

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ



Título:

Externalidades Negativas de la Minería Aurífera Informal en Madre de Dios:
Un Análisis de Caracterización Microeconómico de la Contaminación por
Mercurio y su Impacto en el Bienestar de las Comunidades Harakmbut

Vela Mogollón, Sebastián Matías (20182662)
Sotomayor Isuhuaylas, Daphne Anais (20222612)

*“El análisis de externalidades
revela por qué los mercados
fallan cuando los costos sociales
superan los privados”.*

-Varian (2010)

**Adaptado de Varian, H. R. (2010). Microeconomía intermedia (9ª ed.).*

1. Introducción

El sector minero constituye uno de los pilares de la economía peruana, representando cerca del 10% del PBI y más del 60% de las exportaciones nacionales (BCRP, 2024). Sin embargo, si bien su presencia en diversas regiones implica oportunidades económicas, también genera impactos sociales y ambientales de gran magnitud. La realidad es que la minería ha contribuido significativamente al crecimiento nacional y también ha originado conflictos por los efectos negativos que produce sobre el entorno. En dicho contexto, el caso de Madre de Dios (MDD) se presenta como un ejemplo paradigmático de cómo la minería aurífera informal, al operar fuera del marco regulatorio, genera severas externalidades negativas ambientales, como la contaminación por mercurio. Esto convierte la situación en un caso representativo para analizar los costos sociales no internalizados, en línea con el modelo económico de fallos de mercado por externalidades de producción.

El objetivo de este trabajo es responder la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera la minería aurífera informal en Madre de Dios genera una alta contaminación por mercurio en los ríos, constituyendo una externalidad negativa de producción, y cómo esta afecta al bienestar de las comunidades indígenas Harakmbut? Para ello, el estudio se articulará en dos partes: primero, se caracterizan los hechos estilizados que describan el impacto de la minería aurífera informal en la región; y segundo, se desarrollará un análisis microeconómico para examinar los efectos de la contaminación por mercurio en la salud humana y la sostenibilidad local.

La investigación tiene relevancia tripartita: teórica, al abordar el fallo de mercado por externalidades negativas que surgen cuando los costos sociales no son asumidos por quienes los generan (Varian, 2010); socioambiental, debido a que la minería informal en Madre de Dios ha provocado una alarmante acumulación de mercurio en la fauna local, con efectos adversos sobre la biodiversidad y la salud humana (Ministerio del Ambiente, 2011); y política, al evidenciar la limitada capacidad del Estado para gestionar este tipo de externalidades en contextos de economía informal (CHS Alternativo, 2023).

Para analizar este fenómeno, se aplicará el modelo de externalidades negativas de producción (Varian, 2010; Baumol, 1972). Esta se refiere a la contaminación por mercurio que genera una divergencia entre costo marginal privado (CMP) y social ($CMS = CMP + \text{daño ambiental}$) en este caso particular. Como resultado, se produce una sobreproducción minera ($Q_{\square} > Q_{\square}$), ya

que el óptimo privado no considera los efectos negativos sobre terceros. El caso de Madre de Dios evidencia un conflicto socioambiental, donde la contaminación por mercurio afecta directamente el bienestar de las comunidades locales, a través de intoxicaciones crónicas y daños a ecosistemas acuáticos, sin que los responsables asuman los costos sociales generados (Caviedes Sihuín & Ccopa Huillca, 2025).

Se anticipa que la falta de regulación efectiva y la persistencia de la informalidad en la minería aurífera contribuyen a la expansión de una externalidad que reduce significativamente el bienestar comunitario. En la siguiente sección presentaremos los datos que sustentan esta hipótesis y se comentará el grado de distorsión social generado.

2. Hechos Estilizados

Se ha logrado identificar que la actividad minera en el Perú ha constituido uno de los pilares clave del crecimiento económico en las últimas décadas, distinguiéndose por ciclos recurrentes de expansión. Entre los años 2005 y 2024, el sector de minería metálica e hidrocarburos ha evidenciado un comportamiento dinámico, con fases de crecimiento sostenido, especialmente en contextos de recuperación económica (BCRP, 2024). Asimismo, se registra un notable incremento cíclico en la producción de minería metálica, impulsado principalmente por el aumento en la extracción de cobre, molibdeno y oro (CooperAcción, 2024).

Este rol de pilar económico se refleja en contribuciones macroeconómicas estables y de largo plazo. Según el Ministerio de Energía y Minas, durante el período 2005-2024 la minería ha representado de manera consistente entre el 8% y el 10% del Producto Bruto Interno nacional y ha concentrado históricamente más del 60% del valor total de las exportaciones peruanas, con el cobre, el oro y el zinc como los productos de mayor peso (MINEM, 2024).

Por otro lado, la base productiva peruana se caracteriza por una alta rentabilidad, con márgenes operativos que históricamente han duplicado el promedio global de la industria, evidenciando su eficiencia y competitividad (PwC, 2025). Adicionalmente, una robusta cartera de proyectos de inversión, valorada en más de US\$ 63,000 millones, asegura la continuidad de la actividad y consolida su rol como principal impulsor del crecimiento y del dinamismo macroeconómico nacional en el futuro previsible (IIMP, 2025).

No obstante, este crecimiento ha sido desigual. En la región de Madre de Dios (MDD), predomina una minería aurífera de carácter informal, llevada a cabo mayoritariamente por actores externos a las comunidades indígenas. Estas actividades se desarrollan al margen del marco regulatorio y generan impactos ambientales severos, particularmente debido al uso indiscriminado de mercurio (Bach et al., 2024). La contaminación generada afecta de manera desproporcionada a las poblaciones locales, quienes no participan de manera directa en los beneficios (principalmente económicos) que genera esta actividad.

La actividad minera se puede clasificar principalmente en tres grandes categorías según su estatus legal y organización (Toledo y Arce, 2024): la minería formal, la informal y la ilegal. La minería formal constituye el sector regulado, que opera con todos los permisos, concesiones y cumple con las obligaciones tributarias, laborales y ambientales bajo supervisión estatal. Por el contrario, la minería informal, que constituye el objeto central de este estudio, se refiere a aquella actividad que, pese a operar en zonas permitidas (como concesiones mineras), no ha completado su proceso de formalización, careciendo de autorizaciones, fiscalización y protección laboral, y caracterizándose a menudo por métodos rudimentarios o de pequeña escala. Finalmente, la minería ilegal es aquella que se practica en zonas prohibidas por ley, como áreas naturales protegidas o cursos de agua, operando al margen de cualquier marco regulatorio y generando impactos socioambientales de mayor gravedad. Cabe precisar que la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) es una clasificación por método de producción, no legal, por lo que puede manifestarse en cualquiera de las tres categorías anteriores.

En este contexto, las comunidades Harakmbut de San José de Karene y Puerto Luz (Reymundo, 2019) enfrentan un deterioro multidimensional de su bienestar. La salud comunitaria se ve afectada por intoxicaciones crónicas causadas por el consumo de peces contaminados con mercurio; los ingresos familiares disminuyen debido a la pérdida de días laborales por intoxicación y el aumento de gastos médicos; y el bienestar cultural se ve socavado por la degradación de territorios sagrados para la comunidad.

Este daño es parcialmente mitigado, pero a la vez perpetrado, por la presencia de trabajadores mineros externos que, al establecer vínculos familiares con miembros de la comunidad (los denominados “yernos”), generan relaciones de negociación bilateral imperfectas. Aunque estos acuerdos informales proveen ingresos esporádicos a ciertos hogares, no compensan el

daño acumulado ni corrigen la asimetría estructural existente: los responsables de la contaminación no asumen los costos completos de sus acciones.

Externalidades negativas y conflicto socioambiental

Aunque la minería formal ha desempeñado un papel importante en el crecimiento económico del Perú, su contraparte informal e ilegal (siendo la primera de nuestro interés) en la región de Madre de Dios se desarrolla en un contexto de escasa regulación, trasladando los costos ambientales a la sociedad y transgrediendo la calidad de vida humana. De acuerdo con Schwarz (2017), esta modalidad de minería es cinco veces más extendida que la formal y tiende a instalarse en zonas marcadas por la pobreza y la débil presencia del Estado, lo que agrava sus impactos. Entre ellos, la contaminación por mercurio en los ríos se presenta como uno de los más críticos debido a su efecto directo sobre la salud humana. A diferencia de otros impactos ambientales, como la deforestación, la contaminación por mercurio representa un riesgo inmediato y tangible para las comunidades, ya que este metal se acumula en los peces, base alimentaria de muchas poblaciones locales (Sierra, 2023).

El presente análisis se centra en esta externalidad específica: la contaminación fluvial por mercurio, asociada exclusivamente a la minería informal que utiliza el proceso de amalgamación sin controles ambientales. Este tipo de contaminación produce efectos acumulativos y difíciles de revertir en el corto plazo (OTCA & PNUMA, 2024), lo que evidencia un claro fallo de mercado. Las consecuencias son asumidas por comunidades como los Harakmbut, mientras que los beneficios económicos de la actividad se concentran en manos de terceros. A pesar de la existencia de mecanismos como el Registro Integral de Formalización Minera (REINFO), criticado por operar como un refugio que perpetúa actividades sin responsabilidad por los daños (Calle, 2025), la falta de medidas efectivas para que los responsables asuman los costos de sus impactos perpetúa esta situación de desigualdad.

El modelo económico y los actores involucrados

Desde una mirada económica, la situación generada por la minería informal en Madre de Dios puede entenderse a través del concepto de externalidades negativas de producción. Este enfoque plantea que ciertas actividades generan impactos perjudiciales sobre terceros, sin que dichos costos sean asumidos por quienes los provocan (Varian, 2010). En este caso particular, el uso intensivo de mercurio para la extracción de oro representa un claro ejemplo de

externalidad no internalizada: ni el daño ambiental ni las consecuencias sobre la salud se reflejan en los costos asumidos por los productores ni en los precios del oro o mercurio en el mercado. Esto produce una asignación ineficiente de recursos, ya que la ausencia de mecanismos que obliguen a asumir estos costos incentiva una producción de oro por encima del nivel socialmente óptimo ($Q_p > Q_s$).

Se estima que actualmente operan más de 30,000 mineros informales en esta región amazónica, liberando entre 180 y 200 toneladas de mercurio al año, lo que convierte a Madre de Dios en una de las zonas más afectadas por contaminación por metales pesados en la Amazonía peruana (Minam, 2025).

En este escenario, Reymundo (2019) identifica la presencia de tres actores principales. Por un lado, la comunidad indígena Harakmbut, que soporta las consecuencias más severas de la contaminación, viendo cómo su economía tradicional se debilita por la presencia de mercurio en los ríos. Por otro lado, los mineros informales externos, que promueven una actividad extractiva sin regulación ni control ambiental. Finalmente, se encuentran los llamados “yernos”, mineros foráneos que establecen relaciones familiares con mujeres Harakmbut, lo que les permite acceder de manera informal a territorios comunales. Aunque estos vínculos pueden generar ingresos puntuales para algunas familias, no logran revertir el daño estructural ni proteger el bienestar general de la comunidad. El resultado es un equilibrio profundamente desigual, donde unos pocos se benefician mientras la mayoría ve reducidos sus recursos esenciales.

Desde la teoría económica, este caso refleja fielmente el modelo de externalidades negativas descrito por Varian (2010). Según esta perspectiva, cuando se produce un bien, también se genera un daño colateral (como la contaminación), cuyo costo no es considerado por el productor si no existen mecanismos institucionales o de mercado que lo exijan. En Madre de Dios, ese daño colateral afecta directamente a las comunidades ribereñas y no ha sido internalizado de forma alguna. Como señala Varian, este tipo de fallos impide que se logre un equilibrio eficiente en términos de Pareto, ya que sería posible mejorar el bienestar colectivo si los costos sociales fueran asumidos por quienes los generan.

En este contexto, el mercurio puede entenderse como un "mal económico" para las comunidades locales, especialmente para los Harakmbut. Lejos de aportar valor, su uso genera una pérdida neta de bienestar. Si existiera un sistema de derechos de contaminación, el

precio del uso del mercurio debería ser negativo y cuantioso, reflejando su efecto nocivo. Sin embargo, al carecer de estos mecanismos, su utilización resulta “gratuita” para quienes lo emplean y sumamente costosa para el entorno humano y ecológico.

Efectos sobre el bienestar comunitario

El grupo afectado por esta externalidad negativa está conformado por las comunidades ribereñas Harakmbut, consideradas en este análisis como un sujeto colectivo, lo que permite identificar de manera más clara los impactos generales sobre su bienestar. La exposición prolongada al mercurio ha tenido consecuencias graves en la salud de estas poblaciones, deteriorando significativamente su calidad de vida (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [EPA], 2025; Deutsche Welle [DW], 2025). Desde una perspectiva económica, el bienestar de estas comunidades puede entenderse como una función compuesta por tres elementos centrales: el estado de salud, los ingresos y el vínculo cultural y ambiental con su territorio.

La presencia de mercurio en los peces (base de su alimentación) ha provocado un deterioro constante en la salud comunitaria, lo cual repercute directamente en su capacidad productiva, sobre todo en actividades como la agricultura. Este efecto no puede considerarse una externalidad separada, sino una consecuencia directa del daño ambiental causado por la contaminación. Según lo documentado por Del Pozo y Paucarmayta (2015), el impacto sanitario actúa como un canal de transmisión del daño primario hacia otras esferas del bienestar, como la economía familiar. En términos analíticos, esta relación puede representarse mediante un parámetro que vincula la pérdida de salud con la reducción de ingresos, sin que eso implique nuevas fallas de mercado, sino una extensión del problema original.

La Organización Mundial de la Salud (2024) advierte que el metilmercurio es una sustancia altamente tóxica, capaz de acumularse en órganos vitales y provocar efectos especialmente perjudiciales en fetos y niños pequeños. Este tipo de daño, que no es reconocido ni compensado en los procesos económicos actuales, constituye una externalidad persistente y grave. Su existencia compromete la sostenibilidad de las comunidades indígenas afectadas y pone de manifiesto la necesidad urgente de intervención estatal para corregir esta injusticia estructural.

Diversas investigaciones han señalado que la mayoría de las personas presenta, al menos, pequeñas cantidades de metilmercurio en el organismo, con niveles generalmente cercanos o inferiores a los 10 mcg/L. Dichas concentraciones no implican necesariamente efectos adversos para la salud (Brigham and Women's Hospital, 2022). Sin embargo, cuando estos niveles son superados, pueden generar consecuencias graves para el organismo humano, especialmente a nivel neurológico.

De acuerdo con Nuttall (2004), la exposición al metilmercurio puede ocurrir por distintas vías, tales como la inhalación, ingestión, inyecciones o absorción cutánea. No obstante, se ha documentado que una de las rutas más comunes de exposición en la población general es la ingestión, particularmente a través del consumo de pescado y mariscos, los cuales pueden contener concentraciones elevadas de metilmercurio en sus tejidos (Environmental Protection Agency [EPA], 2025).

La EPA (2025) también advierte sobre los efectos neurológicos que pueden presentarse en personas expuestas a altos niveles de metilmercurio. Entre los síntomas más frecuentes se encuentran la pérdida de visión periférica, sensaciones de hormigueo (especialmente en manos, pies y alrededor de la boca), falta de coordinación motora, alteraciones en el habla, la audición y la marcha, así como debilidad muscular.

Marco institucional débil y derechos de propiedad

La situación de inseguridad jurídica en torno a los recursos naturales en Madre de Dios, especialmente aquellos afectados por la contaminación por mercurio, evidencia una falla estructural en el sistema de derechos de propiedad. Según el INEI (2022), la ambigüedad en la tenencia de tierras y la superposición de concesiones mineras en territorios indígenas han generado un vacío legal en el que nadie asume responsabilidad directa por el daño ambiental generado ($\delta\gamma$). Este problema se ve agravado por las dificultades logísticas y los altos costos que enfrenta el Estado para fiscalizar una zona caracterizada por su lejanía, su difícil acceso y un alto nivel de informalidad. En este contexto, aplicar mecanismos correctivos como impuestos pigouvianos o establecer sistemas de monitoreo efectivo resulta prácticamente inviable.

La fragilidad institucional en Madre de Dios no se limita a la falta de normas, sino que también se manifiesta en la fragmentación burocrática y en una subordinación del sector ambiental frente a intereses extractivos. Ramírez y Valle (2020) señalan que esta estructura

institucional impide cualquier gestión efectiva del problema. El caso del mercurio es especialmente revelador: la ausencia de derechos de propiedad definidos sobre los ríos contaminados impide cualquier control sobre su uso y favorece lo que se conoce como una "tragedia de los comunes", donde el daño colectivo no es asumido por ningún actor en particular. Hemos encontrado que Bach et al. (2024) destacan que esta misma dinámica explica por qué los mecanismos locales de compensación ($\psi\gamma q$) resultan insuficientes: sin una autoridad con capacidad para asignar responsabilidades y hacerlas cumplir, el sistema continúa incentivando la sobreproducción de oro y uso de mercurio ($Q_{\square} > Q_{\square}$).

Esta combinación de tres fallas (la indefinición de derechos, los costos elevados de regulación y la falta de coherencia institucional) configura un círculo vicioso. Las comunidades Harakmbut, que sufren las consecuencias más directas de la contaminación, no cuentan con herramientas legales efectivas para reclamar compensaciones o exigir justicia ambiental. Mientras tanto, los actores mineros continúan operando en un entorno de impunidad, donde contaminar sigue siendo más rentable que prevenir. En este escenario, la persistencia de la externalidad no se debe a un desconocimiento técnico, sino a un diseño institucional que favorece conductas dañinas y no promueve la responsabilidad ambiental.

El caso Harakmbut: conflicto, transformación y resistencia

La historia reciente del pueblo Harakmbut en Madre de Dios refleja un proceso de transformación profunda y en gran medida forzada, donde el avance de la minería informal ha alterado de forma significativa su vínculo tradicional con el territorio. Como señala Reymundo (2019), desde el contacto forzado con el mundo exterior en la década de 1950, la economía Harakmbut ha experimentado una progresiva mercantilización. La llegada de personas mestizas y de patrones vinculados a la minería introdujo nuevas dinámicas de poder y dependencia económica que afectaron la cohesión interna de la comunidad.

Con el tiempo, esta transformación se profundizó a través de la incorporación de trabajadores mineros externos, conocidos localmente como “yernos”. Estos individuos, vinculados a operaciones informales, suelen establecer relaciones matrimoniales con mujeres Harakmbut para obtener acceso a zonas ribereñas de alto valor extractivo. Esta práctica ha generado consecuencias sociales complejas, incluyendo casos frecuentes de abandono familiar y un aumento en la cantidad de madres solteras. La comunidad se encuentra, así, ante un dilema difícil: imponer límites a los yernos significaría restringir el acceso a ingresos ocasionales,

pero tolerar su presencia perpetúa la degradación ambiental que amenaza la base ecológica y cultural de su existencia (Reymundo, 2019).

Este conflicto posee dimensiones económicas particulares. A diferencia de los principios de acumulación propios de la lógica capitalista, los Harakmbut no orientan sus actividades hacia la maximización del ingreso monetario. Tal como se examinará en el análisis posterior, sus prácticas económicas buscan mantener una relación equilibrada con la naturaleza. Las actividades comerciales tienen un propósito instrumental: adquirir bienes esenciales como medicinas o herramientas, sin constituir un fin en sí mismas.

Sin embargo, la integración de los yernos (amiko) ha introducido una contradicción difícil de resolver. A pesar de ser agentes externos, muchos de ellos desarrollan vínculos afectivos genuinos con sus nuevas familias Harakmbut. Esta cercanía emocional los lleva a expresar preocupaciones por la contaminación que afecta a sus esposas e hijos. No obstante, su sustento económico depende precisamente de la actividad minera que genera dicha contaminación, lo que limita el alcance real de sus demandas (Reymundo-Dámaso, 2025). Esto refleja un patrón donde, para los hombres mestizos, el matrimonio es una estrategia de inserción laboral que les permite acceder a los yacimientos de la comunidad sin necesidad de concesiones formales. El resultado es una forma de negociación bilateral imperfecta, donde el compromiso familiar atenúa, pero no elimina, su participación en un sistema extractivo que sigue dañando a la comunidad.

La resistencia del pueblo Harakmbut se despliega, por tanto, en un terreno lleno de tensiones. Por un lado, su principal fuente de proteína (la pesca, que según el Ministerio del Ambiente (2011) representa alrededor del 60% de su consumo diario) se ha vuelto peligrosa debido a la presencia de mercurio en ríos como el Madre de Dios y el Tambopata. Por otro lado, la entrega de concesiones mineras sin consulta previa, incluso después del reconocimiento oficial de sus derechos territoriales en 1986, ha debilitado su autonomía y control sobre el territorio. Como advierte Reymundo (2019), esta presión constante ha llevado a que los yernos sean vistos como una especie de “mal necesario”: frágiles intermediarios entre dos mundos en conflicto, cuya capacidad limitada para mitigar los daños ambientales depende, paradójicamente, de su conexión con quienes los producen.

Nota sobre la unidad de análisis: La literatura etnográfica reciente (Reymundo-Dámaso, 2025) precisa que la unidad social central en la dinámica económica Harakmbut

contemporánea es el wambet o grupo doméstico cognaticio, el cual ha ganado preponderancia sobre el sistema de clanes patrilineales en el contexto de la economía minera. Este trabajo modela a un agente comunitario representativo como una agregación de estos wambets, reconociendo que las decisiones de aceptar a los yernos mineros ($\psi' > 0$) y los ingresos fijos (ω) que estos generan se negocian y materializan a nivel de cada wambet, lo cual explica la distribución desigual de costos y beneficios dentro de la comunidad. Este caso servirá como aclaración y se verá en la parte de Análisis.

3. Análisis

Hemos optado por aplicar el modelo de externalidades de producción de Varian (2010) para examinar cómo la minería aurífera informal en MDD genera contaminación por mercurio como una externalidad negativa que afecta directamente el bienestar de las comunidades Harakmbut. Partiremos de un escenario que no contempla la internalización de los costos sociales, pues la firma minera maximiza sus beneficios considerando solo sus costos privados, mientras que producen daños ambientales sin compensación.

Como supuesto simplificador, modelamos una única firma minera y un agente comunitario representativo, asumiendo que los intereses de las mineras son los mismos (maximizar su ganancia aumentando la producción y reduciendo sus costos) y que la externalidad afecta de manera homogénea a todos los miembros de las comunidades Harakmbut.

Ahora pasaremos a presentar la función de costos que enfrenta la minería informal por producción de oro (q), la cual estaría conformada por cuatro componentes:

- i) **Costos variables aumentados por informalidad:** los costos por producir una unidad de oro (c), como mercurio, implican un aumento adicional (τ) como un costo por la informalidad (precios más altos al no acceder a insumos normalmente legales). Así, τq refleja sobrecostos por informalidad como compra de mercurio en mercado negro a precios elevados.

$$(c + \tau)q$$

ii) **Costos fijos (F)**: representan los gastos independientes de q como herramientas básicas para la actividad minera y los pagos a sus trabajadores.

iii) **Costos de economía de escala**: las economías de escala en la minería informal acaban reduciendo los costos unitarios a medida que aumenta la producción (q), pues los mineros comparten maquinaria rudimentaria y se distribuyen los gastos operativos. Este ahorro modela cómo F' refleja la intensidad de la reducción de costos por colaboración. A diferencia de los costos fijos tradicionales (F), que son constantes, este componente es variable y decrece marginalmente con q , exponiendo la lógica de operaciones artesanales con mano de obra intensiva y bajas inversiones iniciales.

$$F'.q/(1 + q)^2$$

iv) **Costos por presión social***: este costo refleja cómo la firma enfrenta un costo intangible, no monetario, (ψ) por contaminar, siendo caracterizado como la presión social por generar mercurio como externalidad $e(m) = \gamma m$ producto de la liberación de mercurio en su proceso de amalgamación. Dado que $m = \eta q$, esto equivale a $e(q) = (\gamma\eta)q$. Estos costos son protestas comunitarias que interrumpen operaciones o generan un daño reputacional que limita el acceso a mercados. Este costo no internaliza la externalidad en un inicio, pues no compensa el daño ambiental, es un gasto operativo y el costo social real ($\delta e(m)$) sigue excluido. Denotamos que al ser ψ bajo (implementamos el supuesto de $\psi = 0$), la minería ignora la externalidad por completo y de momento no se incluiría inicialmente en la función de costos de la firma.

$$\psi e(m) = \psi \gamma m = \psi \gamma (\eta q) = \psi (\gamma \eta) q$$

Así la función de costos queda planteada como:

$$C(q) = (c + \tau)q + F + F'.q/(1 + q)^2$$

A continuación, presentamos la función de beneficios de la firma:

$$\Pi = p \cdot q - C(q)$$

En el escenario inicial asumimos que la firma no enfrenta presión social $\psi = 0$, reflejando un escenario donde la comunidad no tiene capacidad de negociación ni protestas efectivas. Esta función de beneficios se compone por el precio por unidad de oro (p), la cantidad de oro producido (q) y los costos que enfrenta la firma $C(q)$. En este contexto, la condición del óptimo privado se reduce a obtener la maximización de beneficios al igualar el precio con los costos marginales:

$$p = CMG(q) = c + \tau + \frac{F'}{(1+q)^2}$$

Podemos observar que este equilibrio es socialmente ineficiente, pues la producción q^m únicamente toma en cuenta los intereses de la firma y la externalidad es ignorada, así como los daños a la comunidad Harakmbut producto de esta (estos daños se presentarán en la caracterización de la función de bienestar comunitario).

Ahora procederemos a modelar el bienestar de la comunidad Harakmbut como un agente representativo afectado por tres canales:

i) **Externalidad directa:** la contaminación no sería sólo un subproducto inevitable de producir oro, sino del uso de mercurio (m) en el proceso de amalgamación. La relación entre la producción de oro (q) y el mercurio utilizado (m) estaría determinada por el tipo de tecnología. Definimos entonces a η como la intensidad del uso de mercurio (kg de Hg por unidad de oro producido), propia de la tecnología informal como $m = \eta q$.

La externalidad, siendo el daño ambiental por contaminación, es directamente proporcional a la cantidad de mercurio usado. Así, la formulamos como $e(m) = \gamma m$, donde γ es el daño marginal ambiental por kilogramo de mercurio liberado.

Combinando ambas expresiones, la externalidad en función de la producción es:

$$e(q) = \gamma m = \gamma(\eta q) = (\gamma\eta)q$$

El término $\gamma\eta$ representa ahora el daño ambiental marginal por unidad de oro producido, que encapsula tanto el daño del mercurio (γ) como la ineficiencia tecnológica (η).

ii) **Salud**: el nivel de salud S acaba siendo modelado como una función que depende de S_0 como el estado de salud en condiciones ambientales no degradadas y φ como el factor que cuantifica el daño marginal por unidad de mercurio liberado (e). Esta ecuación refleja el impacto negativo a la salud comunal a través de enfermedades, intoxicaciones y otros padecimientos crónicos asociados a la bioacumulación de este metal pesado (EPA, 2025), donde la relación evidencia el deterioro progresivo.

$$S = S_0 - \varphi e(m) = S_0 - \varphi(\gamma\eta q)$$

iii) **Ingreso**: los ingresos comunitarios (I) se componen por el ingreso base en ausencia de contaminación (I_0), la pérdida de productividad agropecuaria ($\theta_1 \cdot e$) y los gastos médicos por enfermedades ($\theta_2 \cdot e$). Ambos efectos derivan únicamente del daño a la salud (S).

$$I = I_0 - \theta_1 \cdot e = I_0 - \theta_1 e - \theta_2 e$$

Continuamos ahora con la presentación de la cadena de efectos para demostrar cómo la externalidad se transmite desde la producción minera hasta el bienestar comunitario como un impacto multidimensional: el mercurio usado ($m = \eta q$), al contaminar los ríos ($e = \gamma m$) y bioacumularse en peces, deteriora la salud ($S \downarrow$) mediante intoxicaciones crónicas producto de la ingesta de peces contaminados, lo que a su vez reduce los ingresos ($I \downarrow$) de la comunidad por pérdida de productividad laboral (los enfermos no pueden trabajar) y gastos médicos. Paralelamente, el daño ambiental directo ($-\beta e$) afecta prácticas culturales ligadas al territorio. Estos tres efectos, salud, ingresos y bienestar ambiental/cultural (posteriormente descrito como comunal), son manifestaciones de un mismo fallo de mercado (la producción no regulada de mercurio), no externalidades independientes. Adicionalmente, los parámetros

θ_1 , θ_2 y β operan como canales de transmisión del daño, no como mecanismos de mercado separados.

Producción $q \rightarrow \eta$ Mercurio usado (m) $\rightarrow \gamma$ Daño Ambiental (e) $\rightarrow$ Bioacumulación $\rightarrow S \downarrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow$ Bienestar comunal $\downarrow$

Ahora procederemos a formular la función de utilidad comunitaria que representa el bienestar de la población Harakmbut afectada por la externalidad. Esta función refleja una cosmovisión donde el equilibrio con la naturaleza prima sobre la acumulación material. Para estas comunidades, el dinero (I) tiene importancia como medio para acceder a medicinas, herramientas y otros bienes esenciales, pero no como fin. Esto se caracteriza mediante el parámetro ($\lambda < 0$), que pondera modestamente el ingreso (I) frente a la salud (S) y la integridad ambiental, mostrando cómo su utilidad marginal decrece rápidamente una vez cubiertas las necesidades básicas. El término $-\beta e$, por su parte, expresa el profundo malestar cultural ante la ruptura del equilibrio ecológico.

$$U_{cn} = \ln(S) + \lambda \ln(I) - \beta e$$

La función sintetiza los impactos en sus tres dimensiones clave: salud, ingresos y bienestar comunal, donde los dos primeros términos engloban los efectos económicos y sanitarios mediante una forma logarítmica que refleja la utilidad marginal decreciente, mientras que el último término ($-\beta e$) representa el daño directo por degradación ambiental. En esta formulación, la comunidad carece de control sobre la producción minera (q) que determina la contaminación ($e = \gamma \eta q$), pero internaliza todos sus costos: el mercurio acaba reduciendo tanto el bienestar comunal, la salud y los ingresos disponibles, este último afectado por pérdidas productivas y gastos médicos ($\theta_1 e + \theta_2 e$) que surgen únicamente del daño a la salud ($S = S_0 - \varphi e$).

Adicionalmente, el modelo reconoce que un segmento de la comunidad (α) recibe ingresos fijos (ω) mediante los "yernos mineros", según Reymundo (2019). Estos ingresos serían transferencias unilaterales sin negociación comunitaria, no compensan los daños ambientales ni internalizan la externalidad, pues son exógenos ($\omega \neq f(q)$), no cubren el daño agregado ($\alpha \omega < \theta e$), y generan desigualdad interna (familias con ω vs. sin ω). La función de utilidad para estos hogares refleja que ω mitiga parcialmente su vulnerabilidad económica, pero no

resuelve la contaminación ($e = \gamma\eta q$), manteniendo intacto el fallo de mercado original. Esta especificación evita interpretar ω como un mecanismo de mercado, sino como una estrategia de supervivencia familiar en un contexto de informalidad. Así, la función de utilidad para familias con "yernos" puede ser descrita de la siguiente manera:

$$U_{cy} = \ln(S) + \lambda \ln(I + \omega) - \beta e$$

La combinación de ambas funciones daría como resultado la función de utilidad comunitaria real. Esta agregación muestra que, incluso con ω , el bienestar promedio disminuye por la contaminación ($\alpha\omega < \theta e$), reforzando que la externalidad persiste sin compensación social plena:

$$U_c = \alpha \cdot U_{cy} + (1 - \alpha) \cdot U_{cn}$$

Una vez expuestas las funciones de la firma y la comunidad, avanzaremos con el análisis de la externalidad, el cual requiere examinar cuatro componentes interrelacionados que explican su persistencia como fallo de mercado. Primero, la composición multidimensional del daño social (δ) que incluye salud, ingresos y cultura. Segundo, el escenario base ($\psi = 0$) donde la minería opera sin considerar costos sociales, externalizando toda la contaminación. Tercero, el rol limitado de los yernos como negociadores ($\psi' > 0$) que logran reducciones parciales pero insuficientes. Cuarto, las barreras estructurales que impiden alcanzar el óptimo social, como serían los altos costos de transacción. Juntos, estos elementos revelan por qué los mecanismos informales son incapaces de resolver completamente la externalidad.

1. Caracterización del daño marginal social ($\delta\gamma$):

La brecha entre el costo marginal privado (CMP) y social (CMS = CMP + daño social) se expresa como el daño marginal social por kilogramo de mercurio liberado, denotado por (δ). Este agrega todos los costos no internalizados por unidad de mercurio:

$$\delta = \varphi/S + \lambda\theta/I + \beta$$

El daño social δ integra tres canales de impacto: φ/S representa el costo en salud por kg de mercurio, $\lambda\theta/I$ refleja la pérdida de utilidad por ingresos reducidos (vía θ) por kg de mercurio, y β simboliza el daño comunitario directo por kg de mercurio. Dado que cada unidad de oro producido utiliza η kg de mercurio, el daño social marginal por unidad de oro producido es $\delta\eta$.

La cantidad óptima social q^s que internaliza la externalidad en su totalidad se alcanzaría bajo el supuesto en el que la firma reconociera todo el impacto de su acción contaminante (usar mercurio) e incluyera $\delta\eta$ en sus costos:

$$p = c + \tau + F'/(1 + q)^2 + \delta\eta$$

2. Escenario inicial ($\psi = 0$): Externalidad no internalizada:

En el escenario inicial con ausencia de presión social ($\psi = 0$), bajo un esquema privado que ignora los costos sociales, se generan daños a la comunidad Harakmbut producto de la maximización de beneficios de la firma. La condición de optimalidad privada se reduce a:

$$p = c + \tau + F'/(1 + q)^2$$

Aquí, la producción q^m maximiza beneficios ignorando completamente la contaminación ($e = \gamma\eta q^m$), externalizando todos los costos (salud, ingresos, cultura). Este caso refleja la realidad de zonas donde no hay organización comunitaria ni intermediarios (ya sean los “yernos” o el Estado) que negocien compensaciones.

3. Rol de los yernos ($\psi' > 0$): Negociación bilateral imperfecta:

En este escenario, los “yernos”, trabajadores con lazos familiares en la comunidad, actúan como puentes informales entre la minería y la comuna, generando un mecanismo de negociación bilateral imperfecto: presionan para reducir q (y así $e = \gamma\eta q$) al estar perjudicando a sus familias, pero sin eliminar la producción pues dependen del empleo. La firma acepta parcialmente estos costos ($\psi'\gamma\eta q$) para evitar protestas, pero la compensación seguiría siendo insuficiente:

$$\psi'\gamma\eta < \delta\eta \text{ (Daño Marginal Social por unidad de oro NO cubierto)}$$

La nueva condición de optimalidad incluye este costo social parcial:

$$p = c + \tau + F'/(1 + q)^2 + \psi'\gamma\eta$$

Podemos observar cómo la influencia, aunque limitada, de los “yernos” incrementa el costo intangible de contaminar, llevando a una producción intermedia q^* ($q^s < q^* < q^m$), donde la contaminación sigue existiendo, pero en menor medida. Este escenario real explica por qué, pese a la presión comunitaria, la externalidad persiste: la solución sigue siendo ineficiente ($q^* > q^m$).

4. Ineficiencia persistente:

Aunque los yernos reducen e al incrementar el costo intangible de contaminar (ψ'), la solución sigue siendo ineficiente porque continúa habiendo:

- i) **Control limitado:** los “yernos” no determinan toda la producción minera, sino la misma firma (inversores, jefes, empresarios).
- ii) **Incentivos divididos:** la minera prioriza ganancias y los yernos equilibran lealtad familiar con empleo, llevando a soluciones de compromiso inestables en las que priorizan empleo sobre reducción total de e .
- iii) **Ausencia estatal:** no hay mecanismos coercitivos (impuestos pigouvianos $t = \delta\eta$) sería complejo de implementar y, como señala la literatura, no ataca la raíz del problema. La política de primer mejor sería la prohibición y sustitución tecnológica del mercurio para reducir η a cero, no solo gravar su uso.

4. Conclusiones

Con todo lo expuesto, concluimos que la investigación demuestra que la minería aurífera informal en Madre de Dios opera bajo un fallo de mercado estructural, donde el uso de

mercurio en la producción de oro genera una externalidad negativa severa que no es internalizada por los agentes mineros. Esto crea una brecha crítica entre el costo marginal privado (CMP) y el costo marginal social ($CMS = CMP + \delta\eta$), derivando en una sobreproducción de oro ($q^m > q^s$) que supera el óptimo social. El modelo microeconómico aplicado, enriquecido con la distinción entre producción (q) e insumo contaminante ($m = \eta q$), confirma que, al ignorar los costos sociales (daños ambientales, sanitarios y culturales), la actividad minera informal distorsiona la asignación eficiente de recursos, imposibilitando un equilibrio Pareto-eficiente. La consecuencia directa es una reducción drástica del bienestar de las comunidades Harakmbut, expresada en tres dimensiones interconectadas: salud, ingresos y bienestar comunal.

La ineficiencia institucional del Estado emerge como un factor central que perpetúa esta externalidad. La ambigüedad en los derechos de propiedad, la superposición de concesiones mineras en territorios indígenas, y los prohibitivos costos de transacción para regular zonas remotas impiden la implementación de mecanismos correctivos. Además, la fragmentación burocrática y la subordinación de políticas ambientales limitan la capacidad estatal para internalizar los costos sociales ($\delta\eta$). En este vacío, los "yernos" actúan como intermediarios informales, cuyo efecto neto, fruto de la tensión entre facilitar el acceso y mitigar el daño familiar, es una atenuación parcial de la contaminación ($q^s < q^* < q^m$), pero sin alcanzar el óptimo social. Esto se explica por sus incentivos divididos: dependen del empleo minero, lo que debilita su capacidad de negociación y revela un equilibrio injusto y persistente.

Para transitar hacia un escenario de eficiencia paretiana, las recomendaciones de política deben de evolucionar desde soluciones genéricas hacia intervenciones que ataquen la raíz del problema identificado en el análisis: el uso del mercurio. Si bien un impuesto pigouviano sobre la producción ($t = \delta\eta$) representaría una internalización teórica, su implementación en contextos de alta informalidad y débil gobernanza es inviable y constituye una solución del segundo mejor. La política del primer mejor, acorde con el Convenio de Minamata y la naturaleza evitable de la externalidad, consiste en:

- i) **La prohibición progresiva y sustitución tecnológica del mercurio:** Políticas activas deben promover y subsidiar tecnologías limpias (como concentradores

gravimétricos) para reducir la intensidad de uso η a cero, atacando directamente la causa de la externalidad.

ii) **Control estricto de la cadena de suministro de mercurio:** Fortalecer la fiscalización de la importación y comercialización del insumo contaminante.

iii) **Fortalecimiento de la gobernanza local adaptativa:** Establecer mesas de diálogo que incluyan a las comunidades, los "yernos" y autoridades, reconociendo la cosmovisión Harakmbut y diseñando mecanismos de monitoreo comunitario de bajo costo.

iv) **Remediación ambiental y sanitaria:** Destinar recursos a la limpieza de ríos y al tratamiento de afectados por intoxicación crónica, aplicando el principio "quien contamina paga" de manera retroactiva en la medida de lo posible.

Solo mediante esta combinación de medidas, que van más allá de la internalización de costos para buscar la eliminación de la fuente contaminante, se podrá cerrar la brecha entre costos privados y sociales. El objetivo final debe ser la transformación del círculo vicioso de degradación en un modelo de extracción responsable que, respetando los límites ecológicos y los derechos indígenas, demuestre que el desarrollo económico no está reñido con el bienestar comunitario.

5. Bibliografía:

-Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2025, 24 de junio). Efectos en la salud por la exposición al mercurio. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-en-la-salud-por-la-exposicion-al-mercurio>

-Bach Bandera Llamapponca, J. D., & Molina Mollo, B. (2024). *La actividad minera y su impacto en la economía del Perú, periodo 2010–2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional UNMSA. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8744>

-Banco Central de Reserva del Perú (BCRP). (2024). *Producción minera e hidrocarburos por principales productos (variación porcentual interanual) - PBI minería metálica e hidrocarburos, 2005-2024* [Base de datos]. BCRPData.

<https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/anuales/resultados/PM05145AA/html>

-Brigham and Women's Hospital. (2022, 1 de septiembre). *Mercurio (sangre)*. Biblioteca de Salud.

https://healthlibrary.brighamandwomens.org/spanish/Encyclopedia/167,mercury_blood_ES#:~:text=Normalmente%2C%20los%20niveles%20son%20de,que%20tendr%C3%A1%20problemas%20de%20salud.

-Calle, I. (2025, 28 de noviembre). El Reinfo: una excepción que se volvió norma. Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA).

<https://spda.org.pe/noticia/el-reinfo-una-excepcion-que-se-volvio-norma/>

-Caviedes Sihuín, J., & Ccopa Huilca, C. U. (2025). Impacto ambiental de la pequeña minería y la contaminación por mercurio en el río Inambari de la región de Madre de Dios, 2020 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]. Repositorio Institucional UNAMAD. <http://hdl.handle.net/20.500.14070/1313>

-CooperAcción. (2024, 30 de julio). *ECONOMÍA Y MINERÍA*. CooperAcción.

<https://cooperaccion.org.pe/economia-y-mineria-23/>

-CooperAcción. (s. f.). *Economía y minería*. Recuperado de

<https://cooperaccion.org.pe/economia-y-mineria-13/>

-Del Pozo Loayza, C., & Paucarmayta Tacuri, V. (2015). *Impacto de la minería en la producción agropecuaria en el Perú: Impactos heterogéneos y determinación de los canales de transmisión* [Informe de investigación]. CIES.

<https://cies.org.pe/investigacion/impacto-de-la-mineria-en-la-produccion-agropecuaria-en-el-peru-impactos-heterogeneos-y-determinacion-de-los-canales-de-transmision/>

-Deutsche Welle. (2025, 9 de agosto). El mercurio intoxica los pueblos originarios de la Amazonía.

<https://www.dw.com/es/la-contaminaci%C3%B3n-por-el-mercurio-y-la-miner%C3%ADa-intoxica-a-pueblos-originarios-de-la-amazon%C3%ADa/a-73577368>

-Environmental Protection Agency. (s. f.). *Efectos en la salud por la exposición al mercurio*. Recuperado de

https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-en-la-salud-por-la-exposicion-al-mercurio#:~:text=Los%20posibles%20síntomas%20del%20envenenamiento%20por%20mercurio,y%20capacidad%20de%20caminar,%20*%20debilidad%20muscular.

-Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (IIMP). (2025). Guía de Proveedores IIMP 2025. Recuperado de <https://iimp.org.pe/brochure/guia/proveedores/2025/index.html>

-Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2023). *Perú: Compendio estadístico 2023*. INEI.

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1839/libro.pdf

-Ministerio del Ambiente. (2011). *Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio: Una bomba de tiempo* [Informe técnico]. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA).

https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/mineria_aurifera_en_madre_de_dios.pdf

-Ministerio de Energía y Minas. (2024). *Estadística del subsector minería – enero 2024*. Perú.

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6133582/5418668-estadistica-subsector-mineria-enero-2024.pdf>

-Ministerio de Energía y Minas. (2025). *MINEM: Exportaciones minero-metálicas crecieron un 21,5 % en el primer bimestre del 2025* [Comunicado de prensa]. Gobierno del Perú.

<https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/1173239-minem-exportaciones-minero-metalicas-crecieron-un-21-5-en-el-primer-bimestre-del-2025>

-Nuttall, K. L. (2004). *Interpreting mercury in blood and urine of individual patients*. *Annals of Clinical & Laboratory Science*, 34(3), 235–250.

<https://www.annclinlabsci.org/content/34/3/235.full>

-Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA) & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024, 3 de abril). Estudio proporcionará una visión regional de la situación de la contaminación por mercurio en la Cuenca Amazónica. <https://otca.org/estudio-proporcionara-una-vision-regional-de-la-situacion-de-la-contaminacion-por-mercurio-en-la-cuenca-del-amazonas/>

-Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). *Mercurio y salud*. Recuperado de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>

-Ortiz, J. C. (2025, octubre). La inversión minera sumaría \$ 6,400 millones en el 2026. Semáforo Minero, IIMP. Citado en Energiminas. Recuperado de <https://diariocorreop.economia/la-inversion-minera-sumaria-6400-millones-en-el-2026-y-registraria-un-crecimiento-de-10-noticia/>

-Plenge Osorio, F., Rojas Jaimes, J. E., & Manrique Lara Estrada, C. H. (2012). *Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: un problema de salud pública*. *Acta Médica Peruana*, 29(1), 38–42. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1728-5917201200010001

-PwC Perú. (2025). *Mine 2025: Concentrarse en el futuro*. PwC. Recuperado de <https://www.pwc.com/cl/es/Publicaciones/Mine-2025.html>

-Ramírez, T., & Valle, E. (2020). *Capacidad estatal en la gestión de los cierres de minas y pasivos ambientales mineros en el Perú*. Universidad del Pacífico. <https://sisisemail.up.edu.pe/sisisemail/docs/2022/1570/CAPACIDAD-ESTATAL-EN-LA-GESTION-DE-LOS-CIERRES-DE-MINA-Y-PASIVOS-AMBIENTALES.pdf>

-Reymundo-Dámaso, L. E. (2025). Tiempos de mistura: parentesco y matrimonios entre harakbut y mestizos en el contexto de la minería aurífera en una comunidad indígena de la Amazonía sur peruana. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 20(2). <https://doi.org/10.1590/2178-2547-BGOELDI-2023-0060>

-Reymundo, L. (2019). *Los indígenas depredados. Análisis de conflictos socioambientales en dos comunidades que trabajan oro en Madre de Dios*. Investigaciones.

https://cies.org.pe/wp-content/uploads/2021/06/analisis_de_conflictos_socioambientales_en_dos_comunidades_que_trabajan_oro_en_madre_de_dios.pdf

-Schwarz, M. (2017). *Inversión minera, conflictividad y pobreza regional en el Perú 2007–2017*. UCSA Revista de Ciencias Sociales, 5(2), 45–68. Recuperado de

<http://scielo.iics.una.py/pdf/ucsa/v5n2/2409-8752-ucsa-5-02-45.pdf>

-Sierra Praeli, Y. (2023, 21 de noviembre). *Perú: Deforestación por minería en Madre de Dios supera las 23 mil hectáreas en los últimos tres años*. Mongabay Latam.

<https://es.mongabay.com/2023/11/peru-deforestacion-mineria-madre-de-dios-estudio/>

-Varian, H. R. (2010). *Microeconomía intermedia: Un enfoque actual*. Análisis microeconómico (3.^a ed., Cap. 24: Las externalidades). Antoni Bosch Editor.