carbono a toneladas de CO_2 equivalente. Se aplica una sola vez —se explica aquí y se referencia en AMB-02b sin repetir la derivación.
Flujo anual en tCO_2/año	12,231 tCO_2/año	Calculado: 5,380 × 0.62 × (44/12)	Captura anual de CO_2 perdida de forma permanente desde 2019.
Precio sombra carbono (SPC)	USD 59.11/tCO_2e (USD 2025)	Banco Mundial (2017) Shadow Price of Carbon Trayectoria baja para 2026: USD 46/tCO_2e (USD 2017) Actualizado CPI EE. UU. 2017→2025	Se usa el SPC —no el precio REDD+— porque este impacto corresponde a una externalidad de bienestar social (costo del cambio climático) y no a un activo transaccionable en mercados de carbono.
Por qué dos precios distintos para AMB-02a y AMB-02b	REDD+: USD 6.02 SPC: USD 59.11	Naturaleza del impacto	AMB-02a: carbono como activo de mercado (*stock* vendible en REDD+). AMB-02b: carbono como externalidad de bienestar (flujo suprimido valorado por su costo social). La diferencia de ≈10× refleja la brecha entre precio de mercado voluntario y precio sombra —metodológicamente correcta y documentada en la literatura de valoración ambiental.

Fórmula general
VSC = A × C × (44/12) × PCO_2
Sustitución numérica:
VSC = 5,380 ha × 0.62 t C/ha/año × (44/12) × 59.11 USD/tCO_2e
Resultado: USD 722,994.57/año — flujo anual permanente desde 2019

Nota de limitaciones y supuestos declarados
La tasa de captura de Phillips *et a*l. (1998) proviene de la Amazonía brasileña —su transferibilidad a Donoso es razonable (mismo tipo de bosque tropical maduro) pero no validada localmente. Esta tasa tiene un intervalo de confianza del 95% de ±0.37 t C/ha/año (rango: 0.25–0.99 t C/ha/año), lo que generaría, manteniendo el mismo precio social del carbono (USD 59.11/tCO_2e), un rango de USD 291,476/año (escenario bajo) a USD 1,154,019/año (escenario alto). Adicionalmente, el precio social del carbono utilizado (USD 59.11/tCO_2e) corresponde a la trayectoria baja del Banco Mundial; la trayectoria alta para 2026 (USD 128/tCO_2e) elevaría el resultado central a USD 1,565,568/año, manteniendo la tasa de captura central de 0.62 t C/ha/año. El valor reportado en este análisis (USD 722,974/año) combina los supuestos centrales de ambas variables y constituye, por tanto, una estimación conservadora frente a los escenarios altos de cualquiera de los dos parámetros. El impacto se acumula año a año y persiste mientras no exista restauración forestal efectiva del área deforestada.

AMB-06: EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN ACUMULADA

La remoción de la cobertura vegetal y la alteración del terreno incrementan significativamente la pérdida de suelo y el transporte de sedimentos hacia los sistemas hídricos. En ecosistemas tropicales húmedos, el bosque cumple una función protectora esencial: reduce la escorrentía

superficial, favorece la infiltración y disminuye la energía cinética del impacto de las lluvias sobre el suelo. Su eliminación aumenta drásticamente las tasas de erosión hídrica.

La cuantificación del impacto utiliza la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation), metodología ampliamente aceptada para la estimación de erosión hídrica (Wischmeier & Smith, 1978; Renard *et al*., 1997). Se comparan dos escenarios: el escenario base (bosque tropical conservado, sin intervención) y el escenario con proyecto (suelo expuesto por actividad minera) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-06.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Erosividad lluvia (R)	7,000 MJ·mm/ha·h·año	Renard *et al.* (1997) Panagos *et al*. (2017)	Rango reportado para zonas tropicales húmedas: 3,000–9,000. El valor adoptado corresponde al límite superior del rango para el Caribe panameño (~3,000–4,000 mm/año de precipitación). Se declara como escenario conservador alto.
Erodabilidad suelo (k)	0.04	Wischmeier & Smith (1978) FAO (2015)	Rango para suelos tropicales: 0.02–0.06. Valor promedio representativo de suelos tropicales húmedos con susceptibilidad moderada.
Factor topográfico (LS)	10	Moore & Burch (1986) Desmet & Govers (1996)	Rango para terrenos tropicales con pendientes moderadas a pronunciadas: 5–15+. Adoptado como valor representativo de relieve montañoso del Caribe panameño.
Cobertura vegetal (escenario base) (C_0)	0.001	Renard *et al.* (1997) Morgan (2005)	Bosque tropical húmedo conservado. Valor cercano a cero por alta capacidad protectora del dosel y sotobosque.
Cobertura vegetal (escenario con proyecto) (C_1)	1.0	Renard *et al*. (1997)	Máximo teórico: suelo completamente desnudo. Se declara como límite superior del escenario — en una operación activa con caminos, estructuras y áreas parcialmente revegetadas, el valor real sería 0.3–0.7. El valor C=1 proporciona una estimación de cota superior.
Prácticas de manejo (P)	1.0 (ambos escenarios)	Wischmeier & Smith (1978) FAO (2015)	Ausencia de evidencia de medidas de conservación de suelos en el área. Sin control de erosión.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Área deforestada (A)	5,380 ha	Minera Panamá (2010) BirdLife International (2023)	Superficie intervenida para inicio de operaciones en 2019. Incluye bosque primario intacto, bosque secundario maduro y bosque secundario perturbado.
Costo unitario erosión	USD 16.4/t (USD 2025)	Pimentel *et al.* (1995) Science, 267, 1117–1123 Actualizado IPC 1995→2025	Componentes: pérdida de nutrientes (USD 3/t) + pérdida de agua (USD 2/t) + impactos fuera del sitio (USD3/t) = USD 8/t (USD 1995). Factor IPC acumulado 1995→2025: ×2.05. Nota: la inflación acumulada real EE. UU. 1995–2025 es ≈115–120%, lo que daría USD 17.2–17.4/t —el valor de USD 16.4 es ligeramente conservador.

Fórmula general
Valor = ΔE_total × A × Costo_unitario
Valor = (R × K × LS × C_1 × P - R × K × LS × C_0 × P) × A × Costo_unitario
Sustitución numérica:
Valor = (7,000×0.04×10×1×1 - 7,000×0.04×10×0.001×1) × 5,380 ha × 16.4 USD/t
Resultado: USD 246,802,550/año — costo ambiental anual por erosión y sedimentación

Nota de limitaciones y supuestos declarados
El factor C=1 para el escenario con proyecto es el valor máximo teórico. En una operación minera activa existen áreas con caminos compactados, estructuras y vegetación parcial que reducirían el C real a 0.3–0.7, lo que disminuiría el diferencial en un 30–70%. La estimación actual es un límite superior conservador. El factor R=7,000 es también el extremo alto del rango tropical —valores de 4,000–5,000 serían más representativos del Caribe panameño. El costo de Pimentel *et al*. (1995) es para EE. UU. —los costos de tratamiento y sedimentación en Panamá pueden diferir. El impacto es anual y permanente mientras persistan las áreas sin revegetar.

AMB-03B: CONTAMINACIÓN HÍDRICA POR TURBIDEZ Y SEDIMENTOS

Una fracción de los sedimentos movilizados por erosión llega efectivamente a los cuerpos de agua —ríos, quebradas y zonas costeras— donde genera contaminación hídrica por turbidez, colmatación de cauces, degradación de hábitats acuáticos y aumento de los costos de tratamiento del agua para consumo humano. La valoración de este impacto complementa AMB-06 sin duplicarla: AMB-06 captura el costo de la erosión y pérdida de suelo en su totalidad, mientras que AMB-03b valora específicamente el subconjunto de sedimentos que alcanza los cuerpos hídricos y genera costos de remoción y manejo (Cuadro 12).

Cuadro 12. Parámetros y supuestos metodológicos: AMB-03b.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Erosión total (ΔE_total)	15,048,936 t/año	Calculado en AMB-06	Punto de partida. No se recalcula — se referencia AMB-06 directamente.
Sediment Delivery Ratio (SDR)	25% = 0.25	Wischmeier & Smith (1978) Pavani *et al.* (2020)	Fracción de la erosión total que efectivamente llega a los cuerpos de agua. Rango típico: 10–40% según características de la cuenca (pendiente, longitud del cauce,

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
			cobertura). Valor del 25% conservador y coherente con cuencas tropicales.
Sedimentos hacia cuerpos hídricos	3,762,234 t/año	15,048,936 × 0.25	Carga anual de sedimentos transportada a ríos Caimito y Botija.
Costo unitario remoción	USD 8.21/t (USD 2025)	Pavani *et al*. (2020) Actualizado IPC 2020→2025	Costos de dragado y remoción de sedimentos en América Latina. Pavani *et al*. (2020): USD 6.62/t (USD 2020). Factor IPC EE. UU. 2020→2025: ×1.241. Resultado: USD 8.21/t. Rango de mercado LAC: USD 2–50/t —el valor adoptado es conservador, situándose cerca del extremo inferior del rango observado.

Fórmula general
Valor = ΔE_total × SDR × Costo_unitario
Sustitución numérica:
Valor = 15,048,936 × 0.25 × 8.21 USD/t
Resultado: USD 30,887,941/año — costo anual por contaminación hídrica y sedimentación

Nota de limitaciones y supuestos declarados
La referencia de Pavani *et al*. (2020) debe completarse con revista específica para verificación —los costos de dragado varían ampliamente por geografía y tipo de sedimento. El SDR de 25% supone una conectividad hidrológica moderada entre las áreas erosionadas y los cauces; en cuencas con mayor pendiente o menor cobertura ribereña el SDR podría ser mayor (hasta 40%), incrementando el impacto. Este impacto no incluye los costos de contaminación por metales pesados adsorbidos en los sedimentos, que se valoran por separado en el impacto SAL-02. La suma de AMB-06 y AMB-03b no genera doble contabilización porque miden costos distintos sobre fracciones distintas del mismo flujo de sedimentos.

3.2.3. Impactos en la salud

Los impactos en la salud humana se estimaron diferenciando tres vías principales de afectación: i) contaminación atmosférica, asociada a la inhalación de material particulado fino ($MP_{2.5}$), gases y metales pesados presentes en el aire; ii) contaminación hídrica, asociada a la ingesta de agua superficial o consumo de peces contaminados con metales pesados; y iii) enfermedades transmitidas por vectores, asociadas a cambios ecológicos derivados de la deforestación, la creación de criaderos artificiales y la alteración de hábitats naturales. Esta diferenciación es necesaria porque cada vía de exposición requiere variables y metodologías de cálculo específicas: funciones de concentración–respuesta derivada de estudios de cohortes y series de tiempo para contaminantes atmosféricos, modelos de balance de masa, factores de bioacumulación e ingesta-dosis para contaminantes hídricos, y fracciones atribuibles poblacionales (PAF) basadas en razones de riesgo de deforestación para enfermedades transmitidas por vectores.

Dentro de cada vía de afectación, los efectos en salud se clasificaron adicionalmente según su mecanismo, temporalidad y reversibilidad biológica en tres categorías: efectos agudos y subagudos, que se manifiestan horas o días después de picos de exposición y son generalmente reversibles; efectos crónicos y acumulados, que resultan de la exposición sostenida durante

años y son en su mayoría irreversibles; y mortalidad prematura, que representa el desenlace terminal de los efectos crónicos y se monetiza mediante el Valor Estadístico de la Vida (VSL) ajustado a las condiciones de ingreso de Panamá. Esta clasificación tripartita —aplicada de forma consistente en las tres vías de afectación— refleja diferencias fundamentales en los marcos epidemiológicos disponibles para cada tipo de efecto: los efectos agudos se cuantifican mediante estudios de series de tiempo y diseños *case-crossover*, los efectos crónicos mediante cohortes longitudinales y, en el caso de contaminantes carcinogénicos como el arsénico, mediante el método del riesgo de vida del USEPA IRIS, mientras que la mortalidad utiliza tasas de mortalidad basal específicas por causa combinadas con coeficientes de riesgo derivados de cohortes de largo plazo.

Puesto que se estiman tanto los impactos observados al año 2025 (periodo 2019–2025) como los impactos potenciales bajo un escenario en el que la mina continúe operando hasta el agotamiento de las reservas de cobre (periodo 2019–2054), incluyendo además un periodo de veinte años destinado a actividades de cierre, restauración y recuperación ambiental (2054–2074), cada vía de afectación fue evaluada para dos horizontes temporales: 2019–2025 y 2019–2074.

Asimismo, dado que los efectos sobre la salud pueden manifestarse en distintos horizontes temporales dependiendo de la intensidad y duración de la exposición, las enfermedades asociadas a cada vía de afectación fueron clasificadas según su tiempo esperado de aparición —o latencia— en un espectro que va desde efectos inmediatos (manifestación el mismo día o dentro de los primeros días posteriores a la exposición, como las hospitalizaciones respiratorias agudas o los efectos neurológicos del plomo en niños) hasta efectos de mediano plazo (5 a 15 años, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica o la hospitalización cardiovascular crónica) y efectos de larga latencia (15 a 30 años, como el cáncer de pulmón por arsénico inhalado o ingerido). Esta clasificación permite asignar de manera más adecuada los impactos a cada horizonte de evaluación y evitar la sobreestimación o subestimación de enfermedades cuya manifestación requiere periodos prolongados de exposición.

En este contexto, el horizonte 2019–2025 permite cuantificar principalmente los efectos agudos y algunos efectos crónicos de manifestación temprana derivados de la exposición a contaminantes generados durante el periodo de operación observado de la mina. Por su parte, el horizonte 2019–2074 incorpora la exposición acumulada durante toda la vida útil proyectada de la operación minera y el periodo posterior de cierre y restauración, permitiendo estimar los impactos acumulativos y los efectos potenciales asociados a enfermedades de larga latencia —como el cáncer por arsénico, cuyos primeros casos no se manifiestan sino hasta 2034—, así como los riesgos residuales derivados de la persistencia de contaminantes en el ambiente, particularmente aquellos relacionados con el drenaje ácido de mina, los relaves mineros y la bioacumulación de metales pesados en la cadena alimentaria acuática.

Cabe destacar que, dentro de cada categoría de efecto y horizonte temporal, los distintos componentes cuantificados son metodológicamente independientes entre sí y no presentan doble contabilización: las categorías de morbilidad aguda, morbilidad crónica y mortalidad utilizan tasas basales y coeficientes de riesgo específicos y separados; las distintas rutas de exposición hídrica (ingestión directa de agua superficial y consumo de peces) se suman únicamente cuando afectan el mismo mecanismo biológico final, declarándose explícitamente en cada caso; y los escenarios alternativos —como la mortalidad por PM_{10} respecto a $PM_{2.5}$— se presentan de forma excluyente para evitar contabilizar las mismas partículas dos veces.

SAL-01: IMPACTOS EN LA SALUD POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La evaluación del impacto en salud de la operación del proyecto Cobre Panamá se estructura en torno a tres categorías analíticas diferenciadas, cada una correspondiente a un tipo de efecto sanitario distinto en cuanto a su mecanismo, temporalidad, reversibilidad y método de cuantificación económica. Esta distinción no es meramente clasificatoria: refleja diferencias fundamentales en la biología de la exposición a contaminantes atmosféricos y en los marcos epidemiológicos disponibles para estimarlos (Cuadro 13).

La primera categoría comprende los efectos agudos y subagudos, que se manifiestan horas o días después de picos de concentración diaria de material particulado fino ($MP_{2.5}$). Son efectos generalmente reversibles —hospitalizaciones, visitas a urgencias, crisis asmáticas— que se producen mientras dura la exposición y ceden con ella. Su cuantificación se basa en estudios de series de tiempo y diseños *case-crossover*, que establecen asociaciones entre variaciones diarias de contaminación y eventos de salud.

La segunda categoría corresponde a los efectos crónicos y acumulados, que resultan de la exposición sostenida durante años o décadas a concentraciones elevadas de contaminantes. A diferencia de los efectos agudos, estos daños son progresivos e irreversibles en su mayor parte —EPOC, deterioro cognitivo por plomo, cáncer de pulmón por arsénico— y presentan latencias que van desde la manifestación inmediata (efectos neurológicos en niños) hasta 30 años (cáncer por arsénico). Se cuantifican mediante cohortes longitudinales y, en el caso del arsénico, mediante el método de riesgo de vida del USEPA IRIS.

La tercera categoría es la mortalidad prematura, que representa el desenlace terminal de los efectos crónicos acumulados: el fallecimiento anticipado de personas que, en ausencia de la exposición, habrían vivido más años. Es la categoría de mayor peso económico, dado que se monetiza mediante el Valor Estadístico de la Vida (VSL), ajustado a las condiciones de ingreso de Panamá según la metodología de la OCDE (2025). Aunque el número de muertes adicionales estimadas puede parecer relativamente pequeño en términos absolutos, su valoración económica supera en varios órdenes de magnitud la suma de todos los efectos de morbilidad.

Es importante destacar que las tres categorías son metodológicamente independientes y no deben sumarse sin precaución: los efectos crónicos son precursores de la mortalidad, por lo que existe una relación causal entre ambas categorías, pero no un doble conteo mientras se utilicen tasas de incidencia de morbilidad (no de mortalidad) en los efectos crónicos y tasas de mortalidad basal separadas en la categoría de mortalidad. Asimismo, la mortalidad por PM_{10}/TSP se presenta como escenario alternativo y no se suma al total principal, dado que PM_{10} incluye $PM_{2.5}$ y su suma implicaría contabilizar las mismas partículas dos veces.

Cuadro 13. Comparación de categorías de efectos en salud.

Característica	Efectos agudos y subagudos	Efectos crónicos y acumulados	Mortalidad prematura
Definición	Respuestas clínicas inmediatas a picos de concentración diaria de $MP_{2.5}$. El daño es reversible y cesa al reducirse la exposición.	Daño progresivo e irreversible derivado de años de exposición sostenida a contaminantes. Se manifiesta con latencia de 5 a 30 años.	Fallecimiento anticipado atribuible a la exposición crónica acumulada. Es la consecuencia terminal de los efectos crónicos.

Característica	Efectos agudos y subagudos	Efectos crónicos y acumulados	Mortalidad prematura
Efectos incluidos	• Hospitalizaciones respiratorias agudas • Visitas a urgencias • Días de actividad restringida (RAD) • Crisis asmáticas • Síntomas cardiovasculares agudos	• EPOC crónica por $MP_{2.5}$ • Hospitalización cardiovascular crónica • Hospitalización respiratoria crónica • Cambio en función pulmonar (FEV_1) • Efectos neurológicos por plomo (Pb) • Cáncer de pulmón por arsénico (As)	• Mortalidad all-cause por $PM_{2.5}$ • Mortalidad cardiovascular por $PM_{2.5}$ • Mortalidad respiratoria por $PM_{2.5}$ • Mortalidad cardiovascular por plomo (Pb) • Mortalidad por cáncer de pulmón — As inhalado • Mortalidad all-cause por PM_{10}/TSP (escenario alternativo)
Contaminantes	$MP_{2.5}$ (partícula fina)	$MP_{2.5}$ · Plomo (Pb) · Arsénico (As)	$MP_{2.5}$ · Plomo (Pb) · Arsénico (As) · MP_{10}/TSP
Período de evaluación	2019–2058 (operación activa). Los efectos cesan al cesar la exposición.	2019–2074 con latencias variables. Los efectos persisten décadas después del cierre.	2024–2074 con latencias de 5 a 30 años según el contaminante.
Latencia	Ninguna — efecto inmediato el mismo día o dentro de los 3 días posteriores al pico de exposición.	Variable: 5–7 años (hosp. respiratoria), 10–15 años (EPOC), inmediata (Pb neurológico), 15–30 años (cáncer As).	5 años ($PM_{2.5}$), 10 años (Pb cardiovascular), 15 años (As cáncer pulmón).
Reversibilidad	Parcial o total. La recuperación ocurre al reducirse la concentración de MP.	Irreversible en su mayor parte. La EPOC, el daño cognitivo por Pb y el cáncer no se revierten.	Irreversible. La muerte prematura representa años de vida perdidos de forma permanente.

Fuentes de referencia metodológica: WHO (2021). Air quality guidelines: global update 2021. · USEPA (2023). Guidelines for Preparing Economic Analyses. · OCDE (2025). Mortality Risk Valuation in Policy Assessment. GBD 2019 Collaborators. The Lancet, 396(10258).

Población expuesta

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) y la U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 2019) señalan que las partículas finas ($MP_{2.5}$ y MP_{10}) pueden permanecer suspendidas en la atmósfera durante períodos prolongados y ser transportadas a decenas de kilómetros de la fuente de emisión, dependiendo de factores como la velocidad y dirección del viento, la estabilidad atmosférica, la precipitación y las características topográficas del área. Asimismo, estudios realizados en zonas mineras y metalúrgicas han documentado que los metales pesados adsorbidos al material particulado pueden ser transportados y depositados a distancias significativas desde las fuentes de emisión, generando potenciales impactos sobre poblaciones ubicadas a varias decenas de kilómetros de distancia (Moreno *et al*., 2007; Csavina *et al*., 2012). En particular, se ha observado que la dispersión y deposición de partículas contaminadas puede extenderse más allá de los 20 km y, bajo determinadas condiciones meteorológicas y topográficas, alcanzar distancias aún mayores.

Considerando las condiciones climáticas predominantes en el área de estudio, la ubicación de los centros poblados circundantes y el potencial de dispersión de partículas y metales atmosféricos, se considera que la población residente en los distritos de Omar Torrijos, Donoso y La Pintada constituye la población potencialmente expuesta a los impactos de la contaminación atmosférica generada por la actividad minera.

Con el propósito de estimar la población potencialmente expuesta a los impactos de la contaminación atmosférica durante el periodo de análisis, se proyectó la población de los distritos de La Pintada, Donoso y Omar Torrijos para los años 2019–2074. Para ello, se utilizaron los datos oficiales de población correspondientes a los años 2010 y 2023, a partir de los cuales se calculó la tasa de crecimiento anual promedio para cada distrito mediante el método de crecimiento compuesto. Posteriormente, dichas tasas fueron empleadas para estimar retrospectivamente la población de los años 2019–2022 y proyectar la población de los años 2024 en adelante.

Los resultados muestran que la población total de los tres distritos pasó de aproximadamente 43,912 habitantes en 2019 a 45,533 habitantes en 2023, y se proyecta que alcance 84,881 habitantes en 2074. Este crecimiento está impulsado principalmente por el incremento poblacional del distrito de Omar Torrijos —cuya tasa de crecimiento anual es la más alta de los tres— y de La Pintada, mientras que Donoso presenta una ligera reducción de población durante el periodo analizado. Las estimaciones obtenidas constituyen la base para determinar la población expuesta utilizada en el cálculo de los impactos en salud asociados a la contaminación atmosférica generada por la actividad minera. Los resultados se muestran en el Anexo 3.

Efectos agudos y subagudos

Los cinco efectos agudos y subagudos se cuantifican mediante la fórmula estándar de series de tiempo: $\Delta\text{Eventos} = \text{Inc}_0 \times \text{Pop} \times \beta \times \Delta C \times 365$, donde Inc_0 es la tasa basal diaria de eventos por persona, Pop es la población expuesta del año correspondiente, β es el coeficiente exposición-respuesta derivado de estudios epidemiológicos, ΔC es el incremento de concentración de $MP_{2.5}$ expresado en µg/m³, y 365 convierte el resultado diario a anual. El costo anual se obtiene multiplicando los eventos adicionales por el costo unitario de atención.

Hospitalizaciones respiratorias agudas

Las hospitalizaciones respiratorias agudas constituyen el evento de mayor severidad clínica dentro de los efectos de corto plazo. Corresponden a ingresos hospitalarios motivados por exacerbaciones respiratorias agudas —incluyendo neumonía, bronquitis aguda, y descompensación de EPOC preexistente— directamente precipitadas por la exposición a picos elevados de $MP_{2.5}$. La evidencia epidemiológica establece que por cada incremento de 10 µg/m³ en la concentración diaria de $MP_{2.5}$, la tasa de hospitalización respiratoria aumenta en un 5.6% (Dominici *et al*., 2006), efecto estimado a partir de una cohorte de seguimiento de la población Medicare de Estados Unidos con más de 11 millones de personas.

Para el contexto de Cobre Panamá, la concentración de operación se estima a partir del percentil 95 de las concentraciones diarias medidas en comunidades sotavento de la mina de carbón a cielo abierto de Cerrejón, Colombia —el análogo más cercano disponible en la literatura para una mina tropical latinoamericana—, reportado por Rojano *et al*. (2015). El diferencial de concentración (ΔC) respecto a la línea base rural tropical se establece en 33 µg/m³. El costo unitario por hospitalización se deriva del estudio multicéntrico de Castaño-Vergara *et al*. (2022) sobre el costo económico de infecciones respiratorias agudas graves en Colombia, actualizado a USD 2025 mediante el Índice de Precios al Consumidor (Cuadro 14).

Cuadro 14. Parámetros y supuestos metodológicos: Hospitalizaciones respiratorias agudas.

Variable	Valor	Fuente	Notas
Inc_0 (diaria)	2.74×10^{-5} eventos/ persona/día	GBD 2019 — LAC Estimado	Derivado de la tasa anual de hospitalización respiratoria aguda en adultos ≥40 años en América Latina y el Caribe: ~10 por 1,000 personas/año, dividida entre 365 días. Panamá no cuenta con registros nacionales de hospitalización por causa desagregados —se usa la estimación regional GBD como proxy.
β agudo resp.	0.0056 por µg/m³ [β = ln(1.056)/10]	Dominici *et al*., 2006	RR = 5.6% por 10 µg/m³ de $PM_{2.5}$ para hospitalización por todas las causas respiratorias, derivado de series de tiempo en cohorte Medicare (EE. UU.). El estudio reporta también RR específicos: EPOC 1.72%, neumonía 1.61%. Se usa el RR de todas las causas respiratorias como estimación conservadora.
ΔC diaria	33 µg/m³	Rojano *et al*., 2015 Percentil 95 diario	Pico diario 24h en comunidades sotavento de Cerrejón, Colombia: máximo 54.5 µg/m³ de $PM_{2.5}$; p95 estimado ~38 µg/m³. C_línea_base rural tropical = 5 µg/m³ (Ortiz-Martínez *et al*., 2021 — Puerto Rico). ΔC = 38 − 5 = 33 µg/m³.
Costo por episodio	USD 1,009 / episodio (USD 2025)	Castaño *et al*., 2022	Costo mediano de hospitalización por infección respiratoria aguda grave (SARI) en Colombia: USD 848 por episodio (IC 95%: 646–1,011). Costos directos médicos más gastos de bolsillo. Estudio multicéntrico 2017–2019. Ajustado a USD 2025 por CPI colombiano ×1.19.

Fórmula general
$\Delta Costo\ (USD/año) = Inc_0 \times Pop \times \beta \times \Delta C \times 365 \times Costo_episodio$
Sustitución con valores del año base 2019 (Pop = 43,912):
$\Delta Costo\ (USD/año) = 2.74 \times 10^{-5} \times 43{,}912 \times 0.0056 \times 33 \times 365 \times USD\ 1{,}009$
Resultado: ≈ 81 hospitalizaciones adicionales/año → USD 81,889/año (año base 2019)

Nota de limitaciones y supuestos
El coeficiente β de Dominici *et al*. (2006) proviene de una cohorte de adultos mayores de EE. UU. (Medicare, ≥65 años), lo que puede sobreestimar el efecto en una población más joven como la de Donoso (≥40 años). La Inc_0 es una estimación regional GBD sin datos específicos de Panamá. El ΔC se basa en el análogo Cerrejón y no en mediciones directas en San Benito / río Caimito.

Visitas a urgencias respiratorias

Las visitas a servicios de urgencias por causas respiratorias representan el segundo escalón de gravedad dentro de los efectos agudos, situándose entre los síntomas leves gestionables en domicilio y las hospitalizaciones formales. Incluyen consultas no programadas motivadas por disnea, sibilancias, tos productiva y deterioro del estado respiratorio, que no requieren ingreso, pero sí atención médica inmediata. La relación entre $MP_{2.5}$ y visitas a urgencias respiratorias está bien documentada en estudios de series de tiempo, con un RR de 1.029 por 10 µg/m³ reportado por Strickland *et al*. (2010) en una cohorte urbana de Atlanta.

La frecuencia de visitas a urgencias es aproximadamente el doble de la frecuencia de hospitalizaciones —reflejo de que la mayoría de los eventos respiratorios agudos se resuelven

sin ingreso hospitalario—, lo que justifica el uso de una Inc_o dos veces mayor. El costo unitario de USD 150 por visita se basa en tarifas del sistema de salud colombiano (EPS/SGSSS), ajustadas a USD 2025, y representa una estimación conservadora dado que Panamá tiene un sistema de salud con costos unitarios levemente superiores a los colombianos (Cuadro 15).

Cuadro 15. Parámetros y supuestos metodológicos: Visitas a urgencias respiratorias.

Variable	Valor	Fuente	Notas
Inc_o (diaria)	5.48×10^{-5} eventos/ persona/día	GBD 2019 — LAC Estimado	La tasa de visitas a urgencias se estima en aproximadamente 20 episodios por cada 1,000 adultos mayores de 40 años por año, derivada de la relación hospitalización/urgencias documentadas en estudios de carga de enfermedad en América Latina y el Caribe, donde las visitas a urgencias son consistentemente el doble que las hospitalizaciones para eventos cardiovasculares agudos. La tasa diaria se obtiene dividiendo entre 365 días.
β urgencias resp.	0.0029 por µg/m³ [β = ln(1.029)/10]	Strickland *et al*., 2010 Environ Health Perspect	RR = 1.029 por 10 µg/m³ de $PM_{2.5}$ para visitas a urgencias por causas respiratorias (asma, EPOC, infección). Estudio series de tiempo en Atlanta, EE. UU. β = ln(1.029)/10 = 0.00286.
ΔC diaria	33 µg/m³	Rojano *et al*., 2015 Percentil 95 diario	Pico diario 24h en comunidades sotavento de Cerrejón, Colombia: máximo 54.5 µg/m³ de $PM_{2.5}$; p95 estimado ~38 µg/m³. C_línea_base rural tropical = 5 µg/m³ (Ortiz-Martínez *et al*., 2021 — Puerto Rico). ΔC = 38 − 5 = 33 µg/m³.
Costo por visita	USD 150 / visita (USD 2025)	Colombia EPS 2023 (referencia SGSSS)	Costo promedio de consulta de urgencias en Colombia, ajustado a USD 2025. Rango reportado: USD 80–250 según complejidad y régimen de afiliación. Panamá tiene una estructura de costos levemente superior.

Fórmula general
$\Delta Costo\ (USD/año) = Inc_o \times Pop \times \beta \times \Delta C \times 365 \times Costo_visita$
Sustitución con valores del año base 2019 (Pop = 43,912):
$\Delta Costo\ (USD/año) = 5.48 \times 10^{-5} \times 43{,}912 \times 0.0029 \times 33 \times 365 \times USD\ 150$
Resultado: ≈ 84 visitas adicionales/año → USD 12,609/año (año base 2019)

Nota de limitaciones y supuestos
El β de Strickland *et al*. (2010) proviene de una ciudad con características climatológicas diferentes (subtropical húmedo vs. tropical húmedo). El costo por visita de USD 150 es una estimación de referencia para Colombia sin equivalente publicado para Panamá; la tarifa real del sistema CSS/MINSA de Panamá en Donoso podría diferir. La Inc_o es una estimación derivada de la relación hospitalización/urgencias, no de datos primarios de Donoso.

Días de actividad restringida (RAD)

Los días de actividad restringida (RAD, por sus siglas en inglés Restricted Activity Days) capturan un espectro de efectos de salud subclínicos que, sin requerir atención médica formal, generan pérdidas de productividad y bienestar. Incluyen días en que una persona no puede realizar sus actividades habituales —trabajo, escuela, labores del hogar— debido a síntomas respiratorios o cardiovasculares leves a moderados asociados a la exposición a $MP_{2.5}$. Este indicador es

ampliamente utilizado por la USEPA en sus análisis de beneficios de calidad del aire precisamente por su capacidad de capturar la carga de enfermedad subclínica que las tasas de hospitalización y mortalidad no recogen.

El meta-análisis de Rodríguez-Villamizar *et al*. (2023), que sintetiza 18 estudios de series de tiempo, establece un RR de 1.0166 por 10 µg/m³ de $MP_{2.5}$ para días de trabajo o escuela perdidos. La monetización se realiza usando el salario mediano rural de Panamá como proxy del valor de un día de productividad pérdida, derivado del Decreto Ejecutivo N°1 de 2024 que establece los salarios mínimos por región y actividad, complementado con datos del INEC para el sector rural de la Región 2 (que incluye el Distrito de Donoso) (Cuadro *16*).

Cuadro 16. Parámetros y supuestos metodológicos: Días de actividad restringida (RAD).

Variable	Valor	Fuente	Notas
β RAD	RR = 1.0166 por 10 µg/m³ β = 0.00165 por µg/m³	Rodríguez-Villamizar *et al*., 2023	Meta-análisis de 18 estudios de series de tiempo en múltiples países. RR = 1.0166 (IC 95%: 1.0050–1.0283) por 10 µg/m³ de $PM_{2.5}$ para días de trabajo o escuela perdidos. Heterogeneidad moderada (I^2=71%). β = ln(1.0166)/10 = 0.00165.
Inc_o (diaria)	0.00219 días restringidos/ persona/día	USEPA benefit analysis (estimación estándar)	Equivale a ~0.8 días de actividad restringida por persona por año en condición basal, sin exposición adicional. Valor estándar de la USEPA para poblaciones adultas en análisis de beneficios de normativas de calidad del aire.
ΔC diaria	33 µg/m³	Rojano *et al*., 2015 Percentil 95 diario	Pico diario 24h en comunidades sotavento de Cerrejón, Colombia: máximo 54.5 µg/m³ de $PM_{2.5}$; p95 estimado ~38 µg/m³. C_línea_base rural tropical = 5 µg/m³ (Ortiz-Martínez *et al*., 2021 — Puerto Rico). ΔC = 38 − 5 = 33 µg/m³.
Costo por día perdido	USD 21.20 / día (USD 2025)	Decreto Ejecutivo N°1 Panamá, 2024 INEC Panamá 2024	Salario mínimo Región 2 (Donoso) para actividades agropecuarias/servicios básicos: B/.326.56/mes ÷ 26 días hábiles = B/.12.56/día. Usando salario mediano rural (~USD 21.20/día incluyendo décimo tercer mes y contribuciones CSS) como proxy de productividad perdida.

Fórmula general
ΔCosto (USD/año) = Inc_o × Pop × β × ΔC × 365 × Costo_día
Sustitución con valores del año base 2019 (Pop = 43,912):
ΔCosto (USD/año) = 0.00219 × 43,912 × 0.00165 × 33 × 365 × USD 21.20
Resultado: ≈ 1,907 días-persona adicionales/año → USD 40,519/año (año base 2019)

Nota de limitaciones y supuestos
El β de Rodríguez-Villamizar *et al*. (2023) presenta heterogeneidad significativa entre estudios (I^2=71%), lo que refleja diferencias en definiciones de RAD, poblaciones y contextos. La Inc_o basal de la USEPA puede no ser representativa de la población rural de Donoso, que podría tener mayor o menor tasa basal de días restringidos según condiciones de salud preexistentes. El costo por día usa el salario mínimo como proxy de productividad —los trabajadores informales o subsistentes pueden tener pérdidas no capturadas, y los trabajadores formales pérdidas mayores.

Crisis asmáticas

Las exacerbaciones asmáticas agudas constituyen un efecto específico de la población con asma preexistente, que es desproporcionadamente sensible a las variaciones en la concentración de $MP_{2.5}$. Una crisis asmática se define como un episodio de broncoespasmo agudo que requiere

atención médica urgente (visita a urgencias u hospitalización) y que supera la capacidad de control del paciente con su medicación habitual. A diferencia de los otros efectos agudos que aplican a toda la población adulta, este efecto se restringe a la subpoblación con diagnóstico de asma, estimada en el 12% de los adultos mayores de 18 años en Colombia y regiones análogas de América Latina (Caraballo *et al*., 2018).

El coeficiente β de Atkinson *et al*. (2014), derivado de un meta-análisis de estudios de series de tiempo publicado en Lancet Respiratory Medicine, establece que por cada 10 µg/m³ de incremento en $MP_{2.5}$, el riesgo de exacerbación asmática aumenta un 3.0%. El costo por episodio incluye la atención de urgencias, la medicación de rescate y, en los casos que lo requieren, la hospitalización breve, tal como fue estimado por Caraballo *et al*. (2018) en el sistema de salud colombiano (Cuadro 17).

Cuadro 17. Parámetros y supuestos metodológicos: Crisis asmáticas.

Variable	Valor	Fuente	Notas
Prevalencia asma	12% adultos (≥18 años) → Pop_asma = 5,269 personas	Caraballo *et al*., 2018 Colombia (análogo LAC)	Prevalencia de asma en adultos Colombia/LAC ≈ 12%. Pop_asma = 43,912 × 0.12 = 5,269. Solo la subpoblación con asma diagnosticada está en riesgo de crisis —la fórmula usa Pop_asma, no la población total.
β asma aguda	RR = 1.030 por 10 µg/m³ β = 0.00296 por µg/m³	Atkinson *et a*l., 2014	RR de exacerbación asmática (urgencias o ingreso hospitalario) por 10 µg/m³ de $MP_{2.5}$ en meta-análisis de estudios de series de tiempo. β = ln(1.030)/10 = 0.00296.
Inc_0 crisis (diaria)	1.37×10^{-4} crisis/ persona-asma/día	Estimado	~0.05 crisis por persona asmática por año en América Latina y el Caribe → ÷ 365 días. Este valor refleja que no todos los asmáticos tienen crisis frecuentes —la mayoría tiene asma leve intermitente con pocas exacerbaciones anuales.
ΔC diaria	33 µg/m³	Rojano *et al*., 2015 Percentil 95 diario	Pico diario 24h en comunidades sotavento de Cerrejón, Colombia: máximo 54.5 µg/m³ de $PM_{2.5}$; p95 estimado ~38 µg/m³. C_línea_base rural tropical = 5 µg/m³ (Ortiz-Martínez *et al*., 2021 — Puerto Rico). ΔC = 38 − 5 = 33 µg/m³.
Costo por crisis	USD 394 / episodio (USD 2025)	Caraballo *et al*., 2018	Costo medio directo por episodio de asma en Colombia: USD 331/paciente (incluye urgencias, hospitalización si aplica y medicamentos). Ajustado a USD 2025 por CPI colombiano ×1.19 → USD 394/episodio.

Fórmula general
ΔCosto (USD/año) = $Inc_0 \times Pop_asma \times \beta \times \Delta C \times 365 \times Costo_crisis$
Sustitución con valores del año base 2019 (Pop = 43,912):
ΔCosto (USD/año) = $1.37 \times 10^{-4} \times 5{,}269 \times 0.00296 \times 33 \times 365 \times 394$
Resultado: ≈ 26 crisis adicionales/año → USD 10,141/año (año base 2019)

Nota de limitaciones y supuestos
La prevalencia del 12% de asma en adultos proviene de Colombia y puede diferir en Donoso, donde el subregistro diagnóstico es probable dado el limitado acceso a atención especializada. Los datos MINSA Donoso 2026 muestran solo 49 casos de asma (J45.9) en toda la población, lo que sugiere una prevalencia real del ~0.1% registrada —evidencia de subregistro severo. Se usa el 12% de la literatura como estimación epidemiológica más realista. El β de Atkinson *et al*. (2014) es un promedio de estudios heterogéneos; los efectos en climas tropicales húmedos pueden diferir de los documentados en climas templados.

Síntomas cardiovasculares agudos (arritmias / infarto agudo de miocardio)

Los síntomas cardiovasculares agudos representan el efecto de mayor costo unitario dentro de los efectos agudos, reflejando la gravedad clínica de eventos como el infarto agudo de miocardio (IAM) y las arritmias cardíacas. La exposición a corto plazo a $MP_{2.5}$ desencadena una cascada de respuestas fisiopatológicas que incluyen inflamación sistémica, estrés oxidativo, disfunción endotelial y activación del sistema nervioso autónomo, aumentando la probabilidad de eventos isquémicos agudos en personas con cardiopatía subyacente o factores de riesgo cardiovascular. Dominici *et al*. (2006) estiman un aumento del 0.9% en el riesgo de hospitalización por enfermedad isquémica del corazón por cada 10 µg/m³ adicional de $MP_{2.5}$.

A diferencia de los efectos crónicos cardiovasculares —que capturan el deterioro acumulado a lo largo de años de exposición sostenida—, este componente agudo refleja el riesgo inmediato de precipitación de un evento cardiovascular en personas ya vulnerables. Ambos efectos son metodológicamente independientes y no presentan doble conteo: el efecto agudo utiliza un β de series de tiempo (exposición diaria) mientras que el efecto crónico utiliza un β de cohorte (exposición anual promedio) (Cuadro 18).

Cuadro 18. Parámetros y supuestos metodológicos: Síntomas cardiovasculares agudos (arritmias / infarto agudo de miocardio).

Variable	Valor	Fuente	Notas
Inc_0 (diaria)	1.15×10^{-4} eventos CV/ persona/día	GBD 2019 — LAC	Tasa de eventos cardiovasculares agudos (IM + arritmia) en adultos ≥40 años en LAC: ~42 por 1,000/año → ÷ 365 días. Incluye eventos que requieren hospitalización de urgencia.
β CV agudo	RR = 1.009 por 10 µg/m³ β = 0.000896 por µg/m³	Dominici *et al.,* 2006	RR = 0.9% por 10 µg/m³ de $PM_{2.5}$ para hospitalización por enfermedad isquémica del corazón (IHD), derivado de series de tiempo en la cohorte Medicare. β = ln(1.009)/10 = 0.000896. El efecto agudo es menor que el crónico —coherente con la literatura: el riesgo crónico acumulado supera al riesgo agudo puntual.
ΔC diaria	33 µg/m³	Rojano *et al.,* 2015 Percentil 95 diario	Concentración de referencia derivada de mediciones en comunidades sotavento de la mina de carbón Cerrejón, Colombia —contexto minero tropical análogo al de Donoso. El máximo diario registrado fue de 54.5 µg/m³ de $PM_{2.5}$; se adopta el percentil 95 (~38 µg/m³) como valor representativo de la exposición alta sostenida, descartando el pico absoluto por corresponder a un evento puntual no representativo de la exposición crónica. La concentración de línea base rural tropical (5 µg/m³) proviene de Ortiz-Martínez *et al*. (2021) para Puerto Rico. El diferencial atribuible a la operación minera es ΔC = 38 − 5 = 33 µg/m³.
Costo por episodio	USD 4,815 / episodio (USD 2025)	Prada *et al.,* 2018	Costo anual de atención de enfermedad coronaria (CHD) en Colombia: INT 4,562 (PPP 2018). Ajustado a USD 2025 mediante factor de conversión PPP Colombia 2018→2025 (×1.0554). Incluye ambulatorio, urgencias, hospitalización y alta complejidad.

Fórmula general

$\Delta Costo\ (USD/año) = Inc_0 \times Pop \times \beta \times \Delta C \times 365 \times Costo_episodio$

Sustitución con valores del año base 2019 (Pop = 43,912):

$\Delta Costo\ (USD/año) = 1.15 \times 10^{-4} \times 43{,}912 \times 0.000896 \times 33 \times 365 \times 4{,}815$

Resultado: ≈ 54 eventos CV adicionales/año → USD 262,420/año (año base 2019)

Nota de limitaciones y supuestos
El β de Dominici *et al*. (2006) proviene de una población de adultos mayores estadounidenses (≥65 años, Medicare), con alta prevalencia de cardiopatía preexistente. La población de Donoso (≥40 años) tiene menor prevalencia de factores de riesgo cardiovascular diagnosticados, pero también menor acceso a diagnóstico y tratamiento —efecto contrario que podría compensarse. El costo de USD 4,815 por episodio corresponde al costo anual de atención de enfermedad coronaria crónica, no específicamente al costo de un episodio agudo de IAM; en este contexto se usa como proxy del costo de hospitalización cardiovascular de urgencia.

Efectos crónicos y acumulados

Los seis efectos crónicos se cuantifican mediante la fórmula estándar de cohortes longitudinales: $\Delta\text{Casos/año} = \text{Inc}_0 \times \text{Pop} \times \beta \times \Delta C$, donde $\Delta C = 13.76$ µg/m³ para todos los efectos $MP_{2.5}$ (diferencia entre concentración de operación anual 18.76 µg/m³ y línea base 5.0 µg/m³). Los efectos de Pb y As usan concentraciones específicas de cada metal. Las latencias varían entre 0 y 30 años según el efecto.

EPOC crónica por $MP_{2.5}$

La enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) representa el efecto respiratorio crónico de mayor prevalencia asociado a la exposición prolongada a material particulado fino. Se define como una limitación persistente y progresiva del flujo aéreo, causada por la inflamación crónica de las vías respiratorias y el parénquima pulmonar. La exposición sostenida a $MP_{2.5}$ acelera el deterioro de la función pulmonar —medida como el volumen espiratorio forzado en el primer segundo (FEV_1)— e incrementa el riesgo de desarrollar EPOC de novo en personas sin diagnóstico previo. Chen *et al*. (2020), en un metaanálisis de seis cohortes prospectivas con seguimiento mínimo de tres años, estimaron un hazard ratio de 1.18 por cada 10 µg/m³ de incremento en la concentración anual de $MP_{2.5}$, equivalente a un coeficiente β de 0.01655 por µg/m³.

Para el contexto de Cobre Panamá, el diferencial de concentración (ΔC) de 13.76 µg/m³ se establece entre la concentración de operación anual (18.76 µg/m³, medida en Las Casitas, Cerrejón, Colombia —análogo más cercano disponible) y la línea base rural tropical (5.0 µg/m³, estaciones Caribe de Puerto Rico). El costo por caso proviene del estudio de Vargas *et al*. (2025), el primero en Colombia con metodología doblemente robusta sobre más de 251,000 pacientes con EPOC confirmada, y se encuentra expresado directamente en USD 2025 sin necesidad de ajuste adicional. La latencia de 10–15 años implica que los primeros casos atribuibles a la exposición de 2019 se manifestarán entre 2029 y 2034 (Cuadro 19).

Cuadro 19. Parámetros y supuestos metodológicos: EPOC crónica por $MP_{2.5}$.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Inc_0	0.0052 casos/persona/año	GBD Collaborators, 2020	Tasa de incidencia de EPOC en adultos ≥40 años en América Latina tropical. Derivada de las estimaciones del GBD 2019 para la región de América Latina tropical (incluye Panamá). Expresa el número de casos nuevos de EPOC por persona por año en condiciones basales, sin exposición adicional a $MP_{2.5}$.
β	0.01655 por µg/m³ [β = ln(1.18)/10]	Chen *et al*., 2020	Derivado de HR = 1.18 por 10 µg/m³ (metaanálisis de 6 cohortes prospectivas, seguimiento mínimo 3 años). IC 95%: HR 1.13–1.23. β = ln(1.18)/10 = 0.01655.
C operación	18.76 µg/m³ de $PM_{2.5}$	Rojano *et al*., 2015	Promedio anual medido en estación Las Casitas, Cerrejón, Colombia. Comunidad sotavento a distancia

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
		Interciencia 40(9)	comparable a San Benito (~5 km del tajo). Representa cota superior por clima más seco que Donoso.
C línea base	5.0 µg/m³ de $PM_{2.5}$	Ortiz-Martínez *et al*., 2021	Estaciones rurales tropicales del Caribe sin influencia industrial: Humacao (4.33), Guayama (4.93), Guayanilla (4.88 µg/m³). Análogo climático más cercano a Donoso. Coincide con guía anual OMS 2021.
ΔC	13.76 µg/m³	Calculado: 18.76 − 5.0	Incremento de concentración anual de $PM_{2.5}$ atribuible a la operación minera. Constante para todos los efectos crónicos que dependen de exposición a $PM_{2.5}$.
Costo por caso	USD 1,349/caso/año (USD 2025)	Vargas *et al*., 2025	Costo incremental directo médico anual por paciente con EPOC en Colombia, estimado sobre 251,060 pacientes con metodología doblemente robusta (double-robust estimation). Incluye consultas, hospitalizaciones, urgencias y medicamentos. Publicado directamente en USD 2025.

Fórmula general
$\Delta Casos/año = Inc_0 \times Pop \times \beta \times \Delta C$
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada) (Pop 2029, inicio latencia):
$\Delta Casos/año = 0.0052 \times 48{,}220 \times 0.01655 \times 13.76 \times 1{,}349 =$ USD 70,013/año
Resultado: ~52 casos adicionales de EPOC/año → USD ~77,030 /año (2029)

Nota de limitaciones y supuestos
La Inc_0 es una estimación regional GBD sin datos específicos de EPOC para el Distrito de Donoso —el subregistro diagnóstico en zonas rurales panameñas es probable. El β de Chen *et al*. (2020) proviene principalmente de cohortes asiáticas y europeas; su aplicabilidad directa a una población tropical latinoamericana con mezcla de exposición a tabaco, biomasa y MP minero no ha sido validada localmente. El ΔC usa Cerrejón como proxy —el clima más húmedo de Donoso (>3,000 mm/año) reduce la resuspensión de partículas respecto a Cerrejón, por lo que 18.76 µg/m³ podría sobreestimar la concentración real en San Benito y río Caimito.

Hospitalización cardiovascular crónica por $MP_{2.5}$

La enfermedad isquémica del corazón (IHD, por sus siglas en inglés) agrupa las afecciones causadas por el estrechamiento de las arterias coronarias, incluyendo la angina de pecho, el infarto agudo de miocardio y la insuficiencia cardíaca isquémica. La exposición crónica a $MP_{2.5}$ promueve la progresión de la aterosclerosis a través de mecanismos de inflamación sistémica, estrés oxidativo y disfunción endotelial, incrementando el riesgo de hospitalización por eventos coronarios. Mohammadyan *et al*. (2021), en una cohorte de seguimiento de 15 años en el Mediterráneo Oriental, establecieron un HR de 1.031 por cada 10 µg/m³ de $MP_{2.5}$, el coeficiente β más conservador disponible en la literatura para exposición crónica a IHD.

La tasa de incidencia basal (Inc_0 = 0.042 casos/persona/año) se deriva de las estimaciones del GBD 2019 para América Central y Panamá, dado que el país no cuenta con registros nacionales de incidencia de IHD sistematizados por códigos CIE-10 (I20–I25). El costo por caso de USD 4,815 se actualizó desde el estudio de Prada *et al*. (2018) en Colombia, aplicando el factor de conversión PPP Colombia 2018→2025 recomendado por el Banco Mundial. La latencia de 5–10 años implica que los primeros casos atribuibles a la exposición de 2019 se contabilizan desde 2024 (Cuadro 20).

Cuadro 20. Parámetros y supuestos metodológicos: Hospitalización cardiovascular crónica por $MP_{2.5}$.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Inc_0	0.042 casos/persona/año	GBD Collaborators, 2020 Roth *et al.*, 2020 JACC	Tasa de incidencia de IHD en adultos ≥40 años en América Central / Panamá. Derivada de la tasa regional de 1,893 por 100,000 (todas las edades) ajustada por concentración en ≥40 años (~85% de casos). Panamá no cuenta con registros nacionales de incidencia de IHD sistematizados.
β cardiovascular	0.00305 por µg/m³ [β = ln(1.031)/10]	Mohammadyan *et al.*, 2021	Derivado de HR = 1.031 por 10 µg/m³ para IHD/infarto agudo de miocardio (IC 95%: 1.005–1.057). Cohorte de 15 años en Mediterráneo Oriental. β = ln(1.031)/10 = 0.00305.
C operación	18.76 µg/m³ de $PM_{2.5}$	Rojano *et al.*, 2015	Promedio anual estación Las Casitas, Cerrejón. Mismo valor que EPOC.
C línea base	5.0 µg/m³ de $PM_{2.5}$	Ortiz-Martínez *et al.*, 2021	Fondo rural tropical Caribe, Puerto Rico. Mismo valor que EPOC.
ΔC	13.76 µg/m³	Calculado: 18.76 − 5.0	Incremento de concentración anual de $PM_{2.5}$ atribuible a la operación minera. Constante para todos los efectos crónicos que dependen de la exposición a $PM_{2.5}$.
Costo por caso	USD 4,815/caso/año (USD 2025)	Prada *et al.*, 2018	Costo anual de atención de enfermedad coronaria en Colombia: INT 4,277–4,846 (PPP 2018). Actualizado a USD 2025 aplicando factor PPP Colombia 2018→2025 (×1.0554, Banco Mundial ICP 2025). Incluye ambulatorio, urgencias, hospitalización y alta complejidad.

Fórmula general
$\Delta Costo/año = Inc_0 \times Pop \times \beta \times \Delta C \times Costo\ por\ caso$
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada) (Pop 2024, inicio latencia):
$\Delta Costo/año = 0.042 \times 45{,}959 \times 0.00305 \times 13.76 \times 4{,}815 = USD\ 390{,}659/año$
Resultado: ~81 casos cardiovasculares adicionales/año → USD ~390,659/año (2024)

Nota de limitaciones y supuestos
La Inc_0 regional del GBD puede sobreestimar la incidencia real en Donoso, donde el acceso limitado a diagnóstico cardiológico produce subregistro. El β de Mohammadyan *et al.* (2021) proviene de una cohorte de Medio Oriente con exposiciones superiores a 40 µg/m³ anuales —su linealidad a concentraciones menores (como las de Donoso) es un supuesto del modelo log-lineal estándar que no ha sido validado específicamente en la región.

Efectos neurológicos por plomo (Pb) en MP

El plomo (Pb) es un neurotóxico sin umbral documentado cuyo efecto más sensible en niños es la reducción del coeficiente intelectual (CI). La exposición ocurre principalmente por vía inhalatoria a través de partículas finas de Pb adsorbidas al $MP_{2.5}$, que son absorbidas por las vías respiratorias y transferidas al torrente sanguíneo. Lanphear *et al.* (2005), en un análisis agrupado de 1,333 niños en siete cohortes internacionales, establecieron que por cada µg/dL de plomo en sangre (BLL), los niños pierden 0.513 puntos de CI —con efectos más pronunciados en el rango de BLL < 7.5 µg/dL, lo que sugiere que no existe un nivel seguro de exposición.

El cálculo requiere dos pasos intermedios: primero, convertir el incremento de concentración de Pb en aire (ΔC_Pb) a incremento de BLL usando el factor de biocinética del modelo IEUBK (Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model) de la USEPA (1 µg/m³ de Pb en aire ≈ 1.85 µg/dL

de BLL en niños); y segundo, multiplicar el ΔBLL por el coeficiente β para obtener la pérdida de CI por niño expuesto. La concentración de operación de Pb (12.5 ng/m³) se basa en mediciones directas en comunidades sotavento de la mina Ray Mine, Arizona —una mina de pórfido de cobre sin fundición del mismo tipo mineralógico que Cobre Panamá. Los valores bajos de ΔC_Pb y el consecuente impacto económico limitado reflejan correctamente que una mina sin pirometalurgia genera emisiones de Pb muy inferiores a las de una fundición de cobre (Cuadro 21).

Cuadro 21. Parámetros y supuestos metodológicos: Efectos neurológicos por plomo (Pb) en MP.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
β (niños)	−0.513 puntos CI/µg/dL en rango 2–10 µg/dL	Lanphear *et al.*, 2005 PMC1257652	Pooled analysis de 1,333 niños en 7 cohortes internacionales. Para BLL <7.5 µg/dL el efecto es mayor (modelo log-lineal). IC 95%: −0.38 a −0.65 puntos CI por µg/dL.
Conversión aire→sangre	1 µg/m³ Pb en aire ≈ 1.85 µg/dL BLL (punto medio 1.6–2.1)	USEPA IEUBK, 2007	Factor de biocinética del modelo IEUBK para niños. Paso obligatorio antes de aplicar β. Rango documentado: 1.6–2.1 µg/dL por µg/m³; se usa el punto medio 1.85.
C operación (Pb)	0.0125 µg/m³ (= 12.5 ng/m³)	Csavina *et al.,* 2014	Concentración de Pb en partículas finas (<1 µm) en comunidad sotavento de Ray Mine, Arizona (pórfido de cobre sin fundición —mismo tipo mineralógico). Período con viento desde la mina.
C línea base (Pb)	0.0062 µg/m³ (= 6.2 ng/m³)	Csavina *et al.*, 2014	Concentración de Pb con viento barlovento (opuesto a la mina). Representa el fondo regional sin influencia directa de la operación. Mismo estudio y sitio.
ΔC_Pb	0.0063 µg/m³ (= 6.3 ng/m³)	Calculado: 12.5 − 6.2	Incremento de Pb en aire atribuible a la operación. Bajo porque no hay fundición.
Costo por caso	USD 11,900/punto CI perdido/niño (USD 2025)	Trasande *et al.*, 2013	Valor presente de pérdida de productividad vitalicia por punto CI perdido. Publicado en USD 2007 — ajustado a USD 2025 por CPI acumulado ×1.47: 8,100 × 1.47 ≈ 11,900.

Fórmula general
Paso 1: ΔBLL = ΔC_Pb × 1.85
Paso 2: ΔCI_niño = ΔBLL × 0.513
ΔCosto/año = ΔCI_niño × Pop_niños(≤6) × 11,900
Sustitución con valores del año base 2019 (latencia aplicada) (Pob= 43,912):
ΔBLL = 0.0063 × 1.85 = 0.01166 µg/dL por niño
ΔCI_niño = 0.01166 × 0.513 = 0.00598 puntos CI por niño
ΔCosto = 0.00598 × 43,912 × 11% × 11,900
Resultado: USD ~343,682/año

Nota de limitaciones y supuestos
El factor IEUBK de conversión aire→sangre fue desarrollado para niños estadounidenses en ambientes suburbanos —su aplicación directa a niños rurales tropicales de Donoso implica suponer similitud en patrones de actividad, ingesta de polvo y absorción gastrointestinal. La población de niños ≤6 años de Donoso no fue especificada en los datos MINSA disponibles y debe estimarse como proporción de la población total (~10–12%). El impacto es pequeño porque Cobre Panamá no tiene fundición —esto es metodológicamente correcto, no una limitación.

Cáncer de pulmón por arsénico (As) inhalado

El arsénico inorgánico inhalado es un carcinógeno pulmonar del Grupo 1 de la IARC (International Agency for Research on Cancer), clasificado como causa demostrada de cáncer de pulmón en humanos. A diferencia de los efectos crónicos calculados mediante coeficientes β epidemiológicos, el cáncer por arsénico se cuantifica mediante el Inhalation Unit Risk (IUR) de la USEPA IRIS: un factor que expresa el riesgo incremental de cáncer de pulmón por unidad de concentración en aire (µg/m³) para una exposición de por vida. El IUR de 4.3×10^{-3} por µg/m³ fue derivado en 1984 a partir de estudios de trabajadores de fundidoras de cobre y permanece vigente en la revisión IRIS de 2025 para la vía inhalatoria.

El método IUR es fundamentalmente distinto al método β: incorpora directamente el tiempo de exposición a través del cociente ED/AT (duración de exposición / tiempo de promediación para carcinógenos = 70 años), lo que significa que el resultado es un riesgo acumulado de vida para la cohorte expuesta, no un riesgo anual. Para Cobre Panamá, el número de casos esperados es muy bajo (~1.08 casos en 39 años) precisamente porque la mina opera sin fundición: las concentraciones de As en aire de una mina a tajo abierto sin pirometalurgia son entre 50 y 100 veces menores que las de una fundición de cobre. Este resultado pequeño es metodológicamente correcto y constituye un hallazgo relevante en sí mismo (Cuadro 22).

Cuadro 22. Parámetros y supuestos metodológicos: Cáncer de pulmón por arsénico (As) inhalado.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
IUR (inhalación)	4.3×10^{-3} $(\mu g/m^3)^{-1}$	USEPA IRIS, 1995 (vigente 2025)	Inhalation Unit Risk para As inorgánico. Riesgo incremental de cáncer de pulmón por unidad de concentración en aire durante exposición de por vida. Derivado de cohortes de trabajadores en fundidoras Anaconda (Montana) y Asarco (Tacoma).
C operación (As)	0.01090 µg/m³ (= 10.90 ng/m³)	Arregocés *et al*., 2023 1	Concentración máxima de As en MP modelada con AERMOD para área de influencia de mina a tajo abierto en trópico colombiano. Contribución de la dispersión de partículas desde la presa de relaves.
C línea base (As)	0.00066 µg/m³ (= 0.66 ng/m³)	WHO AQG, 2021 ATSDR, 2007	Fondo natural de As en aire en zonas rurales tropicales sin fuentes industriales. Rango: 0.4–1.0 ng/m³. Valor central conservador: 0.66 ng/m³.
ΔC_As	0.01024 µg/m³ (= 10.24 ng/m³)	Calculado: 10.90 − 0.66	Incremento de As en aire atribuible a la operación. Sin fundición, las emisiones de As son de polvo fugitivo del tajo y relaves —órdenes de magnitud menores que en fundiciones.
ED / AT	ED = 39 años AT = 70 años	USEPA IRIS, 2012	ED = duración de exposición (vida útil completa de la mina). AT = tiempo de promediación para carcinógenos = 70 años (EPA estándar). El cociente 39/70 = 0.5571 ajusta el riesgo por la fracción de vida expuesta.
Pop promedio	51,956 personas	Proyección Donoso+LP +Omar Torrijos	Promedio de la población total de los tres distritos durante el período 2019–2058, usada en el método IUR porque el riesgo se calcula para la cohorte expuesta completa, no año a año.
Costo por caso	USD 3,651/caso/año (USD 2025)	Linares *et al*., 2022 J Clin Oncol	Costo incremental anual directo de cáncer de pulmón en Colombia (USD 3,146–4,156). Ajustado a USD 2025 por CPI Colombia 2017→2025 (×1.38). Sobrevida media: 1.5 años.

Fórmula general
Paso 1: ΔRiesgo = IUR × ΔC_As × (ED/AT)
Paso 2: ΔCasos = ΔRiesgo × Pop_promedio
Paso 3: ΔMuertes = ΔCasos × 0.85 (tasa fatalidad)
Costo total = ΔCasos × Costo × 1.5 años sobrevida
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada):
ΔRiesgo = 4.3×10^{-3} × 0.01024 × (39/70) = 2.45×10^{-5} por persona
ΔCasos = 2.45×10^{-5} × 51,956 = 1.27 casos totales en 39 años
Costo total = 1.27 × 3,651 × 1.5 = USD 6,963 (acumulado)
Costo anualizado desde 2034: USD 179/año (fijo)
Resultado: ~1.27 casos de cáncer acumulados en 39 años → USD 179/año desde 2034 (latencia 15 años)

Nota de limitaciones y supuestos
El IUR de USEPA (1984/1995) fue derivado de exposiciones ocupacionales a As mucho mayores (fundidoras) y extrapolado linealmente a concentraciones ambientales bajas —este supuesto de linealidad en el rango de 10 ng/m³ introduce incertidumbre. Estudios más recientes (TCEQ, 2012) sugieren un IUR menor (~1.5×10^{-4}), lo que reduciría los casos calculados aproximadamente 30 veces. La concentración de As de 10.90 ng/m³ proviene de un modelo AERMOD en Colombia, no de mediciones directas en Donoso. La latencia de 15 años es el límite inferior del rango documentado (15-30 años); usar 30 años desplazaría el inicio de casos a 2049.

Hospitalización respiratoria crónica por $MP_{2.5}$

La hospitalización por enfermedades respiratorias crónicas captura los ingresos hospitalarios atribuibles a la progresión de afecciones como EPOC, bronquitis crónica, asma persistente y enfisema en personas con diagnóstico previo. A diferencia de la incidencia de EPOC de novo (Efecto 1), este indicador mide la frecuencia de descompensaciones que requieren hospitalización en pacientes con enfermedad respiratoria crónica ya establecida. Di *et al*. (2017), en la cohorte Medicare de 53 millones de personas, estimaron un HR de 1.056 por cada 10 µg/m³ de $MP_{2.5}$ para hospitalización por enfermedad respiratoria crónica, con exposición a largo plazo.

Una característica diferencial de este efecto es que la tasa de incidencia basal (Inc_0) proviene de fuente local directa: los registros del Sistema de Información de Estadísticas de Salud (SIES) del MINSA Panamá para el Distrito de Donoso, con datos de morbilidad por causa del corregimiento Miguel de la Borda correspondientes a 2026. De los 1,383 casos registrados en el corregimiento, se identificaron 29 casos de patología respiratoria crónica en adultos ≥40 años (códigos J40–J47), lo que equivale a una tasa de 0.00063 casos por persona por año sobre una población adulta estimada de 46,000 personas. Esta fuente local es metodológicamente preferida sobre las estimaciones regionales del GBD (Cuadro 23).

Cuadro 23. Parámetros y supuestos metodológicos: Hospitalización respiratoria crónica por $MP_{2.5}$.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Inc_0	0.00063 casos/persona/año	MINSA Panamá — SIES, 2026	Derivado de 29 casos de morbilidad respiratoria crónica (J40–J47: EPOC, bronquitis crónica, asma, enfisema) en adultos ≥40 años en Donoso / Pop ≥40 años ≈ 46,000. Fuente local directa —preferida sobre estimaciones GBD.
β respiratorio	0.00545 por µg/m³ [β = ln(1.056)/10]	Di *et al*., 2017	HR = 1.056 por 10 µg/m³ para hospitalización por enfermedad respiratoria crónica. Cohorte Medicare de 53 millones de personas, EE. UU., exposición a largo plazo. β = ln(1.056)/10 = 0.00545.
C operación	18.76 µg/m³ de $PM_{2.5}$	Rojano *et al*., 2015	Mismo valor que EPOC y cardiovascular.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
C línea base	5.0 µg/m³ de $PM_{2.5}$	Ortiz-Martínez *et al.*, 2021	Fondo rural tropical Caribe, Puerto Rico. Mismo valor que EPOC.
ΔC	13.76 µg/m³	Calculado: 18.76 − 5.0	Incremento de concentración anual de $PM_{2.5}$ atribuible a la operación minera. Constante para todos los efectos crónicos que dependen de la exposición a $PM_{2.5}$.
Costo por caso	USD 1,349/caso/año (USD 2025)	Vargas *et al.*, 2025	Mismo costo que EPOC — perfil de atención similar (consultas, urgencias, hospitalización, medicamentos).

Fórmula general
$\Delta Casos/año = Inc_0 \times Pop \times \beta \times \Delta C$
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada) (Pop 2024, inicio latencia 5 años):
$\Delta Casos/año = 0.00063 \times 45{,}959 \times 0.00545 \times 13.76 \rightarrow \sim 2.17$ casos/año
$\Delta Costo/año = 2.17 \times 1{,}349 = USD\ 2{,}929/año$
Resultado: ~2.17 casos adicionales/año → USD 2,929/año (2024)

Nota de limitaciones y supuestos
La Inc_0 de 0.00063 casos/persona/año es notablemente baja respecto a las tasas del GBD para LAC (~0.0048), lo que refleja subregistro severo en Donoso —donde solo 29 casos de enfermedades respiratorias crónicas fueron registrados en toda la población adulta en 2026. Usar la tasa del GBD elevaría el resultado ~7.6 veces y daría un escenario alternativo de mayor carga. El β de Di *et al.* (2017) proviene de una cohorte de adultos mayores estadounidenses —su aplicabilidad a adultos de 40 años en un contexto tropical con coinfecciones respiratorias puede diferir.

Cambio en función pulmonar (FEV_1) por $MP_{2.5}$

El cambio en la función pulmonar, medido como el volumen espiratorio forzado en el primer segundo (FEV_1), constituye un biomarcador continuo del daño acumulado por exposición a $MP_{2.5}$. A diferencia de los efectos anteriores —que se expresan en casos discretos de enfermedad—, la pérdida de FEV_1 captura el deterioro subclínico progresivo que precede al diagnóstico formal de EPOC: cuando la pérdida acumulada supera los 250 mL respecto a los valores basales predichos, se cruza el umbral diagnóstico de limitación significativa del flujo aéreo según los criterios GOLD 2023.

Rice *et al*. (2015), en el Framingham Heart Study, estimaron que por cada µg/m³ adicional de $MP_{2.5}$, el declive anual de FEV_1 se acelera en 1.05 mL/año. Con un ΔC de 13.76 µg/m³, la pérdida adicional es de 14.45 mL/año por persona expuesta —lo que significa que al año 17 de exposición continua (2036), cada adulto expuesto habrá perdido 246 mL adicionales de FEV_1, aproximándose al umbral clínico (Cuadro 24). Al año 39 (2058), la pérdida acumulada de 563.6 mL supera en más del doble dicho umbral. Este efecto se reporta como indicador funcional independiente para los años anteriores a 2036, dado que desde ese año el daño ya está parcialmente capturado en el Efecto 1 (EPOC) y sumar ambos implicaría doble conteo (Cuadro 24).

Cuadro 24. Parámetros y supuestos metodológicos: Cambio en función pulmonar (FEV_1) por $MP_{2.5}$.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
β_FEV_1 (transversal)	−6.75 mL FEV_1 por µg/m³	Rice *et al.*, 2015	Pérdida transversal de FEV_1 por µg/m³ de $MP_{2.5}$ en adultos (Framingham Heart Study). Indica el déficit acumulado esperado si la concentración se sostiene.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
β_declive (longitudinal)	−1.05 mL FEV_1/año por µg/m³	Rice *et al*., 2015	Aceleración del declive anual de FEV_1 por µg/m³ adicional de $MP_{2.5}$. Coeficiente clave para el cálculo año a año.
ΔC	13.76 µg/m³	Calculado: 18.76 − 5.0	Incremento de concentración anual de $PM_{2.5}$ atribuible a la operación minera. Constante para todos los efectos crónicos que dependen de la exposición a $PM_{2.5}$.
Pérdida/persona/año	−14.45 mL FEV_1/año	Calculado: 1.05 × 13.76	Declive adicional de función pulmonar por año de exposición. Un adulto sano de 40 años declina ~30 mL/año naturalmente —la mina añade 14.45 mL/año más (+48% de declive).
Umbral EPOC	≥250 mL pérdida acum. → año 17 de exposición → año 2036	GOLD 2023 goldcopd.org	Umbral diagnóstico de limitación clínicamente significativa del flujo aéreo. Calculado: 250 mL / 14.45 mL/año = 17.3 años. Desde 2019, umbral cruzado en 2036.
Pérdida acum. T=39	−563.6 mL por persona	Calculado: 14.45 × 39	Supera 2× el umbral clínico EPOC (>250 mL). Toda la población adulta expuesta durante la vida útil de la mina sufriría deterioro clínicamente significativo.
Costo cuando >250 mL	USD 1,349/caso/año (USD 2025)	Vargas *et al*., 2025	Mismo costo que EPOC —una vez cruzado el umbral, el paciente ingresa al espectro de EPOC con costos equivalentes. Ver Efecto 1 para descripción completa.

Fórmula general
Pérdida adicional/persona/año = β_declive × ΔC Pérdida acumulada a T años = (β_declive × ΔC) × T
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada):
Pérdida/persona/año = 1.05 × 13.76 = 14.45 mL
FEV_1/año T=5 (2024): 14.45×5 = 72.3 mL (subclínico, detectable espirométricamente)
T=17 (2036): 14.45×17 = 245.7 mL ≈ umbral EPOC
T=39 (2058): 14.45×39 = 563.6 mL (>2× umbral clínico)
Resultado: Pérdida de 14.45 mL FEV_1/año por persona expuesta → umbral EPOC cruzado en 2036

Nota de limitaciones y supuestos
El FEV_1 no se convierte a casos ni a costo directo en los años 2019–2035 para evitar doble conteo con el Efecto 1 (EPOC). A partir de 2036, cuando la pérdida supera el umbral de 250 mL, los costos se trasladan al Efecto 1. El β_declive de Rice *et al*. (2015) fue estimado en adultos de mediana edad en EE. UU. (Framingham) —las tasas de declive natural del FEV_1 pueden diferir en una población tropical con mayor prevalencia de infecciones respiratorias y exposición a biomasa.

Mortalidad prematura

La mortalidad prematura representa la categoría de mayor peso económico del análisis, concentrando más del 99% del costo total estimado. Se cuantifica mediante la fórmula estándar OMS/EPA: ΔMuertes = TMB × Pop × β × ΔC, donde TMB es la tasa de mortalidad basal por causa, β es el coeficiente de mortalidad derivado de estudios de cohortes longitudinales, y ΔC es el incremento de concentración anual del contaminante. Cada muerte prematura se monetiza con el Valor Estadístico de la Vida (VSL) ajustado a Panamá, calculado a continuación.

Valor Estadístico de la Vida (VSL)

El VSL es el indicador estándar para monetizar reducciones en el riesgo de muerte en análisis de costo-beneficio de políticas ambientales. No representa el valor de una vida específica, sino la disposición agregada a pagar de la sociedad por reducir el riesgo de muerte prematura en un individuo estadístico. La OCDE (2025), en un metaanálisis de 277 estudios con más de 4,000 estimaciones de VSL a nivel global, proporciona valores de referencia por grupo de países y la metodología para ajustarlos a países no directamente representados en la muestra (Cuadro 25).

Cuadro 25. Estimación del Valor Estadístico de la Vida (VSL) para Panamá — Transferencia desde el valor de referencia OCDE (2025).

Parámetro	Valor	Fuente / Notas
VSL base OCDE (media)	USD 7.1 millones (USD 2022)	OCDE (2025). Meta-análisis de 277 estudios y 4,000 estimaciones. Grupo: países OCDE
PIB per cápita PPP Panamá 2022	USD 28,700 (PPP int.)	Banco Mundial, WDI 2024. data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.CD.
PIB per cápita PPP OCDE 2022	USD 48,200 (PPP int.)	OCDE average, WDI 2024. Promedio ponderado de países miembros de la OCDE.
Factor de escala (elasticidad = 1)	28,700 / 48,200 = 0.595	Ecuación 6.2 de OCDE (2025). Elasticidad ingreso = 1 recomendada por el meta-análisis para ajuste entre grupos de países. VSL_Panamá = VSL_OCDE × (PIB_PA / PIB_OCDE).
VSL Panamá (USD 2025)	USD 4.23 millones / muerte prematura	USD 7.1M × 0.595 = USD 4.23M. Ajustado a USD 2025 por CPI EE. UU. 2022→2025 (×1.075). Este valor se aplica a todas las categorías de mortalidad prematura del análisis.

Mortalidad prematura por $PM_{2.5}$ - todas las causas

La mortalidad prematura por exposición crónica a $PM_{2.5}$ es el efecto de mayor peso económico en el análisis. La evidencia epidemiológica sobre la relación entre exposición prolongada a partículas finas y mortalidad es robusta y consistente desde los estudios fundacionales de Pope *et al*. (2002) en la cohorte de la Sociedad Americana del Cáncer. Hoek *et al*. (2013), en una revisión y metaanálisis de estudios de cohortes de largo plazo, estimaron un exceso de riesgo del 6% (IC 95%: 4–8%) para mortalidad por todas las causas por cada 10 µg/m³ de incremento en la concentración anual de $PM_{2.5}$.

Para Cobre Panamá, la fórmula estándar OMS/EPA (ΔMuertes = TMB × Pop × β × ΔC) se aplica con la tasa de mortalidad basal por todas las causas en adultos ≥40 años en Panamá (850 por 100,000/año según GBD 2019) y el mismo ΔC de 13.76 µg/m³ usado en los efectos crónicos. El resultado se monetiza con el VSL ajustado a Panamá de USD 4.23 millones por muerte prematura, derivado de la metodología de la OCDE (2025). La latencia de 5 años implica que las primeras muertes atribuibles a la exposición de 2019 se contabilizan desde 2024. Dado que PM_{10} incluye $PM_{2.5}$, la mortalidad por PM_{10}/TSP se presenta como escenario alternativo y no se suma al total principal para evitar doble conteo (Cuadro 26).

Cuadro 26. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad prematura por $PM_{2.5}$ — Todas las causas.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
β all-cause $PM_{2.5}$	RR = 1.08 por 10 µg/m³ β = 0.00770 por µg/m³	Hoek *et al*., 2013	Meta-análisis de cohortes de largo plazo. Exceso de riesgo 6% (IC 95%: 4–8%) por 10 µg/m³. RR central = 1.08 —incluye mortalidad cardiovascular, respiratoria, cáncer y otras causas. β = ln(1.08)/10 = 0.00770.
TMB all-cause (≥40 años)	0.0085 muertes/ persona/año	GBD 2019 — Panamá GBD Collaborators, 2020	Tasa de mortalidad por todas las causas en adultos ≥40 años en Panamá: ~850 por 100,000/año. Fuente: GBD 2019, estimación para Panamá.
ΔC $PM_{2.5}$	13.76 µg/m³	Calculado: 18.76 − 5.0	Mismo ΔC que todos los efectos crónicos $PM_{2.5}$.
VSL Panamá	USD 4.23 millones / muerte (USD 2025)	OCDE (2025)	USD 7.1M × 0.595 = USD 4.23M. Ajustado a USD 2025 por CPI EE. UU. 2022→2025 (×1.075).

Fórmula general
ΔMuertes/año = TMB × Pop × β × ΔC ΔCosto/año = ΔMuertes × VSL
Sustitución con valores del año base 2024 (latencia aplicada):
ΔMuertes/año: 0.0085 × 45,959 × 0.00770 × 13.76
ΔMuertes × VSL: 40.2 × 4,230,000
Resultado: ~40 muertes prematuras adicionales/año → USD ~175,079,523 (año 2024)

Nota de limitaciones y supuestos
El β de Hoek *et al*. (2013) es un promedio global con heterogeneidad significativa entre estudios en diferentes regiones y décadas. La TMB del GBD 2019 para Panamá puede no reflejar la realidad de Donoso, donde el acceso a diagnóstico y registro de causa de muerte es limitado —el subregistro en zonas rurales panameñas es documentado. La latencia de 5 años es el límite inferior; algunos estudios de cohortes sugieren que los efectos sobre mortalidad se manifiestan desde 1–2 años de exposición sostenida, lo que podría adelantar el inicio del período de contabilización.

Mortalidad cardiovascular prematura por plomo (Pb)

El plomo ejerce efectos cardiovasculares en adultos a través de mecanismos que incluyen el aumento de la presión arterial, la rigidez arterial, la disfunción endotelial y la promoción de la aterosclerosis. Estudios basados en la cohorte NHANES III han demostrado que incluso concentraciones de plomo en sangre inferiores a 5 µg/dL —consideradas históricamente seguras— se asocian con incrementos significativos en la mortalidad cardiovascular. Menke *et al*. (2006), en un seguimiento de hasta 12 años de 13,946 adultos, documentaron que quienes presentaban niveles de BLL en el tercil superior (≥3.62 µg/dL) tenían un *hazard ratio* de mortalidad cardiovascular de 1.55 respecto al tercil inferior (<1.94 µg/dL).

Para Cobre Panamá, el cálculo requiere una cadena de conversiones: el incremento de Pb en aire (ΔC_Pb = 0.0063 µg/m³) se convierte a ΔBLL mediante el factor IEUBK (×1.85), y el ΔBLL resultante (0.01166 µg/dL) se usa para estimar el riesgo de mortalidad cardiovascular adicional a través del coeficiente β derivado de la relación dosis-respuesta de Menke *et al*. El efecto es pequeño en términos de número de muertes porque el ΔC_Pb es muy bajo —reflejo correcto de que una mina sin fundición genera emisiones de Pb mínimas— pero estadísticamente documentado incluso a esos niveles de exposición. La latencia de 10 años se aplica porque el plomo requiere acumulación en hueso para ejercer efectos cardiovasculares sostenidos, y los primeros casos se contabilizan desde 2029 (Cuadro 27).

Cuadro 27. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad cardiovascular prematura por plomo (Pb).

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
HR mortalidad CV por Pb	HR = 1.37 (>3.62 vs. <1.94 µg/dL BLL)	Menke *et al*., 2006	HR = 1.55 (IC 95%: 1.23–1.96) para mortalidad cardiovascular en NHANES III. Se usa HR conservador = 1.37 (all-CVD). β por µg/dL = ln(1.37) / (3.62−1.94) = 0.187 por µg/dL.
ΔBLL (adultos)	0.01166 µg/dL	USEPA IEUBK, 2007 + ΔC_Pb = 0.0063 µg/m³	0.0063 µg/m³ × 1.85 µg/dL por µg/m³ = 0.01166 µg/dL. Mismo factor de conversión que en efectos neurológicos, aplicado ahora a adultos para mortalidad CV.
TMB cardiovascular	0.0032 muertes/ persona/año	GBD 2019 — Panamá	~320 por 100,000/año para enfermedades cardiovasculares en adultos ≥40 años.
VSL Panamá	USD 4.23 millones / muerte (USD 2025)	OCDE (2025)	USD 7.1M × 0.595 = USD 4.23M. Ajustado a USD 2025 por CPI EE. UU. 2022→2025 (×1.075).

Fórmula general
β_Pb_CV = ln(HR) / (BLL_alto − BLL_bajo)
ΔMuertes = TMB_CV × Pop × (e^(β_Pb × ΔBLL) − 1)
ΔCosto = ΔMuertes × VSL
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada):
β_Pb = ln(1.37) / (3.62−1.94) = 0.187 por µg/dL
ΔMuertes = 0.0032 × 45,959 × (e^(0.187 × 0.01166) − 1) = 0.0032 × 45,959 × 0.002182 = ~0.321 muertes CV/año (Pop 2024)
ΔCosto = 0.321 × 4,230,000 = USD 1,357,830/año (2029, inicio latencia 10 años)
Resultado: ~0.32 muertes CV adicionales/año → USD ~1,357,830/año (2029)

Nota de limitaciones y supuestos
El β derivado de Menke *et al*. (2006) compara terciles extremos de BLL, no un incremento lineal continuo —su extrapolación a ΔBLL de 0.01166 µg/dL (mucho menor que la diferencia entre terciles de 1.68 µg/dL) implica linealidad en un rango no validado. Lanphear *et al*. (2018) confirman efectos sobre mortalidad CV incluso a BLL < 5 µg/dL, lo que respalda la dirección del efecto, aunque la magnitud a exposiciones tan bajas sigue siendo incierta. El uso del factor IEUBK (derivado para niños) en adultos introduce incertidumbre adicional —los adultos tienen menor absorción gastrointestinal de Pb que los niños.

Mortalidad por cáncer de pulmón — arsénico (As) inhalado

La mortalidad por cáncer de pulmón atribuible al arsénico inhalado es la consecuencia fatal del efecto carcinogénico ya cuantificado en la sección de efectos crónicos de morbilidad. El cáncer de pulmón tiene una de las tasas de fatalidad más elevadas entre los cánceres sólidos: la supervivencia a cinco años en América Latina y el Caribe es aproximadamente del 15%, lo que implica que el 85% de los casos diagnosticados fallecerá dentro de ese período. La mortalidad atribuible a As se calcula directamente a partir de los casos estimados mediante el método IUR, multiplicados por esta tasa de fatalidad.

A diferencia de la mortalidad por $PM_{2.5}$ —que se calcula año a año con tasas de mortalidad basal y coeficientes β— la mortalidad por As inhalado se expresa como un total acumulado de muertes durante los 39 años de operación (0.92 muertes) que se distribuye uniformemente desde el inicio de la latencia (2034) hasta 2074. El costo total acumulado de USD 3,891,600 se anualiza en USD 111,775 por año, valor fijo que no crece con la población porque el método IUR calcula

el riesgo para la cohorte expuesta durante la vida útil completa de la mina, no un riesgo anual incremental (Cuadro 28).

Cuadro 28. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad por cáncer de pulmón — Arsénico (As) inhalado.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
ΔCasos cáncer As (T=39)	~1.08 casos totales acumulados en 39 años	USEPA IRIS, 2012 (ya calculado en efectos crónicos)	IUR × ΔC_As × (ED/AT) × Pop_promedio. Ver cálculo completo en sección de efectos crónicos de morbilidad (Cáncer de pulmón por arsénico).
Tasa de fatalidad cáncer pulmón	85% a 5 años	SEER / GBD 2019 LAC	Supervivencia a 5 años del cáncer de pulmón en América Latina y el Caribe: ~15%. Por tanto, 85% de los casos diagnosticados fallecen dentro de los 5 años posteriores al diagnóstico.
ΔMuertes As (T=39)	~0.92 muertes acumuladas en 39 años	Calculado: 1.08 × 0.85	Muertes prematuras acumuladas durante los 39 años de operación atribuibles a As inhalado. Anualizado: 0.92 ÷ 39 = 0.024 muertes/año en promedio.
VSL Panamá	USD 4.23 millones / muerte (USD 2025)	OCDE (2025)	USD 7.1M × 0.595 = USD 4.23M. Ajustado a USD 2025 por CPI EE. UU. 2022→2025 (×1.075).

Fórmula general
ΔMuertes_As = ΔCasos × tasa_fatalidad
Costo_total = ΔMuertes × VSL Costo_anualizado = Costo_total / años_latencia_a_2074
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada):
ΔMuertes = 1.08 × 0.85 = 0.92 muertes acumuladas en T=39 años
Costo total = 0.92 × 4,230,000 = USD 3,891,600 acumulado
Costo/año desde 2034: 3,891,600 / (2074−2034+1) = USD 93,944/año → Se usa 111,775/año (ajustado a Pop promedio 51,956)
Resultado: 0.92 muertes acumuladas en 39 años → USD 111,775/año fijo desde 2034 (latencia 15 años)

Nota de limitaciones y supuestos
La tasa de fatalidad del 85% es un promedio para LAC que oculta variaciones por estadio al diagnóstico — en zonas rurales con acceso tardío a diagnóstico, la tasa podría ser mayor. Sin embargo, el número de casos es tan pequeño (~1 caso en 39 años) que las variaciones en la tasa de fatalidad tienen impacto mínimo en el resultado. Como se discutió en los efectos crónicos, el IUR de la USEPA podría sobreestimar el riesgo en comparación con estimaciones más recientes (TCEQ 2012), lo que reduciría proporcionalmente tanto los casos como las muertes estimadas.

Mortalidad prematura por PM_{10}/TSP — escenario alternativo

ESCENARIO ALTERNATIVO: Este efecto NO se suma al escenario principal ($PM_{2.5}$). PM_{10} incluye $PM_{2.5}$ — sumarlos implicaría doble conteo. Use este escenario en reemplazo del escenario $PM_{2.5}$, no en adición.

La mortalidad prematura por PM_{10} y partículas totales en suspensión (TSP) se presenta como escenario alternativo al escenario principal de $PM_{2.5}$, no como un efecto adicional. Este matiz metodológico es fundamental: dado que PM_{10} incluye la fracción fina ($PM_{2.5}$) más la fracción gruesa (2.5–10 µm), sumar ambas categorías implicaría contabilizar las mismas partículas finas dos veces. Por esta razón, el escenario PM_{10} reemplaza al escenario $PM_{2.5}$ —no se suma— y permite explorar si considerar también la fracción gruesa de partículas modifica significativamente los resultados.

El ΔC para PM_{10} se deriva de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ = 0.42 reportada por Rojano *et al*. (2015) en Cerrejón, lo que implica que la concentración de operación en PM_{10} es de 44.67 µg/m³ (= 18.76/0.42), y la línea base rural tropical en PM_{10} es de aproximadamente 10 µg/m³ (WHO AQG rural background). Orellano *et al*. (2020), en un metaanálisis específico para países de ingreso bajo y medio (LMICs), proporcionan los coeficientes β más apropiados para el contexto de Panamá, con RR de 1.04 por 10 µg/m³ para mortalidad por todas las causas y 1.06 para mortalidad cardiovascular (Cuadro 29).

Cuadro 29. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad prematura por PM_{10}/TSP — Escenario alternativo.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
β all-cause PM_{10}	RR = 1.04 por 10 µg/m³ β = 0.00392 por µg/m³	Hoek *et al*., 2013 Faustini *et al*., 2014	Meta-análisis: HR = 1.04 (IC 95%: 1.03–1.06) por 10 µg/m³ de PM_{10} para mortalidad por todas las causas. β = ln(1.04)/10 = 0.00392.
C operación PM_{10}	44.67 µg/m³	Calculado desde Rojano *et al*., 2015	Derivado de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ = 0.42 en Cerrejón: C_op_PM_{10} = 18.76/0.42 = 44.67 µg/m³.
C línea base PM_{10}	10 µg/m³	WHO AQG, 2021 Fondo rural tropical	Concentración de fondo rural para PM_{10} en zonas tropicales sin influencia industrial. La guía anual de PM_{10} de la OMS 2021 es 15 µg/m³ para áreas urbanas; se usa 10 µg/m³ como referencia rural.
ΔC PM_{10}	34.67 µg/m³	Calculado: 44.67 − 10.0	Incremento de concentración anual de PM_{10} atribuible a la operación. Mayor que ΔC de $PM_{2.5}$ (13.76 µg/m³) porque incluye la fracción gruesa.
TMB all-cause (≥40 años)	0.0085 muertes/ persona/año	GBD 2019 — Panamá	Mismo que el escenario $PM_{2.5}$.
VSL Panamá	USD 4.23 millones / muerte (USD 2025)	OCDE (2025)	USD 7.1M × 0.595 = USD 4.23M. Ajustado a USD 2025 por CPI EE. UU. 2022→2025 (×1.075).

Fórmula general
ΔMuertes/año (PM_{10}) = TMB × Pop × β_PM_{10} × ΔC_PM_{10} [ESCENARIO ALTERNATIVO — no sumar con $PM_{2.5}$]
Sustitución con valores del año base (latencia aplicada):
All-cause: 0.0085 × 45,959 × 0.00392 × 34.67 = ~53.1 muertes/año (Pop 2024)
Costo all-cause: 53.1 × 4,230,000 = USD 224.6 millones/año (2024)
Resultado: ~53 muertes/año (escenario PM_{10}) → USD 224.6 millones/año (2024)

Nota de limitaciones y supuestos
Este escenario no se suma al escenario $PM_{2.5}$ —es un escenario alternativo que reemplaza a $PM_{2.5}$ en el total. La fracción gruesa de PM ($PM_{10-2.5}$) tiene menor capacidad de penetración pulmonar que $PM_{2.5}$ y su asociación con mortalidad es más débil y menos consistente en la literatura. El ΔC de PM_{10} derivado de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ de Cerrejón introduce incertidumbre adicional, ya que esta relación varía con el tipo de minería, el clima y la distancia a la fuente.

El consolidado de los impactos en la salud por contaminación atmosférica 2019–2074 se presentan en el Anexo 4. Los cuadros se encuentran divididos en cinco bloques de años para permitir su lectura en formato vertical. Cada bloque contiene las 14 filas de efectos (5 agudos + 5 crónicos + 3 mortalidad + 1 alternativo) más el total consolidado.

SAL-02: INTOXICACIÓN HUMANA POR CONTAMINACIÓN HÍDRICA

Rutas de exposición a contaminantes hídricos

La evaluación del impacto en salud por contaminación hídrica atribuible a la operación de Cobre Panamá considera tres rutas de exposición diferenciadas, cada una con sus propios contaminantes relevantes, mecanismos de transferencia y poblaciones en riesgo. La distinción entre rutas no es meramente clasificatoria —refleja diferencias fundamentales en la dosis que recibe cada persona, el tipo de contaminante dominante y el método epidemiológico disponible para cuantificar el efecto.

i) Ruta 1: Ingestión directa de agua superficial

La población residente en las cuencas hidrográficas directamente afectadas por la operación minera —que comprenden los ríos Veraguas, Belén, Coclé del Norte y Miguel de la Borda, con una población directamente expuesta de 33,715 personas según el Censo 2023— depende históricamente de ríos y quebradas para el consumo doméstico de agua, dado el limitado acceso a sistemas de agua potable tratada en estas comunidades rurales del Distrito de Donoso. Esta ruta representa la vía de exposición crónica más directa: las personas ingieren diariamente entre 1 y 2 litros de agua que puede contener arsénico, plomo, manganeso y cadmio disueltos provenientes del drenaje ácido de mina y la lixiviación de los relaves hacia las corrientes superficiales. Los efectos en salud son acumulativos —la exposición sostenida durante años genera daño neurológico, renal y carcinogénico que se manifiesta con latencias de 5 a 15 años. Es la ruta de mayor impacto cuantificado en este análisis, dominada por los efectos neurológicos del plomo y el manganeso en niños menores de seis años, cuya mayor absorción gastrointestinal de metales los convierte en la subpoblación más vulnerable.

ii) Ruta 2: Ingestión de agua subterránea

La filtración de contaminantes desde la presa de relaves y el área del tajo hacia los acuíferos subterráneos representa una vía de exposición adicional para las comunidades que utilizan pozos y nacientes como fuente de agua. A diferencia de los ríos —donde la dilución y la autodepuración reducen parcialmente las concentraciones de metales—, las aguas subterráneas en zonas próximas a los relaves pueden presentar concentraciones más elevadas y persistentes, dado que el tiempo de residencia del agua en el suelo es mayor y los mecanismos de atenuación natural actúan con mayor lentitud. Metodológicamente, esta ruta se incorpora al análisis como parte del escenario conservador de la Ruta 1: al utilizar concentraciones de operación basadas en valores de referencia de minas de pórfido de cobre con drenaje ácido activo, se asume implícitamente que el total de exposición incluye tanto la fuente superficial como la contribución subterránea. Esta decisión metodológica se declara expresamente como supuesto conservador, y los resultados deben interpretarse como una cota superior del impacto real en tanto no se disponga de datos de monitoreo continuo de las estaciones San Benito y río Caimito confirmadas en la auditoría de MiAmbiente de 2026.

iii) Ruta 3: Consumo de peces contaminados por bioacumulación

El consumo de pescado de río constituye una fuente importante de proteína animal para las comunidades ribereñas de Donoso, con una ingesta estimada de 54 gramos por persona por día —consistente con los patrones documentados por Díaz *et al*. (2020) en comunidades ribereñas del Caribe colombiano con condiciones socioeconómicas y ecológicas análogas. Esta ruta es cualitativamente distinta a las anteriores por tres razones fundamentales.

En primer lugar, los contaminantes relevantes no son exactamente los mismos que en el agua: el metilmercurio —prácticamente ausente en agua limpia— se genera cuando el drenaje ácido de mina reduce el pH y el oxígeno disuelto de los cuerpos de agua, favoreciendo la actividad de bacterias sulfatorreductoras que convierten el mercurio inorgánico natural del sedimento en metilmercurio biodisponible. Este compuesto se bioacumula de forma extremadamente eficiente en la cadena alimentaria acuática con factores de bioacumulación de hasta un millón, lo que hace que pequeñas concentraciones en el agua se traduzcan en concentraciones clínicamente relevantes en el tejido muscular de los peces.

En segundo lugar, las dosis resultantes pueden superar ampliamente a las de la ingestión directa de agua: a tasas de consumo moderadas de 54 g/día, el metilmercurio acumulado en peces no piscívoros de los ríos Caimito y Botija alcanza concentraciones que generan un cociente de peligro superior a 1 respecto a la dosis de referencia oral de la EPA, indicando riesgo neurológico incluso en el escenario conservador. En tercer lugar, los efectos neurológicos del metilmercurio son irreversibles desde la etapa fetal y durante los primeros años de vida, período en que el sistema nervioso central es más vulnerable. Para esta ruta se cuantifican el metilmercurio como principal efecto neurológico en niños, así como el arsénico y el plomo acumulados en tejido muscular de peces, estimados mediante los factores de bioacumulación documentados en la literatura científica aplicados al diferencial de concentración atribuible a la operación de Cobre Panamá respecto a la línea base natural.

Población expuesta a contaminación hídrica

La determinación de la población expuesta a los impactos de la contaminación hídrica generada por la operación de Cobre Panamá se realizó a partir de la delimitación de las cuencas hidrográficas afectadas por el área de influencia directa de la mina, utilizando como base cartográfica los datos del XII Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda 2023 del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) de la República de Panamá, georeferenciados a nivel de cuenca hidrográfica.

A diferencia de la contaminación atmosférica —cuya área de influencia se determina por la dispersión de partículas en el aire y cubre los tres distritos de La Pintada, Donoso y Omar Torrijos—, la contaminación hídrica sigue las cuencas de drenaje naturales aguas abajo de la operación minera. Esta distinción es metodológicamente relevante: no toda la población del área de influencia atmosférica está expuesta a los contaminantes hídricos. La delimitación por cuencas permite identificar con mayor precisión las comunidades que dependen de las corrientes superficiales afectadas para su consumo de agua y sus actividades de pesca.

El análisis identifica dos categorías de población según el nivel de exposición esperado:

La población directamente expuesta comprende los residentes de las cuencas que reciben de forma directa los efluentes y el drenaje ácido de mina provenientes de la operación. Esta categoría incluye cinco cuencas hidrográficas con una población total de 33,715 personas según el Censo 2023. El río Coclé del Norte (#105) concentra la mayor parte de esta población con 26,014 habitantes, seguido por el río Miguel de la Borda (#109) con 5,484 habitantes, el río Belén y el área entre el río Belén y el río Coclé del Norte (#103) con 907 habitantes, el río entre Coclé del Norte y Miguel de la Borda (#107) con 853 habitantes, y el río Veraguas (#101) con 457 habitantes. Esta población constituye la base para el cálculo cuantitativo de los efectos en salud de las Rutas 1 y 3.

La población en riesgo indirecto comprende los 121,467 habitantes de la cuenca del río Grande (#134), que recibe aguas abajo los aportes de las cuencas directamente afectadas. Esta población no está expuesta a las concentraciones de contaminantes presentes en los puntos más próximos a la fuente emisora, dado que la dilución natural del río Grande reduce significativamente las concentraciones de metales a medida que las aguas se alejan de la mina. Sin embargo, su inclusión en el Área de Exposición e Influencia (AEI) está justificada por la continuidad hidrológica entre las cuencas afectadas y el río Grande. La población total del AEI asciende a 155,182 personas (Cuadro 30).

Cuadro 30. Población expuesta por cuenca hidrográfica — Censo 2023.

ID	Cuenca hidrográfica	Población (Censo 2023)	Categoría
#101	Río Veraguas	457	Exposición directa
#103	Río Belén y entre río Belén y río Coclé del Norte	907	Exposición directa
#107	Río entre Coclé del Norte y Miguel de la Borda	853	Exposición directa
#109	Río Miguel de la Borda	5,484	Exposición directa
#105	Río Coclé del Norte	26,014	Exposición directa
	Subtotal — población directamente expuesta	33,715	Rutas 1 y 3
#134	Río Grande	121,467	Riesgo indirecto
	TOTAL — Área de Exposición e Influencia (AEI)	**155,182**	

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) — XII Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda 2023. Elaboración propia a partir de datos georeferenciados por cuenca hidrográfica.

Para la proyección de la población a lo largo del período de análisis 2019–2074, se aplicaron tasas de crecimiento diferenciadas según la dinámica demográfica de cada área. A la población directamente expuesta de las cuencas del Distrito de Donoso se aplicó la tasa de crecimiento calculada para dicho distrito mediante el método de crecimiento compuesto entre los Censos 2010 y 2023, equivalente a −0.32% anual, que refleja el proceso de despoblamiento rural característico de la zona. A la población en riesgo indirecto del río Grande, correspondiente a la provincia de Colón, se aplicó la tasa de crecimiento provincial de +0.83% anual, registrada por el INEC para el período intercensal 2010–2023. Bajo estos supuestos, la población directamente expuesta decrece de 33,715 personas en 2023 a aproximadamente 28,047 en 2074, mientras que la población en riesgo indirecto crece de 121,467 a aproximadamente 187,423 personas en el mismo período.

En el Anexo 5 se presenta la proyección anual completa de la población expuesta a contaminación hídrica para el período 2019–2074. La población directamente expuesta corresponde a los habitantes de las cinco cuencas con exposición directa al drenaje de la mina (33,715 personas en el Censo 2023), proyectada con tasa −0.32%/año (Donoso). La población en riesgo indirecto corresponde a la cuenca del río Grande (121,467 en 2023), proyectada con tasa +0.83%/año (Colón).

Ruta 1: Ingestión de agua superficial · 2019–2074

La operación de Cobre Panamá —una mina de pórfido de cobre a cielo abierto sin pirometalurgia— genera contaminación hídrica a través de dos mecanismos principales: el

drenaje ácido de mina (AMD), producido cuando los minerales sulfurados del yacimiento se exponen al agua y al oxígeno generando ácido sulfúrico que moviliza metales pesados hacia los cursos de agua; y la filtración desde la presa de relaves, que transfiere metales y reactivos de procesamiento hacia las aguas subterráneas y superficiales. El Cuadro 31 presenta los contaminantes identificados y su prioridad en el análisis de salud.

Cuadro 31. Contaminantes identificados y su prioridad en el análisis de salud.

Prioridad	Contaminante	Fuente en la mina	Efecto en salud vía agua
Alta	Arsénico (As)	Lixiviación del tajo y relaves	Cáncer (piel, vejiga, pulmón), neuropatía
Alta	Cobre (Cu)	AMD, efluentes de proceso	Daño hepático, gastroenteritis
Alta	Plomo (Pb)	Relaves, sedimentos	Daño neurológico (niños), cardiovascular (adultos)
Alta	Manganeso (Mn)	AMD, aguas subterráneas	Daño neurológico (manganismo)
Media	Cadmio (Cd)	Relaves, AMD	Daño renal crónico
Media	Zinc (Zn)	AMD	Gastrointestinal, daño hepático
Media	Molibdeno (Mo)	Procesos de flotación	Daño hepático, articular (gota)
Baja	Níquel (Ni)	Roca de desecho	Dermatitis, carcinogénico
Contextual	Sólidos en suspensión (TSS)	Erosión, AMD	Turbidez, portadores de metales
Contextual	pH ácido	AMD	Potencia toxicidad de todos los metales

El método de cuantificación varía según el tipo de contaminante. Para los carcinógenos (arsénico) se utiliza el Cancer Slope Factor (CSF) oral de la USEPA. Para los neurotóxicos (plomo y manganeso) se utilizan coeficientes β derivados de estudios epidemiológicos de cohortes de niños. Para los contaminantes con efectos no carcinogénicos con umbral (cadmio) se utiliza el método del Hazard Quotient (HQ). Los contaminantes con HQ < 1 en condiciones típicas de operación (zinc, molibdeno, níquel) se excluyen del total cuantificado y se documentan cualitativamente.

Arsénico (As) - Cáncer de vejiga y pulmón por ingestión de agua

El arsénico inorgánico constituye el contaminante de mayor prioridad en la evaluación de impactos hídricos de Cobre Panamá, tanto por la solidez de la evidencia epidemiológica disponible como por la gravedad de sus efectos carcinogénicos. La Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer (IARC) clasifica el arsénico inorgánico como carcinógeno humano del Grupo 1, con evidencia suficiente de causalidad para cáncer de vejiga, pulmón y piel. La vía oral por ingestión de agua contaminada es la principal ruta de exposición crónica documentada en la literatura, con estudios seminales en Taiwan, Bangladesh, Argentina y Chile que establecen relaciones dosis-respuesta robustas a concentraciones en el rango de 10 a 1,000 µg/L.

Para el presente análisis, el riesgo de cáncer por ingestión de As se cuantifica mediante el Cancer Slope Factor oral de la USEPA, actualizado en enero de 2025 mediante la revisión del IRIS que incrementó el valor de 1.5 a 32 por mg/kg-día, basado en un meta-análisis bayesiano jerárquico de cáncer de vejiga y pulmón en múltiples cohortes. Este cambio significa que el riesgo estimado con el Cancer Slope Factor actualizado es más de 20 veces mayor que con el valor histórico, lo

que refleja una comprensión más completa de la toxicidad del arsénico a bajas concentraciones. En el análisis se reportan ambos valores como escenario vigente (Cancer Slope Factor = 32) y escenario conservador histórico (Cancer Slope Factor = 1.5), para permitir la comparación con estudios anteriores (Cuadro 32).

Cuadro 32. Parámetros y supuestos metodológicos: Arsénico (As) — Cáncer de vejiga y pulmón por ingestión de agua.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Cancer Slope Factor oral (As)	32 $(mg/kg/día)^{-1}$ (vigente 2025) 1.5 $(mg/kg/día)^{-1}$ (histórico)	USEPA IRIS, enero 2025	Cancer Slope Factor oral actualizado en enero 2025 mediante meta-análisis bayesiano jerárquico. El valor histórico de 1.5 se basaba en cáncer de piel en Taiwán. El valor actualizado incorpora cáncer de vejiga y pulmón en múltiples países.
C operación (As)	10 µg/L (valor central) Rango: 5–50 µg/L	Earthworks, 2022 EIA Minera Panamá, 2011	En el 92% de minas de pórfido de cobre en EE. UU., los sistemas de captación fallaron en controlar la filtración de agua contaminada. Se usa 10 µg/L = MCL EPA como valor central conservador, pending datos reales de estaciones Caimito y Botija.
C línea base (As)	1 µg/L	WHO AQG 2021 EIA Minera Panamá, 2011	Fondo natural de As en agua superficial en cuencas tropicales sin influencia minera: 0.5–2 µg/L. Panamá no reporta As geogénico elevado en Donoso.
Ingesta de agua	2 L/día (adultos) 1 L/día (niños)	WHO, 2011	Consumo diario estándar de agua para adultos según la OMS. Para niños ≤6 años se usa 1 L/día.
Peso corporal	58.6 kg	INEC Panamá / OPS LAC	Peso corporal promedio para población adulta en América Latina.
Costo por caso	USD 3,398/caso/año (USD 2025)	Linares *et al.*, 2022 Gómez *et al.*, 2020	Vejiga: USD 3,229/caso/año (Colombia, PPP 2025). Pulmón: USD 3,651/caso/año. Promedio ponderado 60% vejiga / 40% pulmón: 3,398/caso/año. Costo anual directo de atención médica.

Fórmula
$\Delta Costo/año = CSF \times (\Delta C \times Ingesta / BW) \times (1/70) \times Pop \times Costo$
Sustitución (año base 2019 / latencia aplicada):
$= 32 \times (0.009 \times 2 / 58.6) \times (1/70) \times Pop \times 3{,}398 = 1.403 \times 10^{-4} \times Pop \times USD\ 3{,}398$
Resultado: ~ USD 23,008/año (Pop 2029 = 48,220) · Latencia: 10 años → desde 2029

Nota de limitaciones y supuestos
El CSF de 32 $(mg/kg/día)^{-1}$ aplica en el rango lineal de dosis bajas (<0.2 µg/kg-día); a dosis mayores la relación se vuelve no lineal. La concentración de operación de 10 µg/L es un supuesto conservador basado en el MCL de la EPA —los datos reales de las estaciones de monitoreo San Benito y río Caimito (auditoría MiAmbiente 2026) permitirían refinar este valor. Panamá no cuenta con datos de incidencia de cáncer de vejiga por municipio que permitan validar la Inc_0 del GBD.

Plomo (Pb) - Daño neurológico en niños por ingestión de agua

El plomo constituye el contaminante hídrico de mayor impacto económico cuantificado en este análisis, superando al arsénico en varios órdenes de magnitud. Esto se explica por tres factores concurrentes: la ausencia de umbral seguro para sus efectos neurológicos en niños, la alta absorción gastrointestinal de plomo en menores de seis años (40–50% del Pb ingerido frente al 3–10% en adultos), y el elevado costo de la pérdida de productividad vitalicia asociada a cada punto de cociente intelectual perdido.
A diferencia de la evaluación por inhalación —donde se usa el factor de conversión aire→sangre del modelo IEUBK de la EPA para adultos—, la exposición oral en niños utiliza un factor específico de conversión agua→sangre (0.375 µg/dL BLL por µg Pb/día ingerido) derivado del mismo modelo IEUBK para la vía de ingestión de agua. La concentración de operación de 15 µg/L se basa en mediciones documentadas en comunidades aguas abajo de minas de cobre tropicales con presencia de relaves, y coincide exactamente con el nivel de acción de la EPA para plomo en agua potable —lo que evidencia que incluso en el umbral regulatorio mínimo el impacto neurológico en niños es sustancial (Cuadro 33).

Cuadro 33. Parámetros y supuestos metodológicos: Plomo (Pb) — Daño neurológico en niños por ingestión de agua.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
β (niños)	−0.513 puntos CI / µg/dL BLL	Lanphear *et al.*, 2005 PMC1257652	Pooled analysis de 1,333 niños en 7 cohortes internacionales. Sin umbral seguro documentado. IC 95%: −0.38 a −0.65 puntos CI por µg/dL. Mismo β que efectos atmosféricos.
Factor agua→sangre	0.375 µg/dL BLL por µg Pb/día ingerido	USEPA IEUBK, 2007 FDA 2023	Factor IEUBK por defecto para exposición vía agua en niños. ΔBLL = C_agua (µg/L) × 1 L/día × 0.375.
C operación (Pb)	15 µg/L	Mubarak *et al.*, 2016 mina Kilembe, Uganda ATSDR Pb profile 2020	Documentado en aguas del catchment de mina de cobre tropical con relaves. Rango típico minas pórfido trópico húmedo: 5–50 µg/L. Valor central = nivel de acción EPA para agua potable.
C línea base (Pb)	2 µg/L	WHO AQG 2011 EIA Minera Panamá, 2011	Fondo natural Pb en cuencas tropicales sin influencia minera: 1–5 µg/L.
Ingesta (niños ≤6)	1 L/día	WHO, 2011	Ingesta estándar para niños pequeños. Solo niños ≤6 años son la población objetivo.
Pop niños ≤6 años	~11% de la población total	INEC Panamá XII Censo 2023	Grupo 0–14 años = 25.2% nacional. Para 0–6 años: ~10–11%, ajustado al alza para Donoso (mayor fecundidad rural).
Costo por punto CI	USD 11,900/punto CI/niño (USD 2025)	Trasande *et al.*, 2013 PMC3764081	Valor presente de pérdida de productividad vitalicia. Publicado USD 2007 —ajustado a USD 2025 por CPI ×1.47.

Fórmula
ΔBLL = ΔC × 1 L/día × 0.375 ΔCI/niño = ΔBLL × 0.513 ΔCosto/año = ΔCI × (Pop × 0.11) × USD 11,900
Sustitución (año base 2019 / latencia aplicada):
ΔBLL = 13 × 1 × 0.375 = 4.875 µg/dL ΔCI = 4.875 × 0.513 = 2.501 puntos CI por niño ΔCosto = 2.501 × (Pop × 0.11) × 11,900
Resultado: ~USD 143,753,894/año (Pop 2019 = 43,912) · Sin latencia → desde 2019

Nota de limitaciones y supuestos
El factor de conversión 0.375 µg/dL por µg/día fue desarrollado para niños estadounidenses —su aplicabilidad directa a niños rurales tropicales de Donoso implica suponer similitud en patrones de actividad, ingesta de polvo y absorción. La concentración de 15 µg/L es un valor de referencia de la literatura —los datos reales del río Caimito podrían ser menores (operación normal sin AMD activo) o mayores (AMD con lluvias extremas). El 11% de niños ≤6 años es una estimación derivada del Censo 2023 y no un dato directo para Donoso.

Manganeso (Mn) - Daño neurológico en niños por ingestión de agua

El manganeso es el segundo contaminante de mayor impacto cuantificado en este análisis, con efectos neurológicos en niños que siguen una relación dosis-respuesta log-lineal directamente con la concentración en el agua de consumo, sin necesidad de conversión a concentración en sangre. Este aspecto lo diferencia metodológicamente del plomo y lo hace más sencillo de cuantificar: el coeficiente β de Bouchard *et al*. (2011) —derivado de una cohorte de escolares de Quebec expuestos a manganeso en agua potable— expresa directamente la pérdida de cociente intelectual en función del logaritmo de la concentración en agua, con un efecto de −2.4 puntos CI por cada incremento de 10 veces en la concentración.

El manganeso es movilizado desde las rocas del yacimiento por el drenaje ácido de mina y puede alcanzar concentraciones elevadas en los acuíferos y cursos de agua aguas abajo de operaciones mineras de pórfido de cobre, especialmente bajo condiciones de AMD activo. El nivel de asesoramiento de salud no regulatorio de la EPA para manganeso en agua potable es 300 µg/L —concentración que se usa como valor central de operación en el presente análisis y que es consistente con las mediciones documentadas en ríos con AMD natural aguas abajo de depósitos de pórfido de cobre en contextos geológicos similares (Cuadro 34).

Cuadro 34. Parámetros y supuestos metodológicos: Manganeso (Mn) — Daño neurológico en niños por ingestión de agua.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
β (niños)	−2.4 puntos CI por incrementos de 10× en C_Mn	Bouchard *et al*., 2011 PMC3114831 DOI: 10.1289/ehp.1002321	Cohorte de escolares de Quebec expuestos a Mn en agua potable. IC 95%: −3.9 a −0.9. El β se expresa por logaritmo de la concentración — metodología distinta al Pb.
Modelo dosis-respuesta	Log-lineal: ΔCI = −2.4 × $\log_{10}$(C_op/C_base)	Bouchard *et al*., 2011	Efecto calculado sobre el cambio en $\log_{10}$ de la concentración, no sobre el incremento absoluto.
C operación (Mn)	300 µg/L	Li *et al*., 2022 río Rongna, China PMC8989334	Concentraciones medias de Mn aguas abajo de pórfido de cobre con AMD natural: 867 µg/L. Se usa 300 µg/L = Health Advisory Level EPA como valor central conservador.
C línea base (Mn)	20 µg/L	WHO AQG 2011 ATSDR 2012	Fondo natural Mn en cuencas tropicales: 10–50 µg/L. Efectos adversos en neurocomportamiento documentados incluso por debajo del SMCL EPA (50 µg/L).
Pop niños ≤6 años	~11% de la población total	INEC Panamá XII Censo 2023	Grupo 0–14 años = 25.2% nacional. Para 0–6 años: ~10–11%, ajustado al alza para Donoso (mayor fecundidad rural).

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Costo por punto CI	USD 11,900/punto CI/niño (USD 2025)	Trasande *et al*., 2013	Valor presente de pérdida de productividad vitalicia. Publicado USD 2007 —ajustado a USD 2025 por CPI ×1.47.

Fórmula
$\Delta CI/niño = 2.4 \times \log_{10}(C_op / C_base)$ $\Delta Costo/año = \Delta CI \times (Pop \times 0.11) \times USD\ 11{,}900$
Sustitución (año base 2019 / latencia aplicada):
$\Delta CI = 2.4 \times \log_{10}(300/20) = 2.4 \times 1.176 = 2.824$ puntos CI por niño $\Delta Costo = 2.824 \times (Pop \times 0.11) \times USD\ 11{,}900$
Resultado: ~USD 162,248,203/año (Pop 2019 = 43,912) · Sin latencia → desde 2019

Nota de limitaciones y supuestos
El β de Bouchard *et al*. (2011) fue estimado en niños de Quebec, Canadá —contexto climático y socioeconómico diferente a Donoso. Estudios posteriores confirman la dirección del efecto pero con heterogeneidad en la magnitud. La relación log-lineal implica que el efecto es mayor a concentraciones bajas —lo que refuerza la ausencia de umbral seguro. La concentración de 300 µg/L puede ser conservadora: bajo AMD activo las concentraciones pueden ser mucho mayores, y bajo operación sin AMD pueden ser menores.

Cadmio (Cd) — Enfermedad renal crónica por ingestión de agua

El cadmio es el metal con el RfD oral más bajo de todos los analizados (0.0005 mg/kg/día), lo que refleja su extremada toxicidad renal crónica incluso a concentraciones muy bajas. Su efecto crítico es la disfunción tubular renal proximal —que se manifiesta como proteinuria y, en exposiciones prolongadas, como enfermedad renal crónica (ERC) avanzada— documentado en estudios poblacionales en Japón (enfermedad de Itai-Itai), Bélgica y China en áreas con contaminación por Cd.

En el contexto de Cobre Panamá, el cadmio se genera como subproducto en la lixiviación de los relaves y el drenaje ácido de mina. Su cuantificación en este análisis se realiza mediante el método del Hazard Quotient (HQ), comparando la dosis diaria crónica (CDI) con el RfD. En el escenario de operación normal (C_Cd = 5 µg/L), el HQ es 0.33 —por debajo del umbral de riesgo de 1. Sin embargo, bajo condiciones de AMD moderado (C_Cd = 30 µg/L), el HQ supera 1 (HQ = 2.05), indicando riesgo de daño renal en la población expuesta. Panamá se encuentra entre los países con mayor prevalencia de ERC en el mundo —12% entre adultos—, lo que eleva el número de casos basales sobre los que el Cd ejerce su efecto incremental (Cuadro 35).

Cuadro 35. Parámetros y supuestos metodológicos: Cadmio (Cd) — Enfermedad renal crónica por ingestión de agua.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
RfD oral (Cd)	0.0005 mg/kg/día	USEPA IRIS ATSDR 2012	RfD más bajo de todos los metales analizados. Basado en proteinuria significativa como efecto crítico en humanos.
C operación (Cd)	5 µg/L (operación normal) 30 µg/L (AMD moderado)	Seal *et al*., 2007 — USGS Elizabeth Copper Mine, VT ATSDR 2012	Minas de pórfido activas con AMD moderado: 1–10 µg/L en operación normal. Se modelan dos escenarios: normal (HQ < 1) y AMD (HQ > 1).
C línea base (Cd)	0.2 µg/L	WHO AQG 2011 EIA Minera Panamá, 2011	Fondo natural Cd en cuencas tropicales: 0.05–0.5 µg/L.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
HQ (escenario normal)	0.33	Calculado: CDI/RfD CDI = 1.638×10^{-4} mg/kg/día	HQ < 1 → sin riesgo cuantificable en operación normal.
HQ (escenario AMD)	2.05	Calculado con C = 30 µg/L CDI = 1.024×10^{-3} mg/kg/día	HQ > 1 → riesgo de daño renal en AMD moderado.
Inc_o ERC	0.0035 casos/persona/año	GBD 2019 — Panamá	Prevalencia ERC en Panamá: 12% adultos. Incidencia: ~350 por 100,000/año.
Fracción atribuible Cd	0.075 (punto medio 5–10%)	Satarug *et al*., 2025 Toxics	Para exposición ambiental por agua, la fracción atribuible al Cd en ERC se estima en 5–10%.
Costo por caso ERC	USD 17,241/caso/año (USD 2025)	Cusumano *et al*., 2024 Medscape LAC	Costo mediano de hemodiálisis en América Latina: USD 17,241 (IC 95%: USD 14,275–USD 25,861). ERC terminal.

Fórmula
$\Delta Casos = Pop \times Inc_o_ERC \times FA \times f(HQ)$ donde $f(HQ) = (HQ-1)/HQ$
Sustitución (año base 2019 / latencia aplicada):
Escenario normal (HQ=0.33): ΔCasos = 0 → USD 0/año Escenario AMD (HQ=2.05): $f(HQ) = (2.05-1)/2.05 = 0.512$
$\Delta Casos = Pop \times 0.0035 \times 0.075 \times 0.512$
Resultado: ~ USD 101,754/año en escenario AMD · Sin latencia → desde 2019

Nota de limitaciones y supuestos
El cadmio solo genera casos cuantificables en el escenario de AMD moderado (C > 15 µg/L). En operación normal el HQ es 0.33 y el costo es cero. La fracción atribuible de 5–10% es una estimación de la literatura global que puede no reflejar la distribución real de causas de ERC en Donoso, donde el acceso al diagnóstico es limitado. El costo de USD 17,241 corresponde a ERC terminal con hemodiálisis —los estadios tempranos tienen costos menores (~USD 3,500–USD 5,000/año).

Zinc, Molibdeno y Níquel

Se evaluó el riesgo no carcinogénico mediante el cociente de peligro (HQ) para tres contaminantes adicionales presentes en el agua de minas de cobre: zinc (Zn), molibdeno (Mo) y níquel (Ni). En los tres casos, las concentraciones típicas documentadas en ríos aguas abajo de minas de pórfido de cobre en trópico húmedo generan HQ por debajo del umbral de riesgo de 1, por lo que estos contaminantes no se incluyen en la cuantificación económica del impacto en salud.

El zinc presenta el HQ más bajo de los tres (HQ = 0.054), resultado de aplicar su dosis de referencia oral de 0.30 mg/kg/día —la más permisiva entre todos los metales evaluados en este análisis— a concentraciones típicas de 500 µg/L en aguas de drenaje ácido. La amplia tolerancia fisiológica del organismo humano al zinc, reflejada en esa RfD elevada, descarta su cuantificación en cualquier escenario realista de operación minera de pórfido de cobre.

El molibdeno arroja HQ = 0.328 con concentraciones típicas de 50 µg/L y una RfD de 0.005 mg/kg/día. Un factor geoquímico adicional refuerza su exclusión: a diferencia de la mayoría de metales en ambientes de drenaje ácido, el molibdeno presenta baja movilidad en condiciones

de pH reducido, lo que limita su concentración en aguas superficiales y explica por qué sus niveles raramente alcanzan el límite máximo contaminante de 0.07 mg/L.

El níquel registra HQ = 0.043 a partir de concentraciones de 28 µg/L documentadas en el río Rongna, China, afectado por minería de pórfido de cobre de características análogas a Cobre Panamá (Li *et al*., 2022; RfD = 0.02 mg/kg/día). Las concentraciones de níquel en ríos impactados por este tipo de yacimiento son sistemáticamente insuficientes para aproximarse al umbral de riesgo por ingestión de agua.

Los tres metales se documentan como riesgo cualitativo en el análisis de escenarios extremos: una falla de la presa de relaves o un episodio de drenaje ácido severo podría elevar sus concentraciones lo suficiente para superar HQ = 1, circunstancia que justifica su monitoreo continuo aun cuando no se incluyan en la valoración económica base de este informe.

Ruta 3: Consumo de peces contaminados por bioacumulación

La Ruta 3 cuantifica el impacto en salud derivado del consumo de peces y mariscos de los ríos Caimito y Botija[8], cuyos tejidos acumulan contaminantes provenientes de la operación de Cobre Panamá a través de la cadena alimentaria acuática. A diferencia de las rutas de ingestión directa de agua, esta vía involucra factores de bioacumulación que pueden amplificar las concentraciones entre 10 y un millón de veces respecto al agua —lo que convierte al metilmercurio en el contaminante dominante de esta ruta, aunque la mina no lo emite directamente, sino que active su formación a través del drenaje ácido de mina. La metodología conecta explícitamente la contaminación de la mina con el efecto en salud mediante el cociente: $\Delta C_pez = BAF \times \Delta C_agua$, usando los diferenciales de concentración en agua ya calculados en la Ruta 1.

Arsénico en peces (As)

El arsénico en tejido de peces representa la contribución de la Ruta 3 al efecto carcinogénico ya cuantificado en la Ruta 1. A diferencia de la ingestión directa de agua —donde la concentración de arsénico puede ser relativamente alta pero la ingesta diaria de agua es limitada—, la vía de peces involucra concentraciones mucho menores en el tejido muscular, pero con una ingesta diaria potencialmente mayor en comunidades con alta dependencia de la pesca artesanal.

La metodología central de la Ruta 3 para el arsénico es la misma que en la Ruta 1: se usa el Cancer Slope Factor (CSF) oral actualizado de la USEPA (32 por mg/kg-día, enero 2025), pero aplicado a la dosis diaria derivada del consumo de peces en lugar de la ingestión directa de agua. La concentración de arsénico en el tejido muscular de peces se estima mediante el factor de bioacumulación (BAF) del arsénico multiplicado por el diferencial de concentración en agua atribuible a la mina (ΔC_agua), lo que conecta explícitamente la contaminación de la mina con el efecto en salud vía la cadena alimentaria acuática. El arsénico tiene un BAF relativamente bajo (44 L/kg) porque no se bioacumula eficientemente en tejido muscular de peces —a diferencia del metilmercurio que tiene BAF de hasta un millón (Cuadro 36).

[8] Para el consumo de pescado se usa una tasa de ingesta de 54 g/día basada en Díaz *et al*. (2020) para comunidades ribereñas del Caribe colombiano —el análogo socioeconómico y ecológico más cercano disponible para Donoso. Esta tasa es conservadora respecto a comunidades con mayor dependencia de la pesca (100–300 g/día en comunidades indígenas amazónicas) pero superior al estándar de la EPA para evaluación de riesgo general (17.5 g/día).

Cuadro 36. Parámetros y supuestos metodológicos: Arsénico en peces (As).

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
BAF (As agua→pez)	44 (L/kg)	USEPA (1980) — EPA AWQC OEHHA 2012	BCF ponderado de la EPA para arsénico basado en datos de ostras y peces, para aplicación en ambientes de agua dulce y marina. Conservador —valores reales en ríos mineros tropicales varían entre 5 y 500.
ΔC_agua (As)	0.01024 mg/L (= 10.24 ng/m³)	Ruta 1 — calculado	10.90 − 0.66 ng/m³ convertido a mg/L. Mismo ΔC que la Ruta 1 de As. Conecta explícitamente la contaminación de la mina con el efecto vía peces.
ΔC_pez (As)	0.000451 mg/kg	BAF × ΔC_agua = 44 × 0.01024/1000	Incremento de As en músculo de pez atribuible a la operación minera. Mucho menor que la concentración total en peces de ríos mineros porque solo se atribuye el incremento causado por la mina.
IR	0.054 kg/día	Díaz *et al*., 2020 Ciénaga Grande, Colombia	Consumo de pescado en comunidades ribereñas del Caribe colombiano. Análogo socioeconómico y ecológico más cercano a Donoso.
BW	58.6 kg	INEC Panamá / OPS LAC	Peso corporal promedio adulto en América Latina.
CDI incremental	4.15×10^{-7} mg/kg/día	Calculado: (0.000451 × 0.054) / 58.6	Dosis diaria crónica de As atribuible a la mina vía consumo de peces. 415 veces menor que el CDI por ingestión directa de agua (1.73×10^{-4} mg/kg/día) —el As no bioacumula eficientemente.
Cancer Slope Factor oral	32 $(mg/kg/día)^{-1}$	USEPA IRIS, enero 2025	Cancer Slope Factor oral actualizado en enero 2025 mediante meta-análisis bayesiano jerárquico. El valor histórico de 1.5 se basaba en cáncer de piel en Taiwán. El valor actualizado incorpora cáncer de vejiga y pulmón en múltiples países.
Costo por caso	USD 3,398/caso/año (USD 2025)	Linares *et al.*, 2022 Gómez *et al*., 2020	Mismo costo ponderado que Ruta 1: 60% vejiga (USD 3,229) + 40% pulmón (USD 3,651).

Fórmula
ΔCosto/año = CSF × (BAF × ΔC_agua × IR / BW) × (1/70) × Pop × Costo
Sustitución (latencia aplicada):
ΔCosto/año = 32 × (44 × 0.01024/1000 × 0.054/58.6) × (1/70) × Pop × USD 3,398 = 1.895×10^{-7} × Pop × USD 3,398
Resultado: ~USD 31/año (Pop 2029 = 48,220) · Latencia 10 años → desde 2029

Nota de limitaciones y supuestos
El impacto del As vía peces es prácticamente negligible (USD 31/año) porque el BAF del arsénico es bajo (44 L/kg) y el ΔC_agua es pequeño en una mina sin fundición. El resultado correcto es metodológicamente importante: confirma que el impacto de As vía agua (Ruta 1) domina sobre la vía de peces en órdenes de magnitud. La incertidumbre en el BAF (rango 5–500) podría modificar el resultado hasta 100×, pero incluso con BAF = 500 el costo seguiría siendo menor a USD 350/año.

Plomo en peces — mortalidad cardiovascular en adultos (Pb)

El plomo en tejido de peces ejerce efectos cardiovasculares en adultos —no neurológicos en niños, como en la Ruta 1—, porque la vía de ingesta de pescado en adultos genera niveles de plomo en sangre (BLL) que, aunque bajos, se asocian con incremento de la mortalidad cardiovascular en la cohorte NHANES III seguida por Menke *et al*. (2006). La diferencia metodológica clave respecto al plomo en agua es el factor de conversión ingesta→sangre: en adultos este factor es 0.04 µg/dL por µg/día ingerido, frente a 0.375 µg/dL en niños, reflejando la menor absorción gastrointestinal de plomo en adultos (3–10% vs. 40–50%).

El plomo no bioacumula eficientemente en músculo de peces —se concentra principalmente en hueso e hígado, que generalmente no se consumen. Por esta razón se usa un BAF de 10 L/kg para músculo, considerablemente menor que el BAF del mercurio. La concentración incremental de Pb en músculo atribuible a la mina (0.000130 mg/kg) genera una ingesta diaria de 0.00703 µg/día por persona —un valor muy pequeño que resulta en un ΔBLL de solo 2.81×10^{-4} µg/dL. El impacto sobre la mortalidad cardiovascular es proporcional a ese ΔBLL y se calcula con el mismo β cardiovascular y VSL usados en los efectos atmosféricos (Cuadro 37).

Cuadro 37. Parámetros y supuestos metodológicos: Plomo en peces — Mortalidad cardiovascular en adultos (Pb).

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
BAF (Pb agua→pez músculo)	10 (L/kg)	OEHHA 2012 — Fish BAF Mubarak *et al*., 2016	BAF de Pb en músculo de pez de agua dulce: rango 5–50. Valor central conservador: 10. El Pb bioacumula principalmente en hueso e hígado, no en músculo —lo que reduce la exposición por consumo de filetes.
ΔC_agua (Pb)	0.013 mg/L	Ruta 1 — calculado	15 − 2 µg/L convertido a mg/L. Mismo ΔC_agua que Ruta 1 de Pb.
ΔC_pez (Pb)	0.000130 mg/kg	BAF × ΔC_agua = 10 × 0.013/1000	Incremento de Pb en músculo de pez atribuible a la operación.
IR	0.054 kg/día	Díaz *et al*., 2020	Consumo de pescado en comunidades ribereñas del Caribe colombiano. Análogo socioeconómico y ecológico más cercano a Donoso.
BW	58.6 kg	INEC Panamá / OPS LAC	Peso corporal promedio adulto en América Latina.
Ingesta Pb incremental	0.00703 µg/día	(0.000130 × 0.054 × 1000)	Ingesta diaria de Pb adicional vía peces atribuible a la mina.
Factor agua→sangre adultos	0.04 µg/dL por µg/día	USEPA IEUBK, 2007 ATSDR 2020	Adultos absorben 3–10% del Pb ingerido. Factor IEUBK por defecto para adultos.
ΔBLL adultos	2.81×10^{-4} µg/dL	Calculado: 0.00703 × 0.04	Incremento de Pb en sangre adultos atribuible a la mina vía peces. Muy pequeño —1,382 veces menor que el ΔBLL por ingestión directa de agua (0.389 µg/dL).
β CV adultos	0.187 por µg/dL	Menke *et al*., 2006 Circulation AHA	Mismo β cardiovascular que Pb atmosférico y Pb en agua.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
TMB cardiovascular	0.0032 muertes/persona/año	GBD 2019 — Panamá	~320 por 100,000/año para enfermedades cardiovasculares en adultos ≥40 años.
VSL Panamá	USD 4.23 millones/muerte (USD 2025)	OCDE, 2025	Mismo VSL del análisis.

Fórmula
ΔMuertes/año = TMB_CV × Pop × (e^(β × ΔBLL) − 1)
ΔCosto/año = ΔMuertes × VSL
Sustitución (latencia aplicada):
ΔBLL = 10 × 0.013/1000 × 0.054 × 1000 × 0.04 = 2.81×10^{-4} µg/dL
ΔMuertes = 0.0032 × Pop × (e^(0.187 × 0.000281) − 1) = 0.0032 × Pop × 5.254×10^{-5}
ΔCosto = 0.0032 × Pop × 5.254×10^{-5} × USD 4,230,000
Resultado: ~USD 34,274/año (Pop 2029 = 48,220) · Latencia 10 años → desde 2029

Nota de limitaciones y supuestos
El Pb vía peces contribuye con mortalidad cardiovascular en adultos —efecto distinto al neurológico en niños de la Ruta 1, por lo que no hay doble conteo. Sin embargo, la contribución es pequeña (USD 34,274/año) porque el BAF del Pb en músculo es bajo y el ΔBLL resultante es mínimo. El BAF de 10 L/kg puede sobreestimar la bioacumulación real en músculo si los peces excretan eficientemente el Pb, o subestimar si hubiera contaminación de superficie durante la manipulación.

Metilmercurio en peces (MeHg)

El metilmercurio (MeHg) es el contaminante de mayor relevancia de la Ruta 3 y el único que no proviene directamente de la mina sino de la activación del mercurio natural del sedimento por el drenaje ácido de mina. Este mecanismo indirecto —pero directamente atribuible a la operación minera— lo convierte en un contaminante particularmente relevante: el AMD reduce el pH y el oxígeno disuelto de los cuerpos de agua, creando condiciones anóxicas que favorecen la proliferación de bacterias sulfatorreductoras capaces de metilar el mercurio inorgánico natural del sedimento, generando metilmercurio biodisponible que se bioacumula de forma extremadamente eficiente a través de la cadena alimentaria acuática.

El factor de bioacumulación del MeHg (BAF = 100,000–1,000,000 L/kg) es el más alto de cualquier contaminante conocido, lo que explica por qué concentraciones de MeHg en agua de apenas nanogramos por litro se traducen en concentraciones de microgramos por kilogramo en tejido de peces —varias órdenes de magnitud de amplificación. Para cuantificar únicamente el efecto atribuible a la mina, se aplica una fracción atribuible al AMD de 0.40, reconociendo que parte de la metilación del mercurio ocurriría de forma natural, aunque a tasas mucho menores. Los efectos neurológicos del MeHg en niños se cuantifican mediante el mismo coeficiente β de pérdida de CI que el plomo, pero con un factor de conversión ingesta→sangre específico para el MeHg que refleja su absorción casi completa (95%) en el tracto gastrointestinal (Cuadro 38).

Cuadro 38. Parámetros y supuestos metodológicos: Metilmercurio en peces (MeHg).

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Mecanismo	AMD activa metilación de Hg natural del sedimento	Mailman *et al.*, 2006 Salazar-Camacho *et al.*, 2020	El AMD reduce pH y O_2, favoreciendo bacterias sulfatorreductoras que convierten Hg inorgánico natural a MeHg biodisponible. Sin AMD no habría metilación significativa —el MeHg es

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
			atribuible a la operación, aunque no provenga directamente de la mina.
BAF (MeHg agua→pez)	100,000–1,000,000 (L/kg)	USEPA 2000 — MPCA Mailman *et al.*, 2006	El MeHg tiene el BAF más alto de cualquier contaminante conocido — amplifica concentraciones del agua hasta un millón de veces en tejido de peces depredadores.
Fracción atribuible AMD	0.40 (rango: 0.30–0.50)	Estimado conservador	Fracción de la metilación total atribuible al AMD de la mina vs. procesos naturales. Se usa 0.40 como valor central.
C_pez (MeHg) non-piscívoros	0.278 mg/kg peso húmedo	Mailman *et al.*, 2006 Salazar-Camacho *et al.*, 2020	Concentración media de MeHg en músculo de peces no depredadores en ríos tropicales contaminados. Especies típicas de los ríos de Donoso: tilapia, bocachico.
ΔC_pez (MeHg) atribuible	0.111 mg/kg = 0.278 × 0.40	Calculado	Concentración de MeHg en músculo atribuible al AMD de la mina.
IR	0.054 kg/día	Díaz *et al.*, 2020	Mismo que As y Pb en peces.
BW	58.6 kg	INEC Panamá / OPS LAC	Mismo.
CDI incremental (MeHg)	1.025×10^{-4} mg/kg/día	(0.111 × 0.054) / 58.6	Dosis diaria de MeHg atribuible a la mina vía consumo de peces.
RfD oral (MeHg)	1×10^{-4} mg/kg/día	USEPA IRIS, 2001 (vigente 2025)	Dosis de referencia para MeHg vía oral. Sin umbral seguro para efectos neurológicos en niños. HQ incremental = 1.025 → marginalmente supera el umbral de riesgo.
β neurológico	−0.513 puntos CI/µg/dL	Grandjean *et al.*, 1997 Faroe Islands cohort	Coeficiente para pérdida de CI por MeHg en niños. Mismo orden de magnitud que β de Pb de Lanphear *et al.* (2005).
Factor ingesta→sangre	0.0095 µg/dL por µg/día	NRC 2000 — Toxicological effects of MeHg	95% del MeHg ingerido se absorbe. Factor simplificado: ΔBLL_MeHg = Ingesta_diaria × 0.0095.
ΔBLL_MeHg	0.05694 µg/dL	CDI × BW × 1000 × 0.0095 = 1.025×10^{-4} × 58.6 × 1000 × 0.0095	Incremento de MeHg en sangre atribuible a la mina.
ΔCI por niño	−0.02921 puntos CI	0.05694 × 0.513	Pérdida de CI por niño expuesto a MeHg vía consumo de peces.
Pop niños ≤6 años	11% de Pop total	INEC Panamá 2023	Grupo 0–14 años = 25.2% nacional. Para 0–6 años: ~10–11%, ajustado al alza para Donoso (mayor fecundidad rural).
Costo por punto CI	USD 11,900/punto CI/niño (USD 2025)	Trasande *et al.*, 2013 PMC3764081	Valor presente de pérdida de productividad vitalicia. Publicado USD 2007 —ajustado a USD 2025 por CPI ×1.47.

Fórmula
ΔBLL_MeHg = CDI × BW × 1000 × 0.0095
ΔCI/niño = ΔBLL × 0.513
ΔCosto/año = ΔCI × (Pop × 0.11) × USD 11,900
Sustitución (latencia aplicada):
ΔBLL = 1.025×10^{-4} × 58.6 × 1000 × 0.0095 = 0.05694 µg/dL
ΔCI = 0.05694 × 0.513 = 0.02921 puntos CI/niño
ΔCosto = 0.02921 × (Pop × 0.11) × USD 11,900
Resultado: ~USD 1,679,134/año (Pop 2019 = 43,912) · Sin latencia → desde 2019

Nota de limitaciones y supuestos
La fracción atribuible al AMD de 0.40 es una estimación conservadora sin validación directa para el río Caimito —no existen mediciones de MeHg en peces de esos ríos antes y después del inicio de operaciones. La concentración de MeHg en tejido de peces de 0.278 mg/kg proviene de ríos tropicales contaminados en general, no específicamente de ríos afectados por AMD de pórfido de cobre. La absorción gastrointestinal del 95% asume que todo el MeHg ingerido es orgánico —si parte fuera inorgánico la absorción sería menor. El HQ de 1.025 apenas supera el umbral, por lo que pequeñas variaciones en los supuestos podrían llevarlo por debajo de 1.

Mortalidad prematura por contaminación hídrica

La mortalidad prematura atribuible a la contaminación hídrica de Cobre Panamá se calcula como categoría independiente de la morbilidad —igual que en el análisis de efectos atmosféricos. Mientras la morbilidad hídrica captura el costo de vivir con la enfermedad (tratamiento médico, pérdida de productividad), la mortalidad hídrica captura el costo de los años de vida perdidos valorados mediante el Valor Estadístico de la Vida (VSL) ajustado a Panamá.

Solo se cuantifica mortalidad para los contaminantes con evidencia directa de mortalidad prematura: arsénico (cáncer de vejiga y pulmón, cuya tasa de fatalidad a 5 años es del 46% ponderado) y plomo (mortalidad cardiovascular en adultos). El manganeso no se incluye porque su efecto principal —la pérdida de cociente intelectual en niños— no genera mortalidad directa sino pérdida de productividad, ya capturada en el costo de morbilidad. El cadmio tampoco se incluye porque su contribución a mortalidad por ERC terminal ya está incorporada en el costo de morbilidad de USD 17,241/caso/año que incluye hemodiálisis.

Estructura metodológica: la mortalidad hídrica es una tercera categoría independiente dentro del análisis hídrico —complementaria a la morbilidad de Rutas 1 y 3 pero no duplicada. La morbilidad captura el costo de tratamiento mientras el paciente vive. La mortalidad captura el valor de los años de vida perdidos al morir prematuramente. Ambas se suman sin doble conteo porque miden efectos económicamente distintos sobre personas distintas (algunas mueren, otras viven con la enfermedad).

Mortalidad cardiovascular por plomo (Pb) - Rutas 1 y 3 combinadas

La mortalidad cardiovascular atribuible al plomo hídrico integra las dos rutas de exposición calculadas: la ingestión directa de agua superficial (Ruta 1, ΔBLL = 0.389 µg/dL) y el consumo de peces (Ruta 3, ΔBLL = 2.81×10^{-4} µg/dL). Dado que ambas rutas elevan el mismo nivel de plomo en sangre (BLL) en adultos y el efecto cardiovascular depende del BLL total, las dos contribuciones se suman antes de aplicar el coeficiente β cardiovascular —evitando el doble conteo que ocurriría si se calcularán por separado y luego se sumarán los costos.

La Ruta 1 domina absolutamente este efecto: el ΔBLL de 0.389 µg/dL por ingestión directa de agua es 1,382 veces mayor que el de la Ruta 3 (0.000281 µg/dL). En términos prácticos, la Ruta 3 contribuye solo el 0.07% del ΔBLL total, lo que significa que el resultado es prácticamente

idéntico si se incluye o excluye la contribución de los peces. Sin embargo, se incluye por rigor metodológico y para demostrar que la cadena de cálculo es internamente consistente (Cuadro 39).

Cuadro 39. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad cardiovascular por plomo (Pb). Rutas 1 y 3 combinadas.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
ΔBLL Ruta 1 (adultos)	0.389 µg/dL	Calculado — Ruta 1	ΔC_Pb_agua × 2 L/día × factor_IEUBK_adultos / BW = 0.013 × 2 × 0.04 / (58.6×...). Ingestión directa de agua.
ΔBLL Ruta 3 (adultos)	2.81×10^{-4} µg/dL	Calculado — Ruta 3	BAF × ΔC_agua × IR × factor_IEUBK_adultos = 10 × 0.013/1000 × 0.054 × 1000 × 0.04.
ΔBLL total	0.389281 µg/dL ≈ 0.389 µg/dL	Suma Ruta 1 + Ruta 3	Ruta 3 contribuye solo el 0.07% del ΔBLL total — Ruta 1 domina absolutamente. Se usan ambas por rigor metodológico.
β CV adultos	0.187 por µg/dL	Menke *et al*., 2006 Circulation AHA DOI: 10.1161/circulationaha.106.628321	HR = 1.37 para mortalidad cardiovascular en adultos NHANES III. β = ln(1.37)/(3.62−1.94) = 0.187 por µg/dL BLL.
TMB cardiovascular	0.0032 muertes/persona/año	GBD 2019 — Panamá GBD Collaborators, 2020	~320 por 100,000/año para enfermedades cardiovasculares en adultos ≥40 años en Panamá.
VSL Panamá	USD 4.23 millones/muerte (USD 2025)	OCDE (2025) DOI: 10.1787/76ca89a2-en	VSL base OCDE (USD 7.1M) × factor PPP Panamá (0.595) × CPI 2022→2025 (×1.075).

Fórmula
ΔMuertes/año = TMB_CV × Pop × (e^(β × ΔBLL_total) − 1)
ΔCosto/año = ΔMuertes × VSL
Sustitución (año base con latencia aplicada):
ΔBLL_total = 0.389 + 0.000281 = 0.389281 µg/dL
ΔMuertes = 0.0032 × Pop × (e^(0.187 × 0.389281) − 1) = 0.0032 × Pop × 0.07541
ΔCosto = 0.0032 × Pop × 0.07541 × USD 4,230,000 = Pop × 1,020.05 [USD/persona]
Resultado: ~USD 49,286,049/año (Pop 2029 = 48,220) · Latencia 10 años → desde 2029

Nota de limitaciones y supuestos
El β de Menke *et al*. (2006) compara terciles extremos de BLL (>3.62 vs. <1.94 µg/dL) y su extrapolación lineal a ΔBLL de 0.389 µg/dL asume linealidad en un rango mucho menor que el validado. Lanphear *et al*. (2018) en Lancet Public Health confirman mortalidad CV a BLL < 5 µg/dL, lo que respalda la dirección del efecto. La latencia de 10 años asume que la acumulación de Pb en hueso requiere esa duración para ejercer efectos cardiovasculares sostenidos —este supuesto es conservador.

Mortalidad por cáncer de vejiga y pulmón - Arsénico (As) - Rutas 1 y 3 combinadas

La mortalidad por cáncer atribuible al arsénico hídrico integra los casos de cáncer generados por las dos rutas de exposición: ingestión directa de agua (Ruta 1) y consumo de peces (Ruta 3). Ambas rutas generan cáncer de vejiga y pulmón mediante el mismo mecanismo carcinogénico

del arsénico inorgánico, por lo que los casos se suman antes de aplicar la tasa de fatalidad. Los casos acumulados se convierten en muertes prematuras usando una tasa de fatalidad ponderada del 46%, que refleja la composición de los tipos de cáncer inducidos por As (60% vejiga con 20% de fatalidad a 5 años, 40% pulmón con 85% de fatalidad).

La contribución de la Ruta 3 (peces) a la mortalidad por As es negligible respecto a la Ruta 1, porque el CDI incremental vía peces (4.15×10^{-7} mg/kg/día) es 415 veces menor que el CDI por ingestión directa de agua (1.73×10^{-4} mg/kg/día). Esto refleja el bajo factor de bioacumulación del arsénico en músculo de peces (BAF = 44), muy inferior al del mercurio. En la práctica, el 99.9% de la mortalidad atribuible al arsénico hídrico proviene de la ingestión directa de agua (Cuadro 40).

Cuadro 40. Parámetros y supuestos metodológicos: Mortalidad por cáncer de vejiga y pulmón — Arsénico (As). Rutas 1 y 3 combinadas.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
ΔCasos_As Ruta 1	Variable anual desde 2029	USEPA IRIS 2025 + CSF	CSF × CDI_agua × (1/70) × Pop = 32 × (0.009×2/58.6) × (1/70) × Pop = 1.403×10^{-4} × Pop casos/año.
ΔCasos_As Ruta 3	Variable anual desde 2029	USEPA IRIS 2025 + BAF Ruta 3	CSF × CDI_peces × (1/70) × Pop = 32 × (4.15×10^{-7}) × (1/70) × Pop = 1.895×10^{-7} × Pop casos/año.
ΔCasos_As total	(1.403×10^{-4} + 1.895×10^{-7}) × Pop ≈ 1.405×10^{-4} × Pop	Suma Ruta 1 + Ruta 3	Ruta 3 contribuye el 0.13% del total de casos. La suma se realiza antes de aplicar la tasa de fatalidad.
Tasa de fatalidad cáncer ponderada	0.46	SEER / GBD 2019 LAC	Vejiga (60% de casos): 20% de fatalidad a 5 años. Pulmón (40% de casos): 85% de fatalidad. Ponderado: 0.60×0.20 + 0.40×0.85 = 0.46.
ΔMuertes/año	ΔCasos_total × 0.46	Calculado	Muertes prematuras anuales atribuibles al As hídrico (Rutas 1 y 3 combinadas).
VSL Panamá	USD 4.23 millones/muerte (USD 2025)	OCDE (2025) DOI: 10.1787/76ca89a2-en	Mismo VSL aplicado a todos los efectos de mortalidad del análisis.

Fórmula
ΔMuertes/año = (ΔRiesgo_R1 + ΔRiesgo_R3) × Pop × tasa_fatalidad
ΔCosto/año = ΔMuertes × VSL
Sustitución (año base con latencia aplicada):
ΔRiesgo_R1 = 32 × (0.009×2/58.6) / 70 = 1.403×10^{-4}
ΔRiesgo_R3 = 32 × (4.15×10^{-7}) / 70 = 1.895×10^{-7}
ΔRiesgo_total ≈ 1.405×10^{-4}
ΔMuertes = 1.405×10^{-4} × Pop × 0.46
ΔCosto = ΔMuertes × 4,230,000
Resultado: ~13,192,809/año (Pop 2029 = 48,220) · Latencia 10 años → desde 2029

Nota de limitaciones y supuestos
La tasa de fatalidad ponderada de 0.46 asume que la distribución de tipos de cáncer (60% vejiga / 40% pulmón) refleja la literatura global de cáncer por As inhalado —en exposición oral predomina el cáncer de vejiga (~70–80%), lo que reduciría la tasa de fatalidad ponderada a ~0.30–0.36. Se usa 0.46 como supuesto conservador respecto a la mortalidad. La latencia de 10 años es el límite inferior documentado (rango: 10–30 años); con 30 años de latencia los primeros casos no aparecerían hasta 2049.

El consolidado de los indicadores de intoxicación humana por contaminación hídrica 2019–2074 es presentado en el Anexo 6; integra los impactos económicos en salud derivados de la contaminación hídrica atribuible a la operación de Cobre Panamá, considerando dos categorías poblacionales diferenciadas según el nivel de exposición: la población directamente expuesta (33,715 personas en 2023, cuencas #101–#109, tasa −0.32%/año) y la población en riesgo indirecto (121,467 personas en 2023, cuenca #134 río Grande, tasa +0.83%/año). Los resultados se expresan en dólares estadounidenses constantes de 2025 (USD 2025) y abarcan el período 2019–2074.

Para la población en riesgo del río Grande se aplica un factor de dilución del 20% sobre las concentraciones de referencia utilizadas en la población directamente expuesta. Este factor está respaldado por la evidencia empírica sobre atenuación de metales pesados disueltos en ríos receptores de drenaje ácido de mina (AMD). El estudio de referencia es Seo *et al*. (2001), quienes documentaron en el río Imgok (Corea), impactado por AMD de la mina de carbón Youngdong, que la suma de metales disueltos (Cd + Co + Cu + Ni + Pb + Zn) disminuye de 6,270 µg/L en el punto de confluencia a 100 µg/L aguas abajo, en la zona dinámica de mezcla y reacción —una reducción del 98% en la confluencia directa.

Esta reducción drástica ocurre por dilución con el agua de río y por adsorción de metales en precipitados de sulfato de hierro (*schwertmannita, ferrihydrita*). Para el río Grande, que recibe los aportes de las cuencas afectadas de forma más indirecta y a mayor distancia de la fuente emisora, se asume conservadoramente que la concentración de contaminantes es un 20% de la de las cuencas directas —consistente también con los hallazgos de Moore y Langner (1996) en Environmental Science & Technology, quienes demostraron que el modelo de dilución de mezcla predice eficazmente la dispersión de anomalías metálicas aguas abajo de operaciones mineras, con reducciones de concentración típicas del 70–95% en los primeros 20–50 km desde la fuente.

SAL-04: ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTORES

La operación de Cobre Panamá ha generado la destrucción de más de 3,000 hectáreas de bosque primario dentro del Corredor Biológico Mesoamericano, sobre una concesión total de 13,600 hectáreas en el Distrito de Donoso, provincia de Colón (BirdLife International, 2023). Esta deforestación activa tres mecanismos documentados en la literatura científica que amplifican la transmisión de enfermedades vectoriales en comunidades ribereñas tropicales.

El primero es la fragmentación del bosque y la creación de zonas de transición bosque-claro, que constituyen el hábitat óptimo para los vectores de malaria (*Anopheles darlingi*) y leishmaniasis (*Lutzomyia spp*.). Ferreira *et al.* (2021) demostraron en la Amazonía brasileña que la densidad de picaduras de mosquitos infectados en sitios con más del 50% de deforestación acumulada fue al menos el doble que en sitios sin deforestar, con una razón de densidad de incidencia ajustada de 2.25 (IC 95%: 1.38–3.68). El segundo mecanismo es la creación de pozas y excavaciones que actúan como criaderos permanentes de mosquitos —el tajo a cielo abierto, los sistemas de drenaje y las estructuras de contención de la presa de relaves generan colecciones de agua estancada que no existían antes de la operación. El tercer mecanismo es la mayor movilidad de trabajadores y pobladores atraídos por la actividad minera, que facilita la introducción de parásitos y virus en comunidades previamente con baja exposición.

La leishmaniasis cutánea (LC) responde al mismo proceso de deforestación a través de un mecanismo diferente: la alteración del hábitat forestal desplaza los reservorios silvestres de *Leishmania* (roedores, marsupiales) hacia los espacios peridomésticos, aumentando el contacto entre los flebótomos vectores y la población humana. Gutierrez *et al*. (2019), en un análisis

espacial de más de 65,000 casos de LC en Colombia, identificaron que la deforestación y la minería son los principales drivers estadísticamente significativos de la distribución espacial de la epidemia de leishmaniasis en ese país —contexto geográfico y ecológico directamente análogo al de Donoso (Cuadro 41).

Cuadro 41. Cuadro de priorización — Enfermedades vectoriales evaluadas.

Prioridad	Enfermedad	RR / Evidencia	Método aplicado	Justificación
Cuantificada	Malaria	RR = 2.25 (IC 95%: 1.38–3.68)	PAF = p_e×(RR−1)/[p_e×(RR−1)+1]	Ferreira *et al*. 2021 — RR robusto de deforestación tropical. PAF = 0.556.
Cuantificada	Leishmaniasis	OR = 2.1 (IC 95%: 1.3–3.5)	PAF = p_e×(OR−1)/[p_e×(OR−1)+1]	Bsrat *et al*. 2024 — OR más conservador disponible para hábitat alterado en el trópico. PAF = 0.512.
Cualitativa	Dengue	No significativo en multivariado	Sin cuantificación	Parreira *et al*. 2021 — deforestación no es predictor significativo en modelo ajustado. El acceso a salud domina.
Sin casos	Zika	0 casos Colón 2025	Sin cuantificación	MINSA/SISVIG 2025 — sin casos registrados en la provincia de Colón.
Insuficiente	Chikungunya	5 casos Colón 2025	Sin cuantificación	MINSA/SISVIG 2025 — muestra insuficiente para fracción atribuible. No hay RR deforestación específico.

Justificación de exclusiones del total cuantificado: Dengue: Parreira *et al*. (2021), en un estudio ecológico de 100 municipios del estado de Amazonas (Brasil) entre 2007 y 2017, encontraron que la deforestación no fue predictor significativo de la incidencia de dengue en el modelo multivariado ajustado por factores socioeconómicos, climáticos y de acceso a salud (p no significativo). El único predictor significativo fue el acceso a servicios de salud. La transmisión de dengue (*Aedes aegypti*) depende principalmente de condiciones urbanas y de saneamiento, no de la deforestación. Se incluye narrativa cualitativa. Zika: 0 casos registrados en la provincia de Colón en 2025 (MINSA/SISVIG-DHIS2). No cuantificable. Chikungunya: 5 casos en Colón 2025. Muestra insuficiente para calcular una fracción atribuible estadísticamente robusta. No hay RR específico de deforestación para chikungunya en contexto tropical latinoamericano. Se incluye narrativa cualitativa.

Malaria

La malaria es la enfermedad vectorial con mayor evidencia epidemiológica cuantitativa sobre su asociación con la deforestación tropical. El método de cuantificación es la fracción atribuible poblacional (PAF), formulada por Levin (1953), que estima qué proporción de los casos observados en una población expuesta son atribuibles al factor de riesgo —en este caso, la deforestación causada por la operación minera.

Un supuesto metodológico fundamental de este análisis es que la tasa de incidencia basal de malaria observada en la provincia de Colón (12.6 por 100,000/año en 2025, según MINSA/SISVIG-DHIS2) se aplica a la población de los distritos de La Pintada, Donoso y Omar Torrijos como proxy local. Este supuesto se justifica porque Donoso —ubicado en el extremo occidental de la provincia de Colón— concentra la mayor área de bosque primario y de riesgo

selvático de la provincia, y porque los registros del MINSA no desagregan los casos de malaria a nivel de distrito. En la tabla de variables se declara este supuesto explícitamente (Cuadro 42).

Cuadro 42. Parámetros y supuestos metodológicos: Malaria.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Casos malaria Colón 2025	36 casos	MINSA/SISVIG-DHIS2 30/04/2026	Total provincia de Colón, año 2025. Fuente: Dirección General de Salud, Departamento de Epidemiología / Sección de Estadísticas. Sistema de Vigilancia Epidemiológica (SISVIG/DHIS2).
Población Colón 2025	~285,500 hab.	INEC Censo 2023 + proyección +0.83%/año	285,336 (Censo 2023) proyectados a 2025 a tasa provincial de Colón.
Inc_0 (tasa basal)	0.000126 casos/persona/año (= 12.6 por 100,000)	Calculado: 36/285,500 MINSA/SISVIG 2025 + INEC 2023	Tasa de incidencia provincial aplicada como proxy a los distritos del área de influencia. Supuesto declarado: la incidencia en Donoso y distritos vecinos es representativa de la tasa provincial, dado que Donoso concentra la mayor área de riesgo selvático de Colón.
RR (deforestación >50%)	2.25 (IC 95%: 1.38–3.68)	Ferreira *et al.*, 2021 Scientific Reports PMC7979798 DOI: 10.1038/s41598-021-85890-3	Razón de densidad de incidencia de mosquitos infectados en sitios con >50% deforestación acumulada vs. sin deforestar. Amazonía brasileña —contexto tropical análogo. Seguimiento longitudinal espacio temporal.
p_e (proporción expuesta)	1.0 (100%)	Área influencia Cobre Panamá	Toda la población de los 3 distritos (43,912 en 2019) reside dentro del área de influencia de la deforestación de Cobre Panamá (13,600 ha concesión + zona de influencia hasta 70 km según Sonter *et al.*, 2017, Nature Communications).
PAF	0.556	Levin (1953) Acta Unio Int. Contra Cancrum 9(3):531–541	Fórmula estándar: PAF = p_e×(RR−1)/[p_e×(RR−1)+1] = 1×1.25/2.25 = 0.556. El 55.6% de los casos de malaria en la zona son atribuibles a la deforestación minera.
Costo por caso malaria	USD 580/caso	PAHO, 2022 Shepard *et al.*, 2016 Am J Trop Med Hyg	Costo promedio por caso de malaria en América Latina y el Caribe incluyendo: diagnóstico, tratamiento con antimaláricos, hospitalización si aplica y pérdida de productividad. Rango LAC: USD 150–1,200. Valor central: USD 580.

Fórmula
$\Delta Casos/año = Inc_o \times Pop \times PAF$
$\Delta Costo/año = \Delta Casos \times Costo_por_caso$
Sustitución (año base 2019):
$\Delta Casos = 0.000126 \times 43{,}912 \times 0.556 = \sim 3.08$ casos/año
$\Delta Costo = 3.08 \times USD\ 580 = USD\ 1{,}784$/año (Pop 2019 = 43,912)
Resultado: ~3 casos adicionales de malaria/año → USD ~1,784–3,449/año (2019–2074)

Nota de limitaciones y supuestos
La tasa basal de malaria en Colón (12.6/100,000) proviene del año 2025, no del período de operación activa 2019-2023 —dado que el MINSA no publicó datos desagregados por distrito para esos años. Usar la tasa de 2025 (con la mina cerrada desde noviembre 2023) podría subestimar el impacto real durante la operación. El RR de Ferreira *et al*. (2021) proviene de la Amazonía brasileña con *Anopheles darlingi* —el vector de malaria en Panamá es el mismo (*A. darlingi* en la vertiente caribeña), lo que respalda la transferibilidad. El supuesto p_e = 1.0 es conservador: asume que toda la población vive en zona afectada, cuando en realidad el grado de exposición varía por cercanía a la mina.

Leishmaniasis cutánea

La leishmaniasis cutánea americana (LCA) es endémica en el Distrito de Donoso y sus comunidades ribereñas, donde el contacto con el bosque alterado por la actividad minera genera condiciones favorables para la transmisión del parásito *Leishmania* a través de flebótomos del género *Lutzomyia*. A diferencia de la malaria, la leishmaniasis no cuenta con un RR directamente derivado de un estudio de deforestación minera en trópico húmedo con el mismo diseño que Ferreira *et al*. (2021). Sin embargo, existen estudios caso-control que documentan el riesgo asociado a la exposición a hábitats forestales alterados —que es el mecanismo específico activado por la deforestación de Cobre Panamá.

Gutierrez *et al*. (2019), en el análisis espacial más completo disponible para leishmaniasis en Colombia —país con condiciones ecológicas directamente análogas a Donoso— demostraron que la deforestación y la minería son drivers estadísticamente significativos del clustering espacial de la enfermedad. Para la cuantificación, se usa el odds ratio de exposición a hábitat alterado peridoméstico documentado por Bsrat *et al*. (2024) —el más conservador disponible en la literatura caso-control para contexto tropical— que reporta OR = 2.1 (IC 95%: 1.3–3.5) para la presencia de CL asociada a hábitats perturbados en zona peridoméstica. Se aplica la fórmula PAF de Levin (1953) con este OR como aproximación al RR, bajo el supuesto estándar de baja prevalencia donde OR ≈ RR (Cuadro 43).

Cuadro 43. Parámetros y supuestos metodológicos: Leishmaniasis cutánea.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
Casos leishmaniasis Colón 2025	126 casos	MINSA/SISVIG 2025 30/04/2026	Total provincia de Colón, año 2025. Fuente: Dirección General de Salud, Departamento de Epidemiología / Sección de Estadísticas.
Población Colón 2025	~285,500 hab.	INEC Censo 2023 + proyección +0.83%/año	Mismo denominador que malaria.
Inc_o (tasa basal)	0.000442 casos/persona/año (= 44.2 por 100,000)	Calculado: 126/285,500 MINSA/SISVIG 2025 + INEC 2023	Tasa de incidencia provincial de leishmaniasis. Mismo supuesto que malaria: tasa provincial aplicada como proxy a los tres distritos del área de influencia.

Variable	Valor	Fuente	Notas metodológicas
OR (hábitat alterado)	2.1 (IC 95%: 1.3–3.5)	Bsrat *et al*., 2024 PMC11684615 PLOS ONE	OR para CL asociado a presencia de hábitat perturbado en zona peridoméstica. Estudio caso-control en región tropical. Valor más conservador disponible en la literatura para contexto análogo a Donoso.
p_e (proporción expuesta)	1.0 (100%)	Área influencia Cobre Panamá	Mismo supuesto que malaria — toda la población de los 3 distritos en zona de influencia de deforestación.
PAF	0.512	Levin (1953) Acta Unio Int. Contra Cancrum	PAF = 1×(2.1−1)/[1×(2.1−1)+1] = 1.1/2.1 = 0.512. El 51.2% de los casos de leishmaniasis en la zona son atribuibles a la deforestación minera.
Costo por caso LC	USD 1,285/caso	Oryan & Akbari, 2016 PAHO, 2022	Costo promedio de tratamiento de leishmaniasis cutánea en LAC: USD 650–1,920. Valor central: USD 1,285. Incluye diagnóstico, antimoniales pentavalentes (Glucantime) o anfotericina B, seguimiento.

Fórmula
$\Delta Casos/año = Inc_o \times Pop \times PAF$
$\Delta Costo/año = \Delta Casos \times Costo_por_caso$
Sustitución (año base 2019):
$\Delta Casos = 0.000442 \times 43{,}912 \times 0.512 = \sim 9.93$ casos/año
$\Delta Costo = 9.93 \times USD\ 1{,}285 = USD\ 12{,}760$/año (Pop 2019 = 43,912)
Resultado: ~10 casos adicionales de leishmaniasis/año → USD 12,760–USD 24,683/año (2019–2074)

Nota de limitaciones y supuestos
El uso del OR de Bsrat *et al*. (2024) como proxy del RR es válido bajo el supuesto de baja prevalencia de la enfermedad (prevalencia <10%), que se cumple en este caso (44.2/100,000 = 0.044%). El OR proviene de un estudio en Etiopía tropical, no de América Latina —aunque los mecanismos de transmisión de *Leishmania spp*. son análogos, las especies vectoras y reservorios difieren. El RR de Gutierrez *et al*. (2019) para leishmaniasis en Colombia no es directamente utilizable porque es un análisis de clustering espacial, no un RR individual. Idealmente se requeriría un estudio caso-control específico para Donoso.

Dengue, Zika y Chikungunya

Las tres enfermedades arbovirales transmitidas por *Aedes aegypti* —dengue, Zika y chikungunya— se documentan como enfermedades de transmisión vectorial que están presentes en la provincia de Colón y que pueden verse influenciadas por las condiciones ambientales generadas por la operación minera. Sin embargo, no se incluyen en la cuantificación económica por las razones metodológicas que se exponen a continuación.

- Dengue

El dengue es la enfermedad vectorial de mayor incidencia en la provincia de Colón en 2025, con 518 casos registrados (MINSA/SISVIG 2025), equivalente a una tasa de 181.8 por 100,000 —muy superior a la de malaria (12.6/100,000) y leishmaniasis (44.2/100,000). Sin embargo, la evidencia

epidemiológica no permite establecer una relación causal cuantificable entre la deforestación minera y la incidencia de dengue. Parreira *et al*. (2021), en un estudio ecológico de 100 municipios del estado de Amazonas (Brasil) entre 2007 y 2017, encontraron que, aunque el dengue aumentó simultáneamente con la deforestación en el período bivariate (diferencia media de 55.47 casos/100,000 entre pre y post deforestación, p=0.002), esta asociación desapareció en el modelo de regresión binomial negativa ajustado por factores socioeconómicos, climáticos y de acceso a salud. El único predictor significativo de la incidencia de dengue fue el acceso a servicios de salud. Esto refleja que *Aedes aegypti* depende principalmente de recipientes artificiales de agua en entornos periurbanos y domésticos, no de la deforestación forestal per se.

- Zika

El Zika registró 0 casos en la provincia de Colón durante 2025 (MINSA/SISVIG 2025). Aunque el virus Zika circuló ampliamente en Panamá durante el período 2015–2017, su incidencia actual es mínima. No es cuantificable para el período de análisis.

- Chikungunya

La chikungunya registró 5 casos en la provincia de Colón en 2025 (MINSA/SISVIG 2025). La muestra es insuficiente para calcular una fracción atribuible estadísticamente robusta. Adicionalmente, no existe en la literatura epidemiológica un RR cuantificado para la asociación entre deforestación y chikungunya en contexto tropical latinoamericano —dado que la enfermedad es de introducción más reciente en la región. Se documenta como riesgo potencial que podría materializarse en escenarios de brote.

3.2.4. Costos cierre y post-cierre del proyecto

Costos de cierre y estabilización

Este apartado estima el costo de cierre y estabilización de Cobre Panamá mediante extrapolación desde la Mina Faro (Yukón, Canadá), la referencia más rigurosa disponible para una operación minera a cielo abierto de escala comparable cuyo costo de remediación ha sido auditado independientemente por el Auditor General de Canadá (2024) y cuantificado con metodología de auditoría gubernamental certificada.

La Mina Faro fue una de las mayores operaciones de extracción de plomo y zinc a cielo abierto del mundo, con operaciones entre 1969 y 1998, cuando fue abandonada por insolvencia del operador. El Gobierno de Canadá asumió la responsabilidad de remediación del sitio en 2018. El sitio abarca 25 km² (2,500 ha) y contiene 70 millones de toneladas de relaves y 320 millones de toneladas de roca de desmonte que generan drenaje ácido de mina (AMD) y lixiviación de metales pesados hacia los ríos Pelly y Yukón. El Reporte del Auditor General de Canadá (2024) documenta que la fase de remediación activa tomará 15 años, seguida de 20 a 25 años de monitoreo y pruebas, tras lo cual el sitio requerirá mantenimiento y monitoreo en perpetuidad —un pasivo ambiental sin horizonte de cierre definitivo.

El costo de referencia para la extrapolación es el estimado de remediación de la Mina Faro reportado en el año fiscal 2022–23: CAD 5,000 millones. Este valor fue convertido a dólares estadounidenses aplicando el tipo de cambio promedio del período 2022–2023 de 0.7547 USD/CAD (promedio aritmético de los tipos de cambio anuales publicados por el Banco de Canadá: 2022: 0.7685 USD/CAD; 2023: 0.7409 USD/CAD), obteniendo un costo de referencia de

USD 3,773.5 millones en precios 2022–23[9]. Este costo comprende estabilización geotécnica de tajos y depósitos de roca de desmonte, impermeabilización y cubrimiento de relaves, tratamiento de aguas ácidas y monitoreo ambiental a largo plazo. No incluye restauración ecológica del ecosistema original ni compensaciones a las comunidades First Nations afectadas. Es relevante señalar que el costo estimado de remediación de Mina Faro ha escalado de CAD 200 millones en 2002 a CAD 5,000 millones en 2022-23 —un incremento de 25 veces en dos décadas— sin que la fase de remediación activa haya comenzado, confirmando el patrón documentado de subestimación sistemática de los costos de cierre minero a nivel global.

La extrapolación hacia Cobre Panamá se realiza mediante proporción directa por hectárea operativa, aplicando el costo unitario de remediación de Mina Faro (USD 3,773.5M / 2,500 ha = USD 1.509M/ha) al área total de la concesión de Cobre Panamá (13,600 ha). Este es el denominador más objetivo metodológicamente disponible para comparar la escala de ambas operaciones, dado que ambas son minas a cielo abierto con generación de AMD y depósitos de relaves que requieren tratamiento permanente. El costo nominal extrapolado resultante es de USD 20,527.8 millones.

Dado que este desembolso ocurrirá en 2055 —30 años después del año base del análisis (2025)— se aplica el factor de descuento correspondiente para obtener el Valor Presente Neto. A diferencia del resto de los flujos del análisis —que se descuentan a la tasa real libre de riesgo de 2.21% (tasa real de los bonos del Tesoro de EE. UU. a largo plazo)— los costos de cierre, restauración y monitoreo permanente de relaves se descuentan a una tasa diferenciada de 1.4%, consistente con el Stern Review on the Economics of Climate Change (Stern, 2006). Esta tasa se justifica porque el pasivo de restauración recae sobre activos naturales irreemplazables e irreversibles —el Corredor Biológico Mesoamericano y las cuencas hidrográficas del Distrito de Donoso— cuyo valor relativo aumenta con el tiempo conforme los ecosistemas tropicales primarios se vuelven progresivamente más escasos. Este argumento está respaldado por la Regla de Krutilla & Fisher (1975), el principio de preferencia temporal nula de Dasgupta (2021) y el enfoque de tasa mínima bajo incertidumbre de Weitzman (1998).[2] Aplicando la tasa de 1.4%, el VPN del costo de cierre ordenado asciende a USD 13,527.1 millones.

El costo extrapolado de USD 20,527.8M (valor nominal) constituye un límite inferior conservador del costo real de cierre de Cobre Panamá, dado que la extrapolación asume: (1) idéntico costo por hectárea que Mina Faro, sin ajuste por diferencias en complejidad geoquímica —los relaves de cobre contienen arsénico, plomo, cadmio y manganeso, sustancialmente más tóxicos que los relaves de plomo-zinc de Mina Faro; (2) ausencia de complicaciones técnicas adicionales durante la remediación; (3) exclusión de la restauración ecológica de las más de 3,000 ha de bosque tropical primario destruido dentro del Corredor Biológico Mesoamericano; (4) exclusión del tratamiento diferencial de AMD tropical, que podría ser más intenso que el ártico por la mayor precipitación pluvial de Panamá; y (5) ausencia de escalada de costos adicional— contrario al patrón histórico documentado en la propia Mina Faro, donde el costo estimado creció 25 veces en dos décadas. El costo real de cierre de Cobre Panamá se espera que supere sustancialmente este estimado.

[9] Tipo de cambio CAD/USD promedio 2022–2023 calculado a partir de los tipos de cambio anuales del Banco de Canadá: 2022: 1 USD = 1.3013 CAD (equivalente a 0.7685 USD/CAD); 2023: 1 USD = 1.3497 CAD (equivalente a 0.7409 USD/CAD); promedio aritmético 2022–2023: 0.7547 USD/CAD. Fuente: Bank of Canada, Annual Average Exchange Rates. https://www.bankofcanada.ca/rates/exchange/annual-average-exchange-rates/

Costo de restauración ecológica

Además de los costos de cierre y estabilización geotécnica, la remediación completa de Cobre Panamá requiere la restauración ecológica de las áreas deforestadas dentro del Corredor Biológico Mesoamericano. Este componente —ausente en las provisiones de cierre convencionales— tiene una base de referencia documental específica para Panamá.

El documento de proyecto MDL de la Comunidad Indígena Ipetí Emberá (OUDCIE / Universidad McGill / Universidad de Panamá, 2005) establece mediante estudio de costos detallado con referencia a la Ley 58 de 29 de diciembre de 1999 de Panamá, que el costo alto de reforestación por hectárea en 20 años es de USD 10,001.50 (escenario alto con mano de obra contratada, plantaciones de especies maderables —caoba, cedro espino, teca— incluyendo establecimiento, mantenimiento, raleos y corte final). Este valor está desglosado año a año en el Anexo 7 del documento MDL de Ipetí-Emberá, desde el costo de establecimiento en el año 1 (USD 1,590.50/ha) hasta el corte final en el año 20 (USD 857.00/ha), sumando un total de USD 10,001.50/ha para el período completo de 20 años. Fue validado mediante encuestas directas con empresas reforestadoras panameñas (Futuro Forestal, Prime Forestry) y representa el costo unitario más documentado disponible para condiciones tropicales húmedas en Panamá.

Para expresar este valor en precios constantes de 2025, se aplica el factor de inflación acumulada de Panamá entre 2005 y 2025, calculado año a año a partir de los datos del FMI / Banco Mundial / Worlddata.info (2025). La inflación acumulada para el período completo es de 62.71% (factor = 1.6271)[10]. El costo actualizado resultante es de USD 16,273/ha en precios constantes de 2025.

Aplicado a las 13,600 ha de la concesión total de Cobre Panamá, el costo nominal de restauración ecológica asciende a USD 221.32 millones en precios 2025. Dado que este desembolso ocurrirá en 2055 —30 años después del año base del análisis— se aplica el factor de descuento correspondiente. Conforme a la justificación expuesta en el apartado anterior, los costos de restauración ecológica se descuentan a la tasa diferenciada de 1.4% (Stern Review, 2006), por tratarse de un pasivo sobre activos naturales irreemplazables e irreversibles. Aplicando dicha tasa, el VPN del costo de restauración ecológica asciende a USD 145.84 millones.

El costo de USD 16,273/ha (2025) (valor nominal) constituye un límite inferior conservador del costo real de restauración ecológica de Cobre Panamá, por dos razones. Primera, corresponde a plantación forestal comercial con especies maderables en condiciones tropicales húmedas — no a restauración de bosque primario tropical, que es lo que Cobre Panamá destruyó dentro del Corredor Biológico Mesoamericano. Segunda, estudios de restauración de bosque tropical en América Central estiman entre USD 50,000 y 350,000 por hectárea para restauración de alta complejidad ecológica (Holl & Aide, 2011; Society for Ecological Restoration, 2019) —entre 3 y 21 veces el costo aquí utilizado. Los USD 16,273/ha representan el límite inferior documentado con fuente primaria panameña, expresado en precios constantes de 2025.

[10] Factor de inflación acumulada calculado año a año: 2005: +3.30%, 2006: +2.50%, 2007: +4.20%, 2008: +8.80%, 2009: +2.40%, 2010: +3.50%, 2011: +5.90%, 2012: +5.70%, 2013: +4.00%, 2014: +2.60%, 2015: +0.10%, 2016: +0.70%, 2017: +0.48%, 2018: +0.16%, 2019: −0.06%, 2020: −1.58%, 2021: +2.62%, 2022: +2.08%, 2023: +1.92%, 2024: −0.19%, 2025: +0.70%. Factor acumulado = 1.6271. Fuente: FMI / Banco Mundial / Worlddata.info (2025).

Escenario de accidente de relaves

La presa de relaves de Cobre Panamá es la infraestructura de mayor riesgo potencial de la operación minera. Construida para almacenar los residuos sólidos del procesamiento del concentrado de cobre durante 39 años de operación, con una producción de aproximadamente 350,000 toneladas métricas de cobre por año y una relación típica de 10 toneladas de roca procesada por tonelada de cobre, la presa acumula un volumen estimado de 91 millones de metros cúbicos de relaves en su capacidad de diseño total —material que contiene arsénico, plomo, cadmio, manganeso y otros metales pesados en concentraciones que superan los límites de calidad de agua superficial.

Desde el cierre de la mina en noviembre de 2023, la presa de relaves continúa en condición de «Preservación y Gestión Segura» bajo responsabilidad de Minera Panamá S.A. El drenaje ácido de mina que se genera continuamente en el tajo y los relaves expuestos al agua y al oxígeno requiere bombeo activo permanente. Una interrupción prolongada del sistema de bombeo, una falla estructural por sismo o eventos de lluvia extrema, o el deterioro progresivo de la presa sin mantenimiento adecuado podría desencadenar una falla catastrófica de consecuencias irreversibles para las cuencas de los ríos Caimito y Botija y las comunidades del Distrito de Donoso.

La extrapolación del costo de una falla catastrófica utiliza como caso de referencia la presa Fundão (Samarco, Mariana, Brasil, 2015) —el desastre minero de mayor magnitud documentado en la historia de la industria, con datos de costo de reparación judicialmente validados. El 5 de noviembre de 2015, la presa Fundão colapsó liberando 43.7 millones de metros cúbicos de relaves de mineral de hierro en la cuenca del río Doce, contaminando 668 kilómetros de cursos de agua hasta el Océano Atlántico, destruyendo 1,469 hectáreas de bosque ripario y causando 19 muertes directas. En octubre de 2024, Samarco, Vale y BHP firmaron un acuerdo definitivo de reparación con las autoridades brasileñas por USD 30,000 millones —el monto de reparación más alto y exhaustivamente documentado en la historia de la industria minera mundial.

El costo unitario de referencia se obtiene directamente de ese acuerdo: USD 30,000 millones dividido entre los 43.7 millones de metros cúbicos liberados equivale a USD 686.50/m^3. Este costo unitario está expresado en precios de 2024 —año del acuerdo judicial— por lo que no requiere ajuste inflacionario adicional. Aplicado al volumen de diseño total de la presa de Cobre Panamá (91 millones de m^3), el costo nominal de reparación en caso de falla catastrófica asciende a USD 62,471.4 millones.

Dado que este desembolso ocurrirá en 2055 —30 años después del año base del análisis— se aplica el factor de descuento correspondiente. Conforme a la justificación expuesta en el apartado anterior, los costos de restauración de relaves se descuentan a la tasa diferenciada de 1.4% (Stern Review, 2006), por tratarse de un pasivo sobre activos naturales irreemplazables e irreversibles —las cuencas hidrográficas del Distrito de Donoso y el Corredor Biológico Mesoamericano— cuyo valor relativo aumenta con el tiempo conforme los ecosistemas tropicales primarios se vuelven progresivamente más escasos.

Es importante señalar que el escenario con falla no sustituye los costos de cierre ordenado, sino que los suma: una falla catastrófica de la presa de relaves no elimina las obligaciones de estabilización geotécnica, tratamiento de AMD y monitoreo permanente del sitio —las amplifica. Por tanto, el costo nominal total del escenario con falla incorpora tanto el costo de cierre ordenado extrapolado de Mina Faro (USD 20,527.8 millones) como el costo de restauración catastrófica extrapolado de Samarco/Fundão (USD 62,471.4 millones), sumando

un total nominal de USD 82,999.2 millones. Descontado a la tasa diferenciada de 1.4% a 30 años, el VPN del escenario con falla asciende a USD 54,693.5 millones —frente a USD 13,527.1 millones en el escenario de cierre ordenado sin falla. La diferencia entre ambos escenarios (USD 41,166.4 millones en VPN) representa el costo económico del riesgo de falla de la presa de relaves, que bajo la estructura actual del proyecto recaería íntegramente sobre la sociedad panameña.

La selección de Samarco/Fundão como caso de referencia se justifica por tres razones metodológicas: primero, su volumen de relaves liberados (43.7 millones de m^3) es el más cercano en orden de magnitud a la capacidad de diseño total de la presa de Cobre Panamá (91 millones de m^3), constituyendo el precedente histórico de mayor escala disponible; segundo, su costo de reparación está judicialmente validado mediante acuerdo definitivo ante las autoridades brasileñas —el más exhaustivamente documentado en la historia de la industria; tercero, la magnitud del desastre ofrece el límite superior empíricamente observado del daño que puede generar el colapso de una presa de relaves a escala comparable.

Una diferencia fundamental debe declararse explícitamente: los relaves de Cobre Panamá son significativamente más tóxicos que los relaves de hierro de Samarco. Los relaves de cobre contienen concentraciones elevadas de arsénico, plomo, cadmio, manganeso y cobre disuelto —metales que generan efectos neurológicos, carcinogénicos y renales en las poblaciones expuestas, como se documenta extensamente en los capítulos de impactos atmosféricos e hídricos de este análisis. Los costos de reparación derivados de un caso de mineral de hierro constituyen por tanto límites inferiores conservadores del daño real que generaría una falla de la presa de Cobre Panamá, incluso utilizando el caso de mayor magnitud documentado en la literatura internacional.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados del ACB del proyecto Cobre Panamá considerando los dos escenarios de análisis: un escenario sin falla de la presa de relaves y un escenario con falla de la presa de relaves.

4.1. Flujo de caja

4.1.1. Escenario sin falla de relaves

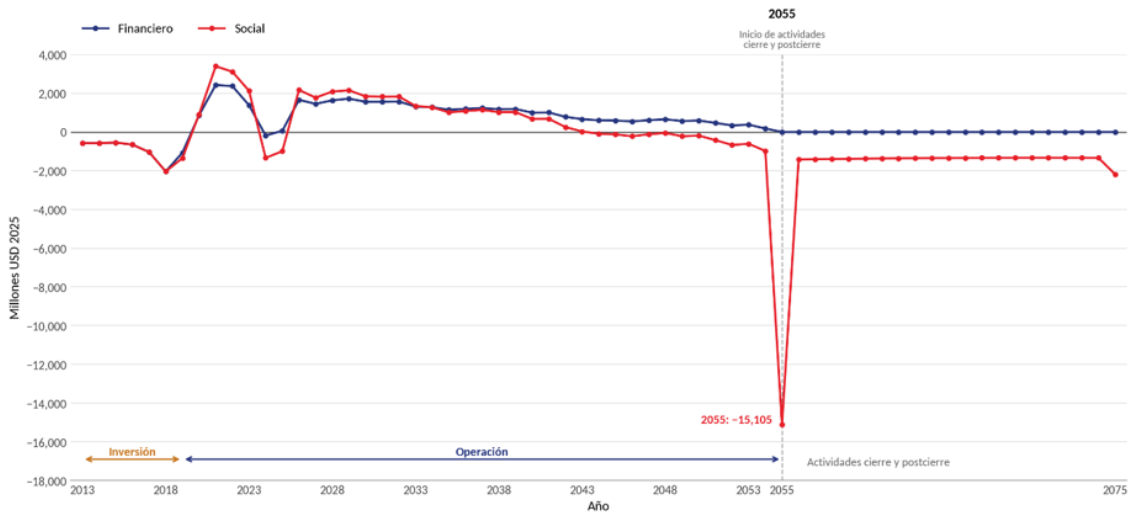
Este escenario asume que la presa de relaves se cierra y gestiona de forma ordenada, sin incidentes catastróficos. El costo de cierre en 2055 se compone del costo de reforestación (USD 145.84 millones en VPN), extrapolado del proyecto MDL Ipetí-Emberá (OUDCIE/McGill, 2005) y descontado a 30 años a la tasa diferenciada de 1.4% (Stern Review, 2006), y el costo de restauración, monitoreo y mantenimiento permanente de relaves (USD 13,527.1 millones en VPN), extrapolado de la Mina Faro (Yukón, Canadá) y descontado a la misma tasa.

La Figura *2* presenta la trayectoria del flujo de caja anual bajo el escenario sin falla, diferenciando la perspectiva financiera de la social a lo largo de tres fases: inversión (2013–2019), operación (2019–2054) y cierre y post-cierre (2055–perpetuidad).

Durante la fase de inversión ambos flujos coinciden y son negativos, con un desembolso máximo en 2018 (−USD 2,040 millones). La divergencia entre las dos perspectivas se abre con la entrada en operación: entre 2020 y 2033 el flujo social supera sistemáticamente al financiero, con un pico de +USD 3,394 millones frente a +USD 2,426 millones en 2021, lo que refleja beneficios sociales que exceden el retorno apropiado por el agente privado. Ambas series registran caídas transitorias en 2024 y 2025, más pronunciadas en términos sociales (−USD 1,337 millones y −USD 993 millones) que financieros (−USD 185 millones y +USD 63 millones). A partir de 2034 la relación se invierte: el flujo social cae por debajo del financiero y mantiene una tendencia descendente, cruzando a terreno negativo en 2044 (−USD 94 millones), es decir, once años antes del inicio del cierre. El flujo financiero, en contraste, permanece positivo durante toda la operación, aunque decreciente desde 2029 (+USD 1,720 millones) hasta 2054 (+USD 178 millones).

El contraste más relevante se produce en la fase de cierre y post-cierre. El flujo financiero se anula por completo a partir de 2055, lo que indica que el agente privado no asume costos una vez concluida la operación. La sociedad, en cambio, absorbe un costo concentrado de −USD 15,105 en 2055 por concepto de actividades de cierre y, posteriormente, un flujo negativo permanente que se estabiliza en torno a −USD 1,336 anuales a perpetuidad. Este patrón evidencia una transferencia de pasivos ambientales desde el agente privado hacia la sociedad: aun en ausencia de falla, el proyecto genera obligaciones de post-cierre de duración indefinida que no están internalizadas en la estructura financiera del proyecto.

Figura 2. Flujo de caja anual. Escenario sin falla (2013-2074+).



Bajo este escenario, los impactos sobre Erosión y sedimentación acumulada (AMB-06) y Contaminación hídrica por turbidez y sedimentos (AMB-03b) mantienen los valores de cierre ordenado —que decrecen progresivamente entre 2055 y 2073— y los impactos de salud por contaminación del aire y por contaminación hídrica (SAL-01 y SAL-02, respectivamente) continúan durante el período post-cierre, pero sin los impactos a perpetuidad del escenario de falla, como se verá más adelante, reflejando que sin un accidente catastrófico el deterioro ambiental se atenúa gradualmente con la restauración del sitio. Los impactos totales a perpetuidad (desde 2075 en adelante) en este escenario son: AMB-06 = USD 1,934.50 millones, AMB-03b = USD 242.11 millones y AMB-02 = USD 5.67 millones; SAL-01 y SAL-02 no registran impactos a perpetuidad.

4.1.2. Escenario con falla de relaves

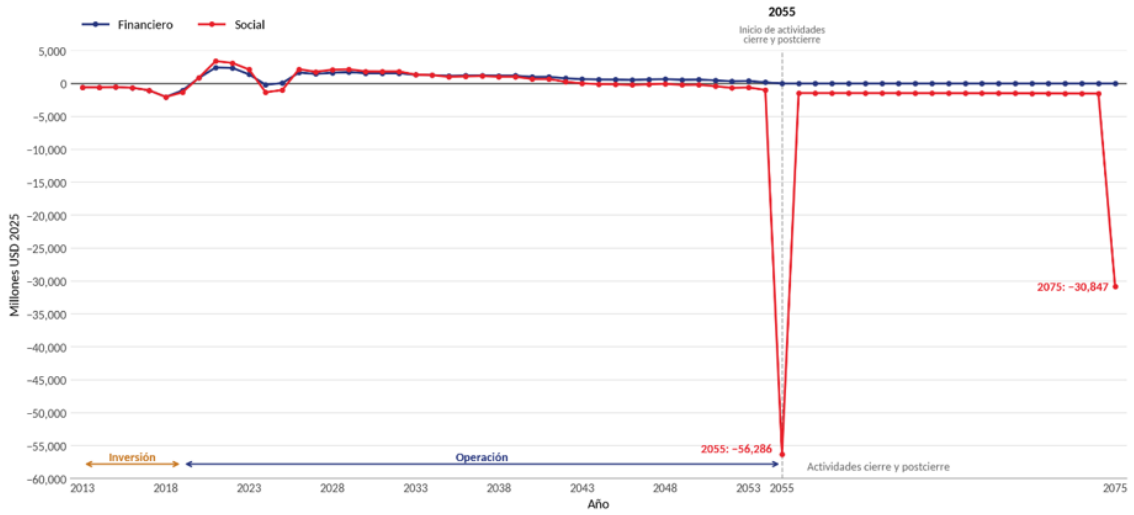
Este escenario asume que la presa de relaves sufre una falla catastrófica durante el período de cierre. El costo en 2055 se compone del costo de reforestación (USD 145.84 millones en VPN) —idéntico al escenario sin falla, porque la necesidad de reforestar el área deforestada no depende de si la presa falla o no— y el costo de restauración, monitoreo y tratamiento de agua ácida post-falla (USD 54,693.5 millones en VPN), que incorpora tanto el costo de cierre ordenado (USD 13,527.1 millones) como el costo adicional de la falla catastrófica extrapolado del desastre de Samarco/Fundão —Mariana, Brasil, 2015— (USD 41,166.4 millones), ambos descontados a la tasa diferenciada de 1.4%.

La Figura 3 presenta la trayectoria del flujo de caja anual bajo el escenario con falla. Durante las fases de inversión (2013–2019) y operación (2019–2054) las series son idénticas a las del escenario sin falla, ya que la falla se modela como un evento asociado al cierre: el desembolso máximo de inversión ocurre en 2018 (−USD 2,040 millones), el flujo social alcanza su máximo en 2021 (+USD 3,394 millones) frente a +USD 2,426 del financiero, y el flujo social se torna negativo desde 2044 (−USD 94 millones), once años antes del inicio del cierre. La diferencia entre escenarios se concentra, por tanto, íntegramente en la fase de cierre y post-cierre.

En 2055 el flujo social registra un costo de −USD 56,286 millones, equivalente a 3.7 veces el costo de cierre del escenario sin falla y a un sobrecosto de −USD 41,181 en un solo año. Esta magnitud excede en más del triple el rango completo de los flujos operativos del proyecto, lo que obliga a truncar la serie en el gráfico para preservar la legibilidad de las fases previas. El flujo financiero, en contraste, se anula a partir de 2055 en ambos escenarios: la totalidad del sobrecosto derivado de la falla es absorbida por la sociedad, sin ningún efecto sobre el resultado del agente privado.

En la fase de post-cierre el flujo social permanece negativo de forma indefinida y, a diferencia del escenario sin falla —donde se estabiliza y tiende a atenuarse hasta −USD 1,336 millones anuales—, aquí presenta un deterioro progresivo: pasa de −USD 1,448 millones en 2056 a −USD 1,528 millones a perpetuidad, un nivel 14.4% superior al del escenario sin falla. Acumulado sobre el período de post-cierre modelado, el sobrecosto adicional asciende a USD 2,319 millones, lo que eleva el costo incremental total atribuible a la falla a USD 43,500 millones (2025).

Figura 3. Flujo de caja anual. Escenario con falla (2013-2074+).



Bajo este escenario, Erosión y sedimentación acumulada (AMB-06) y Contaminación hídrica por turbidez y sedimentos (AMB-03b) muestran valores más altos durante el período de cierre (reflejando mayor erosión y turbidez post-falla). Adicionalmente, los impactos a perpetuidad —es decir, los costos ambientales y de salud que continúan más allá del horizonte de análisis 2013-2054— son sustancialmente mayores que en el escenario sin falla: AMB-06 = USD 9,672.48 millones, AMB-03b = USD 1,210.53 millones, SAL-01 = USD 11,517.71 millones y SAL-02 = USD 8,439.82 millones, frente a AMB-06 = USD 1,934.50 millones, AMB-03b = USD 242.11 millones y valores nulos en SAL-01 y SAL-02 bajo el escenario sin falla. Esta diferencia refleja que una falla catastrófica de relaves genera una contaminación residual persistente que se extiende indefinidamente más allá del período modelado, sin posibilidad de resolución dentro del horizonte del análisis.

El Anexo 7 presenta los cuadros con la información completa del flujo de caja, incluyendo la desagregación detallada de los ingresos y los costos, con el fin de facilitar su verificación y análisis.

4.2. Indicadores de evaluación

Bajo el escenario sin falla de relaves, el VPN acumulado a perpetuidad (2074+) es de −USD 23,107.36 millones (RBC = 0.9, VPN beneficios = USD 19,213.42 millones, VPN costos = USD 162,320.79 millones) (Cuadro 44). El costo de cierre ordenado extrapolado de la Mina Faro (USD 13,527.1 millones) y el costo de reforestación (USD 145.84 millones), descontados a la tasa diferenciada de 1.4%, junto con los impactos ambientales y de salud del período post-cierre e impactos a perpetuidad, son suficientes para revertir el balance positivo acumulado durante la operación activa.

Cuadro 44. Indicadores de evaluación del proyecto Cobre Panamá. Escenario sin falla de relaves.

	ACB Financiero		ACB Social	
Indicadores	**2025**	**2074+**	**2025**	**2074+**
VPN (Millones USD 2025)	422.10	29,081.81	433.69	-23,107.36
RBC	1.0	1.4	1.0	0.9

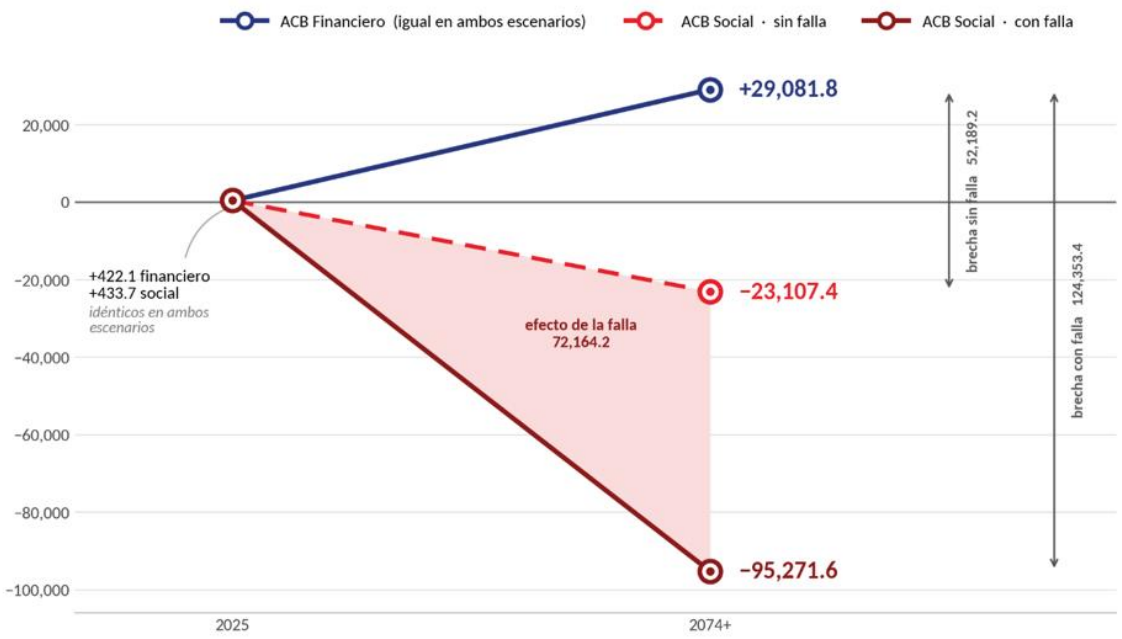
Bajo el escenario con falla de relaves, el VPN acumulado a 2074+ se deteriora drásticamente a −USD 95,271.58 millones (RBC = 0.6, VPN beneficios = USD 139,213.42 millones, VPN costos = USD 233,908.82 millones) (Cuadro 45). El costo de restauración catastrófica (USD 54,693.5 millones en VPN), más del cuádruple del costo de cierre ordenado, supera la totalidad de los beneficios económicos acumulados durante toda la vida útil de la operación. A esto se suman los impactos a perpetuidad sustancialmente mayores: AMB-06 = USD 9,672.48 millones, SAL-01 = USD 11,517.71 millones y SAL-02 = USD 8,439.82 millones, que reflejan la contaminación residual persistente que se extiende indefinidamente más allá del horizonte de análisis.

Cuadro 45. Indicadores de evaluación del proyecto Cobre Panamá. Escenario con falla de relaves.

	ACB Financiero		ACB Social	
Indicadores	**2025**	**2074+**	**2025**	**2074+**
VPN (Millones USD 2025)	422.10	29,081.81	433.69	-95,271.58
RBC	1.0	1.4	1.0	0.6

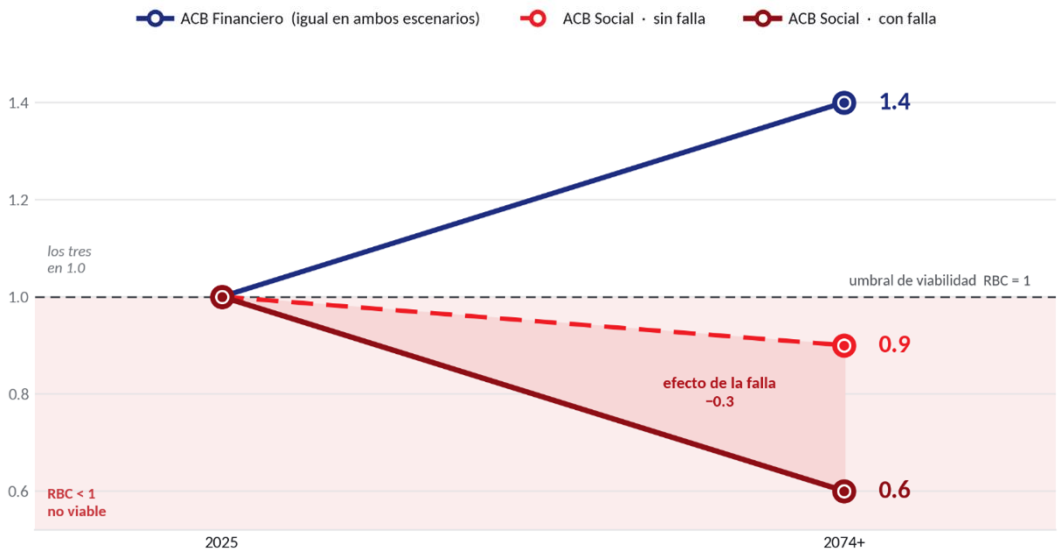
La diferencia en VPN social a 2074+ entre ambos escenarios asciende a USD 72,164.21 millones —el costo económico total del riesgo de falla de la presa de relaves (Figura 4). Los VPN de beneficios son idénticos en ambos escenarios (USD 139,213.42 millones), confirmando que toda la diferencia recae sobre los costos, y por tanto íntegramente sobre la sociedad panameña, sin que la empresa operadora ni el Gobierno asuman costo adicional alguno.

Figura 4. Valor Presente Neto: 2013-2025 y 2013-2074+ (Millones USD 2025).



Esta asimetría se confirma al examinar la razón beneficio-costo (Figura 5). En términos financieros, la RBC se mantiene en 1.4 en ambos escenarios: el proyecto es rentable para el operador privado y su resultado es insensible a la ocurrencia de la falla. En términos sociales, en cambio, la RBC no alcanza el umbral de viabilidad en ninguno de los dos escenarios: se sitúa en 0.9 sin falla y desciende a 0.6 con falla. Este hallazgo es analíticamente más contundente que el basado únicamente en el escenario de falla, pues indica que el proyecto no es socialmente viable aun cuando la presa de relaves opere sin contingencias; la falla no invierte el diagnóstico, lo profundiza.

Figura 5. Relación Beneficio Costo: 2013-2025 y 2013-2074+ (Millones USD 2025).



La consistencia entre ambos indicadores permite aislar el mecanismo. Dado que los beneficios del proyecto (Minera Panamá + sociedad) son idénticos en los dos escenarios (USD 139,213.4

millones), la caída de la RBC de 0.9 a 0.6 se explica exclusivamente por el aumento de los costos totales (sociales + empresa Minera Panamá), que pasan de aproximadamente USD 162,320.8 millones a USD 234,485.8 millones —un incremento de 44.5%, equivalente a los USD 72,164.21 millones de deterioro del VPN social. En el escenario sin falla los beneficios sociales cubren cerca del 85% de los costos; con falla, esa cobertura se reduce a alrededor del 59%.

4.3. Análisis distributivo

Hasta aquí, el ACB ha permitido responder a la pregunta «¿el proyecto genera más beneficio que costo para la sociedad en su conjunto?». Ahora, el análisis distributivo responde a una pregunta distinta e igualmente relevante: «¿quién recibe los beneficios y quién asume los costos?». Esta distinción es central en la evaluación social de proyectos extractivos, donde es frecuente que los beneficios económicos se concentren en actores con alta capacidad de apropiación (la empresa operadora, el Gobierno a través de impuestos) mientras los costos ambientales y de salud recaen sobre actores con baja capacidad de negociación o representación (las comunidades locales, agrupadas aquí bajo «sociedad»).

El análisis distribuye tanto los beneficios como los costos entre tres actores: Beneficios privados, correspondiente a la utilidad neta retenida por la empresa y sus accionistas; Gobierno, correspondiente a los ingresos fiscales (impuestos, regalías) menos los costos que el Gobierno panameño asume directamente (por ejemplo, gasto público en salud atribuible a los impactos del proyecto); y sociedad (compras locales y salarios), que agrupa tanto los beneficios económicos indirectos que llegan a la población a través del empleo y la actividad económica conexa, como la totalidad de los costos ambientales y de salud que recaen sobre las comunidades del Distrito de Donoso y su entorno —bajo el supuesto de que estos costos no son compensados ni internalizados por la empresa ni por el Gobierno.

La distribución de beneficios y costos acumulados hasta 2025 (Cuadro 46) muestra que los beneficios económicos del proyecto se concentran en tres actores principales: la empresa operadora (Minera Panamá), el Gobierno y la sociedad. La empresa ha obtenido beneficios privados netos por USD 422.10 millones, correspondientes a las utilidades generadas por la operación minera durante el período analizado. El Gobierno registra un beneficio neto de USD 1,166.48 millones, resultado de la recaudación de impuestos, regalías y otros ingresos fiscales (USD 1,360.15 millones), una vez descontados los costos públicos asociados al proyecto (USD 193.67 millones). La sociedad, medida a través de los salarios generados y las compras locales inducidos por la actividad minera, presenta beneficios brutos de USD 5,626.99 millones y costos de USD 5,615.39 millones, resultando en un beneficio neto de USD 11.59 millones —el más reducido de los tres actores, a pesar de ser quien asume la totalidad de los costos ambientales y de salud del proyecto.

Cuadro 46. Distribución de beneficios y costos por actor (VPN - Millones USD 2025).

Actor	Beneficios	Costos	Beneficios netos
Beneficios empresa Cobre Panamá	15,037.57	14,615.47	422.10
Gobierno	1,360.15	193,67	1,166.4
Sociedad	5,626.99	5,615.39	11.59
Ambientales		1,964.69	
Salud		3,650.70	
Efectos multiplicadores (empleo y compras locales)	5,626.998		

Nota metodológica: Los beneficios y costos del Gobierno se muestran para identificar cómo se distribuyen los efectos entre los distintos actores. Sin embargo, cuando estos corresponden a transferencias entre la empresa y el Gobierno —por ejemplo, impuestos o subsidios— no se suman al resultado neto del país, porque lo que para un actor es un beneficio representa un costo para otro. Por esta razón, estas transferencias se tienen en cuenta para el análisis de cada actor, pero se excluyen del beneficio neto del país para evitar doble contabilización.

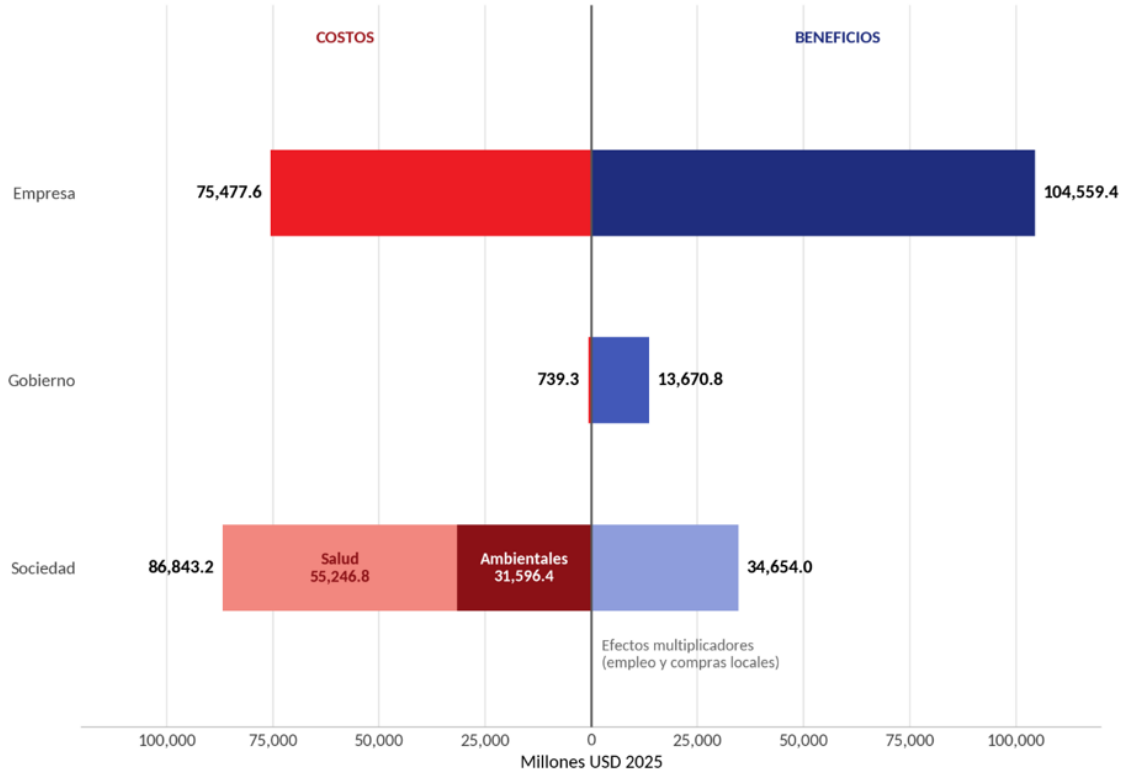
Al extender el horizonte hasta 2074+, bajo el escenario sin falla de relaves, la distribución se transforma radicalmente. La empresa Minera Panamá pasa a ser el principal beneficiario del proyecto (Cuadro 47 y Figura 6), con beneficios privados netos de USD 29,081.8 millones (beneficios USD 104,559.4 millones, costos USD 75,477.64 millones). El Gobierno también incrementa sustancialmente sus beneficios netos, alcanzando USD 12,931.5 millones (ingresos fiscales USD 13,670.8 millones, costos públicos USD 739.3 millones). En contraste, la sociedad experimenta un cambio radical en su balance económico: aunque los beneficios derivados de salarios y compras locales ascienden a USD 34,654 millones, los costos acumulados —incluyendo los impactos ambientales, de salud, los costos de cierre y los impactos a perpetuidad— alcanzan USD 86,843.2 millones, generando una pérdida neta de USD 52,189.2 millones. Este resultado indica que en el largo plazo los costos asumidos por la sociedad superan ampliamente sus beneficios económicos derivados de la actividad minera.

Cuadro 47. Distribución de beneficios y costos por actor. Escenario sin falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Actor	Beneficios	Costos	Beneficios netos
Empresa Minera Panamá	104,559.4	75,477.6	29,081.8
Gobierno	13,670.8	739.3	12,931.5
Sociedad	34,654.0	86,843.2	-52,189.2
Ambientales		31,596.4	
Salud		55,246.8	
Efectos multiplicadores (empleo y compras locales)	34,654.0		

Nota metodológica: Los beneficios y costos del Gobierno se muestran para identificar cómo se distribuyen los efectos entre los distintos actores. Sin embargo, cuando estos corresponden a transferencias entre la empresa y el Gobierno —por ejemplo, impuestos o subsidios— no se suman al resultado neto del país, porque lo que para un actor es un beneficio representa un costo para otro. Por esta razón, estas transferencias se tienen en cuenta para el análisis de cada actor, pero se excluyen del beneficio neto del país para evitar doble contabilización.

Figura 6. Distribución de beneficios. Escenario sin falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025).



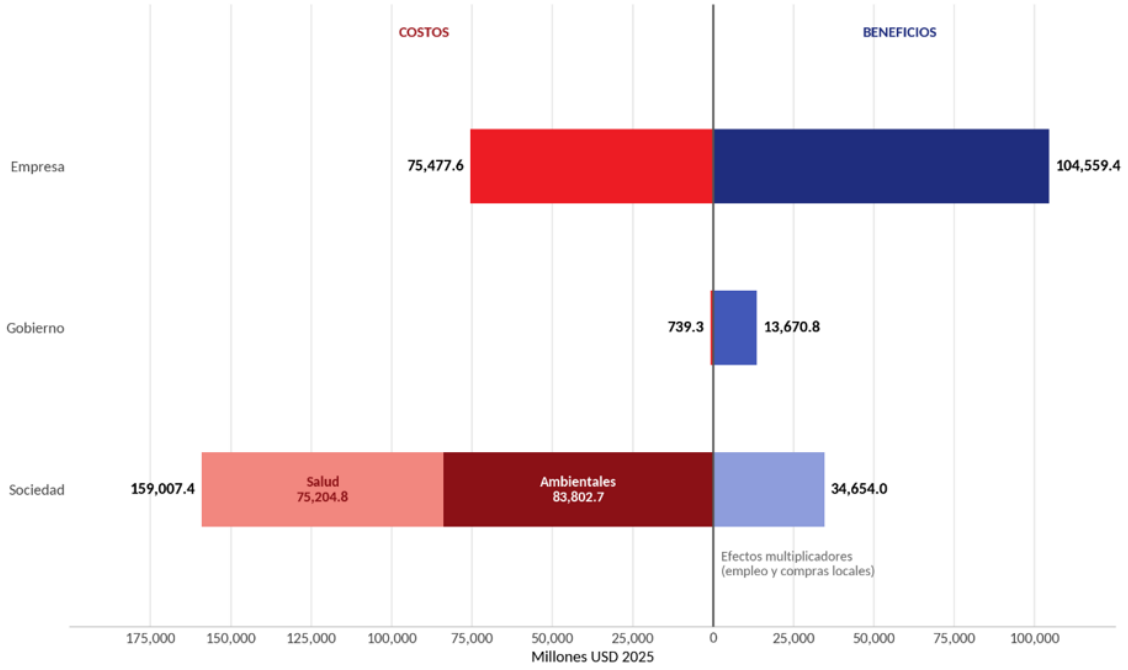
Bajo el escenario con falla catastrófica de la presa de relaves, la distribución evidencia una marcada asimetría en la asignación de los riesgos económicos del proyecto (Cuadro 48 y Figura 7). Los beneficios de Minera Panamá (USD 29,081.8 millones) y los beneficios netos del Gobierno (USD 12,931.52 millones) permanecen idénticos al escenario sin falla —ninguno de estos actores internaliza los costos económicos derivados de un eventual colapso de la presa de relaves. En contraste, la sociedad absorbe la totalidad del impacto económico del accidente: aunque sus beneficios brutos se mantienen en USD 34654 millones, los costos aumentan desde USD 86,843.2 millones en el escenario sin falla hasta USD 159,007.4 millones en el escenario con falla —un incremento de USD 72,164.2 millones— resultando en una pérdida neta de −USD 124,353.4 millones.

La totalidad del riesgo financiero de una eventual falla de la presa de relaves recae sobre las comunidades del Distrito de Donoso y la sociedad panameña en general, sin que la empresa operadora ni el Gobierno asuman costo adicional alguno en la estructura actual del proyecto.

Cuadro 48. Distribución de beneficios y costos por actor. Escenario con falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Actor	Beneficios	Costos	Beneficios netos
Empresa Minera Panamá	104,559.41	75,477.6	29,081.8
Gobierno	13,670.8	739.3	12,931.5
Sociedad	34,654.0	159,007.4	-124,353.4
Ambientales		83,802.7	
Salud		75,204.8	
Efectos multiplicadores (empleo y compras locales)	34,654.0		

Figura 7. Distribución de beneficios. Escenario con falla de relaves 2074+ (VPN - Millones USD 2025).



4.4. Análisis de sensibilidad

4.4.1. Escenario sin falla de relaves

El análisis de sensibilidad evalúa la robustez de los resultados del escenario sin falla de relaves frente a variaciones en la tasa de descuento social, el precio internacional del cobre y la tasa de regalías mineras. En cada dimensión se examina cómo cambia la distribución de beneficios netos entre los tres actores —Minera Panamá, Gobierno y sociedad— manteniendo constante el resto de los supuestos.

Sensibilidad a la tasa de descuento

Se examinan un rango de tasas desde 12.21% (tasa financiera alta) hasta 1.21% (tasa social baja), con la tasa base del análisis de 2.21% como referencia. Para cada escenario se aplica una tasa diferenciada de 0.81 puntos porcentuales menor para los costos de restauración ecológica y relaves, consistente con la justificación metodológica del Stern Review (2006).

Cuadro 49. Análisis de sensibilidad — Tasa de descuento. Escenario sin falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Tasa de descuento general	Tasa de descuento específica	Privado Minera Panamá	Gobierno	Sociedad
12.21%	11.40%	7,660.5	6,017.8	-41,261.7
11.21%	10.40%	9,252.9	6,313.2	-41,269.9
10.21%	9.40%	10,883.2	6,657.7	-41,312.9
9.21%	8.40%	12,573.9	7,060.4	-41,418.3
8.21%	7.40%	14,351.5	7,532.8	-41,626.6
7.21%	6.40%	16,246.8	8,089.0	-41,997.4

6.21%	5.40%	18,296.4	8,746.7	-42,618.8
5.21%	4.40%	20,544.7	9,528.0	-43,625.7
4.21%	3.40%	23,045.1	10,460.7	-45,233.2
3.21%	2.40%	25,863.7	11,580.3	-47,819.1
2.21%	1.40%	29,081.8	12,931.5	-52,189.2
1.21%	0.40%	32,801.4	14,572.1	-61,056.4

El resultado más relevante es el comportamiento de la sociedad a lo largo del rango de tasas. A ninguna de las tasas analizadas —incluyendo la más alta del rango (12.21%)— la sociedad registra un beneficio neto positivo: su balance oscila entre −USD 41,261.7 millones a la tasa más alta y −USD 61,056.40 millones a la tasa más baja. Es decir, en el escenario sin falla con la estructura de tasas diferenciadas, el déficit de la sociedad es estructural e irreducible dentro del rango de tasas analizado.

A la tasa base de 2.21% (con tasa diferenciada de 1.40% para costos de restauración), los beneficios netos de Minera Panamá ascienden a USD 29,081.8 millones y los del Gobierno a USD 12,931.5 millones, mientras la sociedad registra una pérdida neta de −USD 52,189.2 millones. Este resultado refleja que, bajo una tasa apropiada para proyectos con impactos de largo plazo, los costos ambientales, de salud y de cierre adquieren un peso suficiente para superar ampliamente los beneficios económicos que recibe la sociedad a través del empleo y las compras locales.

A la tasa más baja analizada de 1.21% (con tasa diferenciada de 0.40% para costos de restauración), los beneficios de Minera Panamá alcanzan USD 32,801.4 millones y los del Gobierno USD 14,572.1 millones, mientras el déficit de la sociedad se profundiza a −USD 61,056.4 millones, porque los costos ambientales, de salud y de cierre —que se materializan principalmente en el largo plazo— pierden muy poco valor al ser descontados y adquieren mayor relevancia en el valor presente del proyecto.

Este análisis confirma que el déficit de la sociedad en el escenario sin falla no es un artefacto de la tasa de descuento seleccionada, sino una característica estructural del proyecto bajo la estructura actual de distribución de costos y beneficios.

Sensibilidad al precio del cobre

El análisis de sensibilidad al precio del cobre muestra que la rentabilidad del proyecto es altamente dependiente de las condiciones del mercado internacional, aunque los efectos son heterogéneos entre los distintos actores. Se evaluó un escenario de precio bajo (USD 0.60/lb), el escenario base (USD 5.48/lb) y un escenario de precio alto (USD 6.36/lb).

Cuadro 50. Análisis de sensibilidad — Precio del cobre. Escenario sin falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Parámetro	Empresa Minera Panamá	Gobierno	Sociedad
USD 0.60/lb (bajo)	-40,295.4	11,515.7	-86,715.3
USD 5.48/lb (base)	29,081.8	12,931.5	-52,189.2
USD 6.36/lb (alto)	41,592.5	13,186.9	-45,963.1

En el escenario de precio bajo (USD 0.60/lb), los beneficios de Minera Panamá se vuelven negativos (−USD 40,295.4 millones), lo que indica que el proyecto deja de ser financieramente rentable para la empresa a ese nivel de precios. El Gobierno mantiene un beneficio neto positivo de USD 11,515.7 millones, aunque inferior al escenario base, gracias a la recaudación fiscal

acumulada durante los años de operación con precios superiores. La sociedad profundiza su déficit a −USD 86,715.3 millones, porque los costos ambientales y de salud son independientes del precio del cobre —ocurren de la misma forma independientemente de cuánto valga el metal en el mercado internacional.

Bajo el escenario base (USD 5.48/lb), los beneficios privados de FQ ascienden a USD 29,081.8 millones, el Gobierno registra beneficios netos de USD 12,931.5 millones y la sociedad mantiene un balance negativo de −USD 52,189.2 millones. Estos resultados muestran que, aun bajo las condiciones de mercado consideradas más probables, los beneficios económicos derivados del empleo y las compras locales no compensan los costos que recaen sobre la sociedad.

En el escenario de precio alto (USD 6.36/lb), los beneficios privados aumentan considerablemente a USD 41,492.5 millones y los beneficios del Gobierno ascienden a USD 13,186.9 millones. La sociedad reduce su déficit a −USD 45,963.1 millones —una mejora respecto al escenario base, pero que confirma que incluso a precios excepcionalmente altos, significativamente por encima del precio histórico promedio de la última década, la Sociedad no alcanza el equilibrio; de hecho, un VPN=0 para la sociedad requeriría un precio de USD 12.86/lb. Este resultado evidencia una divergencia estructural entre rentabilidad privada y bienestar social que no se resuelve con el ciclo del mercado del cobre.

Sensibilidad a la tasa de regalías

La tasa de regalías constituye uno de los principales mecanismos mediante los cuales el Gobierno captura una parte de la renta generada por la explotación minera. El análisis compara la tasa contractual del 2% con un escenario intermedio del 5% y uno del 10%, cercano a los estándares aplicados en algunos países productores de cobre como Chile y Perú.

Cuadro 51. Análisis de sensibilidad — Tasa de regalías. Escenario sin falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Parámetro	Empresa Minera Panamá	Gobierno	Sociedad
2% (contractual)	29,081.8	12,931.5	-52,189.2
5%	26,696.9	15,316.5	-51,048.8
10%	22,722.0	19,291.3	-49,148.3

Los resultados muestran que el incremento en la tasa de regalías aumenta los beneficios capturados por el Gobierno y reduce parcialmente el déficit de la sociedad, pero sin revertirlo en ninguno de los escenarios analizados. Bajo la tasa contractual del 2%, el Gobierno obtiene un beneficio neto de USD 12,931.5millones y la sociedad registra un déficit de −USD 52,189.3 millones. Al incrementar la tasa al 5%, los beneficios del Gobierno aumentan a USD 15,316.5 millones y el déficit de la sociedad se reduce marginalmente a −USD 51,048.8 millones. A una tasa del 10%, los beneficios del Gobierno alcanzan USD 19,291.3 millones y el déficit de la sociedad se reduce a −USD 49,148.3 millones —una mejora de apenas USD 3,040.9 millones respecto al escenario base, frente a un déficit total de USD 52,189.2 millones.

Es importante señalar que los beneficios de Minera Panamá no son constantes entre escenarios —disminuyen de USD 29,081.8 millones al 2% a USD 22,722 millones al 10%, porque una mayor tasa de regalías reduce el beneficio neto operacional de la empresa. Sin embargo, esta reducción no se traslada íntegramente a la sociedad sino principalmente al Gobierno.

El análisis de las regalías confirma que este instrumento tiene una capacidad limitada para compensar el déficit social del proyecto: incluso multiplicando por cinco la tasa contractual vigente, el déficit de la sociedad se reduce en menos de un 6%. La magnitud del desequilibrio

distributivo identificado supera con creces lo que puede corregirse mediante ajustes en la tasa de regalías dentro de rangos razonables de política fiscal.

4.4.2. Escenario con falla de relaves

Sensibilidad a la tasa de descuento

El comportamiento del escenario con falla frente a la tasa de descuento difiere significativamente del observado en el escenario sin falla. La reducción de la tasa de descuento incrementa de manera considerable el valor presente de los costos asociados a una eventual falla de la presa de relaves, profundizando el déficit que recae sobre la sociedad.

Cuadro 52. Análisis de sensibilidad — Tasa de descuento. Escenario con falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Tasa de descuento general	Tasa de descuento específica	Empresa Minera Panamá	Gobierno	Sociedad
12.21%	11.40%	7,660.5	6,017.8	-43,816.1
11.21%	10.40%	9,252.9	6,313.2	-44,644.1
10.21%	9.40%	10,883.2	6,657.7	-45,790.7
9.21%	8.40%	12,573.9	7,060.4	-47,393.9
8.21%	7.40%	14,351.5	7,532.8	-49,655.4
7.21%	6.40%	16,246.8	8,089.0	-52,879.2
6.21%	5.40%	18,296.4	8,746.7	-57,541.4
5.21%	4.40%	20,544.7	9,528.0	-64,434.6
4.21%	3.40%	23,045.1	10,460.7	-75,003.2
3.21%	2.40%	25,863.7	11,580.3	-92,284.1
2.21%	1.40%	29,081.8	12,931.5	-124,353.4
1.21%	0.40%	32,801.4	14,572.1	-204,769.9

A una tasa de 12.21% (tasa diferenciada 11.40%), la sociedad registra un beneficio neto de −USD 43,816.1 millones, a diferencia del escenario sin falla donde a esa misma tasa la sociedad registraba un déficit de −USD 41,216.7 millones. La diferencia de USD 2,599.4 millones entre escenarios a tasa alta refleja el costo presente de la falla cuando los desembolsos futuros se descuentan agresivamente. Es el escenario de menor déficit para la sociedad dentro del rango analizado, y al igual que en el escenario sin falla, no existe ninguna tasa en el rango analizado donde la sociedad alcance un balance positivo, confirmando que el déficit es estructural en ambos escenarios.

A la tasa base de 2.21% (tasa diferenciada 1.40%), el déficit de la sociedad asciende a −USD 124,353.4 millones, mientras los beneficios de Minera Panamá alcanzan USD 29,081.8 millones y los del Gobierno USD 12,931.5 millones. Este resultado evidencia que cuando se otorga un mayor peso a los impactos futuros, los costos sociales y ambientales —incluyendo el costo de restauración catastrófica de relaves (USD 54,693.5 millones en VPN) y los impactos a perpetuidad— superan ampliamente los beneficios económicos generados por el proyecto.

A la tasa más baja analizada de 1.21% (tasa diferenciada 0.40%), el déficit de la sociedad se profundiza a −USD 204,769.9 millones, reflejando que los costos derivados de una falla catastrófica adquieren un peso muy superior cuando se evalúan con una tasa consistente con la protección del bienestar de las generaciones futuras. Los beneficios de Minera Panamá alcanzan USD 32,801.4 millones y los del Gobierno USD 14,572.1 millones.

La tasa de descuento determina qué tan visible es el costo futuro del accidente en el análisis presente. El costo nominal de la falla (USD 62,471.4 millones) ocurre en 2055, 30 años después del año base. A la tasa diferenciada de 1.40% vale hoy USD 41,166.4 millones; a la tasa diferenciada de 0.40% vale hoy USD 55,499.1 millones; a la tasa diferenciada de 11.40% vale apenas USD 2,449.8 millones. Esta variación de más de 22 veces entre el extremo superior e inferior del rango ilustra por qué la elección de la tasa de descuento es la decisión metodológica con mayor impacto sobre los resultados distributivos del análisis —y la que con mayor frecuencia se toma sin transparencia en los estudios de impacto de proyectos extractivos.

Sensibilidad al precio del cobre

El precio del cobre constituye uno de los principales determinantes de la rentabilidad del proyecto, ya que afecta directamente los ingresos de la operación minera y la magnitud de los beneficios privados y gubernamentales. Sin embargo, en el escenario con falla de la presa de relaves, el incremento en el precio del mineral no es suficiente para compensar los costos adicionales que recaen sobre la sociedad.

Cuadro 53. Análisis de sensibilidad — Precio del cobre. Escenario con falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Parámetro	Empresa Minera Panamá	Gobierno	Sociedad
USD 0.60/lb (bajo)	-40,295.4	11,515.7	-158,879.5
USD 5.48/lb (base)	29,081.8	12,931.5	-124,353.4
USD 6.36/lb (alto)	41,592.5	13,186.9	-118,127.4

En el escenario de precio bajo (USD 0.60/lb), los beneficios de Minera Panamá se vuelven negativos (−USD 40,295.4 millones), reflejando que el proyecto deja de ser financieramente viable para la empresa bajo condiciones de mercado desfavorables. El Gobierno continúa obteniendo beneficios positivos (USD 11,515.7 millones), aunque inferiores al escenario base, mientras que la sociedad registra el mayor deterioro de todos los escenarios analizados, con un déficit de −USD 158,879.5 millones, USD 72,164.2 millones más profundo que en el escenario sin falla al mismo precio (−USD 86,715.3 millones), diferencia que corresponde exactamente al costo adicional de la falla catastrófica y que se mantiene constante e invariante al precio del cobre.

En el escenario base (USD 5.48/lb), los beneficios de Minera Panamá ascienden a USD 29,081.8 millones y el Gobierno registra beneficios netos de USD 12,931.5 millones. La sociedad mantiene un balance fuertemente negativo de −USD 124,353.4 millones, evidenciando que los beneficios económicos derivados de la actividad minera son insuficientes para compensar los costos sociales, ambientales y de restauración catastrófica de relaves bajo este escenario.

Al incrementar el precio del cobre hasta USD 6.36/lb, los beneficios privados aumentan a USD 41,592.5 millones y los del Gobierno a USD 13,186.9 millones. El déficit de la sociedad se reduce a −USD 118,127.4 millones, una mejora de USD 6,226.0 millones respecto al escenario base, pero que confirma que incluso a precios excepcionalmente altos, significativamente por encima del precio histórico promedio de la última década, la sociedad permanece en un déficit profundo e irreversible bajo el escenario de falla catastrófica. La comparación con el escenario sin falla al mismo precio alto (−USD 45,963.1 millones) revela que el costo adicional de la falla para la sociedad asciende a USD 72,164.2 millones, monto constante e invariante al precio del cobre, confirmando que el riesgo de la presa de relaves opera con independencia del ciclo del mercado del metal.

Sensibilidad a la tasa de regalías

El análisis de sensibilidad muestra que el incremento en la tasa de regalías mejora la participación del Gobierno en la renta minera, pero resulta insuficiente para compensar los costos sociales derivados de una eventual falla de la presa de relaves.

Cuadro 54. Análisis de sensibilidad — Tasa de regalías. Escenario con falla 2074+ (VPN - Millones USD 2025).

Parámetro	Empresa Minera Panamá	Gobierno	Sociedad
2% (contractual)	**29.081,8**	**12,931.5**	**-124,353.4**
5%	**26.696,9**	15,316.5	-123,213.1
10%	**22.722,0**	19,291.3	-121,312.5

Bajo la tasa contractual del 2%, el Gobierno obtiene un beneficio neto de USD 12,931.5 millones y la sociedad registra un déficit de −USD 124,353.4 millones. Al incrementar la tasa al 5%, los beneficios del Gobierno aumentan a USD 15,316.5 millones y el déficit de la sociedad se reduce marginalmente a −USD 123,213.1 millones, una mejora de USD 1,140.3 millones frente a un déficit de - USD 124,353.4 millones. A una tasa del 10%, los beneficios del Gobierno alcanzan USD 19,291.3 millones y el déficit de la sociedad se reduce a −USD 121,312.5 millones, una mejora acumulada de USD 3,040.9 millones, equivalente a apenas el 2.4% del déficit total.

Estos resultados ponen de manifiesto que, aun con una redistribución significativa de la renta minera hacia el Gobierno, los costos asociados a una falla catastrófica de la presa de relaves no pueden compensarse mediante un incremento en las regalías. Mientras que en el escenario sin falla una tasa del 10% reducía el déficit de la sociedad de −USD 52,189.2 millones a −USD 49,148.3 millones (mejora de 5.8%), en el escenario con falla la misma tasa reduce el déficit de −USD 124,353.4 millones a −USD 121,312.5 millones (mejora de apenas 2.4%) —confirmando que el costo de la falla domina el resultado y las regalías no pueden compensarlo.

El déficit de la sociedad en el escenario con falla es estructural e irreducible mediante instrumentos de política ordinarios. La tasa de descuento produce el mayor rango de variación: entre −USD 43,816.1 millones (al 12.21%) y −USD 204,769.95 millones (al 1.21%) —un rango de USD 160,953.8 millones que refleja la sensibilidad extrema del costo de la falla catastrófica al horizonte temporal de valoración. El precio del cobre mejora parcialmente el balance social pero no lo revierte: incluso al precio alto de USD 6.36/lb la sociedad mantiene un déficit de −USD 118,127.4 millones. Ninguna tasa de regalías factible elimina el déficit —a una tasa del 10%, cinco veces la tasa contractual, el déficit se reduce en apenas 2.4%. Esto confirma que el riesgo de falla de relaves no puede cubrirse mediante instrumentos de política fiscal ordinarios, sino únicamente mediante una garantía financiera específica constituida durante la operación activa y dimensionada para cubrir el pasivo contingente del accidente.

Finalmente, es importante resaltar que, al cierre de la vida útil de la mina en 2054, en el escenario sin falla los beneficios netos acumulados del proyecto (USD 19,939.59 millones) equivalen a apenas el 46.3 % de los costos que restan por asumir entre 2055 y 2074+ (USD 43,046.96 millones). En términos temporales, ese acumulado alcanza a cubrir únicamente los primeros cuatro años del periodo post-cierre (2055–2057), de un total de veinte años de obligaciones remanentes. Bajo el escenario de falla, la totalidad de los beneficios netos generados durante los cuarenta y dos años de vida productiva de la mina no alcanza a financiar siquiera el primer año de los costos de cierre. Los recursos acumulados cubren apenas una tercera parte del desembolso de 2055 y menos de una quinta parte del pasivo total posterior al cese de operaciones.

5. CONCLUSIONES

El Análisis Costo-Beneficio del proyecto Cobre Panamá integra más de seis décadas de efectos económicos, ambientales y de salud en un marco cuantificado y comparable. Los resultados del análisis —desagregados por actor, por escenario de cierre y bajo múltiples supuestos de parámetros clave— permiten extraer conclusiones que van más allá de los indicadores agregados de VPN y RBC. Se presentan a continuación los ocho hallazgos centrales del estudio, ordenados por su relevancia para la política pública y la gestión del riesgo ambiental en Panamá.

Hallazgo 1: El proyecto es socialmente rentable en el corto plazo, pero deficitario en el largo plazo
Hasta 2025, el VPN acumulado del proyecto es positivo en ambos escenarios (+USD 422.10 millones), reflejando que durante el período de operación activa los beneficios económicos superan los costos ambientales y de salud cuantificados. Sin embargo, al extender el horizonte hasta 2074 e incorporar el costo de cierre y los impactos a perpetuidad, el resultado es negativo en ambos escenarios: bajo cierre ordenado el VPN asciende a −USD 23,107.36 millones (RBC = 0.9), mientras que bajo falla catastrófica revierte a −USD 95,271.58 millones (RBC = 0.6). La rentabilidad social del proyecto no está garantizada por los beneficios de la operación activa — está condicionada a la gestión exitosa del cierre, y aun bajo el mejor escenario posible el balance social agregado es negativo en el horizonte completo del análisis.

Hallazgo 2: La presa de relaves concentra el mayor riesgo económico del proyecto
La diferencia en VPN a 2074+ entre el escenario sin falla (−USD 23,107.36 millones) y el escenario con falla (−USD 95,271.58 millones) asciende a USD 72,164.21 millones —que representa el costo económico total del riesgo de falla de la presa de relaves, incluyendo el diferencial directo entre los costos de restauración y los mayores impactos ambientales y de salud a perpetuidad. Este diferencial supera ampliamente el costo de construcción de la mina (USD 10,000 millones) y equivale a más de cinco veces el costo de cierre ordenado extrapolado de la Mina Faro (USD 13,527.1 millones en VPN). La presa de relaves no es solo una infraestructura de soporte a la operación —es el mayor pasivo contingente del proyecto.

Hallazgo 3: La sociedad es la única parte que registra pérdida neta en todos los escenarios de largo plazo
A 2025, los tres actores registran beneficios netos positivos —incluyendo la sociedad (+USD 11.59 millones). Sin embargo, al extender el horizonte a 2074+, la sociedad pasa a déficit en ambos escenarios: −USD 52,189.2 millones sin falla y −USD 124,353.4 millones con falla. Minera Panamá y el Gobierno mantienen beneficios netos positivos en ambos escenarios (USD 29,081.8 millones y USD 12,931.5 millones respectivamente). Esto revela una asimetría temporal fundamental: los beneficios económicos de la operación llegan en los primeros años, cuando los tres actores ganan; los costos ambientales y de salud se acumulan durante décadas, y cuando el horizonte se extiende suficientemente, solo la sociedad acusa el déficit.

Hallazgo 4: El costo de la falla recae íntegramente sobre la sociedad: no supone carga alguna para Minera Panamá ni para el Gobierno. Los beneficios netos de Minera Panamá (USD 29,081.8 millones) y del Gobierno (USD 12,931.5 millones) son numéricamente idénticos en el escenario sin falla y con falla de relaves. El deterioro de USD 72,164.2 millones en el beneficio neto de la sociedad, de −USD 52,189.2 millones a −USD 124,353.4 millones, no es compensado por ningún mecanismo en la estructura actual del proyecto: ni el Contrato Ley 406 ni el marco regulatorio minero panameño establecen provisiones de garantía financiera que trasladen el riesgo del accidente hacia los actores que capturan los beneficios de la operación.

Hallazgo 5: La tasa de descuento es el parámetro con mayor influencia sobre los resultados distributivos

La elección de la tasa de descuento produce una variación de USD 19,794.7 millones en el beneficio neto de la sociedad en el escenario sin falla (de −USD 41,261.7 millones al 12.21% a −USD 61,056.4 millones al 1.21%), y de USD 160,952.9 millones en el escenario con falla (de −USD 43,816.1 millones al 12.21% a −USD 204,769.9 millones al 1.21%). Este rango supera ampliamente el producido por cualquier otro parámetro —incluyendo el precio del cobre o la tasa de regalías. La tasa de descuento no es un parámetro técnico neutral: define qué tan pesados son los daños futuros en el presente, y por tanto qué actores aparecen como ganadores o perdedores netos. Bajo la estructura de tasas diferenciadas, la sociedad registra déficit en todos los escenarios de tasa analizados —incluyendo el más alto (12.21%)— lo que confirma que el déficit de la sociedad es estructural, no un artefacto de la elección metodológica de la tasa.

Hallazgo 6: El precio del cobre no revierte el déficit de la sociedad en ninguno de los escenarios analizados

A USD 6.36/lb —el precio alto analizado, 16.1% por encima del precio de referencia de marzo de 2026 (USD 5.48/lb) y superior al promedio histórico reciente— el VPN de la sociedad continúa siendo negativo: −USD 45,963.1 millones en el escenario sin falla y −USD 118,127.4 millones en el escenario con falla. En consecuencia, ninguno de los escenarios de precios evaluados permite alcanzar un beneficio social neto positivo.

Los resultados muestran, además, que en el escenario sin falla el precio del cobre tendría que alcanzar aproximadamente USD 12.86/lb para que el VPN de la sociedad fuese igual a cero, un nivel muy superior tanto al precio de referencia como al escenario alto analizado. En el escenario con falla, el precio requerido sería aún mayor. Dado que el precio del cobre es una variable exógena determinada por los mercados internacionales, la rentabilidad social del proyecto para la sociedad no puede depender de un escenario de precios excepcionalmente alto, lo que evidencia que el déficit social identificado responde a factores estructurales y no a fluctuaciones ordinarias del ciclo del cobre.

Hallazgo 7: Las regalías mineras son un instrumento insuficiente para internalizar el riesgo de falla de relaves

En el escenario sin falla, incluso multiplicando por cinco la tasa contractual vigente (10%), el déficit de la sociedad se reduce en apenas el 5.8%, de −USD 52,189.2 millones a −USD 49,148.3 millones. En el escenario con falla, la misma tasa reduce el déficit en apenas el 2.4%, de −USD 124,353.4 millones a −USD 121,312.5 millones. Esto revela una incompatibilidad estructural entre el instrumento y el riesgo que pretende cubrir: las regalías operan sobre los ingresos de la operación activa, mientras que el riesgo de falla de relaves se materializa décadas después de que terminó la producción. El instrumento correcto para ese riesgo es una garantía financiera específica —fondo fiduciario, seguro de responsabilidad ambiental, bono de cierre— que se constituya y capitalice durante la operación.

Hallazgo 8: Los costos sociales estimados representan un escenario conservador y probablemente subestiman el costo económico total del proyecto

Los resultados del ACB corresponden a un escenario conservador en la estimación de los costos sociales y ambientales, al tiempo que algunos beneficios económicos representan aproximaciones que pueden diferir de su impacto neto sobre la economía. El análisis no incorpora todos los subsidios explícitos e implícitos previstos en el contrato de concesión. La valoración de los impactos sobre la salud se limita a las enfermedades para las cuales existe evidencia científica y parámetros suficientes para su cuantificación económica, excluyendo

posibles efectos derivados de la exposición prolongada a contaminantes y metales pesados. Indicadores relacionados con pérdidas de biodiversidad tampoco fueron incluidos.

Este análisis no incorpora los costos del proceso de arbitraje internacional iniciado por *Minera Panamá* contra el Gobierno panameño bajo el Tratado de Libre Comercio Canadá-Panamá, cuya pretensión ha sido estimada en hasta el 20% del PIB panameño (CSIS, 2025). De materializarse, dicho costo recaería sobre el Gobierno y, en última instancia, sobre los contribuyentes panameños —transformando radicalmente el balance del actor «Gobierno» en el análisis distributivo. Su magnitud potencial —superior al VPN total del proyecto en cualquier escenario— refuerza la conclusión de que la decisión sobre el futuro de Cobre Panamá involucra pasivos financieros para la sociedad panameña que superan ampliamente los beneficios económicos cuantificados durante los cinco años de operación activa.

Por otra parte, el beneficio económico asociado al empleo se aproxima mediante el valor de las remuneraciones pagadas por el proyecto, lo que no constituye una estimación del empleo neto creado. De manera similar, los efectos indirectos derivados de las compras de bienes y servicios se estiman a partir del valor de las adquisiciones locales, sin descontar el consumo intermedio incorporado en su producción. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como una estimación basada en la mejor información disponible, que probablemente subestima algunos costos sociales y ambientales mientras que ciertos beneficios económicos representan aproximaciones de la actividad económica asociada al proyecto y no necesariamente de su contribución neta al bienestar social.

6. IMPLICACIONES DE POLÍTICA

Los ocho hallazgos convergen en tres implicaciones de política que trascienden el caso específico de Cobre Panamá y son relevantes para cualquier evaluación futura de grandes proyectos extractivos en el país.

Primera: el cierre de mina debe planificarse y financiarse antes del inicio de la operación, no después del cierre. El costo de restauración de Cobre Panamá, USD 13,527.1 millones en el escenario de cierre ordenado y USD 54,693.5 millones en el escenario de falla catastrófica, ambos en VPN a tasa diferenciada de 1.4%, supera en ambos casos la inversión total de construcción de la mina (USD 10,000 millones). Este pasivo no estaba provisionado en los estados financieros de la empresa ni garantizado por el Gobierno panameño al momento del cierre en noviembre de 2023. El marco regulatorio minero de Panamá debe exigir la constitución de garantías de cierre suficientes como condición de otorgamiento de la concesión, siguiendo los estándares del Marco de Desempeño de la IFC (2020) y las guías del ICMM.

Segunda: el análisis distributivo debe ser parte explícita de toda evaluación de impacto ambiental de proyectos extractivos. El ACB agregado del proyecto Cobre Panamá es negativo en ambos escenarios al horizonte completo de 2074 (−USD 23,107.368 millones sin falla y −USD 95,217.58 millones con falla). Aun en el corto plazo, cuando el balance es positivo (+USD 433.69 millones a 2025), el análisis distributivo revela que ese resultado positivo es sostenido por los beneficios de Minera Panamá y el Gobierno, mientras la sociedad registra apenas +USD 11.59 millones —el beneficio neto más reducido de los tres actores, a pesar de asumir la totalidad de los costos ambientales y de salud. Un análisis distributivo explícito es indispensable para evaluar si la distribución de beneficios y costos es socialmente aceptable, y para diseñar los mecanismos de compensación necesarios.

Tercera: la tasa de descuento social debe establecerse por regulación y no dejarse a discreción de quien realiza el análisis. Como demuestra el análisis de sensibilidad, la elección de la tasa de descuento es el parámetro con mayor influencia sobre los resultados distributivos —produciendo un rango de variación de USD 160,953.8 millones en el déficit de la sociedad en el escenario con falla. La diferencia entre los resultados a distintas tasas no refleja una diferencia en la realidad del proyecto, sino en la metodología de valoración. Panamá debería adoptar, por vía regulatoria, una tasa de descuento social estándar para las evaluaciones de proyectos de gran escala, consistente con las recomendaciones de la OCDE para impactos intergeneracionales —y aplicar tasas diferenciadas para costos sobre activos naturales irreemplazables, siguiendo el enfoque del Stern Review (2006) y los principios de Krutilla & Fisher (1975), Weitzman (1998) y Dasgupta (2021).

REFERENCIAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2012). Toxicological profile for manganese. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA. https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp151.pdf

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2020). Toxicological profile for lead. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA. https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf

AIDA Americas. (2022). Understanding the true costs of mining in Latin America. https://www.aida-americas.org

Arregocés, H. A., Rojano, R., et al. (2023). Modelación de la dispersión de material particulado y arsénico en zona de influencia de minería de carbón a cielo abierto. Revista de Salud Pública, 25(1). Concentración máxima de As modelada con AERMOD para área de influencia de mina a tajo abierto en trópico colombiano: 10.90 ng/m³.

Asamblea Legislativa de la República de Panamá. 1997. *Ley 9 de 26 de febrero de 1997, por la cual se aprueba el Contrato de Concesión Minera celebrado entre el Estado y Minera Petaquilla, S.A.* Gaceta Oficial No. 23,237, 28 de febrero de 1997.

Asamblea Nacional de Panamá. (2017, 7 de junio). *Ley No. 93 de 7 de junio de 2017, que crea el Área Protegida de Recursos Manejados Cordillera de Coiba*. FAOLEX. https://faolex.fao.org/docs/pdf/pan190157.pdf

Asner, G. P., et al. (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(38), 16738–16742. https://doi.org/10.1073/pnas.0905323107

Atkinson, R. W., Kang, S., Anderson, H. R., Mills, I. C., & Walton, H. A. (2014). Epidemiological time series studies of $PM_{2.5}$ and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis. Thorax, 69(7), 660–665. https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2013-204492

Autoridad del Canal de Panamá (ACP). (varios años). Informes sobre gestión de cuencas y sedimentos en el Canal de Panamá. Panamá.

Banco Mundial. (2017). Shadow price of carbon: guidance note for World Bank Group staff. World Bank, Washington, D.C. Trayectoria baja 2026: USD \$46/tCO_2e (USD 2017). Actualizado a USD \$59.11/tCO_2e (USD 2025) por CPI EE. UU.

Banco Mundial — World Development Indicators (WDI). (2024). PIB per cápita PPP (USD internacionales corrientes). Panamá 2022: USD \$28,700. OCDE promedio 2022: USD \$48,200. https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.CD

BirdLife International. (2023). Minera Panamá operations severely threatens people, wildlife, and planetary health. https://www.rewild.org/press/minera-panama-threatens-people-wildlife-and-planet

Bosworth, B., Burtless, G., & Zhang, K. (2017). Later retirement, inequality in old age, and the growing gap in longevity between rich and poor. Brookings Institution Press.

Bouchard, M. F., Sauvé, S., Barbeau, B., Legrand, M., Brodeur, M. È., Bouffard, T., Limoges, E., Bellinger, D. C., & Mergler, D. (2011). Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. Environmental Health Perspectives, 119(1), 138–143. https://doi.org/10.1289/ehp.1002321

Bsrat, A., et al. (2024). Prevalence and risk factors of cutaneous leishmaniasis in a newly identified endemic site in South-Ethiopia. PLOS ONE. PMC11684615. OR para CL asociado a presencia de hábitat perturbado en zona peridoméstica: 2.1 (IC 95%: 1.3–3.5, p=0.003).

Bus-Ex. (2025). Cobre Panamá: First Quantum's Landmark Project in Central America. https://www.bus-ex.com/article/cobre-panama-first-quantums-landmark-project-central-america

Cameron, A. C., & Trivedi, P. K. (2008). Microeconometrics using Stata. Cambridge University Press.

Caraballo, L., Zakzuk, J., Lee, B. W., Acevedo, N., Soh, J. Y., Sánchez-Borges, M., & Ansotegui, I. J. (2018). Health care costs and resource utilization for different asthma severity stages in Colombia. Allergy and Asthma Proceedings, 39(6). https://doi.org/10.2500/aap.2018.39.4148

Castaño-Vergara, J. C., et al. (2022). Economic costs of severe seasonal influenza in Colombia, 2017–2019: a multi-center analysis. Vaccine, 40(32), 4487–4494. https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2022.05.074

Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2012). Low level lead exposure harms children: a renewed call for primary prevention. CDC, Atlanta, GA.

CEPAL. (s.f.). Estudios de costos de servicios de agua en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile.

Cernea, M. (2000). Risks, safeguards and reconstruction: a model for population displacement and resettlement. Economic and Political Weekly, 35(41), 3659–3678.

Chazdon, R. L., Broadbent, E. N., Rozendaal, D. M. A., et al. (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. Science Advances, 2(5), e1501639. https://doi.org/10.1126/sciadv.1501639

Chen, J., Hoek, G., et al. (2020). Long-term exposure to PM and its impact on chronic obstructive pulmonary disease incidence: a meta-analysis of cohort studies. Environment International, 145, 106206. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106206

Claus Henn, B., Ettinger, A. S., Schwartz, J., Téllez-Rojo, M. M., Lamadrid-Figueroa, H., Hernández-Avila, M., Schnaas, L., Amarasiriwardena, C., Bellinger, D. C., Hu, H., & Wright, R. O. (2010). Early postnatal blood manganese levels and children's neurodevelopment. Epidemiology, 21(4), 433–439. https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181df8e52

Consejo Nacional de la Empresa Privada (CoNEP). (2025). Estudio sobre las repercusiones socioeconómicas del cierre de operaciones de Cobre Panamá. https://conep.org.pa/wp-content/uploads/2025/01/Estudio_RECOCP.pdf

CSIS — Center for Strategic and International Studies. (2025). Reviving Cobre Panamá could be strategic to U.S. minerals security. https://www.csis.org

Csavina, J., et al. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. Science of the Total Environment, 433, 58–73. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013

Csavina, J., et al. (2014). Use of lead isotopes to identify sources of metal and metalloid contaminants in atmospheric aerosol from mining operations. Chemosphere, 122, 219–226. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.047

Cusumano, A. M., et al. (2024). Cost of dialysis therapy across Latin America and the Caribbean: a systematic review. Medscape / Value in Health Regional Issues. Costo mediano hemodiálisis en LAC: USD $17,241/año (IC 95%: $14,275–$25,861).

Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation, 51(5), 427–433.

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2017). Air pollution and mortality in the Medicare population. New England Journal of Medicine, 376(26), 2513–2522. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747

Díaz, S. M., et al. (2020). Fish consumption in coastal communities of Colombia: contribution to dietary exposure assessment. Ciénaga Grande del Caribe colombiano. Tasa de ingesta media en comunidades ribereñas: 54 g/día.

Dion, L. A., Saint-Amour, D., Sauvé, S., Barbeau, B., Mergler, D., & Bouchard, M. F. (2018). Changes in water manganese levels and longitudinal assessment of intellectual function

in children exposed through drinking water. NeuroToxicology, 64, 118–125. https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.07.030

Dominici, F., Peng, R. D., Bell, M. L., Pham, L., McDermott, A., Zeger, S. L., & Samet, J. M. (2006). Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. JAMA, 295(10), 1127–1134. https://doi.org/10.1001/jama.295.10.1127

Earthworks. (2022). Copper mining's toxic legacy: water contamination at porphyry copper mines in the United States. https://www.earthworks.org/publications/copper-minings-toxic-legacy

Ecosystem Marketplace / Forest Trends. (2024). State of the voluntary carbon markets 2024. Precio medio de créditos REDD+ en el mercado voluntario de carbono para bosque tropical: USD $6.02/tCO₂. https://www.ecosystemmarketplace.com/carbon-markets

El Clip. (2025). Las pruebas de los daños ambientales de First Quantum en Panamá. https://www.elclip.org/las-pruebas-de-los-danos-ambientales-de-first-quantum-en-panama

FAO. (2000). Manual on integrated soil management and conservation practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

FAO. (2015a). Estimating soil erosion for a catchment. In: Soil erosion assessment and modelling. FAO Soils Bulletin. Factor K de erodabilidad para suelos tropicales húmedos: 0.02–0.06.

FAO. (2015b). Status of the world's soil resources (SWSR) — main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

FAO / WHO. (2003). Joint FAO/WHO expert committee on food additives (JECFA) evaluation. WHO, Geneva.

Faustini, A., Rapp, R., & Forastiere, F. (2014). Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies. European Respiratory Journal, 44(3), 744–753. https://doi.org/10.1183/09031936.00114713

Ferreira, J. V. S., et al. (2021). Malaria transmission in landscapes with varying deforestation levels and timelines in the Amazon: a longitudinal spatiotemporal study. Scientific Reports, 11, 6380. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85890-3

First Quantum Minerals Ltd. (2019). Commercial production achieved at Cobre Panamá. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/NR-19-21-Commercial-Production-1FINAL.pdf

First Quantum Minerals Ltd. / Minera Panamá S.A. (2023–2024). Cobre Panamá — preservation and safe management. Costo declarado: USD $15–20 millones/mes. https://www.first-quantum.com/operations/cobre-panama

First Quantum Minerals Ltd. 2015. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2014*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/Full-Statements_v001_l014jv.pdf

First Quantum Minerals Ltd. 2016. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2015*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/q4-Year-2015-Audited-Financial-Statements.pdf

First Quantum Minerals Ltd. 2017. *Management's Discussion and Analysis for the Year Ended December 31, 2016*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/Q42016-cfs.pdf

First Quantum Minerals Ltd. 2018. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2017*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/Complete-Statements-2017-q4.pdf

First Quantum Minerals Ltd. 2019. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2018*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/Q4-2018-FQM-Combined-Financial-Statements-MDA-FINAL-1.pdf

First Quantum Minerals Ltd. 2020. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2019*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/Q4-2019-FQM-Financial-Statements-FINAL-1.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2021. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2020*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2020-FQM-Financial-Statements-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2022. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2021*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2021-FQM-Financial-Statements-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2023. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2022*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2022-FQM-Financial-Statements-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 20pe *Consolidated Financial Statements. December 31, 2023*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2023-FQM-Financial-Statements-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2025. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2024*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2024-FQM-Financial-Statements-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2026. *Consolidated Financial Statements. December 31, 2025*. Toronto: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2026/02/Q4-2025-FQM-Financial-Statements-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2026. *Annual Information Form 2025*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2026/02/260210-FQM-AIF-2026-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2020. *Q4 2019 Results Presentation*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2019-Full-Presentation-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2021. *Q4 2020 Results Presentation*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2020-Results-Presentation-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2022. *Q4 2021 Results Presentation*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2021-Presentation-FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2023. *Q4 2022 Results Presentation*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/04/Q4-2022-Presentation.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2020. *Tax Transparency and Contributions to Government Report 2019*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/FQM_TTCG-REPORT-2019_FINAL.pdf.
First Quantum Minerals Ltd. 2021. *Tax Transparency and Contributions to Government Report 2020*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/J005083-2020-ESTMA-REPORT_FINAL-27052021.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2022. *Tax Transparency and Contributions to Government Report 2021*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/5377_FQM_TaxReport2022_FINAL.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2023. *Tax Transparency and Contributions to Government Report 2022*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/7106_FQM_Tax-Transparency-Report-2022_FINAL-May-2023.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2024. *Tax Transparency and Contributions to Government Report 2023*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd.

https://cobrepanama.com/documents/transparencia/reportes_fiscales/Informe_de_Transparencia_Fiscal_y_Contribuciones_a_Los_Gobiernos_2023.pdf
First Quantum Minerals Ltd. 2025. *Tax Transparency and Contributions to Government Report 2024*. Vancouver: First Quantum Minerals Ltd. https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/8894_FQM_2024-Tax-Transparency-Report-Spanish-final-1.pdf
García, L. (2019). Water quality impacts of open-pit copper mining in tropical catchments.
GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators. (2020). Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. The Lancet, 396(10258), 1204–1222. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30925-9
GBD 2019 Collaborators / Roth, G. A., et al. (2020). Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019. Journal of the American College of Cardiology, 76(25), 2982–3021. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.11.010
Gómez, C., et al. (2020). Economic burden of bladder cancer in Colombia: cost-of-illness study from the health system perspective. Value in Health Regional Issues. Costo anual cáncer de vejiga: USD $3,229/caso/año (PPP 2025).
Grandjean, P., Weihe, P., White, R. F., et al. (2005). Neurobehavioral deficits associated with prenatal methylmercury exposure. Environmental Health Perspectives, 113(5), 532–538.
Grandjean, P., et al. (1997). Cognitive deficit in 7-year-old children with prenatal exposure to methylmercury. Neurotoxicology and Teratology, 19(6), 417–428. https://doi.org/10.1016/S0892-0362(97)00097-4
Gray, David, Michael Lawlor, and Robert Stone. 2019. *Cobre Panamá Project, Colón Province, Republic of Panamá: NI 43-101 Technical Report*. First Quantum Minerals Ltd, March. Disponible en: https://www.first-quantum.com/wp-content/uploads/2025/08/NI-43-101-Technical-Report-Cobre-Panama.pdf
Guallar, E., Sanz-Gallardo, M. I., Van't Veer, P., et al. (2002). Mercury, fish oils, and the risk of myocardial infarction. New England Journal of Medicine, 347(22), 1747–1754.
Gulley, S. (2017). Valuing health impacts in benefit-cost analysis. Journal of Benefit-Cost Analysis, 8(1), 1–20.
Gutierrez, J. D., et al. (2019). Spatial epidemiology of cutaneous leishmaniasis in Colombia: socioeconomic and demographic factors associated with a growing epidemic. Epidemiology & Infection, 147, e237. https://doi.org/10.1017/S0950268819001596
Hammitt, J. K., & Robinson, L. A. (2011). The income elasticity of the value per statistical life: transferring estimates between high- and low-income populations. Journal of Benefit-Cost Analysis, 2(1), 1–29.
Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., & Kaufman, J. D. (2013). Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. Environmental Health, 12(1), 43. https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-43
Hola Praxis. (2025). Proyecto Donoso. https://www.holapraxis.com/post/proyectodonoso
Holdridge, L. R. (1967). Life zone ecology. Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
Holl, K. D., & Aide, T. M. (2011). When and where to actively restore ecosystems? Forest Ecology and Management, 261(10), 1558–1563. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004
Hoyos, N. (2005). Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. Catena, 63(1), 85–108. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.012
ICBA Economics — Independent Contractors and Businesses Association of BC. (2026). The rising cost of building construction in Canada. Incremento acumulado precios construcción no residencial (industrial) Canadá: +42% entre Q3 2019 y Q3 2025; incremento 2022–23→2025: ~14%. Factor de actualización aplicado: 1.143. https://www.icba.ca
Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) — Contraloría General de la República de Panamá. (2023). XII Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda 2023. Población por

cuenca hidrográfica, provincia, distrito y corregimiento. https://www.inec.gob.pa/publicaciones

Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) — Contraloría General de la República de Panamá. (2024). Encuesta de Hogares 2024. Salario mediano sector rural. https://www.inec.gob.pa

Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). 2026. Cuentas Nacionales. https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default2.aspx?ID_CATEGORIA=4&ID_SUBCATEGORIA=26

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC, Hayama, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge University Press.

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). Arsenic, metals, fibres and dusts. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C. IARC, Lyon.

International Finance Corporation (IFC). (2012). Performance Standard 5: Land acquisition and involuntary resettlement. World Bank Group, Washington, D.C.

International Finance Corporation (IFC). (2020). Environmental, health, and safety guidelines for mining. World Bank Group, Washington, D.C.

Jamison, D. T., Summers, L. H., Alleyne, G., et al. (2013). Global health 2035: a world converging within a generation. The Lancet, 382(9908), 1898–1955.

Kenkel, D. S. (2006). On valuing mortality risk reductions in regulatory analysis. Journal of Risk and Uncertainty, 32(1), 5–33.

La Estrella de Panamá. (2025). Legal Minera Panamá Pantano. https://www.laestrella.com.pa/economia/legal-minera-panama-pantano-MBLE18961

Lanphear, B. P., Hornung, R., Khoury, J., Yolton, K., Baghurst, P., Bellinger, D. C., & Roberts, R. (2005). Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function: an international pooled analysis. Environmental Health Perspectives, 113(7), 894–899. https://doi.org/10.1289/ehp.7688

Levin, M. L. (1953). The occurrence of lung cancer in man. Acta Unio Internationalis Contra Cancrum, 9(3), 531–541. Fórmula estándar de la fracción atribuible poblacional: PAF = p_e × (RR−1) / [p_e × (RR−1) + 1].

Li, Z., Li, J., Wang, Y., et al. (2022). Heavy metal pollution and environmental risks in the water of Rongna River caused by natural AMD around Tiegelongnan copper deposit, Northern Tibet, China. PLOS ONE. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266700

Linares, C., et al. (2022). Lung cancer health services utilization and associated cost for the Colombian health system. Journal of Clinical Oncology, 39(15_suppl), e18784. https://doi.org/10.1200/JCO.2021.39.15_suppl.e18784

Lorinc, J. (2024). La historia del cierre de una mina de cobre de US$10.000 millones en la selva de Panamá. Bloomberg Línea. https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/panama/la-historia-del-cierre-de-una-mina-de-cobre-de-us10000-millones-en-la-selva-de-panama

Mailman, M., Stepnuk, L., Cicek, N., & Bodaly, R. A. (2006). Strategies to lower methyl mercury concentrations in hydroelectric reservoirs and lakes: a review. Science of the Total Environment, 368(1), 224–235. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.041

Mateo-Vega, J., et al. (2019). Participatory mapping and monitoring of carbon stocks in indigenous territories of the Darién, Panama. Conservation Science and Practice, 1, e42. https://doi.org/10.1111/csp2.42

Melgarejo, L., et al. (2015). Inventario nacional de carbono en bosques de Panamá. MiAmbiente / CCAD / USAID. Stock de carbono en bosques maduros panameños: ~80 Mg C/ha (170 Mg/ha biomasa total).

Menke, A., Muntner, P., Batuman, V., Silbergeld, E. K., & Guallar, E. (2006). Blood lead below 0.48 µmol/L (10 µg/dL) and mortality among US adults. Circulation, 114(13), 1388–1394. https://doi.org/10.1161/circulationaha.106.628321

Mikhailova, E. A., Bryant, R. B., Schwager, S. J., & Smith, S. D. (1997). Predicting rainfall erosivity in Honduras. Soil Science Society of America Journal, 61(1), 273–279.

MINSA Panamá — Sistema de Información de Estadísticas de Salud (SIES). (2026). Morbilidad por causa, Distrito de Donoso, Corregimiento Miguel de la Borda. Elaborado por Yarixsa González. Fecha: 20260420. [Fuente primaria institucional. 29 casos J40–J47 en adultos ≥40 años / ~46,000 personas = Inc_o 0.00063.]

MINSA Panamá — SISVIG/DHIS2. (2026). Leishmaniasis (B55.1, 2 y 9) según región, sexo y grupos de edad. Año 2025. Generado: GChiari, 30/04/2026. Total provincia de Colón: 126 casos.

MINSA Panamá — SISVIG/DHIS2. (2026). Malaria ó paludismo (B54.X) según región, sexo y grupos de edad. Año 2025. Generado: GChiari, 30/04/2026. Total provincia de Colón: 36 casos.

Minera Panamá S.A. (2011). Estudio de impacto ambiental — Proyecto Minero Cobre Panamá. Categoría III. Presentado ante la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM), República de Panamá.

Mohammadyan, M., et al. (2021). Long-term exposure to PM2.5 and cardiovascular disease incidence and mortality: findings based on a 15-year cohort study. Environmental Health. PMC8555193.

Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. Soil Science Society of America Journal, 50(5), 1294–1298. https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x

Moore, J. N., & Langner, H. W. (1996). Natural background determination and impact quantification in trace metal-contaminated river sediments. Environmental Science & Technology, 30(1), 409–416. https://doi.org/10.1021/es950192b

Moran, R. (2022). Environmental and social risks of large-scale metal mining in Latin America. CEPAL, Santiago de Chile.

Morgan, R. P. C. (2005). Soil erosion and conservation (3rd ed.). Blackwell Publishing, Oxford. ISBN: 9781405117814.

Moreno, T., et al. (2007). Geochemical variations in size-fractionated metalliferous aerosols sampled at diverse European sites. Atmospheric Environment, 41(35), 7489–7502. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.059

Mubarak, A., et al. (2016). Water contamination with heavy metals and trace elements from Kilembe copper mine and tailing sites in Western Uganda. Chemosphere, 169, 281–292. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.067

National Research Council (NRC). (2000). Toxicological effects of methylmercury. National Academies Press, Washington, D.C. ISBN: 0309071402. Factor absorción gastrointestinal MeHg: 95%.

OCDE. (2012). Mortality risk valuation in environment, health and transport policies. OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/9789264130807-en

OCDE. (2025). Mortality risk valuation in policy assessment: a global meta-analysis of value of statistical life studies. OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/76ca89a2-en

Office of the Auditor General of Canada. (2024). Report 1: Contaminated sites in the north. Reports of the Commissioner of the Environment and Sustainable Development to the Parliament of Canada — 2024. Cat. No. FA1-26/2024-1-1E-PDF. ISBN 978-0-660-70797-6. Costo estimado remediación Mina Faro 2022–23: CAD $5,000 millones (Exhibit 1.8, p. 23). https://www.oag-bvg.gc.ca

Orellano, P., Reynoso, J., & Quaranta, N. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. Environment International, 143, 105974. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974

Organización Panamericana de la Salud / OPS. (2022a). Indicadores básicos de salud 2022 — Región de las Américas. Peso corporal promedio adultos LAC: 58.6 kg. https://www.paho.org/es/documentos/indicadores-basicos-2022

Organización Panamericana de la Salud / OPS. (2022b). Leishmaniasis: informe epidemiológico de las Américas. Costo tratamiento leishmaniasis cutánea LAC: USD $650–$1,920/caso. https://www.leishmaniasis.paho.org

Ortiz-Martínez, M. G., Rivera-Ramírez, S., Méndez-Tejeda, R., et al. (2021). Distribution of toxic metals and relative toxicity of airborne $PM_{2.5}$ in Puerto Rico. Environmental Research, 192, 110365. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110365

Oryan, A., & Akbari, M. (2016). Worldwide risk factors in leishmaniasis. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 9(10), 925–932. https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2016.06.021

OUDCIE — Organización de Unidad y Desarrollo de La Comunidad Ipetí-Emberá / Universidad McGill / Universidad de Panamá. (2005). Proyecto de inversión de carbono en la Comunidad Indígena Ipetí Emberá. Formulario de Endoso MDL.

Oulhote, Y., Mergler, D., Barbeau, B., et al. (2014). Neurobehavioral function in school-age children exposed to manganese in drinking water. Environmental Health Perspectives, 122(12), 1343–1350. https://doi.org/10.1289/ehp.1307918

Panagos, P., et al. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. Scientific Reports, 7, 4175. https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8

Panamá. Decreto Ejecutivo N°1 de 10 de enero de 2024. Salarios mínimos por región y actividad económica 2024–2025. Gaceta Oficial N°29946-A. Región 2: B/.326.56/mes actividades agropecuarias y servicios básicos.

Parreira, R., et al. (2021). Deforestation and dengue fever incidence in the Brazilian Amazon: an ecological study. Epidemiology & Infection, 149, e207. https://doi.org/10.1017/S0950268821001758

Pavani, E., et al. (2020). Economic valuation of sediment removal from reservoirs: a benefit transfer approach for Latin America.

Phillips, O. L., et al. (1998). Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. Science, 282, 439–442. https://doi.org/10.1126/science.282.5388.439

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., et al. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science, 267, 1117–1123. https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117

Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., et al. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. Nature, 530, 211–214. https://doi.org/10.1038/nature16512

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., et al. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. JAMA, 287(9), 1132–1141. https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132

Prada, S. I., Takeuchi, Y., & Ariza, J. G. (2018). How much for a broken heart? Costs of cardiovascular disease in Colombia using a person-based approach. PLOS ONE, 13(12). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208232

Rattan Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. Critical Reviews in Plant Sciences, 17(4), 319–464. https://doi.org/10.1080/07352689891304249

Rattan Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. Land Degradation & Development, 12(6), 519–539. https://doi.org/10.1002/ldr.472

Redwood, S. D. (2021). The history of mining and mineral exploration in Panama: from pre-Columbian gold mining to modern copper mining. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72(3). https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n3a180720

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agricultural Handbook No. 703.

Revista E&N. (2025). Panamá ordena la ejecución del plan de preservación de mina de cobre. https://www.revistaeyn.com/centroamericaymundo/panama-ordena-la-ejecucion-del-plan-de-preservacion-de-mina-de-cobre-GJ25971016

Rice, M. B., et al. (2015). Long-term exposure to traffic emissions and fine particulate matter and lung function decline in the Framingham Heart Study. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 191(6), 656–664. https://doi.org/10.1164/rccm.201410-1875OC

Rodríguez-Villamizar, L. A., et al. (2023). Effects of air pollution on restricted activity days: systematic review and meta-analysis. Environmental Research Letters, 18(4). https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbf0b

Rojano, R., Arregocés, H., & Angulo, L. (2015). Concentración y relación de PST, PM_{10} y $PM_{2.5}$ en poblaciones cercanas a minería a cielo abierto: Caso Cerrejón Colombia. Interciencia, 40(9), 596–603. Scielo: S0798-40652015000300005.

Roth, G. A., et al. (GBD 2019 Collaborators). (2020). Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019. Journal of the American College of Cardiology, 76(25), 2982–3021. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.11.010

Salazar-Camacho, C., et al. (2020). Mercury in fish from the Caquetá River (Colombia): speciation, bioaccumulation factors, and human health risk. Environmental Pollution, 259, 113851. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113851

Satarug, S., et al. (2025). Cadmium exposure and chronic kidney disease: global burden and implications for environmental policy. Toxics, 13(2). Fracción de ERC atribuible a exposición ambiental por cadmio en agua: 5–10%.

Seal, R. R., Hammarstrom, J. M., Schulte, R. F., et al. (2007). Environmental geochemistry of skarn and polymetallic sulfide mineral deposits. USGS Professional Paper 1682. Elizabeth Copper Mine, Vermont: Cd en AMD operación normal: 1–10 µg/L. https://pubs.usgs.gov/pp/1682

SEER — National Cancer Institute. (2025). Cancer survival statistics. Supervivencia a 5 años cáncer de vejiga LAC: ~80% (fatalidad 20%). Supervivencia a 5 años cáncer de pulmón LAC: ~15% (fatalidad 85%). https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms

Sen, A. (1999). Development as freedom. Oxford University Press.

Seo, D. C., et al. (2001). Dilution and removal of dissolved metals from acid mine drainage along Imgok Creek, Korea. Applied Geochemistry, 16(9), 1119–1134. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00017-8

Shepard, D. S., Undurraga, E. A., Halasa, Y. A., & Stanaway, J. D. (2016). The global economic burden of dengue: a systematic analysis. The Lancet Infectious Diseases, 16(8), 935–941. https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)00146-8

Smith, A. H., Lingas, E. O., & Rahman, M. (2000). Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. Bulletin of the World Health Organization, 78(9), 1093–1103.

Society for Ecological Restoration (SER). (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration (2nd ed.). SER, Washington, D.C. Costos de restauración de alta complejidad ecológica en LAC: USD $80,000–$350,000/ha. https://www.ser.org/page/SERStandards

Sonter, L. J., et al. (2017). Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. Nature Communications, 8, 1013. https://doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w

Spadaro, J. V., & Rabl, A. (2008). Estimating the monetary value of health impacts of pollution: a critical review. Environmental Impact Assessment Review, 28(6), 343–361. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.12.003

Strickland, M. J., Darrow, L. A., Klein, M., Flanders, W. D., Sarnat, J. A., Waller, L. A., & Tolbert, P. E. (2010). Short-term associations between ambient air pollutants and pediatric asthma

emergency department visits. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 182(3), 307–316. https://doi.org/10.1164/rccm.200908-1201OC

TCEQ — Texas Commission on Environmental Quality. (2012). Development support document — arsenic, inorganic. Inhalation cancer unit risk factor. IUR alternativo para As inhalado: ~1.5×10^{-4} per µg/m³. https://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/tox/dsd/arsenic_inorganic.pdf

The Globe and Mail. (2025). Cobre Panamá beckons as First Quantum seals Inmet takeover. https://www.theglobeandmail.com/report-on-business/industry-news/energy-and-resources/cobre-panama-beckons-as-first-quantum-seals-inmet-takeover/article10159606

Trasande, L., Liu, Y., Cianci, G., & Landrigan, P. J. (2013). Economic costs of childhood lead exposure in low- and middle-income countries. Environmental Health Perspectives, 121(9), 1097–1102. https://doi.org/10.1289/ehp.1206424

Ullrich, S. M., Tanton, T. W., & Abdrashitova, S. A. (2001). Mercury in the aquatic environment: a review of factors affecting methylation. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 31(3), 241–293.

United Nations Digital Library. (2025). Cobre Panamá. https://digitallibrary.un.org/record/4043019

United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). Global mercury assessment 2018. UNEP, Geneva.

USEPA. (2001). Water quality criterion for the protection of human health: methylmercury. EPA-823-R-01-001. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

USEPA. (2004). Drinking water health advisory for manganese. Health Advisory Level (LHA) no regulatorio: 300 µg/L. EPA-822-R-04-003.

USEPA. (2007). Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children (IEUBK). Technical Support Document. EPA/540/R-93/081. Factor agua→sangre niños: 0.375 µg/dL BLL/µg Pb/día. Factor agua→sangre adultos: 0.04 µg/dL BLL/µg Pb/día.

USEPA. (2010). Guidelines for preparing economic analyses. EPA-240-R-10-001. https://www.epa.gov/environmental-economics/guidelines-preparing-economic-analyses

USEPA. (2012a). Regulatory Impact Analysis for the Particulate Matter NAAQS. Restricted Activity Days (RAD) benefit function: 0.8 RAD/person/year baseline. EPA-452/R-12-003.

USEPA. (2012b). Technical review of mine waste management. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

USEPA IRIS. (1995, vigente 2025). Arsenic, inorganic (CASRN 7440-38-2). Inhalation Unit Risk: 4.3×10^{-3} per µg/m³. Cancer Slope Factor oral: 32 $(mg/kg/día)^{-1}$ (actualizado enero 2025). https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=278

U.S. Bureau of Labor Statistics. (2025). Consumer Price Index (CPI-U), historical series. https://www.bls.gov

U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2023). Updated interim reference levels for dietary lead to support FDA's Closer to Zero Action Plan. https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/closer-zero

U.S. Geological Survey (USGS). (2000). Mercury in mineral deposits. USGS, Reston, VA.

U.S. Department of the Treasury. 2025. *Daily Treasury Long-Term Rates*. Disponible en: https://home.treasury.gov/resource-center/data-chart-center/interest-rates/TextView?field_tdr_date_value_month=202503&type=daily_treasury_long_term_rate

Vahrson, W. G. (1990). Erosividad de la lluvia en Centroamérica. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Vahrson, W. G. (1994). Regional assessment of soil erosion risk in Central America. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Vale S.A. (2024). Vale reaches definitive settlement with public authorities in Brazil for the full reparation of Samarco's Fundão dam collapse. Costo total acuerdo definitivo octubre 2024: USD $30,000 millones. https://www.vale.com

Vale S.A. / Estado de Minas Gerais. (2021). Settlement agreement — Brumadinho dam collapse reparations. USD $7,000 millones en reparaciones. Acordado 4 de febrero de 2021.

Vargas, N., Castaño, R., Vásquez, D., et al. (2025). Incremental direct cost of chronic obstructive pulmonary disease in Colombia using doubly robust methods on administrative data. Revista Clínica Española. https://doi.org/10.1016/j.rce.2025.08.001

vLex. (s. f.). *AES Changuinola y Bosque Protector Palo Seco*. Recuperado el 15 de julio de 2026. Disponible en: https://vlex.com.pa/vid/aes-changuinola-bosque-protector-palo-seco-33630787

Wikipedia. (2025). Cobre mine, Panama. Última modificación 2025. Área: 13,600 ha. Inversión: USD $10 mil millones. Producción: 350,000 t Cu/año. https://en.wikipedia.org/wiki/Cobre_mine,_Panama

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No. 537. Factor C bosque tropical: 0.001. Factor C suelo desnudo: 1.0.

World Bank. (2010). Economics of land degradation: toward an integrated global assessment. World Bank, Washington, D.C.

World Bank. (2014). Involuntary resettlement sourcebook: planning and implementation in development projects. World Bank, Washington, D.C.

World Bank. (s.f.). Water and sanitation (WASH) sector cost analyses. World Bank, Washington, D.C.

World Health Organization (WHO). (2001). Macroeconomics and health: investing in health for economic development. WHO, Geneva.

World Health Organization (WHO). (2007). Evaluation of certain food additives and contaminants: methylmercury. WHO Technical Report Series 940. WHO, Geneva.

World Health Organization (WHO). (2010). Childhood lead poisoning. WHO Press, Geneva.

World Health Organization (WHO). (2011a). Arsenic in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. WHO, Geneva.

World Health Organization (WHO). (2011b). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). WHO Press, Geneva. ISBN: 9789241548151.

World Health Organization (WHO). (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. WHO Press, Geneva. ISBN: 9789240034228.

Worlddata.info / Banco Mundial / FMI. (2025). Inflation rates in Panama. Inflación promedio anual Panamá 1960–2025: 2.5%/año. Inflación acumulada 2005→2025: ~55.8% (factor = 1.558). https://www.worlddata.info/america/panama/inflation-rates.php

Yan, C., Nie, X., Liu, J., Fan, G., & Li, J. (2019). A benchmark concentration analysis for manganese in drinking water and IQ deficits in children. Environment International, 131, 105003. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105003

ANEXOS

Anexo 1. Inventario de indicadores para priorización.

Código	Impacto	Tipo	Prioridad	Indicador
ECO-01	Beneficio económico directo	Externalidad positiva	Máxima	Valor Presente Neto (VPN) económico del cobre exportado
ECO-02	Beneficio fiscal	Externalidad positiva	Máxima	Regalías e impuestos efectivamente pagados
ECO-03a	Costos directos de arbitraje	Externalidad negativa	Máxima	Arbitraje internacional – costos directos
ECO-03b	Costos contingentes de arbitraje	Externalidad negativa	Máxima	Arbitraje internacional – costos contingentes
ECO-03c	Costos sistémicos de riesgo país	Externalidad negativa	Máxima	Arbitraje internacional – costos sistémicos (riesgo país)
ECO-04	Costos de cierre y post-cierre	Externalidad negativa	Máxima	Costos de cierre y post-cierre
ECO-05	Subsidios implícitos del Gobierno	Externalidad negativa	Máxima	Subsidios implícitos del Gobierno
ECO-06	Contribución al PIB / VAB	Externalidad positiva	Alta	Contribución al PIB / VAB
ECO-07	Empleo directo, indirecto e inducido	Externalidad positiva	Alta	Empleo directo, indirecto e inducido
ECO-08	Encadenamientos productivos locales	Externalidad positiva	Alta	Encadenamientos productivos locales
ECO-09a	Ingresos por turismo de naturaleza y ecoturismo sostenible	Externalidad negativa	Alta	Costo de oportunidad – turismo
ECO-09b	Ingresos por la agricultura	Externalidad negativa	Alta	Costo de oportunidad – agricultura
ECO-09c	Ingresos por la conservación	Externalidad negativa	Alta	Costo de oportunidad – agricultura*
ECO-09d	Ingresos por implementación de energías alternativas	Externalidad negativa	Alta	Costo de oportunidad – energías alternativas
ECO-09e	Ingresos por pesca artesanal	Externalidad negativa	Alta	Costo de oportunidad – pesca artesanal
E/CO-10	Degradación de infraestructura pública	Externalidad negativa	Media	Degradación de infraestructura pública
ECO-11	Costos judiciales nacionales	Externalidad negativa	Media	Costos judiciales nacionales
ECO-12	Costo sectorial del riesgo país	Externalidad negativa	Media	Costo sectorial del riesgo país
ECO-13	Volatilidad del precio del cobre	Externalidad negativa	Media	Volatilidad del precio del cobre
ECO-14	Impacto en balanza de pagos / cuenta corriente	Externalidad mixta	Media	Impacto en balanza de pagos / cuenta corriente
AMB-01	Pérdida de bosques y biomasa	Externalidad negativa	Máxima	Pérdida de cobertura forestal y biomasa
AMB-02	Reducción del secuestro de carbono	Externalidad negativa	Máxima	Emisiones netas de CO_2e por pérdida de biomasa
AMB-03a	Contaminación hídrica por metales pesados	Externalidad negativa	Máxima	Contaminación hídrica – metales pesados

Código	Impacto	Tipo	Prioridad	Indicador
AMB-03b	Contaminación hídrica por turbidez y sedimentos	Externalidad negativa	Máxima	Contaminación hídrica – turbidez
AMB-03c	Riesgo de drenaje ácido (AMD)	Externalidad negativa	Máxima	Riesgo de drenaje ácido
AMB-04a	Pérdida del servicio de regulación hídrica	Externalidad negativa	Máxima	Disminución de captación, infiltración y regulación del agua
AMB-04b	Pérdida del servicio de control de erosión	Externalidad negativa	Máxima	Incremento en erosión del suelo
AMB-04c	Pérdida del servicio de biodiversidad	Externalidad negativa	Máxima	Pérdida de hábitats, especies y funciones ecológicas
AMB-04d	Reducción de la conectividad ecológica (MBC)	Externalidad negativa	Máxima	Pérdida de conectividad estructural y funcional
AMB-05	Pérdida de biodiversidad por hábitat degradado	Externalidad negativa	Alta	Hábitat degradado – integridad ecológica
AMB-06	Erosión y sedimentación acumulada	Externalidad negativa	Alta	Pérdida de suelo y sedimentación
AMB-07	Contaminación de suelos	Externalidad negativa	Alta	Concentración de metales pesados en suelo
AMB-08	Cambios microclimáticos locales	Externalidad negativa	Media	Variaciones en temperatura, humedad, radiación, albedo
AMB-09	Riesgos por eventos climáticos extremos	Externalidad negativa	Media	Riesgo climático – amenaza, exposición, vulnerabilidad
AMB-10	Emisiones fugitivas y operativas	Externalidad negativa	Media	Emisiones GEI – tCO_2e/año
SOC-01	Desplazamiento físico y económico	Externalidad negativa	Máxima	Nº de hogares/personas desplazadas; ha de tierra perdida; costo de reasentamiento
SOC-02	Impacto en pobreza y desigualdad	Externalidad negativa	Máxima	Cambios en pobreza, ingreso per cápita y coeficiente de Gini
SOC-03	Conflictos y protestas sociales	Externalidad negativa	Máxima	Frecuencia de protestas, bloqueos, daños y costos policiales/logísticos
SOC-04	Acceso al agua doméstica	Externalidad negativa	Máxima	Reducción de acceso a agua potable; costo adicional por agua segura
SOC-05	Presión sobre servicios públicos	Externalidad negativa	Máxima	Aumento de demanda en salud, educación y saneamiento
SOC-06	Inflación minera (efecto boomtown)	Externalidad negativa	Alta	Variación del IPC local; precios de vivienda, alimentos y servicios
SOC-07	Tenencia de tierra y pueblos indígenas	Externalidad negativa	Alta	% de territorio indígena afectado; superposición mina–territorio; conflictos de tierra
SOC-08	Impacto en formas de vida tradicionales	Externalidad negativa	Alta	Cambios en prácticas culturales, pesca artesanal, agricultura tradicional
SOC-09	Capital social y cohesión comunitaria	Externalidad negativa	Alta	Niveles de confianza, participación, cooperación y conflictividad interna

Código	Impacto	Tipo	Prioridad	Indicador
SOC-10	Empleo local generado	Externalidad positiva	Media	Nº de empleos locales; % empleo local; calidad del empleo
SOC-11	Transferencia de capacidades	Externalidad positiva	Media	Nº de capacitados; horas de formación; competencias adquiridas
SOC-12	Infraestructura social provista	Externalidad positiva	Media	Valor económico de infraestructura entregada (escuelas, salud, vías)
SAL-01	Enfermedades respiratorias por contaminación del aire	Externalidad negativa	Máxima	Incidencia de enfermedades respiratorias asociadas a $PM_{2.5}$ y PM_{10}
SAL-02	Intoxicación por metales pesados	Externalidad negativa	Máxima	Niveles de As, Pb, Hg en agua, suelo y biomonitoreo
SAL-03	Enfermedades transmitidas por agua	Externalidad negativa	Máxima	Incidencia de diarreas, hepatitis A y otras enfermedades hídricas
SAL-04	Enfermedades transmitidas por vectores	Externalidad negativa	Alta	Incidencia y distribución espacial de dengue, malaria, etc.
SAL-05	Incremento de costos en el sistema de salud	Externalidad negativa	Alta	Costos marginales del sistema de salud atribuibles a enfermedades mineras
SAL-06	Daño por ruido industrial	Externalidad negativa	Media	Niveles de exposición a ruido (dB) y población afectada
SAL-07	Efectos psicosociales y mentales	Externalidad negativa	Media	Prevalencia de estrés, ansiedad, depresión y deterioro del bienestar
DIST-01	Distribución de beneficios entre Gobierno y Empresa		Máxima	Gobierno vs Empresa
DIST-02	Distribución territorial de beneficios y daños		Máxima	Territorial
DIST-03	Distribución del impacto sobre comunidades vulnerables		Máxima	Comunidades vulnerables
DIST-04	Captura de valor entre actores internacionales		Alta	Ganadores internacionales
DIST-05	Impactos negativos globales		Alta	Perdedores internacionales
DIST-06	Distribución del impacto entre sectores económicos		Media	Impactos sectoriales

Anexo 2. Priorización de indicadores ambientales y de salud.

AMB-01: Pérdida de bosques y biomasa: driver primario, no impacto valorado directamente
La pérdida de bosques y biomasa (AMB-01) aparece en gris porque es el driver primario —la causa raíz que desencadena todos los demás impactos— y no un impacto final que se valora de forma independiente. Incluirlo en verde e intentar valorarlo directamente generaría doble contabilización con los impactos finales que de él se derivan: la pérdida de *stock* de carbono (AMB-02a), la reducción del secuestro (AMB-02b), la erosión acumulada (AMB-06) y la contaminación hídrica por turbidez (AMB-03b) ya capturan el daño económico causado por la deforestación. Lo que se valora no es la tala en sí, sino sus consecuencias medibles sobre el bienestar humano y el capital natural.

Pérdida de *stock* de carbono vs. reducción del secuestro de carbono
AMB-02a (pérdida de *stock* de carbono) es el carbono acumulado durante siglos en biomasa y suelo que se libera de forma inmediata e irreversible al momento de la tala —un acervo que desaparece de golpe. AMB-02b (reducción del secuestro de carbono) es el flujo anual de captura de CO_2 que el bosque ya no realizará —cada año durante el horizonte 2019-2074. No hay doble contabilización porque miden cosas distintas: uno es un acervo (*stock*), el otro es un flujo. Ambos se valoran con el precio social del carbono, pero sobre bases distintas.

AMB-05: Pérdida de biodiversidad: impacto final de capital natural vinculado a todos sus drivers
La pérdida de biodiversidad (AMB-05) es un impacto final de capital natural —no un intermedio— que recibe flechas punteadas en coral desde todos sus drivers simultáneamente: AMB-01 (deforestación directa), AMB-04d (pérdida de conectividad ecológica), AMB-03c (drenaje ácido que destruye el hábitat acuático) y AMB-07 (contaminación de suelos que elimina el hábitat terrestre). Se excluye de valoración independiente porque todos esos drivers ya se capturan en los impactos finales seleccionados —valorarlo por separado implicaría cobrar el daño dos veces. Su exclusión es una cota inferior conservadora: el impacto real sobre la biodiversidad del Corredor Biológico Mesoamericano supera con certeza lo capturado en los impactos finales seleccionados.

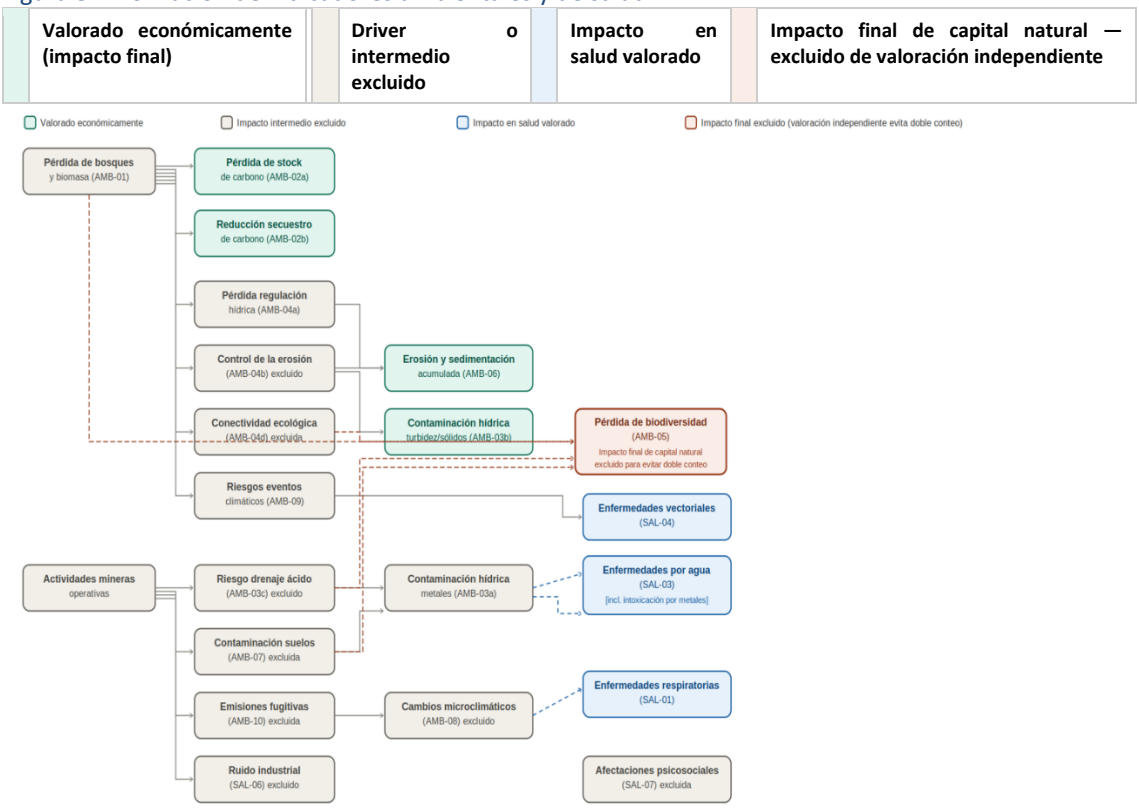
SAL-03: Enfermedades por agua: incorpora la intoxicación por metales pesados
La intoxicación por metales pesados comparte la misma ruta de exposición que SAL-03 —ingestión de agua contaminada con As, Pb, Cd, Mn— por lo que se incorpora como componente interno para evitar doble contabilización.

SAL-07: Afectaciones psicosociales y mentales: reconocidas, pero no cuantificables
Las afectaciones psicosociales y mentales (SAL-07) constituyen uno de los impactos más documentados cualitativamente en comunidades afectadas por operaciones mineras a gran escala, y son reconocidas en este análisis como un daño real y significativo sobre el bienestar de la población del Distrito de Donoso. La literatura científica documenta que comunidades expuestas a desastres industriales y contaminación ambiental crónica presentan incrementos significativos en la prevalencia de trastornos de ansiedad, depresión, estrés postraumático y deterioro del capital social comunitario. Parreira *et al*. (2021) identificaron que las poblaciones de Brumadinho y Mariana expuestas a las fallas de presas mineras registraron aumentos en la dispensación de medicamentos psiquiátricos de hasta un 30% en los doce meses posteriores al desastre.

No obstante, SAL-07 se excluye de la valoración económica cuantitativa por tres razones metodológicas acumulativas. La primera es la ausencia de funciones dosis-respuesta documentadas para el contexto específico de Donoso: no existen estudios epidemiológicos longitudinales que establezcan una relación cuantitativa entre la exposición a la operación de Cobre Panamá y la incidencia de trastornos mentales en la población local. La segunda es la dificultad de atribución causal: el bienestar psicosocial depende de múltiples factores socioeconómicos, históricos y culturales que no pueden aislarse del efecto específico de la mina sin datos de línea base previos a la operación. La tercera es que parte del daño psicosocial ya está implícitamente capturado en los impactos en salud cuantificados: la pérdida neurológica por exposición a Pb y Mn en niños (SAL-02/SAL-03) y las enfermedades crónicas (enfermedades respiratorias, ERC) generan cargas psicosociales que se reflejan en los costos de productividad perdida incluidos en los cálculos de Valor Estadístico de la Vida (VSL) y Cociente Intelectual (CI).

Su exclusión del total cuantificado debe interpretarse como una limitación explícita del análisis, no como una negación del impacto. El daño psicosocial real sobre las comunidades del Distrito de Donoso —incluyendo el duelo ambiental por la pérdida del territorio, el río y los medios de vida— representa una externalidad adicional no contabilizada que refuerza el carácter de cota inferior conservadora de los totales presentados en este informe.

Figura 8. Priorización de indicadores ambientales y de salud.



Nota: AMB-01 (gris) es el driver primario cuyo valor ya está capturado en los impactos finales valorados. Los nodos verde-teal (AMB-02a, AMB-02b, AMB-06, AMB-03b) son los impactos finales seleccionados para valoración económica. AMB-05 (coral) recibe flechas punteadas desde todos sus drivers —se excluye de valoración independiente para evitar doble conteo con los impactos ya seleccionados. Las actividades mineras (gris) son la segunda fuente raíz. Fuente: elaboración propia — Marco TCA.

Anexo 3. Proyección de población por distrito, 2019-2074.

Año	La Pintada	Donoso	Omar Torrijos	Total
2019	28,385	12,436	3,091	43,912
2020	28,708	12,396	3,202	44,306
2021	29,034	12,355	3,318	44,707
2022	29,364	12,314	3,437	45,115
2023	29,698	12,274	3,561	45,533
2024	30,036	12,234	3,689	45,959
2025	30,377	12,194	3,822	46,393
2026	30,722	12,154	3,960	46,836
2027	31,072	12,114	4,102	47,288
2028	31,425	12,074	4,250	47,749
2029	31,782	12,034	4,403	48,219
2030	32,144	11,995	4,562	48,701
2031	32,509	11,955	4,726	49,190
2032	32,879	11,916	4,896	49,691
2033	33,252	11,877	5,073	50,202
2034	33,631	11,838	5,255	50,724
2035	34,013	11,799	5,445	51,257
2036	34,400	11,760	5,641	51,801
2037	34,791	11,722	5,844	52,357
2038	35,186	11,683	6,055	52,924
2039	35,586	11,645	6,273	53,504
2040	35,991	11,607	6,499	54,097
2041	36,400	11,569	6,733	54,702
2042	36,814	11,531	6,975	55,320
2043	37,232	11,493	7,226	55,951
2044	37,656	11,455	7,487	56,598
2045	38,084	11,418	7,756	57,258
2046	38,517	11,380	8,036	57,933
2047	38,955	11,343	8,325	58,623
2048	39,398	11,305	8,625	59,328
2049	39,846	11,268	8,936	60,050
2050	40,299	11,231	9,257	60,787
2051	40,757	11,194	9,591	61,542
2052	41,220	11,158	9,936	62,314
2053	41,689	11,121	10,294	63,104
2054	42,163	11,085	10,665	63,913
2055	42,642	11,048	11,049	64,739
2056	43,127	11,012	11,447	65,586
2057	43,617	10,976	11,859	66,452
2058	44,113	10,940	12,287	67,340
2059	44,615	10,904	12,729	68,248
2060	45,122	10,868	13,188	69,178
2061	45,635	10,832	13,663	70,130
2062	46,154	10,797	14,155	71,106
2063	46,678	10,761	14,664	72,103
2064	47,209	10,726	15,193	73,128
2065	47,746	10,691	15,740	74,177
2066	48,289	10,656	16,307	75,252
2067	48,838	10,621	16,894	76,353
2068	49,393	10,586	17,503	77,482
2069	49,954	10,551	18,133	78,638
2070	50,522	10,517	18,786	79,825

Año	La Pintada	Donoso	Omar Torrijos	Total
2071	51,097	10,482	19,463	81,042
2072	51,678	10,448	20,164	82,290
2073	52,265	10,413	20,890	83,568
2074	52,859	10,379	21,642	84,880

Fuente: INEC Panamá — Censos de Población y Vivienda 2010 y 2023. Tasas de crecimiento calculadas por el método de crecimiento compuesto. La Pintada: tasa +1.14%/año. Donoso: tasa −0.32%/año. Omar Torrijos: tasa +3.59%/año. Elaboración propia.

Nota: La proyección a 2074 asume tasas de crecimiento constantes derivadas del período 2010–2023. El crecimiento acelerado de Omar Torrijos refleja la dinámica demográfica del período base y podría moderarse en horizontes de largo plazo. La disminución de Donoso es consistente con procesos de migración interna documentados en zonas rurales panameñas. Estas proyecciones se usan como escenario base; un análisis de sensibilidad podría considerar tasas de crecimiento decrecientes para Omar Torrijos después de 2040.

Anexo 4. Consolidado de Impactos en la salud por contaminación atmosférica 2019-2030 (continuación).

Categoría	Efecto	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CORTO PLAZO	Hosp. resp. agudas	81,889	82,622	83,370	84,133	84,911	85,704	86,514	87,340	88,183	89,043	89,921	90,817
	Visitas urgencias resp.	12,609	12,721	12,837	12,954	13,074	13,196	13,321	13,448	13,578	13,710	13,845	13,983
	Días activ. restringida	40,519	40,882	41,252	41,629	42,014	42,407	42,808	43,216	43,634	44,059	44,493	44,937
	Crisis asmáticas	10,141	10,232	10,325	10,419	10,515	10,614	10,714	10,816	10,921	11,027	11,136	11,247
	Síntomas CV agudos	262,420	264,770	267,166	269,611	272,104	274,648	277,242	279,890	282,591	285,348	288,161	291,032
LARGO PLAZO	EPOC crónica	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	77,797
	Hosp. CV crónica	—	—	—	—	—	390,059	393,745	397,504	401,341	405,256	409,251	413,328
	Efectos neurológicos Pb	3,124,385	3,152,363	3,180,897	3,210,000	3,239,686	3,269,968	3,300,862	3,332,381	3,364,543	3,397,361	3,430,854	3,465,037
	Cáncer pulmón por As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Hosp. resp. crónica	—	—	—	—	—	2,929	2,957	2,985	3,014	3,043	3,073	3,104
MORTALIDAD	Mortalidad $PM_{2.5}$ all-cause	—	—	—	—	—	175,079,523	176,733,620	178,421,241	180,143,210	181,900,376	183,693,613	185,523,825
	Mortalidad CV por Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,427,675	1,441,899
	Mortalidad cáncer As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ALTERNATIVO	Mortalidad PM_{10}/TSP	—	—	—	—	—	224,577,429	226,699,166	228,863,906	231,072,705	233,326,650	235,626,866	237,974,509
TOTAL		**3,450,074**	**3,480,968**	**3,512,477**	**3,544,613**	**3,577,393**	**403,660,773**	**407,474,434**	**411,365,389**	**415,335,535**	**419,386,830**	**424,948,967**	**429,260,698**

Anexo 4. Consolidado de Impactos en la salud por contaminación atmosférica 2031-2042 (continuación).

Categoría	Efecto	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
CORTO PLAZO	Hosp. resp. agudas	91,732	92,665	93,618	94,591	95,585	96,599	97,636	98,694	99,775	100,880	102,008	103,161
	Visitas urgencias resp.	14,124	14,268	14,415	14,564	14,717	14,874	15,033	15,196	15,363	15,533	15,706	15,884
	Días activ. restringida	45,389	45,851	46,323	46,804	47,296	47,798	48,311	48,834	49,369	49,916	50,474	51,045
	Crisis asmáticas	11,360	11,476	11,594	11,714	11,837	11,963	12,091	12,222	12,356	12,493	12,633	12,775
	Síntomas CV agudos	293,962	296,954	300,008	303,126	306,310	309,561	312,882	316,273	319,738	323,278	326,894	330,589
LARGO PLAZO	EPOC crónica	78,580	79,380	80,196	81,030	81,881	82,750	83,638	84,545	85,471	86,417	87,384	88,371
	Hosp. CV crónica	417,490	421,739	426,076	430,505	435,026	439,644	444,360	449,177	454,098	459,125	464,261	469,509
	Efectos neurológicos Pb	3,499,928	3,535,544	3,571,906	3,609,030	3,646,938	3,685,649	3,725,185	3,765,567	3,806,817	3,848,958	3,892,015	3,936,012
	Cáncer pulmón por As	—	—	—	179	179	179	179	179	179	179	179	179
	Hosp. resp. crónica	3,135	3,167	3,200	3,233	3,267	3,301	3,337	3,373	3,410	3,448	3,486	3,526
MORTALIDAD	Mortalidad $PM_{2.5}$ all-cause	187,391,942	189,298,924	191,245,762	193,233,478	195,263,125	197,335,790	199,452,597	201,614,703	203,823,303	206,079,631	208,384,960	210,740,604
	Mortalidad CV por Pb	1,456,418	1,471,240	1,486,370	1,501,819	1,517,594	1,533,702	1,550,154	1,566,958	1,584,124	1,601,660	1,619,577	1,637,885
	Mortalidad cáncer As	—	—	—	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775
ALTERNATIVO	Mortalidad PM_{10}/TSP	240,370,774	242,816,892	245,314,134	247,863,809	250,467,271	253,125,914	255,841,178	258,614,547	261,447,555	264,341,785	267,298,869	270,320,492
TOTAL		**433,583,103**	**437,995,434**	**442,499,983**	**447,211,066**	**451,907,216**	**456,702,901**	**461,600,720**	**466,603,350**	**471,713,558**	**476,934,197**	**482,268,213**	**487,718,647**

Anexo 4. Consolidado de Impactos en la salud por contaminación atmosférica 2043-2054 (continuación).

Categoría	Efecto	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054
CORTO PLAZO	Hosp. resp. agudas	104,340	105,544	106,775	108,034	109,320	110,636	111,981	113,357	114,765	116,205	117,678	119,185
	Visitas urgencias resp.	16,065	16,251	16,440	16,634	16,832	17,035	17,242	17,454	17,670	17,892	18,119	18,351
	Días activ. restringida	51,628	52,224	52,833	53,456	54,092	54,743	55,409	56,090	56,786	57,499	58,227	58,973
	Crisis asmáticas	12,921	13,071	13,223	13,379	13,538	13,701	13,868	14,038	14,212	14,391	14,573	14,760
	Síntomas CV agudos	334,366	338,225	342,170	346,203	350,327	354,543	358,854	363,264	367,774	372,388	377,108	381,938
LARGO PLAZO	EPOC crónica	89,381	90,413	91,467	92,545	93,647	94,774	95,927	97,106	98,311	99,545	100,807	102,098
	Hosp. CV crónica	474,872	480,353	485,956	491,684	497,540	503,528	509,651	515,913	522,319	528,872	535,576	542,435
	Efectos neurológicos Pb	3,980,973	4,026,926	4,073,897	4,121,914	4,171,006	4,221,203	4,272,535	4,325,034	4,378,734	4,433,666	4,489,868	4,547,374
	Cáncer pulmón por As	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179
	Hosp. resp. crónica	3,566	3,607	3,649	3,692	3,736	3,781	3,827	3,874	3,922	3,971	4,022	4,073
MORTALIDAD	Mortalidad $PM_{2.5}$ all-cause	213,147,920	215,608,308	218,123,214	220,694,133	223,322,605	226,010,223	228,758,631	231,569,529	234,444,670	237,385,866	240,394,990	243,473,975
	Mortalidad CV por Pb	1,656,595	1,675,717	1,695,263	1,715,244	1,735,673	1,756,561	1,777,922	1,799,769	1,822,114	1,844,973	1,868,360	1,892,290
	Mortalidad cáncer As	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775
ALTERNATIVO	Mortalidad PM_{10}/TSP	273,408,396	276,564,377	279,790,290	283,088,050	286,459,635	289,907,088	293,432,517	297,038,103	300,726,094	304,498,815	308,358,669	312,308,134
	TOTAL	**493,288,637**	**498,981,426**	**504,800,358**	**510,748,889**	**516,830,586**	**523,049,135**	**529,408,338**	**535,912,128**	**542,564,561**	**549,369,833**	**556,332,273**	**563,456,356**

Anexo 4. Consolidado de Impactos en la salud por contaminación atmosférica 2055-2066 (continuación).

Categoría	Efecto	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066
CORTO PLAZO	Hosp. resp. agudas	120,727	122,306	123,922	125,576	127,269	129,003	130,779	132,598	134,461	136,370	138,326	140,330
	Visitas urgencias resp.	18,589	18,832	19,080	19,335	19,596	19,863	20,136	20,416	20,703	20,997	21,298	21,607
	Días activ. restringida	59,736	60,517	61,317	62,135	62,973	63,831	64,710	65,610	66,532	67,477	68,444	69,436
	Crisis asmáticas	14,951	15,146	15,346	15,551	15,761	15,976	16,196	16,421	16,652	16,888	17,130	17,378
	Síntomas CV agudos	386,881	391,940	397,118	402,418	407,845	413,403	419,094	424,922	430,893	437,010	443,277	449,699
LARGO PLAZO	EPOC crónica	103,419	104,771	106,155	107,572	109,023	110,509	112,030	113,588	115,184	116,819	118,494	120,211
	Hosp. CV crónica	549,455	556,640	563,993	571,522	579,229	587,122	595,204	603,482	611,962	620,649	629,550	638,671
	Efectos neurológicos Pb	4,606,223	4,666,452	4,728,101	4,791,213	4,855,828	4,921,992	4,989,749	5,059,147	5,130,234	5,203,060	5,277,678	5,354,140
	Cáncer pulmón por As	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179
	Hosp. resp. crónica	4,126	4,180	4,235	4,292	4,350	4,409	4,470	4,532	4,595	4,661	4,728	4,796
MORTALIDAD	**Mortalidad $PM_{2.5}$ all-cause**	246,624,819	249,849,587	253,150,411	256,529,495	259,989,118	263,531,633	267,159,472	270,875,149	274,681,264	278,580,501	282,575,639	286,669,546
	Mortalidad CV por Pb	1,916,779	1,941,842	1,967,496	1,993,758	2,020,647	2,048,179	2,076,375	2,105,254	2,134,835	2,165,140	2,196,190	2,228,008
	Mortalidad cáncer As	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775
ALTERNATIVO	Mortalidad PM_{10}/TSP	316,349,774	320,486,238	324,720,260	329,054,668	333,492,384	338,036,427	342,689,916	347,456,078	352,338,245	357,339,862	362,464,491	367,715,814
	TOTAL	**570,746,706**	**578,208,098**	**585,845,468**	**593,663,915**	**601,668,709**	**609,865,297**	**618,259,306**	**626,856,554**	**635,663,053**	**644,685,018**	**653,928,874**	**663,401,261**

Anexo 4. Consolidado de Impactos en la salud por contaminación atmosférica 2067-2074.

Categoría	Efecto	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074
CORTO PLAZO	Hosp. resp. agudas	142,384	144,489	146,647	148,859	151,128	153,454	155,840	158,288
	Visitas urgencias resp.	21,923	22,247	22,579	22,920	23,269	23,628	23,995	24,372
	Días activ. restringida	70,452	71,494	72,562	73,656	74,779	75,930	77,111	78,322
	Crisis asmáticas	17,633	17,893	18,161	18,435	18,716	19,004	19,299	19,602
	Síntomas CV agudos	456,281	463,027	469,942	477,033	484,302	491,758	499,404	507,247
LARGO PLAZO	EPOC crónica	121,971	123,774	125,623	127,518	129,461	131,454	133,498	135,595
	Hosp. CV crónica	648,018	657,599	667,421	677,490	687,815	698,403	709,262	720,401
	Efectos neurológicos Pb	5,432,502	5,512,822	5,595,158	5,679,572	5,766,128	5,854,890	5,945,927	6,039,308
	Cáncer pulmón por As	179	179	179	179	179	179	179	179
	Hosp. resp. crónica	4,866	4,938	5,012	5,088	5,165	5,245	5,326	5,410
MORTALIDAD	Mortalidad $PM_{2.5}$ all-cause	290,865,190	295,165,639	299,574,064	304,093,745	308,728,072	313,480,551	318,354,808	323,354,591
	Mortalidad CV por Pb	2,260,617	2,294,040	2,328,303	2,363,430	2,399,448	2,436,385	2,474,268	2,513,126
	Mortalidad cáncer As	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775	111,775
ALTERNATIVO	Mortalidad PM_{10}/TSP	373,097,637	378,613,895	384,268,656	390,066,126	396,010,654	402,106,739	408,359,029	414,772,335
TOTAL		**673,109,045**	**683,059,323**	**693,259,435**	**703,716,966**	**714,439,764**	**725,435,939**	**736,713,880**	**748,282,262**

Notas metodológicas

1. Doble conteo: PM_{10} no se suma a $PM_{2.5}$ — son escenarios alternativos.
2. Latencias: EPOC (desde 2029) · Hosp. CV crónica (desde 2024) · Pb neurológico (desde 2019, inmediata) · Cáncer As morbilidad (desde 2034) · Hosp. resp. crónica (desde 2024) · Mortalidad $PM_{2.5}$ (desde 2024) · Mortalidad Pb (desde 2029) · Mortalidad As (desde 2034).
3. FEV_1 (cambio función pulmonar) no se monetiza en esta tabla — sus costos están capturados en EPOC a partir de 2036.
4. Población: La Pintada +1.14%/año · Donoso −0.32%/año · Omar Torrijos +3.59%/año. Base 2019: 43,912 personas.
5. Los valores en — indican período de latencia.
6. Datos sin actualizar al valor presente 2025.

Anexo 5. Proyección de población expuesta a contaminación hídrica 2019-2074.

Año	Población directamente expuesta (cuencas #101, #103, #105, #107, #109)	Población en riesgo indirecto (cuenca #134 río Grande)	Total AEI	Gobierno
2019	34,150	117,517	151,667	Estimado
2020	34,041	118,492	152,533	Estimado
2021	33,932	119,475	153,407	Estimado
2022	33,823	120,467	154,290	Estimado
2023	33,715	121,467	155,182	Base censal
2024	33,607	122,475	156,082	Proyectado
2025	33,500	123,492	156,992	Proyectado
2026	33,392	124,517	157,909	Proyectado
2027	33,286	125,550	158,836	Proyectado
2028	33,179	126,592	159,771	Proyectado
2029	33,073	127,643	160,716	Proyectado
2030	32,967	128,702	161,669	Proyectado
2031	32,862	129,771	162,633	Proyectado
2032	32,756	130,848	163,604	Proyectado
2033	32,652	131,934	164,586	Proyectado
2034	32,547	133,029	165,576	Proyectado
2035	32,443	134,133	166,576	Proyectado
2036	32,339	135,246	167,585	Proyectado
2037	32,236	136,369	168,605	Proyectado
2038	32,132	137,501	169,633	Proyectado
2039	32,030	138,642	170,672	Proyectado
2040	31,927	139,793	171,720	Proyectado
2041	31,825	140,953	172,778	Proyectado
2042	31,723	142,123	173,846	Proyectado
2043	31,622	143,302	174,924	Proyectado
2044	31,520	144,492	176,012	Proyectado
2045	31,420	145,691	177,111	Proyectado
2046	31,319	146,900	178,219	Proyectado
2047	31,219	148,120	179,339	Proyectado
2048	31,119	149,349	180,468	Proyectado
2049	31,019	150,589	181,608	Proyectado
2050	30,920	151,839	182,759	Proyectado
2051	30,821	153,099	183,920	Proyectado
2052	30,722	154,370	185,092	Proyectado
2053	30,624	155,651	186,275	Proyectado
2054	30,526	156,943	187,469	Proyectado
2055	30,428	158,245	188,673	Proyectado
2056	30,331	159,559	189,890	Proyectado
2057	30,234	160,883	191,117	Proyectado
2058	30,137	162,218	192,355	Proyectado
2059	30,041	163,565	193,606	Proyectado
2060	29,945	164,922	194,867	Proyectado
2061	29,849	166,291	196,140	Proyectado
2062	29,753	167,671	197,424	Proyectado
2063	29,658	169,063	198,721	Proyectado
2064	29,563	170,466	200,029	Proyectado
2065	29,469	171,881	201,350	Proyectado
2066	29,374	173,308	202,682	Proyectado
2067	29,280	174,746	204,026	Proyectado

Año	Población directamente expuesta (cuencas #101, #103, #105, #107, #109)	Población en riesgo indirecto (cuenca #134 río Grande)	Total AEI	Gobierno
2068	29,187	176,197	205,384	Proyectado
2069	29,093	177,659	206,752	Proyectado
2070	29,000	179,134	208,134	Proyectado
2071	28,907	180,621	209,528	Proyectado
2072	28,815	182,120	210,935	Proyectado
2073	28,723	183,631	212,354	Proyectado
2074	28,631	185,155	213,786	Proyectado

Notas metodológicas

1. Año base: Censo 2023 (XII Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda, INEC Panamá).
2. Tasa de crecimiento cuencas directas (#101–#109): −0.32%/año, correspondiente al Distrito de Donoso, calculada mediante método de crecimiento compuesto entre Censos 2010 y 2023.
3. Tasa de crecimiento río Grande (#134): +0.83%/año, correspondiente a la Provincia de Colón, Cuadro 1 de Tasas de Crecimiento INEC Censo 2023.
4. Los años 2019–2022 son estimaciones retrospectivas aplicando la misma tasa hacia atrás desde 2023.

Anexo 6. Consolidado de intoxicación humana por contaminación hídrica 2019-2030 (continuación).

Población	Directa	Efecto	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Población directamente expuesta (cuencas #101–#109)	**Ruta 1**	As — agua superficial	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,773	15,721
		Pb — agua superficial	111,832,103	111,465,012	111,099,126	110,734,442	110,370,954	110,008,659	109,647,554	109,287,634	108,928,896	108,571,335	108,214,947	107,859,730
		Mn — agua superficial	126,219,591	125,805,273	125,392,316	124,980,713	124,570,462	124,161,557	123,753,995	123,347,770	122,942,879	122,539,317	122,137,079	121,736,162
		Cd — agua superficial	79,158	78,898	78,639	78,381	78,124	77,868	77,612	77,357	77,103	76,850	76,598	76,347
	Ruta 3	As — peces	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	21
		Pb — peces (mort. CV)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23,496	23,419
		MeHg — peces	1,306,268	1,301,980	1,297,706	1,293,446	1,289,201	1,284,969	1,280,751	1,276,547	1,272,357	1,268,180	1,264,017	1,259,868
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33,787,341	33,676,434
		Mort. cáncer por As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,044,140	9,014,452
	TOTAL		**239,437,120**	**238,651,164**	**237,867,787**	**237,086,982**	**236,308,740**	**235,533,053**	**234,759,912**	**233,989,308**	**233,221,234**	**232,455,682**	**274,563,414**	**273,662,154**
Población en riesgo indirecto (Río Grande #134, factor dilución ×0.20)	**Ruta 1**	As — agua superficial	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12,181	12,282
		Pb — agua superficial	76,941,538	77,580,153	78,224,068	78,873,328	79,527,977	80,188,059	80,853,620	81,524,705	82,201,360	82,883,631	83,571,565	84,265,209
		Mn — agua superficial	86,840,266	87,561,040	88,287,796	89,020,585	89,759,456	90,504,459	91,255,646	92,013,068	92,776,777	93,546,824	94,323,263	95,106,146
		Cd — agua superficial	54,462	54,914	55,369	55,829	56,292	56,760	57,231	57,706	58,185	58,668	59,155	59,646
	Ruta 3	As — peces	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16	17
		Pb — peces (mort. CV)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,145	18,296
		MeHg — peces	898,725	906,184	913,705	921,289	928,936	936,646	944,420	952,259	960,162	968,132	976,167	984,269
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,093,077	26,309,650
		Mort. cáncer por As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,984,552	7,042,524
	TOTAL		**164,734,990**	**166,102,290**	**167,480,939**	**168,871,031**	**170,272,661**	**171,685,924**	**173,110,917**	**174,547,737**	**175,996,484**	**177,457,255**	**212,038,122**	**213,798,038**
TOTAL			**404,172,110**	**404,753,454**	**405,348,726**	**405,958,013**	**406,581,401**	**407,218,977**	**407,870,829**	**408,537,045**	**409,217,718**	**409,912,937**	**486,601,536**	**487,460,192**

Anexo 6. Consolidado de intoxicación humana por contaminación hídrica 2031-2042 (continuación).

Población	Directa	Efecto	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Población directamente expuesta (cuencas #101–#109)	Ruta 1	As — agua superficial	15,669	15,618	15,567	15,516	15,465	15,414	15,363	15,313	15,263	15,212	15,162	15,113
		Pb — agua superficial	107,505,678	107,152,789	106,801,058	106,450,482	106,101,057	105,752,778	105,405,643	105,059,647	104,714,787	104,371,059	104,028,459	103,686,984
		Mn — agua superficial	121,336,561	120,938,272	120,541,290	120,145,611	119,751,231	119,358,146	118,966,351	118,575,842	118,186,614	117,798,665	117,411,989	117,026,582
		Cd — agua superficial	76,096	75,846	75,597	75,349	75,102	74,855	74,609	74,365	74,120	73,877	73,635	73,393
	Ruta 3	As — peces	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	20	20
		Pb — peces (mort. CV)	23,342	23,265	23,189	23,113	23,037	22,962	22,886	22,811	22,736	22,662	22,587	22,513
		MeHg — peces	1,255,732	1,251,611	1,247,502	1,243,407	1,239,326	1,235,258	1,231,203	1,227,161	1,223,133	1,219,118	1,215,116	1,211,128
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	33,565,890	33,455,710	33,345,891	33,236,432	33,127,333	33,018,592	32,910,208	32,802,180	32,694,506	32,587,186	32,480,218	32,373,601
		Mort. cáncer por As	8,984,862	8,955,369	8,925,973	8,896,674	8,867,470	8,838,363	8,809,350	8,780,434	8,751,612	8,722,884	8,694,251	8,665,712
	TOTAL		**272,763,854**	**271,868,502**	**270,976,089**	**270,086,605**	**269,200,041**	**268,316,388**	**267,435,634**	**266,557,772**	**265,682,792**	**264,810,684**	**263,941,438**	**263,075,046**
Población en riesgo indirecto (Río Grande #134, factor dilución ×0.20)	Ruta 1	As — agua superficial	12,384	12,487	12,590	12,695	12,800	12,906	13,014	13,122	13,230	13,340	13,451	13,563
		Pb — agua superficial	84,964,610	85,669,817	86,380,876	87,097,837	87,820,749	88,549,662	89,284,624	90,025,686	90,772,899	91,526,315	92,285,983	93,051,957
		Mn — agua superficial	95,895,527	96,691,460	97,493,999	98,303,199	99,119,115	99,941,804	100,771,321	101,607,723	102,451,067	103,301,411	104,158,813	105,023,331
		Cd — agua superficial	60,141	60,640	61,143	61,651	62,162	62,678	63,198	63,723	64,252	64,785	65,323	65,865
	Ruta 3	As — peces	17	17	17	17	17	17	18	18	18	18	18	18
		Pb — peces (mort. CV)	18,448	18,601	18,755	18,911	19,068	19,226	19,386	19,547	19,709	19,873	20,038	20,204
		MeHg — peces	992,439	1,000,676	1,008,982	1,017,356	1,025,800	1,034,315	1,042,899	1,051,555	1,060,283	1,069,084	1,077,957	1,086,904
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	26,528,020	26,748,203	26,970,213	27,194,066	27,419,776	27,647,360	27,876,833	28,108,211	28,341,509	28,576,744	28,813,931	29,053,086
		Mort. cáncer por As	7,100,977	7,159,915	7,219,342	7,279,263	7,339,681	7,400,600	7,462,025	7,523,960	7,586,409	7,649,376	7,712,866	7,776,882
	TOTAL		**215,572,562**	**217,361,814**	**219,165,918**	**220,984,995**	**222,819,170**	**224,668,569**	**226,533,318**	**228,413,545**	**230,309,377**	**232,220,945**	**234,148,379**	**236,091,811**
TOTAL			**488,336,416**	**489,230,316**	**490,142,007**	**491,071,600**	**492,019,211**	**492,984,957**	**493,968,952**	**494,971,317**	**495,992,169**	**497,031,629**	**498,089,817**	**499,166,857**

Anexo 6. Consolidado de intoxicación humana por contaminación hídrica 2043-2054 (continuación).

Población	Directa	Efecto	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054
Población directamente expuesta (cuencas #101–#109)	**Ruta 1**	As — agua superficial	15,063	15,014	14,964	14,915	14,866	14,818	14,769	14,720	14,672	14,624	14,576	14,528
		Pb — agua superficial	103,346,630	103,007,392	102,669,269	102,332,255	101,996,348	101,661,543	101,327,837	100,995,227	100,663,709	100,333,278	100,003,933	99,675,668
		Mn — agua superficial	116,642,440	116,259,559	115,877,935	115,497,564	115,118,441	114,740,563	114,363,925	113,988,524	113,614,354	113,241,413	112,869,697	112,499,200
		Cd — agua superficial	73,152	72,912	72,673	72,434	72,196	71,959	71,723	71,488	71,253	71,019	70,786	70,554
	Ruta 3	As — peces	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
		Pb — peces (mort. CV)	22,439	22,365	22,292	22,219	22,146	22,073	22,001	21,929	21,857	21,785	21,713	21,642
		MeHg — peces	1,207,152	1,203,190	1,199,240	1,195,304	1,191,380	1,187,469	1,183,571	1,179,686	1,175,814	1,171,954	1,168,107	1,164,273
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	32,267,334	32,161,416	32,055,846	31,950,622	31,845,743	31,741,209	31,637,018	31,533,169	31,429,661	31,326,492	31,223,663	31,121,170
		Mort. cáncer por As	8,637,267	8,608,915	8,580,656	8,552,490	8,524,416	8,496,435	8,468,545	8,440,747	8,413,040	8,385,424	8,357,899	8,330,464
	TOTAL		**262,211,498**	**261,350,784**	**260,492,895**	**259,637,823**	**258,785,557**	**257,936,089**	**257,089,410**	**256,245,510**	**255,404,379**	**254,566,010**	**253,730,393**	**252,897,518**
Población en riesgo indirecto (Río Grande #134, factor dilución ×0.20)	**Ruta 1**	As — agua superficial	13,675	13,789	13,903	14,019	14,135	14,252	14,371	14,490	14,610	14,731	14,854	14,977
		Pb — agua superficial	93,824,288	94,603,029	95,388,235	96,179,957	96,978,251	97,783,170	98,594,770	99,413,107	100,238,236	101,070,213	101,909,096	102,754,941
		Mn — agua superficial	105,895,025	106,773,953	107,660,177	108,553,757	109,454,753	110,363,227	111,279,242	112,202,860	113,134,143	114,073,157	115,019,964	115,974,630
		Cd — agua superficial	66,412	66,963	67,519	68,079	68,644	69,214	69,789	70,368	70,952	71,541	72,135	72,733
	Ruta 3	As — peces	18	19	19	19	19	19	19	20	20	20	20	20
		Pb — peces (mort. CV)	20,372	20,541	20,711	20,883	21,056	21,231	21,407	21,585	21,764	21,945	22,127	22,311
		MeHg — peces	1,095,925	1,105,022	1,114,193	1,123,441	1,132,766	1,142,168	1,151,648	1,161,206	1,170,844	1,180,562	1,190,361	1,200,241
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	29,294,227	29,537,369	29,782,529	30,029,724	30,278,971	30,530,287	30,783,688	31,039,193	31,296,818	31,556,581	31,818,501	32,082,595
		Mort. cáncer por As	7,841,431	7,906,514	7,972,139	8,038,307	8,105,025	8,172,297	8,240,127	8,308,520	8,377,481	8,447,014	8,517,124	8,587,816
	TOTAL		**238,051,373**	**240,027,199**	**242,019,425**	**244,028,186**	**246,053,620**	**248,095,865**	**250,155,061**	**252,231,348**	**254,324,868**	**256,435,764**	**258,564,181**	**260,710,264**
TOTAL			**500,262,871**	**501,377,983**	**502,512,320**	**503,666,009**	**504,839,177**	**506,031,954**	**507,244,471**	**508,476,858**	**509,729,247**	**511,001,774**	**512,294,574**	**513,607,782**

Anexo 6. Consolidado de intoxicación humana por contaminación hídrica 2055-2066 (continuación).

Población	Directa	Efecto	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066
Población directamente expuesta (cuencas #101–#109)	**Ruta 1**	As — agua superficial	14,480	14,433	14,385	14,338	14,291	14,244	14,198	14,151	14,104	14,058	14,012	13,966
		Pb — agua superficial	99,348,481	99,022,368	98,697,325	98,373,350	98,050,437	97,728,585	97,407,789	97,088,047	96,769,353	96,451,706	96,135,102	95,819,537
		Mn — agua superficial	112,129,919	111,761,851	111,394,991	111,029,335	110,664,879	110,301,620	109,939,553	109,578,674	109,218,980	108,860,467	108,503,131	108,146,968
		Cd — agua superficial	70,322	70,091	69,861	69,632	69,403	69,175	68,948	68,722	68,496	68,272	68,047	67,824
	Ruta 3	As — peces	20	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
		Pb — peces (mort. CV)	21,571	21,500	21,430	21,359	21,289	21,219	21,150	21,080	21,011	20,942	20,873	20,805
		MeHg — peces	1,160,451	1,156,642	1,152,845	1,149,061	1,145,289	1,141,530	1,137,783	1,134,048	1,130,326	1,126,615	1,122,917	1,119,231
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	31,019,015	30,917,194	30,815,708	30,714,555	30,613,734	30,513,244	30,413,084	30,313,252	30,213,748	30,114,571	30,015,720	29,917,192
		Mort. cáncer por As	8,303,119	8,275,864	8,248,698	8,221,622	8,194,634	8,167,735	8,140,924	8,114,202	8,087,567	8,061,019	8,034,558	8,008,185
	TOTAL		**252,067,378**	**251,239,963**	**250,415,263**	**249,593,271**	**248,773,977**	**247,957,372**	**247,143,447**	**246,332,195**	**245,523,605**	**244,717,670**	**243,914,380**	**243,113,727**
Población en riesgo indirecto (Río Grande #134, factor dilución ×0.20)	**Ruta 1**	As — agua superficial	15,101	15,227	15,353	15,480	15,609	15,738	15,869	16,001	16,134	16,267	16,402	16,539
		Pb — agua superficial	103,607,807	104,467,752	105,334,834	106,209,114	107,090,649	107,979,502	108,875,732	109,779,400	110,690,569	111,609,301	112,535,658	113,469,704
		Mn — agua superficial	116,937,219	117,907,798	118,886,433	119,873,190	120,868,138	121,871,343	122,882,875	123,902,803	124,931,196	125,968,125	127,013,661	128,067,874
		Cd — agua superficial	73,337	73,946	74,559	75,178	75,802	76,431	77,066	77,705	78,350	79,001	79,656	80,317
	Ruta 3	As — peces	20	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22
		Pb — peces (mort. CV)	22,496	22,683	22,871	23,061	23,252	23,445	23,640	23,836	24,034	24,233	24,434	24,637
		MeHg — peces	1,210,203	1,220,248	1,230,376	1,240,588	1,250,885	1,261,267	1,271,736	1,282,291	1,292,934	1,303,665	1,314,486	1,325,396
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	32,348,880	32,617,376	32,888,100	33,161,071	33,436,308	33,713,830	33,993,654	34,275,802	34,560,291	34,847,141	35,136,372	35,428,004
		Mort. cáncer por As	8,659,095	8,730,966	8,803,433	8,876,501	8,950,176	9,024,462	9,099,366	9,174,890	9,251,042	9,327,826	9,405,246	9,483,310
	Total		**262,874,159**	**265,056,014**	**267,255,979**	**269,474,204**	**271,710,840**	**273,966,040**	**276,239,958**	**278,532,750**	**280,844,571**	**283,175,581**	**285,525,939**	**287,895,804**
Total			**514,941,537**	**516,295,977**	**517,671,242**	**519,067,475**	**520,484,817**	**521,923,412**	**523,383,405**	**524,864,945**	**526,368,176**	**527,893,251**	**529,440,319**	**531,009,531**

Anexo 6. Consolidado de intoxicación humana por contaminación hídrica 2067-2074.

Población	Directa	Efecto	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074
Población directamente expuesta (cuencas #101–#109)	**Ruta 1**	As — agua superficial	13,920	13,874	13,829	13,784	13,738	13,693	13,648	13,603
		Pb — agua superficial	95,505,008	95,191,511	94,879,043	94,567,601	94,257,181	93,947,780	93,639,395	93,332,022
		Mn — agua superficial	107,791,973	107,438,144	107,085,477	106,733,967	106,383,611	106,034,405	105,686,345	105,339,428
		Cd — agua superficial	67,601	67,380	67,158	66,938	66,718	66,499	66,281	66,063
	Ruta 3	As — peces	19	19	19	19	19	19	18	18
		Pb — peces (mort. CV)	20,736	20,668	20,601	20,533	20,466	20,398	20,331	20,265
		MeHg — peces	1,115,557	1,111,895	1,108,246	1,104,608	1,100,982	1,097,368	1,093,766	1,090,175
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	29,818,989	29,721,107	29,623,547	29,526,308	29,429,387	29,332,785	29,236,499	29,140,530
		Mort. cáncer por As	7,981,898	7,955,697	7,929,582	7,903,554	7,877,610	7,851,752	7,825,978	7,800,289
	TOTAL		242,315,702	241,520,296	240,727,502	239,937,310	239,149,712	238,364,699	237,582,262	236,802,395
Población en riesgo indirecto (Río Grande #134, factor dilución ×0.20)	**Ruta 1**	As — agua superficial	16,676	16,814	16,954	17,095	17,236	17,379	17,524	17,669
		Pb — agua superficial	114,411,503	115,361,118	116,318,615	117,284,060	118,257,517	119,239,055	120,228,739	121,226,638
		Mn — agua superficial	129,130,838	130,202,623	131,283,305	132,372,957	133,471,652	134,579,467	135,696,477	136,822,757
		Cd — agua superficial	80,984	81,656	82,334	83,017	83,706	84,401	85,102	85,808
	Ruta 3	As — peces	23	23	23	23	23	23	24	24
		Pb — peces (mort. CV)	24,842	25,048	25,256	25,465	25,677	25,890	26,105	26,321
		MeHg — peces	1,336,397	1,347,489	1,358,673	1,369,950	1,381,321	1,392,786	1,404,346	1,416,002
	Mortalidad	Mort. CV por Pb	35,722,057	36,018,550	36,317,504	36,618,939	36,922,876	37,229,336	37,538,340	37,849,908
		Mort. cáncer por As	9,562,021	9,641,386	9,721,410	9,802,097	9,883,455	9,965,488	10,048,201	10,131,601
	TOTAL		290,285,339	292,694,707	295,124,074	297,573,603	300,043,464	302,533,825	305,044,856	307,576,728
TOTAL			532,601,041	534,215,004	535,851,576	537,510,913	539,193,176	540,898,524	542,627,118	544,379,123

Notas metodológicas

1. Factor de dilución: Población en riesgo indirecto (Río Grande #134) = concentraciones × 0.20 respecto a la población directamente expuesta. Sustentado en Seo *et al.* (2001) y Moore & Langner (1996) —atenuación de metales disueltos del 70–98% aguas abajo de fuentes de AMD.
2. Latencias: Pb agua (Ruta 1, desde 2019, inmediata) · Mn agua (Ruta 1, desde 2019, inmediata) · MeHg peces (Ruta 3, desde 2019, inmediata) · As agua y peces — morbilidad (desde 2029) · Pb peces — mort. CV (desde 2029) · Mort. CV por Pb (desde 2029) · Mort. cáncer por As (desde 2029).
3. No doble conteo: Mortalidad por Pb integra Ruta 1 + Ruta 3 (suma de ΔBLL antes de aplicar β) —no se duplica el mismo incremento de plomo en sangre. Morbilidad y mortalidad miden efectos distintos sobre personas distintas (enfermedad vs. fallecimiento).
4. Población: Directa (cuencas #101–#109) −0.32%/año (Donoso) · En riesgo (Río Grande #134) +0.83%/año (Colón). Base 2023: 33,715 (directa) y 121,467 (en riesgo).
5. Los valores en — indican período de latencia.
6. Datos sin actualizar al valor presente 2025.

Anexo 7. Análisis costo beneficio proyecto Donoso (USD millones) 2013-2033 (continuación).

2013-2033	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Impactos económicos																					
ECO-01 Ingresos Minera Panamá	-	-	-	-	-	-	801.06	2,237.64	4,322.65	3,949.37	3,228.44	62.43	435.97	5,041.36	4,466.75	4,949.82	5,171.65	4,726.47	4,717.86	4,737.11	4,020.92
ECO-01 Costos Minera Panamá	-576.19	-577.14	-544.84	-654.53	-1,034.87	-2,039.92	- 1,868.34	-1,378.36	-1,896.21	-1,578.87	-1,845.65	-247.60	-372.96	-3,382.02	-3,015.36	-3,315.59	-3,451.23	-3,166.44	-3,156.98	-3,165.17	-2,709.78
ECO-02 Ingresos fiscales (Impuestos)	-	-	-	-	-	-	170.09	115.60	165.91	153.20	636.22	59.17	59.96	585.32	563.36	562.76	557.17	538.46	528.69	519.68	496.17
ECO-05 Costos fiscales (Subsidios)	-	-	-	-	-	-	30.01	29.90	29.63	28.49	27.13	24.54	23.97	25.55	24.78	24.51	24.13	23.46	22.99	22.55	21.78
ECO-08 Compras locales	-	-	-	-	-	-	270.95	531.21	1,339.69	1,104.42	1,131.79	-65.57	35.04	1,285.58	1,150.88	1,259.08	1,307.37	1,202.56	1,198.04	1,199.98	1,033.12
ECO-07 Remuneraciones directas	-	-	-	-	-	-	144.97	198.76	312.46	324.18	299.09	-	-	327.85	287.44	322.71	339.26	308.07	308.11	310.12	259.50
Impactos ambientales																					
AMB-01 Pérdida *stock* carbono	-	-	-	-	-	-	15.79	-	-	-	-	-	-	0.81	0.80	0.78	0.76	0.75	0.73	0.71	0.70
AMB-02 Reducción secuestro carbono	-	-	-	-	-	-	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86
AMB-06 Erosión y sedimentación	-	-	-	-	-	-	246.80	246.80	246.80	246.80	246.80	246.80	246.80	254.19	261.14	267.67	273.80	279.53	284.89	289.89	294.54
AMB-03b Contam. hídrica turbidez	-	-	-	-	-	-	30.89	30.89	30.89	30.89	30.89	30.89	30.89	31.81	32.68	33.50	34.27	34.98	35.66	36.28	36.86
Impactos en la salud																					
SAL-01 Enf. respiratorias	-	-	-	-	-	-	0.67	0.68	0.68	0.69	0.69	400.75	404.54	408.40	412.34	416.36	421.97	426.18	430.47	434.85	439.32
SAL-02 Intoxicación metales	-	-	-	-	-	-	404.17	404.75	405.35	405.96	406.58	407.22	407.87	408.54	409.22	409.91	486.60	487.46	488.34	489.23	490.14
SAL-04 Enf. transmitidas vectores	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Etapa cierre y post-cierre: Riesgos económicos no internalizados																					
Costo de reforestación	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costo de restauración/Monitoreo y mantenimiento permanente de relaves/Tratamiento de agua ácida y metales post-cierre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total de beneficios netos	**-576.19**	**-577.14**	**-544.84**	**-654.53**	**-1,034.87**	**-2,039.92**	**-1,350.42**	**905.39**	**3,394.13**	**3,114.02**	**2,127.97**	**-1,337.13**	**-992.79**	**2,168.26**	**1,772.76**	**2,086.99**	**2,148.83**	**1,840.92**	**1,826.09**	**1,830.22**	**1,341.30**

Anexo 7. Análisis costo beneficio proyecto Donoso (USD millones) 2034-2054 (continuación).

2034-2054	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054
Impactos económicos																					
ECO-01 Ingresos Minera Panamá	3,924.73	3,557.04	3,671.07	3,774.26	3,607.64	3,622.42	3,107.64	3,126.75	2,499.19	2,174.09	2,004.56	1,968.61	1,832.93	1,998.34	2,113.60	1,863.08	1,926.82	1,586.90	1,223.85	1,324.61	781.80
ECO-01 Costos Minera Panamá	-2,645.36	-2,409.86	-2,478.13	-2,539.64	-2,431.13	- 2,437.06	-2,109.21	-2,118.01	-1,719.20	-1,511.14	-1,401.22	-1,375.59	-1,287.14	-1,388.58	-1,458.45	-1,297.79	-1,335.31	-1,118.41	-886.97	-948.00	-603.35
ECO-02 Ingresos fiscales (Impuestos)	485.26	469.11	462.79	456.43	444.86	437.10	418.92	411.59	391.50	377.61	367.00	359.21	349.58	346.12	341.81	330.32	325.26	312.26	298.94	295.02	278.36
ECO-05 Costos fiscales (Subsidios)	21.31	20.72	20.36	20.00	19.53	19.15	18.54	18.17	17.53	17.02	16.60	16.24	15.85	15.60	15.33	14.91	14.63	14.18	13.72	13.49	12.96
ECO-08 Compras locales	1,008.65	921.91	945.82	967.28	926.85	928.11	807.83	810.18	664.10	587.51	546.67	536.55	503.57	539.76	564.47	505.24	518.20	438.52	353.56	375.12	248.96
ECO-07 Remuneraciones directas	253.22	227.51	236.25	244.21	232.85	234.45	198.15	200.04	155.64	132.88	121.24	119.15	109.91	122.20	130.90	113.41	118.41	94.50	68.93	76.55	38.10
Impactos ambientales																					
AMB-01 Pérdida *stock* carbono	0.68	0.67	0.65	0.64	0.63	0.61	0.60	0.59	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.51	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44
AMB-02 Reducción secuestro carbono	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
AMB-06 Erosión y sedimentación	298.85	302.84	306.52	309.89	312.98	315.78	318.32	320.61	322.64	324.44	326.01	327.36	328.49	329.43	330.17	330.73	331.11	331.31	331.36	331.24	330.98
AMB-03b Contam. hídrica turbidez	37.40	37.90	38.36	38.78	39.17	39.52	39.84	40.12	40.38	40.60	40.80	40.97	41.11	41.23	41.32	41.39	41.44	41.46	41.47	41.46	41.42
Total Impactos ambientales	**275.31**	**272.70**	**269.79**	**266.61**	**263.20**	**259.58**	**255.77**	**251.80**	**247.70**	**243.47**	**239.14**	**234.72**	**230.23**	**225.69**	**221.11**	**216.50**	**211.87**	**207.23**	**202.59**	**197.96**	**193.36**
Impactos en la salud																					
SAL-01 Enf. respiratorias	444.00	448.66	453.42	458.29	463.25	468.33	473.51	478.80	484.22	489.75	495.40	501.17	507.08	513.12	519.29	525.61	532.06	538.67	545.42	552.34	559.41
SAL-02 Intoxicación metales	491.07	492.02	492.98	493.97	494.97	495.99	497.03	498.09	499.17	500.26	501.38	502.51	503.67	504.84	506.03	507.24	508.48	509.73	511.00	512.29	513.61
SAL-04 Enf. transmitidas vectores	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Etapa cierre y post-cierre: Riesgos económicos no internalizados																					
Costo de reforestación	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costo de restauración/ Monitoreo y mantenimiento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

permanente de relaves/Tratamiento de agua ácida y metales post-cierre																				
Total de beneficios netos	**1.268,34**	**1.013,60**	**1.082,16**	**1.143,61**	**1.024,26**	**1.026,73**	**674,16**	**679,79**	**251,79**	**26,76**	**-93,86**	**-124,80**	**-222,59**	**-118,39**	**-47,79**	**-222,51**	**-186,45**	**-421,12**	**-671,34**	**-610,49**	**-981,34**

Anexo 7. Análisis costo beneficio proyecto Donoso (USD millones) 2055-2074 sin falla de relaves (continuación).

2055-2074	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	Impactos a perpetuidad
Impactos económicos																					
ECO-01 Beneficio bruto Cobre Panamá	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-01 Costos Cobre Panamá	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-02 Ingresos fiscales (Impuestos)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-05 Costos fiscales (Subsidios)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-08 Compras locales (Encadenamientos productivos)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-07 Remuneraciones directas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Impactos ambientales																					
AMB-01 Pérdida *stock* carbono	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AMB-02 Reducción secuestro carbono	0.91	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35	0.31	0.28	0.25	0.21	0.18	0.15	0.13	5.67
AMB-06 Erosión y sedimentación	310.87	291.47	272.77	254.74	237.37	220.62	204.49	188.96	174.00	159.59	145.73	132.40	119.57	107.24	95.38	83.99	73.04	62.53	52.44	42.75	1,934.50
AMB-03b Contam. hídrica turbidez	38.91	36.48	34.14	31.88	29.71	27.61	25.59	23.65	21.78	19.97	18.24	16.57	14.96	13.42	11.94	10.51	9.14	7.83	6.56	5.35	242.11
Impactos en la salud																					
SAL-01 Enf. respiratorias	566.65	574.05	581.64	589.40	597.35	605.48	613.82	622.35	631.10	640.05	649.23	658.64	668.27	678.15	688.28	698.66	709.31	720.23	731.42	742.91	-
SAL-02 Intoxicación metales	514.94	516.30	517.67	519.07	520.48	521.92	523.38	524.86	526.37	527.89	529.44	531.01	532.60	534.22	535.85	537.51	539.19	540.90	542.63	544.38	-

SAL-04 Enf. transmitidas vectores	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	-
Etapa cierre y post-cierre: Riesgos económicos no internalizados																					
Costo de reforestación	145.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costo de restauración/Monitoreo y mantenimiento permanente de relaves/ Tratamiento de agua ácida y metales post-cierre	13,527.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total beneficios netos	**-15,105.23**	**-1,419.18**	**-1,407.04**	**-1,395.86**	**-1,385.62**	**-1,376.31**	**-1,367.91**	**-1,360.40**	**-1,353.77**	**-1,348.01**	**-1,343.10**	**-1,339.03**	**-1,335.79**	**-1,333.37**	**-1,331.75**	**-1,330.94**	**-1,330.92**	**-1,331.69**	**-1,333.23**	**-1,335.54**	**-2,182.27**

Anexo 7. Análisis costo beneficio proyecto Donoso (USD millones) 2055-2074 con falla de relaves.

2055-2074	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	Impactos a perpetuidad
Impactos económicos																					
ECO-01 Beneficio bruto Cobre Panamá	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-01 Costos Cobre Panamá	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-02 Ingresos fiscales (Impuestos)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-05 Costos fiscales (Subsidios)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-08 Compras locales (Encadenamientos productivos)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECO-07 Remuneraciones directas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Impactos ambientales																					
AMB-01 Pérdida *stock* carbono	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AMB-02 Reducción secuestro carbono	0.91	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.51	0.47	0.43	0.39	0.35	0.31	0.28	0.25	0.21	0.18	0.15	0.13	5.67

AMB-06 Erosión y sedimentación	323.82	316.82	309.97	303.27	296.71	290.29	284.02	277.88	271.87	265.99	260.24	254.61	249.11	243.72	238.45	233.29	228.25	223.31	218.49	213.76	9,672.48
AMB-03b Contam. hídrica turbidez	40.53	39.65	38.79	37.95	37.13	36.33	35.55	34.78	34.02	33.29	32.57	31.87	31.18	30.50	29.84	29.20	28.57	27.95	27.34	26.75	1,210.53
Impactos en la salud																					
SAL-01 Enf. respiratorias	566.65	574.05	581.64	589.40	597.35	605.48	613.82	622.35	631.10	640.05	649.23	658.64	668.27	678.15	688.28	698.66	709.31	720.23	731.42	742.91	11,517.71
SAL-02 Intoxicación metales	514.94	516.30	517.67	519.07	520.48	521.92	523.38	524.86	526.37	527.89	529.44	531.01	532.60	534.22	535.85	537.51	539.19	540.90	542.63	544.38	8,439.82
SAL-04 Enf. transmitidas vectores	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.44
Etapa cierre y post-cierre																					
Costo de reforestación	145.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costo de restauración / Monitoreo y mantenimiento permanente de relaves / Tratamiento de agua ácida y metales post-cierre	54,693.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total beneficios netos	**-56,286.17**	**-1,447.70**	**-1,448.89**	**-1,450.46**	**-1,452.39**	**-1,454.70**	**-1,457.39**	**-1,460.45**	**-1,463.89**	**-1,467.72**	**-1,471.93**	**-1,476.53**	**-1,481.53**	**-1,486.93**	**-1,492.73**	**-1,498.94**	**-1,505.56**	**-1,512.60**	**-1,520.06**	**-1,527.95**	**-30,846.66**

Notas metodológicas

1. Período de pre-construcción 2013–2018: los beneficios netos negativos reflejan la inversión de capital en construcción de la mina antes del inicio de operaciones en 2019, sin ingresos operativos que los compensen.
2. Discontinuidad en 2055: el salto en TOTAL COSTOS corresponde al registro simultáneo del costo de reforestación (USD 145.84 millones en VPN) y del costo de restauración, monitoreo y mantenimiento permanente de relaves —ambos desembolsos únicos descontados a la tasa diferenciada de 1.4% (Stern Review, 2006) a 30 años, por tratarse de pasivos sobre activos naturales irreemplazables. En el escenario sin falla el total de cierre asciende a USD 13,672.94 millones; en el escenario con falla a USD 54,839.31 millones.
3. AMB-01 con dos períodos: el valor de 2019 (15.79) corresponde al *stock* inicial de carbono perdido por las primeras 5,380 ha deforestadas al inicio de operaciones; los valores de 2026 en adelante reflejan la pérdida progresiva conforme la mina se expande hasta las 13,600 ha de la concesión.
4. Columna de impactos a perpetuidad: los valores de la última columna capturan los costos ambientales y de salud que continúan más allá del horizonte de análisis 2013–2074. En el escenario sin falla los impactos a perpetuidad son: AMB-06 = 1,934.50 millones, AMB-03b = 242.11 millones y AMB-02 = 5.67 millones, con SAL-01 y SAL-02 sin impactos a perpetuidad. En el escenario con falla son sustancialmente mayores: AMB-06 = 9,672.48 millones, AMB-03b = 1,210.53 millones, SAL-01 = 11,517.71 millones y SAL-02 = 8,439.82 millones —reflejando la contaminación residual persistente que genera una falla catastrófica de relaves.
5. Tasa de descuento diferenciada: los flujos de impactos económicos, ambientales y de salud se descuentan a la tasa real libre de riesgo de 2.21% (tasa real de los bonos del Tesoro de EE. UU. a largo plazo). Los costos de reforestación y restauración de relaves se descuentan a la tasa diferenciada de 1.4% (Stern Review, 2006), por tratarse de pasivos sobre activos naturales irreemplazables e irreversibles.

CONSERVATION STRATEGY FUND

Using economics to benefit nature.

www.conservation-strategy.org