

Aproximando el costo de la contaminación minera sobre los recursos hídricos: metodologías paramétricas y no paramétricas*

PEDRO HERRERA CATALÁN**

OSCAR MILLONES DESTÉFANO***

RESUMEN

En este estudio se aproximan los costos económicos de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos para 2008 y 2009 en el marco conceptual de la Eficiencia Medioambiental, que interpreta dichos costos como el *trade-off* de los empresarios mineros entre incrementar su producción que es vendible a precios de mercado (*output* deseable) y reducir la contaminación ambiental que se desprende de su proceso productivo (*output* no deseable). Dichos costos económicos fueron calculados a partir de fronteras de posibilidades de producción paramétricas y no paramétricas para 28 y 37 unidades mineras en los años 2008 y 2009 respectivamente, las que estuvieron bajo el ámbito de la Campaña Nacional de Monitoreo Ambiental de Efluentes y Recursos Hídricos que realizó el Organismo Supervisor de Inversión Energía y Minería (Osineergmin) en dichos años.

Los resultados indican que los costos económicos de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos ascendieron, en promedio, para los años 2008 y 2009, a US\$ 814,7 millones, y US\$ 448,8 millones, respectivamente. Dichos costos estuvieron altamente concentrados en pocas unidades productivas, así como en pocos parámetros de contaminación, y fueron mayores en unidades mineras con producción media/baja de minerales. Dado que en la actualidad el sistema de multas y sanciones en el sector minero se basa en criterios administrativos, el estudio propone un Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente basado en criterios económicos

* Este estudio es resultado final del proyecto de investigación «¿Cuál es el costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos en el Perú?», desarrollado en el marco del Concurso Anual de Investigación ACIDI-IDRC 2009 organizado por el Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES). Agradecemos los comentarios, apreciaciones y sugerencias de Janina León, Sergio Perelman y Manuel Glave, así como del lector anónimo proporcionado por el CIES y del Organismo Supervisor de Inversión Energía y Minería (Osineergmin). Agradecemos también las apreciaciones recibidas en el XXII Seminario Anual organizado por el CIES en noviembre de 2011. Una versión anterior de este documento aparece como Documento de Trabajo 321 del Departamento de Economía de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Los errores que puedan existir son responsabilidad de los autores.

** Profesor del Departamento de Economía de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), pedro.herrera@pucp.edu.pe, y consultor del Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, pherrera@mef.gob.pe.

*** Profesor del Departamento de Economía de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), omillones@pucp.edu.pe y consultor del Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, omillones@mef.gob.pe

con la finalidad de establecer un mecanismo disuasivo de la contaminación. Se espera que estos mecanismos generen los incentivos necesarios para que las empresas mineras internalicen las externalidades negativas que se desprende de su proceso productivo.

Palabras clave: Eficiencia Medioambiental, precios sombra, fronteras de posibilidades de producción, funciones distancia, externalidades ambientales, empresas extractivas mineras.

Clasificación JEL: Q53, Q25, H23, C67, D24, D21, Q28

Estimating the Cost of Mining Pollution on Water Resources: Parametric and Nonparametric Resources

ABSTRACT

This study estimates the economic costs of mining pollution on water resources for the years 2008 and 2009 based on the conceptual framework of Environmental Efficiency. This framework identifies such costs as the mining companies' trade-off between increasing production that is saleable at market prices (desirable output) and reducing the environmental pollution that emerges from the production process (undesirable output). These economic costs were calculated from parametric and nonparametric production possibility frontiers for 28 and 37 mining units in 2008 and 2009, respectively, which were under the purview of the National Campaign for Environmental Monitoring of Effluent and Water Resources, conducted by the Energy and Mining Investment Supervisory Agency (Osinermin) in those years.

The results show that the economic cost of mining pollution on water resources rose to U.S. \$ 814.7 million and U.S. \$ 448.8 million for 2008 and 2009, respectively. These economic costs were highly concentrated in a few mining units, within a few pollution parameters, and were also higher in mining units with average/low mineral production. Taking into consideration that at present the fine and penalty system in the mining sector is based on administrative criteria, this study proposes a System of Environmentally Efficient Sanctions based on economic criteria so as to establish a preventive mechanism for pollution. It is hoped that this mechanism will generate the necessary incentives for mining companies to address the negative externalities that emerge from their production process.

Keywords: Environmental Efficiency, shadow prices, production possibility frontiers, distance functions, environmental externalities, mining extractive companies.

JEL Classification: Q53, Q25, H23, C67, D24, D21, Q28

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el sector minero ha experimentado un crecimiento exorbitante. De un crecimiento de 2,4% en el año 2000, pasó a 7,6% en el año 2008, y aun cuando la tasa de crecimiento promedio para los años 2009-2010 fue de 1,3%, se espera una tasa de crecimiento promedio de 8,5% para el quinquenio 2011-2015, basada en la ejecución de un conjunto de inversiones mineras ascendentes a US\$ 25 346 millones (MEF, 2011). No cabe duda que la actividad minera representa para el país un importante agente dinamizador de la economía, a la vez que contribuye de manera significativa al aumento de las exportaciones, así como al incremento de la inversión privada y a la recaudación nacional¹.

Sin embargo, merece la pena preguntarse si los beneficios generados en este sector son mayores a los correspondientes costos. En el marco conceptual de la economía del bienestar la eficiencia económica ocurre cuando los beneficios sociales netos de una actividad económica son maximizados o, equivalentemente, cuando los beneficios marginales son iguales a los costos marginales. Por tanto, resulta interesante conocer si los beneficios sociales netos generados por la actividad minera han sido positivos, es decir, si los beneficios totales exceden los correspondientes costos, tanto sociales como privados. La respuesta a dicha pregunta no es clara y constituye en la actualidad un tema de agudo debate intelectual y político en el Perú.

Desde que la actividad minera se ha intensificado en el país, los costos directos para reducir los efectos generados por la contaminación ambiental minera han aumentado. Ya en 2000 el valor de los pasivos ambientales mineros (definido como el monto requerido para mitigar los efectos de la contaminación ambiental minera) superaba los US\$ 1000 millones (Glave y Kuramoto, 2002), y, en la actualidad, aun cuando se desconoce el valor de dichos pasivos, estos deberían ser más elevados, considerando que su número ha aumentado de 611 a 5551 entre los años 2003-2010 (Minem, 2011)². Según Glave y Kuramoto (2002), la mayor parte de estos pasivos mineros (95%) han sido generados por las empresas de la gran y mediana minería³, las cuales producen aproximadamente el 99% del total de minerales del país.

¹ Las exportaciones mineras pasaron de US\$ 3220 millones en 2000 a US\$ 21 148 millones en 2010, lo cual representa un incremento de 556,7%. Asimismo, en la actualidad, el sector minería e hidrocarburos representa aproximadamente el 60% de las exportaciones totales del país. De otro lado, el sector minería e hidrocarburos representa alrededor del 55% de la recaudación por impuesto a la renta de tercera categoría y el 25% del total de la inversión privada en el país.

² Se define como *pasivo ambiental minero* a los efectos nocivos generados por las actividades mineras en el medio ambiente. Entre estos se encuentran bocas de mina no cerradas, relaves o depósitos de agua contaminada, desmontes y acumulación de mineral, zanjas o tajos abiertos, campamentos y obras de infraestructura diversas, entre otros.

³ US\$ 977,1 millones, según cifras para 2000. Al respecto véase Glave y Kuramoto (2002).

Los recursos hídricos han sido tradicionalmente los recursos naturales más afectados por la contaminación de las actividades mineras en el país (Núñez-Barriga y Castañeda-Hurtado, 1999). Esto se debe a que el agua es un insumo indispensable en el proceso productivo minero. Este se combina con reactivos químicos (cianuro, arsénico, etc.) para separar el metal de la roca y así obtener el mineral con valor comercial⁴. Como resultado de este proceso, se generan desechos de roca triturada, agua y reactivos químicos residuales (denominados «relaves mineros») los cuales, debido a un inadecuado tratamiento, frecuentemente alcanzan a las fuentes hídricas aledañas a las operaciones mineras (ríos, lagos y/o lagunas) generándose así la contaminación ambiental en los recursos hídricos.

Según la literatura, la contaminación ambiental ocurre debido a la existencia de fallas de mercado (externalidades, información asimétrica, ausencia de derechos de propiedad, ausencia de un sistema de precios, etc.) lo cual conduce a que las empresas maximicen sus beneficios considerando únicamente sus costos privados de producción y omitiendo aquellos sociales y ambientales (Koundouri, 2000; Birol *et al.*, 2006). Acorde al marco conceptual de la Eficiencia Medioambiental (Pittman, 1981, 1983; Färe *et al.*, 1989, 1993, 2003), los costos de la contaminación ambiental pueden interpretarse como el *trade-off* de los empresarios mineros entre incrementar su producción que es vendible a precios de mercado (*output deseable*) y reducir la contaminación ambiental que se desprende de su proceso productivo (*output no deseable*). En otras palabras, los costos privados de no contaminar el ambiente se interpretan como los costos de oportunidad de los empresarios, es decir como el ingreso al cual estos tendrían que renunciar para reducir una unidad adicional de degradación ambiental (Rao, 2000; Färe *et al.*, 1989, 1993, 2003). En la literatura, a estos costos se los conoce con el nombre de los *precios sombra*, los cuales revelan información sobre la valoración que las empresas tienen respecto a la contaminación ambiental que generan y, dado que pueden expresarse en términos monetarios, representan una aproximación del costo económico de la contaminación ambiental generada por actividades productivas (Coggins y Swinton, 1996; Swinton, 1998).

El objetivo del presente estudio consiste en estimar el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos del Perú en los años 2008 y 2009. Para ello se empleará el marco conceptual de la *Eficiencia Medioambiental* (Pittman, 1981, 1983; Färe *et al.*, 1989, 1993, 2003; Rao, 2000), la cual construye una frontera de posibilidades de producción a partir de los mejores comportamientos ambientales mineros, para después calcular los precios sombra de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos, como la pendiente de la proyección de una empresa minera sobre la frontera de posibilidades de producción. Luego, a partir de los precios sombra estimados se aproximará el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos mediante el empleo de metodologías paramétricas y no paramétricas.

⁴ A esta fase productiva se la conoce como «concentración», la cual es posterior a la fase de «explotación» en la cual la roca conjuntamente con los minerales son extraídos de la mina.

El presente estudio se divide en cinco secciones adicionales a la introducción. En la primera, se describe el proceso de producción minera y su relación con los recursos hídricos. En la segunda sección, se presenta el marco teórico y metodológico vinculado a la Eficiencia Medioambiental, el cual se empleará en la tercera sección para calcular el costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos para los años 2008-2009. En la cuarta sección, se simulan las multas que deberían haber sido impuestas en el sector minero durante los años 2008 y 2009 a aquellas unidades mineras que excedieron los LMP promedios anuales normativos y se propone un Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente. Finalmente, en la quinta sección se exponen conclusiones y reflexiones finales.

1. EL PROCESO PRODUCTIVO MINERO

1.1. LAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN MINERA Y EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

El agua es un insumo indispensable en el proceso productivo minero. Su uso es más intensivo cuando se combina con reactivos químicos para separar el metal de la roca y así obtener el mineral con valor comercial. Esta fase de producción se la conoce como *concentración*, la cual procede a la fase de *explotación*, en la cual los minerales son extraídos de la mina^{5 6}.

Para separar la roca del mineral, las tecnologías mayormente usadas en el país son flotación y lixiviación, y en menor grado la de gravimetría⁷, estando la elección de la tecnología a emplear en función al metal a tratar. A continuación, se hará una descripción de cada una de estas tecnologías⁸.

⁵ Los minerales pueden ser extraídos de yacimientos mineros subterráneos o superficiales (tajo abierto). El empleo de uno u otro dependerá de la cercanía del depósito mineral a la superficie.

⁶ Según Torres (2007) el proceso productivo minero consta de cinco fases. La primera es la de *exploración*, en la cual se busca el yacimiento minero para definir la cantidad, calidad y el valor del mineral a extraer. La segunda fase es en la que se acondiciona el terreno y se provee la infraestructura para la explotación del mineral. Esta fase comprende la construcción de galerías, túneles y chimeneas, así como la provisión de infraestructura energética y vial, y el acondicionamiento de la maquinaria y equipo. La tercera y cuarta fases son de *explotación* y *concentración*, respectivamente, las cuales se describieron líneas arriba. Finalmente, la quinta fase, corresponde a la de *fundición* y *refinación*, en la cual los metales son purificados y fundidos para su comercialización. Cabe indicar que las empresas de la gran minería desarrollan las cinco fases de producción, mientras que las empresas de la mediana minería solo realizan las fases 3 y 4, y las de la pequeña minería solo la fase 3. Dependiendo de la fase de producción que se estudie, se afecta en mayor o menor medida un determinado recurso natural. Así, por ejemplo, la tierra es afectada mayormente en las fases de exploración y de desarrollo y acondicionamiento del terreno, y el aire se contamina mayormente en la fase de fundición y refinación. Dado que los recursos hídricos son afectados mayormente en la fase de concentración, será esta la fase de producción sobre la cual se tratará en la presente sección.

⁷ Estas tecnologías también son las mayormente usadas a nivel mundial. En la práctica internacional, adicionalmente, se emplean las tecnologías de lixiviación por depósitos y la separación magnética.

⁸ Para lo cual se empleó la información provista en el *Manual de Minería* publicada por Estudios Mineros del Perú (2005).

Flotación

Esta técnica es la más empleada en la práctica internacional (aproximadamente el 80.0% de la producción mundial de metales se obtiene por este método). Su uso extensivo radica en la posibilidad de aplicarla a diversos minerales y a su alta capacidad de recuperación por unidad de flotación. Este proceso se inicia con la trituración y el chancado de grandes trozos de roca en partes más pequeñas para posteriormente molerlas y combinarlas con reactivos químicos y agua, lo cual permite separar los componentes valiosos de los no valiosos.

Los reactivos químicos usados permitirán que la parte valiosa del metal flote (mediante el uso de reactivos espumantes), luego se concentre (mediante el uso de reactivos activadores) y que al final la parte no valiosa se hunda (mediante el uso de reactivos depresores). Adicionalmente, y dependiendo del tratamiento que se le quiera dar al mineral, se añaden otros tipos de reactivos químicos como modificadores, dispersantes, floculadores, sulfurantes, estabilizadores y antidotos, los cuales modifican algunas de las condiciones del proceso de flotación⁹.

Para la obtención de metales mediante este método el agua es un insumo indispensable, dado que debe cubrir la totalidad del material molido para que después puedan ocurrir las reacciones químicas y fisicoquímicas que harán flotar el componente valioso del metal. El metal que flota suele contener altos niveles de agua (en ocasiones superiores al 90,0%) que debe ser eliminada mediante un proceso denominado secado (espesado y filtrado).

Lixiviación

Se la conoce también como método hidrometalúrgico dado que emplea el agua como principal insumo para la recuperación de minerales. En este proceso, el agua es disuelta con reactivos químicos hasta formar una solución que regará la roca depositada en pilas o *pads* para separar los minerales valiosos de los no valiosos («lixiviación en pilas»)¹⁰.

Este proceso requiere, en primer lugar, colocar una membrana impermeable (geo membrana) para que aisle el suelo de todo el proceso químico a desarrollar. Luego, es necesario implementar un sistema de cañerías que servirán para transportar y rociar la solución lixivante en los *pads*, así como un sistema de tuberías (sistema de drenaje) que permitirán recoger las soluciones que se vayan filtrando.

⁹ Para, por ejemplo, dispersar partículas que entorpecen el proceso de flotación, evitar que se descompongan los reactivos usados, neutralizar la acidez, reducir la posibilidad que las partículas no valiosas del mineral floten, etcétera.

¹⁰ Si bien este método es el más usado, existen otros dos métodos adicionales: (i) «Lixiviación in situ», la cual es aplicada a la roca sin remover; y la «lixiviación dinámica», la cual consiste en tratar el mineral después de su molienda.

El proceso se inicia con el riego de la superficie del material apilado con una solución lixivante (agua y reactivos químicos), la cual varía dependiendo del metal a trabajar¹¹. Esta solución disuelve el contenido de metal produciendo una solución enriquecida con contenidos metálicos disueltos (*solución pregnant*), la que es recuperada en pozas mediante un sistema de drenaje para, posteriormente, recuperar el mineral fino (purificación y concentración) mediante la aplicación de procesos físico-químicos¹².

Gravimetría

Este proceso aprovecha la diferencia del peso específico entre el metal que se desea tratar y el material no deseado. En términos relativos, emplea una menor cantidad de reactivos y de agua que la tecnología de flotación y lixiviación, por lo que actualmente es reconocida como un proceso de tratamiento de minerales ambientalmente amigable.

En el Perú, la tecnología más usada es la de flotación y en segundo lugar la de lixiviación. En el año 2009, para los cuatro principales minerales producidos en el país, oro, plata, cobre y zinc, en promedio, el 71,3% se produjo por flotación y el 26,2% por lixiviación. Solo el 0,1%, en promedio, se produjo por gravimetría. Estos porcentajes varían dependiendo el tipo de mineral. Como se observa en la tabla 1, la totalidad de la producción de zinc se obtuvo mediante flotación, así como el 91,6% y 87,2% de la producción de la plata y el cobre, respectivamente. La tecnología de lixiviación se empleó mayormente en la producción de oro (83,8%), mientras la gravimetría básicamente se empleó para el tratamiento del oro (0,4%) y de manera muy reducida para la obtención del cobre.

Tabla 1. Producción minera según minerales y tecnología para el año 2009

Tecnología	Mineral							
	COBRE 1/		ORO 2/		ZINC 1/		PLATA 3/	
	TMF	%	Grs.f.	%	TMF	%	Kg.f.	%
Flotación	1 113 414	87,2	11 920 632	6,5	1 512 931	100,0	3 594 161	91,6
Lixiviación	162 795	12,8	154 211 951	83,8	0	0,0	328 548	8,4
Gravimetría	40	0,0	647 350	0,4	0	0,0	0	0,0
Otros	0	0,0	17 214 759	9,4	0	0,0	0	0,0
Total	1 276 249	100,0	183 994 692	100,0	1 512 931	100,0	3 922 708	100,0

1/ Expresado en toneladas métricas de contenido fino - TMF

2/ Expresado en gramos finos (Grs.F)

3/ Expresado en kilogramos finos (Kg.f)

Fuente: Minem (2010). Elaboración propia.

¹¹ Por ejemplo, para el cobre se emplea ácido sulfúrico, y para el oro, cianuro de sodio.

¹² Para los óxidos de cobre se utiliza el ácido sulfúrico para su disolución, posteriormente se procede a su electro refinación. Para el oro/plata, se utiliza el cianuro de sodio, que forma una solución enriquecida, a la que se añade polvo de zinc (proceso Merrill Crowe) para la precipitación de oro y plata.

1.2. EL EMPLEO DE REACTIVOS QUÍMICOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS METALES

Debido a que cada metal tiene una composición química particular, los reactivos químicos (cianuro, ácido sulfúrico, entre otros) empleados para separar la roca de los minerales depende del tipo del metal a tratar. Por ejemplo, para el tratamiento del cobre se emplea acetileno, óxido de calcio, entre otros y, para el tratamiento de zinc, además de los señalados anteriormente, se usa el ácido sulfúrico.

A continuación, se describen brevemente los procesos de obtención de los principales minerales que se extraen en el país (cobre, oro, plata y zinc) precisándose los reactivos químicos que se emplean para el tratamiento de dichos minerales. Se describirá la tecnología de flotación para el cobre, el zinc y la plata y de lixiviación para el caso del oro, dado que son las tecnologías que más se usan para la obtención de dichos minerales.

- **Cobre:** Este mineral, según su composición química, se clasifica en minerales sulfurados y oxidados, por lo que los reactivos que se emplean para su tratamiento dependen de esta clasificación. Para la flotación de los minerales sulfatados de cobre (pirita) se usa aceite de pino como espumante, los xantatos y/o los aerofloats como concentradores del metal y la cal para reducir el contenido de pirita. Por su parte, el tratamiento de los minerales oxidados de cobre (cuprita y tenorita) requiere un tratamiento previo de sulfurización con sulfuro de sodio para hacerlos más dóciles y otorgarle así un mayor grado de flotabilidad para luego agregarle xantato amílico de potasio y silicato de sodio.
- **Zinc:** Este mineral es habitualmente obtenido conjuntamente con el plomo y el cobre. Para su tratamiento se emplea la técnica de flotación diferencial, por la cual se hace flotar primero el cobre y el plomo (mediante carbonato de soda o cal, thiocarbanilida, creosoto, aerofloat, xantato y ácido cresílico o aceite de pino)¹³ y luego se deprime el zinc usando sulfuros de hierro y cianuro de sodio. El componente de cobre y plomo obtenido es separado haciendo flotar primero el plomo, previa depresión del cobre con cianuro de sodio. Finalmente, se hace flotar el cobre y luego el zinc empleando, en este último proceso, cal o carbonato de soda, sulfato de cobre, aceite de pino o ácido cresílico y ditioniofosfato.
- **Plata:** El tratamiento de este mineral se realiza mediante los reactivos del plomo, es decir, mediante el carbonato de soda o cal, thiocarbanilida, creosoto, aerofloat, xantato y ácido cresílico o aceite de pino.
- **Oro:** Una vez que el mineral es apilado en pilas lixiviación, se la rocía con una solución diluida de cianuro para extraer el oro del mineral. Adicionalmente, se agrega antiescamantes y soda cáustica o cal según se requiera, para controlar la acidez de la mezcla. La solución lixivia (lava y amalgama) las partículas de oro

¹³ Estos son los reactivos químicos empleados en el tratamiento del plomo.

del mineral mientras se filtra y mediante un sistema de drenaje es almacenada en pozas. La solución que contiene el oro se denomina *solución pregnant*, la cual es llevada mediante sistemas de bombeo hacia una planta de recuperación del oro. El método más usado para esto es la precipitación con zinc (método Merrill-Crowe), el cual consiste en agregar zinc en polvo, floculante y nitrato de plomo a la solución pregnant, para generar que el oro se precipite (se separe) y el zinc en polvo se combine con el cianuro. Luego, se funde el precipitado para recuperar el oro. Como resultado se obtiene el oro en barras (*gold ore bullion*), una solución de cianuro sin oro denominada «estéril» (*barren solution*) y material de desecho e impurezas (*slag material*).

1.3. LA ACTIVIDAD MINERA Y LA CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Como resultado del proceso de obtención de minerales se generan desechos y residuos, que son una mezcla de roca triturada, agua y reactivos químicos residuales, denominados *relaves mineros*, los cuales son depositados en plantas de recuperación de agua o en lugares de almacenamiento de relaves. En estos lugares, los relaves son acumulados en el fondo de la poza de almacenamiento y el agua residual es recuperada para ser reutilizada o, en todo caso, es evaporada. Luego, los materiales contaminantes son solidificados para proceder a almacenarlos en los denominados depósitos de relaves¹⁴.

Adicional a la contaminación de los recursos hídricos por componentes químicos existen otros tres tipos de contaminación de la calidad del agua como consecuencia de las actividades mineras (De Rosa y Lyon, 1997).

1.3.1. El drenaje ácido de la minería

El drenaje de la minería ácida (DAM) se genera cuando los sulfatos de las rocas son expuestos al aire libre o al agua. Este proceso se origina cuando la roca es removida y amontonada en pilas de drenaje, y, al entrar en contacto con el aire o con el agua, crea ácido sulfúrico, cuya presencia en el agua y a un determinado nivel de acidez, crea una bacteria denominada *Thiobacillus ferrooxidans*, la cual acelera los procesos de oxidación y acidificación.

El ácido lixivia la roca mientras que la roca fuente este expuesta al aire y al agua, proceso que continuará hasta que los sulfatos sean extraídos completamente. Según el Consejo de la Minería Ambiental de la Columbia Británica (2000), este proceso puede durar cientos, o miles de años, dado que el ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, siendo posteriormente depositado en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos degradando la calidad

¹⁴ Debido al alto costo de manejar los relaves, las compañías mineras intentan localizar los tanques o pozas de relave lo más cerca posible a la planta de procesamiento de minerales, con la finalidad de minimizar los costos de transporte y reutilizar el agua contenida.

del agua, lo cual podría aniquilar la vida acuática y volver el agua inservible. Según esta entidad, el DAM se constituye como la fuente mayor de contaminación por metales causada por la minería.

1.3.2. La contaminación por metales pesados y lixiviación

Esta contaminación ocurre cuando ciertos metales como el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, la plata y el zinc, contenidos en las rocas removidas, entran en contacto con el agua. Cuando esto ocurre los metales extraídos son llevados río abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa. Así, las consecuencias en el agua son similares a las generadas por el DAM.

1.3.3. La erosión y sedimentación

Las actividades mineras alteran el estado natural del suelo debido a la construcción de caminos, basureros y el desarrollo de excavaciones a la intemperie. Cuando no se toman las prevenciones adecuadas, la roca removida y la erosión posterior de la tierra pueden transportar la sedimentación generada hacia los arroyos, ríos y lagos ubicados en las cercanías de las actividades mineras posibilitando la obstrucción de las riveras de los ríos, la vegetación de estas y el hábitat para la fauna y los organismos acuáticos.

El manejo de relaves es una operación requerida para recuperar y reutilizar el agua y evitar filtraciones hacia el suelo y subsuelo. Además, la prevención y el tratamiento del DAM, así como de la contaminación del agua por metales pesados y por la erosión, son requeridas para evitar la contaminación y degradación de los recursos hídricos. Cuando esto no ocurre, los contaminantes generados, al tener contacto con el agua y el subsuelo, alteran la composición natural de estos últimos, lo que a su vez afecta a la fauna, flora y a la población que se ubica próxima a las operaciones de la mina. Según Núñez-Barriga y Castañeda-Hurtado (1999), en el Perú los recursos hídricos, tradicionalmente, han sido los más afectados por la contaminación de la actividad minera. Esta contaminación ha perjudicado la productividad de la agricultura y la capacidad de carga de los pastos para la ganadería; esta última predominante en las áreas cercanas a las principales actividades mineras en el Perú (Torres, 2007).

Los efectos nocivos en lo que concierne al agua han creado conflictos mineros en diversas zonas mineras del país. Según Glave y Kuramoto (2007), estos conflictos han estado referidos mayormente a la contaminación y al uso del recurso hídrico. Estos autores indican que el 60,0% de la totalidad de los conflictos reportados tienen como tema principal el agua, siguiéndole en importancia relativa los problemas vinculados a la tierra y el territorio (15,0%), aire (11,0%), uso alternativo de recursos (6,0%), participación (6,0%) y accidentes (2,0%). Sobre los conflictos relacionados al agua, el 64,0% se vincula con la contaminación de dicho recurso, el 18,0% se relacionan a la escasez de agua y el 18,0% restante por el empleo de excedentes de agua. Estos problemas se han

registrado en diversas regiones del país estando en algunos casos identificados de manera puntual y, en algunos otros, se requieren investigaciones más concretas respecto a la problemática generada (Glave y Kuramoto, 2007).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. LAS FRONTERAS DE PRODUCCIÓN EFICIENTE Y LOS PRECIOS SOMBRA

La *Eficiencia Medioambiental* (Pittman, 1981, 1983; Färe *et al.*, 1989, 1993, 2003) surgió en los años ochenta y desde sus inicios se avocó al estudio de los mecanismos para la valoración económica de la contaminación generada por las actividades productivas. La motivación para el cálculo de dicho valor radica en el hecho de que la contaminación ambiental no es comercializable en el mercado, razón por la cual los sistemas de precios fallan para asignar eficientemente los recursos productivos.

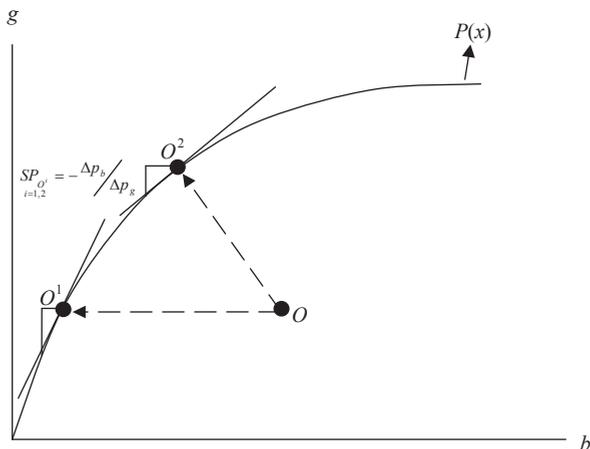
El método de análisis de la *Eficiencia Medioambiental* supone que las unidades productivas emplean diversos input para producir de manera conjunta dos tipos de output: *deseables* y *no deseables* (Färe y Grosskopf, 1998; Färe *et al.*, 1989, 1993); también establece un criterio de eficiencia medioambiental, en el sentido de Pareto, para identificar comportamientos ambientalmente eficientes. Así, una unidad productiva será eficiente si no puede producir más de un *output deseable* o menos de un *output no deseable*, sin disminuir la cantidad de otro *output deseable* o incrementar otro *output no deseable*, dada la dotación de input (insumos) y la tecnología de la empresa. En otras palabras, una unidad productiva será ambientalmente eficiente si tiene la habilidad para incrementar su producción deseable sin dañar el medio ambiente, es decir, para producir sobre la frontera de posibilidades de producción eficiente dada la tecnología.

En términos cuantitativos, la eficiencia medioambiental puede ser calculada como la distancia de una unidad productiva a la frontera de posibilidades de producción, construida a partir de un conjunto de input y output (*deseables* y *no deseables*). Esta evaluación revela información sobre la valoración económica que las unidades productivas tienen respecto a la contaminación ambiental que generan, la cual ha sido denominada en la literatura como los precios sombra de las externalidades ambientales. Estos precios sombra pueden calcularse mediante la pendiente de la proyección de una unidad productiva sobre la frontera de posibilidades de producción, y su lectura indicará «cuánto es el ingreso al cual las unidades productivas deben renunciar para reducir una unidad adicional de degradación ambiental» (Rao, 2000; Färe *et al.*, 1993).

En el gráfico 1, «*g*» es la cantidad de *output deseable* y «*b*» es la cantidad de *output no deseable*. Siendo la frontera de posibilidades de producción $P(x)$, la observación O corresponde a una combinación ineficiente de outputs, dado que es posible producir una mayor cantidad de *output deseable* y a la vez reducir la cantidad del *output no deseable* o, en todo caso, mantener constante el *output deseable* y reducir el *output no deseable*.

En ambos casos, los vectores $\overline{OO^1}$ y $\overline{OO^2}$, que representan la distancia del punto O a la frontera de producción eficiente, constituyen una medida de eficiencia medioambiental (véase el gráfico 1)¹⁵.

Gráfico 1. Fronteras de posibilidades de producción y los precios sombra de las externalidades ambientales



Fuente: Adaptado de Färe *et al.* (1989). Elaboración propia.

Las pendientes de la proyecciones de la observación O sobre la función de producción (puntos O^1 y O^2), es decir la tasa marginal de sustitución técnica entre los *output deseables* y *no deseables*, en ambos casos, corresponde a los precios sombra de la contaminación ambiental, la cual admite la siguiente lectura: «cuánto *output* deseable debería renunciar una unidad productiva, si desea reducir la contaminación ambiental en una unidad, manteniendo el nivel de eficiencia constante» (Färe *et al.*, 1989, 1993; Coggins y Swinton, 1996; Gollop y Swinand, 1998).

2.2. LAS FUNCIONES-DISTANCIA Y EL CÁLCULO DE LOS PRECIOS SOMBRA

Los precios sombra de los *output no deseables* habitualmente han sido estimados mediante funciones-distancia de tipo Shephard (1970)¹⁶. Estas funciones-distancia brindan una representación dual de la referencia tecnológica y estiman la eficiencia medioambiental de una unidad productiva, como la distancia a la frontera de producción eficiente. Luego, a partir de la estimación de la tasa marginal de sustitución técnica de los *output*

¹⁵ Si esta distancia es igual a cero, la unidad productiva es eficiente y opera sobre la frontera de posibilidades de producción.

¹⁶ Este autor propuso funciones-distancia en términos de *output* para el cálculo de índices de eficiencia. Su trabajo fue luego extendido a funciones distancia en términos de *input*, así como a funciones direccionales.

deseables y *no deseables* de la proyección de una observación (unidad productiva) sobre la función de producción eficiente, se calculan los precios sombra de los *output no deseables*.

Diversas metodologías se han utilizado para calcular los precios sombra de las externalidades ambientales a partir del cálculo de funciones-distancia mediante la estimación de una frontera de producción eficiente. Estas metodologías pueden compilarse en dos grandes grupos: paramétricas y no paramétricas. Las metodologías paramétricas fueron propuestas inicialmente para la estimación de funciones de producción (Aigner y Chu, 1968), luego extendidas a funciones de costos (Pollak *et al.*, 1984) y, posteriormente, a funciones-distancia (Pittman 1981, 1983; Färe *et al.*, 1993, 2003; Coggins y Swinton, 1996). La ventaja de emplear aproximaciones paramétricas para el cálculo de los precios sombra radica en que la derivación de una función-distancia con respecto a los outputs (*deseables* y *no deseables*) es más rigurosa, dado que especifican previamente una forma funcional para la referencia tecnológica de las unidades productivas evaluadas.

De otro lado, las metodologías no paramétricas, o de programación matemática, son preferibles en contextos en los cuales las tecnologías de producción de las unidades productivas son desconocidas, cuando existen múltiples output en la evaluación, o en los contextos en que los sistemas de precios son inexistentes, no significativos o inoperativos (Lovell, 1993). Destacan por su flexibilidad y la posibilidad de adaptarse a un contexto de múltiples inputs y outputs. Inicialmente, los precios sombra, mediante esta metodología, se estimaron a partir de funciones de producción translogarítmicas (Färe *et al.*, 1989, Hernández *et al.*, 1997) y posteriormente han sido calculados mediante la aproximación Data Envelopment Analysis (DEA), la cual asume rendimientos constantes o variables a escala, fuerte disponibilidad de inputs y outputs y convexidad del conjunto de combinaciones de inputs y outputs (Lee *et al.*, 2002, Salnykov y Zelenyuk, 2005).

2.3. APLICACIONES EMPÍRICAS VINCULADAS A LOS PRECIOS SOMBRA DE LAS EXTERNALIDADES AMBIENTALES

En el ámbito de las aplicaciones empíricas para el cálculo de los precios sombra mediante metodologías paramétricas, se encuentra el trabajo de Pittman (1983), quien estimó los precios sombra de elementos contaminantes en el agua (oxígeno bioquímico) para cada una de las cinco etapas del proceso de producción de la industria de papel del estado de Wisconsin en 1976. El autor estimó los precios sombra en US\$ 4408 por tonelada, donde el 60,0% de dicho precio provenía de la fase del proceso productivo en el cual la tinta de las fibras del papel reciclado era removida previa a la elaboración del papel. Por su parte, Färe *et al.* (1989, 1993) extendieron el trabajo de Pittman (1983) incluyendo además del oxígeno bioquímico otros contaminantes del agua que se derivan del proceso productivo de elaboración del papel (total de sólidos suspendidos, ácido sulfúrico y partículas diversas). Los autores encontraron que el precio sombra para el conjunto de estos contaminantes, era de US\$ 30 489,5 por tonelada, mayor en US\$ 24 000 a los calculados por Pittman (1983).

De otro lado, Gollop y Swinand (1998) estudiaron los precios sombra de la polución del agua por el uso de pesticidas, herbicidas y fungicidas en la agricultura estadounidense para el período 1972-1993. Los autores señalaron que los precios sombra fueron más elevados en el período 1972-1979 que el en período 1980-1993 y que las políticas de regulación influyeron tanto en los niveles de contaminación como en los precios sombra del sector.

Por el lado de las aplicaciones empíricas no paramétricas, se encuentra el estudio de Lee *et al.* (2002), quienes estimaron los precios sombra de la polución en el aire generada por las plantas energéticas en Corea para el período 1990-1995. Los autores encontraron que los precios sombra promedio de los óxidos de sulfuro, los óxidos de nitrógeno y el total de partículas suspendidas fueron 10% más bajos que aquellos calculados por mediante metodologías paramétricas. Por su parte, Salnykov y Zelenyuk (2005) calcularon los precios sombra de las emisiones en el aire del dióxido de carbono, dióxido sulfúrico y óxido nitrógeno para el período 1990-2004, para una muestra variada de países. Los resultados indicaron que los contaminantes más perjudiciales para la salud tenían precios sombra más elevados y que tanto países desarrollados como en vías de desarrollo podían ser ambientalmente eficientes.

2.4. METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LOS PRECIOS SOMBRA DE LOS OUTPUT NO DESEABLES

2.4.1. Metodologías no paramétricas

Salnykov y Zelenyuk (2005) propusieron una aproximación no paramétrica para la estimación de los precios sombra de los *output no deseables*. Para ello, emplearon una función de producción bajo el supuesto de retornos a escala variables de la siguiente forma:

$$P(x) = \{(g, b) : g \leq Gz, b \geq Bz, Xz \leq x, e^T z \leq 1, z \in \mathfrak{R}_+^K\} \quad (1)$$

Donde:

G : es una matriz $(1 \times K)$ de *output deseables*.

B : es una matriz $(1 \times K)$ de *output no deseables*.

X : es la matriz $(N \times K)$ de input.

e^T : es un vector $(1 \times K)$ de 1.

$z \in \mathfrak{R}_+^K$: es el vector de intensidades¹⁷.

k : es el número de unidades productivas evaluadas (unidades mineras).

Sobre la base de la función de producción descrita anteriormente, se calculan funciones-distancia direccionales, $\vec{D}_0(\cdot)$ para cada una de las unidades productivas mediante la solución del siguiente problema de programación lineal:

¹⁷ Corresponden a los pesos asignados a cada unidad productiva evaluada en la construcción de la frontera de producción eficiente.

$$\max \tau^k \tag{2}$$

s.a.

(i) $Gz \geq (1 + \tau^k)g^k$, con $k = 1, \dots, K$

(ii) $Bz \leq (1 - \tau^k)b^k$

(iii) $Xz \leq x^k$

(iv) $e^T z \leq 1$

(v) $z \geq 0_K$, con $\tau^k \geq 0$

Una vez estimadas las funciones-distancia direccionales para el conjunto de unidades productivas evaluadas, se calculan los precios sombra de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos. Para ello, previamente se proyectan todas las observaciones evaluadas sobre la frontera de producción eficiente, considerando las funciones-distancia direccionales estimadas. Dicha proyección se representará con un punto sobre la frontera de producción, el cual tendrá las siguientes coordenadas (g^k, b^k) :

$$g^{e^k} = \left[1 + \overset{\hat{\rightarrow}}{D}_0^k(\cdot) \right] g^k \tag{3} \quad b^{e^k} = \left[1 - \overset{\hat{\rightarrow}}{D}_0^k(\cdot) \right] b^k \tag{4}$$

Posteriormente, considerando las ecuaciones (3) y (4) se resolverán K problemas de programación lineal para cada unidad productiva evaluada:

$$\max_{z, \tau^k} \tau^k \tag{5}$$

s.a.

(i) $Gz \geq (1 + \tau^k)g^{e^k}$, con $k = 1, \dots, K$

(ii) $Bz \leq (1 - \tau^k)b^{e^k}$

(iii) $Xz \leq x^k$

(iv) $e^T z = 1$

(v) $z \geq 0_K$, con $\tau^k \geq 0$

De esta manera, se obtiene un conjunto de nuevos valores óptimos de τ y z , así como un conjunto de multiplicadores de Lagrange para cada restricción en (5). Los multiplicadores de Lagrange de las restricciones (i) y (ii) son equivalentes a los precios sombra normalizados¹⁸. Finalmente, los precios sombra $(\hat{p}_m^{b^k})$ de los *output no deseables* (b) para el contaminante m ($m = 1, \dots, M$) para cada unidad productiva evaluada se obtienen de la siguiente manera:

¹⁸ Los ratios de estos multiplicadores de Lagrange son equivalentes a los ratios $\overset{\hat{\rightarrow}}{\partial} D_0^k(\cdot) / \partial g^k$ y $\overset{\hat{\rightarrow}}{\partial} D_0^k(\cdot) / \partial b_m^k$.

$$\hat{p}_m^{b^k} = p^{g^k} \frac{\lambda_{(ii)m}^k}{\lambda_{(i)}^k} \left[\frac{1 - \vec{D}_0^k(\cdot)}{1 + \vec{D}_0^k(\cdot)} \right] \quad (6)$$

Donde:

$\lambda_{(i)}^k$: es un multiplicador de Lagrange correspondiente a los *output deseables* (restricción (i) de la ecuación 5) para la *k* – *esima* unidad productiva evaluada.

$\lambda_{(ii)m}^k$: es un multiplicador de Lagrange correspondiente a los *output no deseables* (restricción (ii) de la ecuación 5) para la *k* – *esima* unidad productiva evaluada y para el contaminante *m*.

2.4.2. Metodologías paramétricas

Siguiendo a Chung (1996) y Färe *et al.* (1993), el cálculo de los precios sombra requieren la estimación de una función-distancia direccional en términos de output, para lo cual proponen una especificación translogarítmica de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \ln \left[1 + \vec{D}_0(x, g, b | g, b) \right] = & \alpha_0 + \alpha_1 \ln g + \sum_m \beta_m \ln b_m + \sum_n \gamma_n \ln x_n + \frac{1}{2} \alpha_{11} (\ln g)(\ln g) + \frac{1}{2} \sum_m \sum_{m'} \beta_{mm'} (\ln b_m)(\ln b_{m'}) \\ & + \frac{1}{2} \sum_n \sum_{n'} \gamma_{nn'} (\ln x_n)(\ln x_{n'}) + \frac{1}{2} \sum_n \delta_n (\ln g)(\ln x_n) \\ & + \frac{1}{2} \sum_m \sum_n \xi_{mn} (\ln b_m)(\ln x_n) + \frac{1}{2} \sum_m \zeta_m (\ln g)(\ln b_m) \quad (7) \end{aligned}$$

Donde:

g: corresponde a los *output deseables*.

b: corresponde a los *output no deseables*, donde $n = 1, \dots, N$ es el número de *output no deseables*.

x: corresponde a los input, donde $m = 1, \dots, M$ es el número de inputs.

$\lambda, \beta, \gamma, \delta, \xi, \zeta$: son los parámetros a ser estimados.

$\vec{D}_0(\cdot)$: es una función-distancia direccional.

Para estimar los parámetros de la ecuación (7) se debe de minimizar la suma de las desviaciones, para lo cual se resuelve el siguiente problema de optimización:

$$\min_k \left[\ln \left(1 + \vec{D}_0(\cdot) \right) - \ln \left(1 + \vec{D}_0(\cdot) \Big|_{\partial P(x)} \right) \right] \equiv \min_k \left[\ln \left(1 + \vec{D}_0(\cdot) \right) - \ln (1 + 0) \right] \equiv \min_k \left[\ln \left(1 + \vec{D}_0(\cdot) \right) \right] \quad (8)^{19}$$

¹⁹ La ecuación (7) puede ser estimada usando (8) como una función objetivo de la siguiente manera:

$$\min_k \left[\ln \left(1 + \vec{D}_0(x^k, g^k, b^k | g^k, b^k) \right) \right]$$

s.a

(i) $\ln \left(1 + \vec{D}_0(x^k, g^k, b^k | g^k, b^k) \right) \geq 0, k = 1, \dots, K$ Requirimiento para que todas las observaciones sean tecnológicamente posibles.

Como resultado se obtiene la siguiente función-distancia direccional en términos de output:

$$\hat{D}_0(x^k, g^k, b^k | g^k, b^k) = \exp \left\{ \ln \left[1 + \vec{D}_0(x^k, g^k, b^k | g^k, b^k) \right] \right\} - 1, \forall k = 1, \dots, K \quad (9)$$

Donde:

k : es el número de unidades productivas evaluadas (unidades mineras).

Finalmente, los precios sombra de los *output no deseables* son estimados de la siguiente forma:

$$\hat{p}_m^b = p^g \frac{\frac{\partial \hat{D}_0(\cdot)}{\partial b_m}}{\frac{\partial \hat{D}_0(\cdot)}{\partial g}} \quad (10)$$

Donde:

$\hat{D}_0(\cdot)$ es una notación abreviada para $\vec{D}_0(x, g, b | g, b)$

Luego de reemplazar $\vec{D}_0(x, g, b | g, b)$ en la ecuación (10), y del uso de artificios algebraicos, se obtiene los precios sombra (\hat{p}_m^{bk}) para el j –ésimo *output no deseable* para las k unidades productivas mineras evaluadas de la siguiente manera:

$$\hat{p}_m^{bk} = \frac{\hat{\beta}_j + \sum_m \hat{\beta}_{mj} (\ln b_m^k) + \frac{1}{2} \sum_n \hat{\xi}_{jn} (\ln x_n^k) + \frac{1}{2} \hat{\zeta}_j (\ln g^k)}{\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_{11} (\ln g^k) + \frac{1}{2} \sum_n \hat{\delta}_n (\ln x_n^k) + \frac{1}{2} \sum_m \hat{\zeta}_m (\ln b_m^k)} \times \frac{g^k}{b_m^k} \quad (11)$$

$$(ii) \quad \partial \left[n(1 + \vec{D}_0(\cdot)) \right] / \partial (\ln g) \leq 0, \partial \left[n(1 + \vec{D}_0(\cdot)) \right] / \partial (\ln b_m) \geq 0, m = 1, \dots, M$$

$$(iii) \quad \alpha_1 - \sum_m \beta_m = -1; \alpha_{11} - \sum_m \zeta_m = 0; \zeta_m - \sum_{m'} \beta_{mm'} = 0; \delta_m - \sum_m \xi_{mm} = 0$$

Garantiza precios sombra no negativos para output deseables y precios sombra no positivos para output no deseables.

$$m, m' = 1, \dots, M$$

$$n = 1, \dots, N$$

(iii) $\beta_{mm'} = \beta_{m'm}, \gamma_{nn'} = \gamma_{n'n}$ Impone propiedades de simetría.

3. ESTIMACIONES

3.1. MUESTRA

La muestra utilizada corresponde a las empresas mineras que estuvieron bajo el ámbito de la Campaña Nacional de Monitoreo Ambiental de Efluentes y Recursos Hídricos que realizó el Osinergmin en los años 2008 y 2009 en las siguientes ocho regiones del país: Pasco, Lima, Áncash, Arequipa, La Libertad, Huancavelica, Junín y Cajamarca²⁰.

En el presente estudio, para el año 2008 se incluyeron 20 empresas mineras las cuales abarcaron un total de 28 unidades productivas, mientras que, para el año 2009, el número de empresas incluidas fue de 25, las cuales comprendieron un total de 37 unidades productivas²¹. Cabe indicar que todas las unidades mineras bajo estudio pertenecen a la gran y mediana minería, cuya producción promedio de los años 2008 y 2009, representó el 31,9% del total de las exportaciones de minerales del año 2009.

Previo a describir las variables que se empearán para realizar los cálculos, se describe la metodología empleada en la Campaña Nacional de Monitoreo Ambiental. Esta abarcó los siguientes tres componentes de trabajo:

- (i) Pre-campo.- En el cual se seleccionaron los puntos de toma de la muestra de agua. Dicha selección se realizó sobre la base de la información obtenida de los puntos de monitoreo registrados en el Sistema de Información Ambiental del Minem; de los informes de fiscalización de las normas ambientales realizados en años previos; y de los reportes de Evaluación Sanitaria realizados por la Dirección General de Salud Ambiental (Digesa), así como del reconocimiento realizado en campo. Una vez seleccionados dichos puntos de monitoreo, el Osinergmin procedió con la evaluación y aprobación (o desaprobación) de los mismos. En esta fase de pre-campo se elaboró además un plan de trabajo y un cronograma de monitoreo.
- (ii) Campo.- Esta etapa se recolectaron las muestras de agua de cuerpos receptores y de los efluentes minero-metalúrgicos, para lo cual se consideraron las recomendaciones establecidas en el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua del MINEM. La frecuencia de muestreo se realizó tres veces al día durante tres días según un punto de monitoreo, en el cual los horarios abarcaron horas diurnas

²⁰ El objetivo de dicha campaña fue verificar el cumplimiento de los niveles máximos permisibles en los efluentes, así como la calidad de las aguas de los cuerpos receptores vinculados a las actividades de las empresas mineras-metalúrgicas. Cabe indicar que esta campaña fue realizada cuando Osinergmin tenía las competencias de fiscalización y sanción por incumplimiento de las exigencias ambientales de las empresas mineras. Actualmente dichas competencias están a cargo de la OEFA-MINAM.

²¹ Véase en los Anexos 1 y 2 la información de las unidades productivas mineras bajo estudio, el número de afluentes monitoreados y la fuente hídrica de descarga según empresas mineras para los años 2008 y 2009. En estos anexos se muestra además, el número de afluentes monitoreados según unidad productiva minera, así como la fuente hídrica de descarga de los afluentes mineros.

y nocturnas por un período entre cinco a diez días, conforme a los planes de monitoreo aprobados.

- (iii) Post-campo.- Esta fase implicó el análisis químico de las muestras de agua recogidas en campo, para lo cual se emplearon laboratorios acreditados ante el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). Además, se analizaron los resultados obtenidos y se preparó el informe final de los muestreos.

Se destacan tres ventajas vinculadas al empleo de los resultados de la Campaña Nacional realizada por el Osinergmin para el presente estudio.

La primera de ellas consiste en que el monitoreo ambiental del Osinergmin fue realizado bajo el esquema «inopinado», esquema en el cual las muestras de agua se toman sin informar previamente a la unidad minera de ello. De esta manera se asegura que las unidades mineras no hayan tenido la oportunidad de alterar la contaminación de las aguas, por lo que los resultados contribuyen a una mejor aproximación del comportamiento ambiental de las empresas mineras²².

La segunda ventaja radica en que se cuentan con resultados del monitoreo por empresa minera y por unidad productiva minera. La ventaja de contar con datos por unidad minera es que permitirá conocer si una empresa minera, que cuenta con dos o más unidades productivas localizadas en lugares diferentes, tienen comportamientos ambientales distintos (o similares).

La tercera ventaja corresponde al hecho que el monitoreo fue realizado en «zonas mineras priorizadas», por lo que la información de dicho monitoreo resulta representativa para aproximar el costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos para los años 2008-2009.

3.2. VARIABLES

El proceso productivo minero puede ser caracterizado por uno en el cual las empresas mineras producen un único *output deseable -producción minera (g)*- medido en millones de dólares²³, para lo cual emplean diversos factores productivos, también medidos en millones de dólares²⁴. Como resultado de dicho proceso productivo minero se generan

²² Esta forma de fiscalización ambiental minera marca una diferencia respecto al esquema de monitoreo regular en el cual se le notifica a la empresa minera respecto al día que se realizará la fiscalización.

²³ La producción minera expresada en millones de dólares se calculó al multiplicar la producción de cada unidad productiva minera por los precios de las cotizaciones internacionales. Cabe indicar que en dicho cálculo se consideró la producción de los distintos minerales que cada unidad productiva produjo en los años 2008 y 2009.

²⁴ Debido a la falta de información de los costos de los insumos productivos según unidades mineras para los años bajo estudio, estos fueron aproximados como un porcentaje de la producción total. Dicho porcentaje fue de 33%, el cual fue calculado como el porcentaje promedio para dieciséis empresas mineras

trece tipos de contaminantes u *output no deseables* (b): potencial de hidrógeno (PH), sólidos suspendidos (STS), plomo (PB), cobre (CU), zinc (ZN), hierro (FE), arsénico (AS), cianuro (CN), cadmio (CD), mercurio (HG), cromo (CR), níquel (NI) y selenio (SE). Cabe indicar que los primeros once parámetros corresponden a los LMP de emisiones sobre los recursos hídricos para actividades minero-metalúrgicas regulados en el decreto supremo 010-2010-MINAM promulgado en agosto de 2010. Tanto el níquel como el selenio no se encuentran regulados en la normativa nacional; sin embargo, como se desprenden del proceso productivo minero fueron incluidos en el estudio.

Se debe resaltar que, en el presente estudio, los efluentes líquidos provenientes de las actividades minero-metalúrgicas corresponderán a cualquier flujo regular o estacional de sustancia líquida descargada a los cuerpos receptores que provengan de:

- Cualquier labor, excavación o movimiento de tierras efectuado en terreno cuyo propósito sea el desarrollo de actividades mineras o actividades conexas, incluyendo exploración, explotación, beneficio, transporte y cierre de minas, así como campamentos, sistemas de abastecimiento de agua o energía, talleres, almacenes, vías de acceso de uso industrial (excepto de uso público) y otros.
- Cualquier planta de procesamiento de minerales, incluyendo procesos de trituración, molienda, flotación, separación gravimétrica, separación magnética, amalgamación, reducción, tostación, sinterización, fundición, refinación, lixiviación, extracción por solventes, electrodeposición y otros.
- Cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales asociado con actividades mineras o conexas, incluyendo plantas de tratamiento de efluentes mineros, efluentes industriales y efluentes domésticos.
- Cualquier depósito de residuos mineros, incluyendo depósitos de relaves, desmontes, escorias y otros.
- Cualquier infraestructura auxiliar relacionada con el desarrollo de actividades mineras.
- Cualquier combinación de los antes mencionados²⁵.

La información estadística de las variables *output deseable* se obtuvo del Minem, mientras que la información de las variables *output no deseable* fue proporcionada por el Osinergmin. La descripción estadística de las variables *output deseables*, *output no deseables* e *input* para los años 2008 y 2009 se presenta en la tabla 2²⁶.

de la gran y mediana minería, que en el año 2007 cotizaron en la Bolsa de Valores de Lima. Para la construcción de dicho porcentaje, se revisó la información de los Estados Financieros correspondientes al IV trimestre de 2007, los Estados Financieros Anuales Auditados correspondiente al mismo año y las Memorias Anuales de las empresas mineras en cuestión. La fuente de información de dichas variables fue la Comisión Nacional Supervisora de Empresas y Valores (Conasev).

²⁵ Regulado en el numeral 3.2 del artículo 3 del decreto supremo 010-2010-MINAM.

²⁶ Véase en los Anexos 3 y 4, las variables *output deseable*, *output no deseable* e *input* de las unidades mineras bajo estudio para los años 2008 y 2009.

Tabla 2. Descripción estadística de las variables output deseables y no deseables y variables input para los años 2008 y 2009

Variables	Unidades	Media		Desviación estándar		Máximo		Mínimo		
		2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009	
Output deseable										
Producción de minerales	(g)	Millones de dólares	305,6	232,7	723,7	559,3	3785,2	2903,2	20,3	4,9
Input										
Costo de producción	(x_i)	Millones de dólares	100,8	76,8	238,8	184,6	1249,1	958,1	6,7	1,6
Output no-deseable										
Potencial de hidrógeno	(PH)	Niveles	7,85	7,52	1,10	0,55	10,78	8,29	5,17	5,77
Sólidos suspendidos	(STS)	mg/l 2/	84,87	53,87	146,48	93,79	677,13	515,27	3,65	5,00
Plomo	(PB)	mg/l 2/	0,03	0,02	0,05	0,02	0,17	0,08	0,00	0,00
Cobre	(CU)	mg/l 2/	0,30	4,31	0,73	24,02	3,26	146,38	0,00	0,00
Zinc	(ZN)	mg/l 2/	3,20	43,66	7,99	190,68	38,57	1139,71	0,02	0,01
Arsénico	(FE)	mg/l 2/	0,14	0,07	0,47	0,12	2,48	0,58	0,00	0,00
Cadmio	(AS)	mg/l 2/	6,81	20,32	36,00	123,50	190,49	751,25	0,00	0,00
Mercurio	(CD)	mg/l 2/	0,00	0,01	0,01	0,05	0,05	0,30	0,00	0,00
Cromo	(HG)	mg/l 2/	2,39	0,01	12,39	0,01	65,59	0,03	0,00	0,00
Níquel	(CR)	mg/l 2/	7,85	0,02	39,33	0,04	208,25	0,16	0,00	0,00
Selenio	(NI)	mg/l 2/	15,45	0,02	81,53	0,02	431,48	0,05	0,00	0,00
Hierro	(SE)	mg/l 2/	1,67	3,72	5,14	8,82	25,97	39,03	0,01	0,01
Cianuro 1/	(CN)	mg/l 2/	0,03	0,04	0,07	0,06	0,27	0,22	0,00	0,00

1/ Equivalente a 0,1 mg/l de cianuro libre y 0,2 mg/l de cianuro fácilmente disociable en ácido.

2/ Miligramos por litro

Elaboración propia

Cabe indicar que para el cálculo del precio sombra de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos se empleó una metodología no paramétrica y otra paramétrica. Para el cálculo de la primera se empleó la aproximación Data Envelopment Analysis (DEA), y para la metodología paramétrica se empleó una especificación translogarítmica. El programa DEAP 2.1 (Data Envelopment Analysis Program-Versión 2.1) fue utilizado para realizar las estimaciones de las fronteras no paramétricas, mientras que para el cálculo de las fronteras paramétricas se empleó programación en MATLAB.

3.3. RESULTADOS²⁷

3.3.1. Cálculo de los precios sombra de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos

Los resultados de las estimaciones de los precios sombra según unidad productiva minera y tipo de contaminante calculados a partir de metodologías no paramétricas y paramétricas para los años 2008 y 2009 se muestran en las tablas 3 y 4, respectivamente. En el año 2008, el precio sombra promedio correspondiente al conjunto de las unidades mineras analizadas ascendió a US\$ -907 mil y US\$ -1306 mil calculado a partir de metodologías no paramétrica y paramétrica, respectivamente. Por su lado, en el año 2009, el precio sombra promedio correspondiente a las unidades analizadas ascendió a US\$ -632 mil y US\$ -699 mil calculado a partir de metodologías no paramétrica y paramétrica, respectivamente.

Cabe indicar que los precios sombra calculados representan el costo marginal de la emisión de una unidad de contaminación ambiental minera en los recursos hídricos. En otras palabras, los precios sombra indican cuánto tienen que reducir las unidades productivas mineras de su ingreso para reducir la contaminación ambiental en una unidad contaminante. Dicho costo, en el año 2008 ascendió, en promedio para el conjunto de unidades mineras evaluadas, a US\$ -1106 mil y en 2009 a US\$ -665 mil.

Análisis de los resultados para el año 2008

Para el año 2008, el análisis según unidad productiva minera indica que las unidades Antamina de la empresa Antamina y el Complejo Metalúrgico La Oroya de la empresa Doe Run Perú tienen los precios sombra más elevados para el conjunto de las unidades mineras evaluadas, tanto para metodologías paramétricas como no paramétricas. La primera unidad minera explica, en promedio según ambas metodologías, el 9,2% del precio sombra para dicho año, mientras la segunda el 5,4%, explicando en conjunto el 14,6% del precio sombra promedio para 2008. Esto se debe a que tanto Antamina como el Complejo Metalúrgico La Oroya concentran el 59,0% de la producción total de las 28 unidades mineras analizadas, lo cual estaría indicando que las unidades mineras que más producen tienen un costo de oportunidad mayor por evitar contaminar el medio ambiente.

Por el contrario, las unidades productivas: Huarón (Empresa Pan American Silver S.A.), Orcopampa (Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.) y Casapalca (Empresa Minera Los Quenuales S.A.) poseen los precios sombra más reducidos del conjunto de unidades mineras estudiadas. En promedio, el precio sombra de estas tres unidades

²⁷ El detalle de las estimaciones de los precios sombra y del costo económico para los años bajo estudio, según parámetro contaminante, y unidad productiva minera, están disponibles previa solicitud a los autores.

mineras, según metodologías no paramétricas y paramétricas, ascendió a US\$ -987 mil, monto reducido si se lo compara con aquellos de las unidades mineras Antamina y del Complejo Metalúrgico La Oroya, el cual ascendió, en promedio, a US\$ -2237 mil. La explicación de ello radica en el hecho que estas tres unidades mineras representan solamente el 5,8% de la producción total de las unidades mineras bajo estudio, lo cual indica que el costo de oportunidad de las unidades mineras de contaminar los recursos hídricos es mayor mientras mayor es su nivel producción minera y menor si su producción minera es, efectivamente, menor.

El análisis por contaminante indica que, en promedio, el 68,2% de los precios sombra totales es explicado por el potencial de hidrógeno (28,7%), los sólidos total en suspensión (17,3%) y el mercurio (22,2%), lo cual indica que la emisión de unidad de contaminación por estos contaminantes genera un mayor costo en los recursos hídricos que la emisión de los otros contaminantes estudiados. De otro lado, los parámetros de contaminación menos contaminantes son el cadmio, el cromo y el níquel, los cuales explicaron, en promedio, el 0,1% de los precios sombra totales para el caso de metodologías no paramétricas y paramétricas.

Análisis de los resultados para el año 2009

Para el año 2009, el análisis según unidad productiva minera indica que las unidades Antamina, de la empresa Antamina y la unidad Chaupiloma Sur, de la empresa Yanacocha, tienen los precios sombra más altos del conjunto de las 37 unidades mineras evaluadas tanto para el caso de metodologías no paramétricas como paramétricas, explicando, en promedio, el 13,9% del monto del precio sombra total para dicho año. Esto se explica en que unidades mineras concentran, en conjunto, el 57,5% de la producción en 2009 de las unidades bajo estudio. Por esto, al igual que en 2008, y acorde a lo que señala la literatura, el costo de oportunidad de los empresarios por evitar contaminar los recursos hídricos como resultado de sus actividades productivas es mayor en los que producen más y generan un mayor ingreso y menor en caso contrario.

En contraste, las unidades productivas mineras Santa Luisa (Compañía Minera Santa Luisa S.A.); Acumulación Parcoy (Consortio Minero Horizonte S.A.); y Unidad La Libertad (Compañía Minera Poderosa S.A.) poseen los precios sombra más reducidos del conjunto de unidades mineras estudiadas. Estas tres unidades productivas explican, en conjunto, el 3,0% de la producción total de minerales de las unidades bajo estudio, lo cual indica que sus costos de oportunidad por contaminar el medio ambiente son menores dado que su producción (ingresos) son menores.

Al igual que en 2008, en 2009 el potencial de hidrógeno resultó ser el parámetro de contaminación más nocivo, explicando en promedio, el 37,7% del precio sombra total para dicho año. Este contaminante adicional a los sólidos total en suspensión (16,1%) y el plomo (13,4%), explicaron, en promedio, el 67,3% de los precios sombra totales

en 2008, tanto para el caso de metodologías no paramétricas como paramétricas. Cabe señalar que a diferencia del año 2008, en el cual el mercurio resultó ser un parámetro que explicó un porcentaje elevado del precio sombra total (22,2%), en 2009 dicho contaminante solo representó el 0,7%.

Los resultados de los precios sombra para 2008 y 2009 indican que existe una relación positiva entre estos y los montos de producción (expresados en US\$), lo cual revela que los costos de oportunidad de los empresarios mineros por no contaminar los recursos hídricos son mayores en las empresas más grandes y menores en las empresas más pequeñas, acorde a lo que señala la literatura. Otro resultado es que el potencial de hidrógeno (nivel de acidez) resultó ser el parámetro de contaminación más nocivo, explicando en promedio, para 2008 y 2009 más de la tercera parte del precio sombra total de dichos años. Además, es posible mencionar que los precios sombra son explicados por pocos parámetros de contaminación (4 de los 13 bajo estudio), desde que, tanto en 2008 como en 2009, el potencial de hidrógeno, los sólidos total en suspensión, el mercurio y el plomo justificaron cerca del 70,0% de los precios sombra total en ambos años.

Los precios sombra son útiles para su aplicación en el ámbito de las políticas públicas medioambientales. Como se verá más adelante, una gran utilidad de los precios sombra es que permitirá aproximar las multas que deberían establecerse en el sector minero ante el incumplimiento de los estándares ambientales de emisiones en los recursos hídricos (LMP normativos promedios anuales). Además, los precios sombra permiten analizar cómo estos varían en el tiempo y como ayudan a predecir el nivel de contaminación ambiental que podría generarse ante un incremento de 1,0% en la producción de minerales.

3.3.2. Cálculo del costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídrico

En esta sección se calculará el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos de los años 2008 y 2009. Para ello, los precios sombra estimados para cada unidad minera, según cada uno de los trece parámetros de contaminación, fueron multiplicados por su valor promedio anual respectivo; es decir, por el monto de contaminación que se generó como consecuencia de sus actividades productivas mineras en los años 2008 y 2009. Los resultados de las estimaciones del costo económico, según unidad productiva minera y tipo de contaminante calculados a partir de metodologías no paramétricas y paramétricas para los años 2008 y 2009, se muestran en las tablas 5 y 6, respectivamente.

Tabla 3. Precios sombra de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos calculados a partir de una metodología no paramétrica y paramétrica para el año 2008 (US\$ / Unidad de contaminación)

REGIONES EMPRESAS MINERAS UNIDADES PRODUCTIVAS			PRECIOS SOMBRA																								Total			
			Potencial de Hidrógeno (PH) US\$ / niveles		Sólidos Total Suspendedos (STS) US\$ / mg/l		Plomo (PB) US\$ / mg/l		Cobre (CU) US\$ / mg/l		Zinc (ZN) US\$ / mg/l		Arsénico (AS) US\$ / mg/l		Cadmio (CD) US\$ / mg/l		Mercurio (HG) US\$ / mg/l		Cromo (CR) US\$ / mg/l		Níquel (NI) US\$ / mg/l		Selenio (SE) US\$ / mg/l		Hierro (FE) US\$ / mg/l				Cianuro total (CN) US\$ / mg/l	
			NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P			NP	P
Ancash	Compañía Minera Antamina S.A.	Antamina	-1.313,934	-1.379,631	-167,612	-172,640	-144,510	-202,315	-28,559	-45,695	-30,702	-36,934	-68,111	-220,278	-509	-598	-118,887	-278,196	-5,620	-8,149	-601	-1,070	-824	-845	-277,883	-319,586	-270,082	-510,455	-2.447,836	-3.176,372
	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	Santa Luisa	-261,234	-274,296	-187,530	-193,156	-51,144	-71,801	-36,363	-58,181	-32,242	-38,787	-68,023	-170,058	-472	-555	-154,975	-362,642	-646	-937	-514	-916	-5	-5	-18,995	-19,544	-6,770	-12,795	-816,914	-1.203,473
	Minera Huallanca S.A.	Contonga	-265,283	-278,547	-180,273	-185,681	-50,591	-70,827	-36,301	-58,082	-31,153	-37,477	-67,599	-168,998	-469	-551	-154,694	-361,983	-633	-917	-519	-924	-2	-2	-16,927	-19,466	-2,231	-4,217	-806,674	-1.187,672
Arequipa	Minera Bateas S.A.C.	San Cristóbal	-266,077	-279,381	-181,536	-186,982	-50,362	-70,506	-36,217	-57,948	-33,064	-39,776	-67,740	-169,350	-473	-556	-154,733	-362,076	-633	-918	-522	-929	-4	-4	-16,216	-18,648	-6,870	-12,984	-814,448	-1.200,060
	Cedimin S.A.C.	Chaquellé	-269,711	-278,996	-180,821	-186,245	-51,821	-72,549	-36,341	-58,146	-32,344	-38,910	-67,576	-168,940	-471	-554	-154,275	-361,003	-632	-916	-519	-924	-8	-9	-16,425	-18,889	-6,859	-12,984	-814,448	-1.200,060
	Compañía Minera Ares S.A.C.	Ares	-265,261	-278,524	-180,181	-185,587	-51,802	-72,523	-36,067	-57,706	-32,319	-38,879	-67,187	-167,968	-471	-553	-154,693	-361,982	-633	-918	-518	-921	-3	-3	-19,181	-22,058	-2,050	-3,225	-813,300	-1.196,776
Huancavelica	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Orcopampa	-258,339	-271,256	-206,725	-212,927	-48,886	-68,441	-36,300	-58,080	-32,198	-38,734	-68,316	-170,791	-470	-552	-155,817	-364,612	-642	-930	-520	-926	-41	-42	-17,532	-20,162	-3,900	-7,372	-829,688	-1.214,826
	Castrovireyna Compañía Minera S.A.	San Genaro	-246,580	-258,909	-182,133	-187,597	-34,128	-47,780	-36,923	-50,077	-32,477	-39,070	-67,183	-167,957	-471	-553	-161,698	-378,374	-647	-938	-471	-838	-82	-84	-16,643	-19,139	-13,408	-25,341	-792,844	-1.185,657
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Julcaní	-265,237	-278,499	-181,038	-186,469	-52,578	-73,609	-35,328	-56,524	-32,316	-38,876	-69,256	-173,139	-471	-553	-154,693	-361,982	-633	-918	-518	-921	-3	-3	-19,181	-22,058	-2,050	-3,225	-813,300	-1.196,776
Junín	Compañía de Minas Caudalosa S.A.	Recuperada	-264,325	-277,541	-181,095	-175,119	-51,892	-72,649	-40,626	-65,002	-32,293	-31,234	-67,646	-169,114	-471	-451	-154,658	-361,899	-634	-919	-518	-507	-2	-2	-17,120	-19,688	-2,050	-3,874	-813,329	-1.177,998
	Compañía Minera Caudalosa S.A.	Huachocolpa Uno	-263,776	-276,965	-181,329	-186,769	-51,448	-72,027	-36,321	-58,114	-32,360	-38,930	-67,485	-168,713	-471	-554	-154,724	-362,055	-635	-921	-518	-922	-7	-7	-17,201	-19,782	-2,050	-3,875	-808,327	-1.189,632
	Volcan Compañía Minera SAA	Andaychagua	-264,744	-277,981	-181,096	-186,529	-51,052	-71,472	-36,367	-58,167	-33,191	-39,929	-67,602	-169,004	-16,403	-21,623	-154,794	-362,217	-633	-920	-518	-923	-1	-1	-17,069	-19,629	-2,051	-2,029	-827,521	-1.210,145
La Libertad	Compañía Minera San Simón S.A.	La Virgen	-257,710	-270,596	-183,643	-189,152	-56,416	-78,983	-36,601	-58,561	-32,169	-38,699	-75,933	-189,832	-471	-553	-158,663	-371,271	-635	-921	-514	-916	-56	-57	-17,041	-19,598	-2,103	-3,974	-821,955	-1.223,113
	Compañía Minera Aurifera Santa Rosa S.A.	Santa Rosa	-255,859	-268,652	-182,968	-188,457	-54,880	-76,832	-36,135	-57,817	-32,954	-39,644	-67,266	-168,165	-469	-551	-155,591	-364,083	-642	-930	-522	-930	-51	-52	-17,415	-20,028	-2,062	-3,897	-806,814	-1.190,037
	Compañía Minera Aurifera Santa Rosa S.A.	San Cristóbal / Mahr Túnel	-265,536	-278,812	-178,948	-184,317	-49,299	-69,019	-41,196	-65,913	-38,657	-46,505	-67,784	-169,461	-466	-548	-154,506	-361,543	-634	-919	-516	-919	-7	-7	-19,782	-22,520	-2,047	-3,870	-849,379	-1.239,083
Lima	Doe Run Perú SRL	Complejo Metalúrgico La Oroya	-273,525	-287,201	-180,734	-186,156	-53,679	-75,151	-37,465	-59,943	-30,530	-36,728	-74,180	-185,449	-464	-545	-149,257	-349,262	-626	-908	-521	-928	-640,579	-656,594	-17,316	-19,914	-2,073	-3,918	-1.460,949	-1.862,696
	Pan American Silver S.A. - Mina Quiruvilca	Quiruvilca	-265,294	-278,559	-181,037	-186,468	-50,999	-69,979	-36,222	-57,956	-32,367	-38,938	-68,381	-170,953	-474	-557	-154,958	-362,603	-666	-965	-4,018	-7,151	-1	-1	-17,113	-19,680	-23,843	-45,063	-835,372	-1.218,871
	Compañía Minera San Simón S.A.	La Virgen	-264,929	-278,656	-180,719	-186,140	-51,037	-71,452	-36,308	-58,588	-32,225	-38,767	-66,915	-167,287	-471	-554	-153,713	-359,690	-10,201	-14,791	-9,859	-17,549	-9	-10	-17,118	-19,685	-2,294	-4,335	-825,797	-1.171,772
Pasco	Compañía Minera Aurifera Santa Rosa S.A.	Santa Rosa	-265,155	-278,413	-181,138	-186,572	-49,682	-69,555	-36,455	-58,328	-32,027	-38,528	-67,712	-169,280	-472	-555	-154,853	-362,356	-1,664	-2,412	-524	-933	-50	-51	-17,103	-19,669	-6,310	-8,526	-853,146	-1.274,179
	Empresa Minera Los Quenuales S.A.	Casapalca	-253,807	-266,497	-180,770	-186,193	-49,932	-69,905	-35,692	-57,107	-31,526	-37,926	-67,102	-167,754	-471	-554	-151,188	-353,779	-616	-893	-518	-922	-75	-77	-17,601	-20,241	-2,004	-3,787	-791,301	-1.165,635
	Compañía Minera Casapalca S.A.	Americana	-266,334	-279,650	-182,180	-187,645	-55,100	-77,140	-41,004	-65,607	-28,652	-34,468	-68,284	-170,660	-472	-555	-155,277	-363,348	-603	-874	-518	-922	-44	-45	-17,162	-19,736	-2,058	-3,889	-817,668	-1.204,540
Pasco	Votorantim Metais - Cajamarquilla S.A.	Refinería Cajamarquilla	-261,496	-274,571	-179,680	-185,070	-53,454	-74,835	-37,265	-59,624	-31,967	-38,636	-69,227	-173,068	-476	-559	-159,727	-373,762	-646	-937	-532	-947	-238	-244	-15,904	-18,290	-2,117	-4,001	-872,729	-1.276,544
	Chancadora Centauro S.A.C.	Quicay	-261,057	-274,109	-181,453	-186,897	-51,405	-71,968	-36,050	-57,681	-32,243	-38,789	-67,389	-168,473	-472	-555	-155,240	-363,261	-622	-902	-515	-916	-8	-8	-18,624	-21,417	-2,050	-3,874	-807,128	-1.188,850
	Volcan Compañía Minera S.A.A.	Cerro de Pasco	-259,618	-272,599	-234,949	-241,998	-45,322	-63,451	-35,542	-56,867	-36,797	-44,267	-67,171	-167,927	-472	-555	-151,391	-354,255	-647	-938	-518	-923	-27	-28	-17,505	-20,162	-2,012	-3,802	-801,972	-1.285,240
Pasco	Sociedad Minera El Brocal S.A.	Colquijirca	-257,175	-270,034	-184,011	-189,531	-46,449	-64,136	-34,618	-52,657	-39,286	-47,631	-169,078	-471	-554	-154,419	-361,342	-620	-899	-545	-970	-17	-17	-19,664	-22,613	-2,076	-3,923	-889,872	-1.313,895	
	Empresa Administradora Chungar S.A.C.	Animón	-279,146	-293,103	-167,002	-172,012	-47,842	-66,979	-36,134	-57,815	-33,413	-40,196	-60,372	-150,929	-472	-555	-153,324	-358,779	-752	-1,091	-491	-874	-36	-37	-34,548	-39,730	-2,117	-4,002	-815,649	-1.196,100
TOTAL	Pan American Silver S.A.	Huarón	-269,489	-282,963	-181,329	-186,769	-51,367	-71,914	-25,696	-41,114	-31,831	-38,293	-67,278	-168,195	-469	-551	-155,077	-362,879	-3,074	-4,457	-520	-925	-9	-10	-18,174	-20,900	-2,035	-3,847	-806,348	-1.182,817
	TOTAL		-8,425,930	-8,824,708	-5,132,671	-5,275,242	-1,549,244	-2,147,523	-1,659,837	-1,673,505	-968,972	-1,158,059	-1,923,718	-4,809,295	-31,157	-36,507	-4,301,659	-10,065,882	-35,908	-51,768	-27,407	-48,369	-642,219	-658,274	-845,501	-972,328	-446,729	-841,821	-25,390,953	-36,563,277
Media	Dev. Std		-300,926.7	-315,168.1	-183,309.7	-188,401.5	-55,330.2	-76,697.2	-37,851.3	-59,768.0	-34,660.5	-41,359.2	-68,704.2	-171,122.8	-1,112.8	-1,303.8	-153,630.7	-359,495.8	-1,282.4	-1,848.8	-978.8	-1,727.5	-22,936.4	-23,509.8	-30,196.5	-34,725.9	-15,954.6	-30,065.0	-906,619.7	-1,305,831.3
	Max		198,626.7	208,752.6	115,974.6	12,597.6	19,143.1	27,281.3	8,551.0	16,976.6	11,379.5	13,821.9	4,555.4	11,388.5	3,388.6	3,862.3	7,203.2	16,855.5	2,033.4	2,952.5	1,861.6	3,318.3	121,046.7	124,072.9	49,865.3	57,345.1	50,754.5	95,952.1	325,974.6	388,273.1
	Min		-246,579.9	-255,656.1	-167,001.7	-173,011.7	-54,128.4	-71,779.8	-26,695.5	-38,807.7	-26,651.9	-31,233.6	-60,371.8	-159,929.4	-463.5	-450.9	-118,987.3	-278,196.4	-602.7	-616.7	-471.0	-506.8	-0.6	-0.6	-15,904.1	-18,290.0	-1,950.9	-2,023.7	-791,200.6	-1,163,634.6
Media	Dev. Std		-300,926.7	-315,168.1	-183,309.7	-188,401.5	-55,330.2	-76,697.2	-37,851.3	-59,768.0	-34,660.5	-41,359.2	-68,704.2	-171,122.8	-1,112.8	-1,303.8	-153,630.7	-359,495.8	-1,282.4	-1,848.8	-978.8	-1,727.5	-22,936.4	-23,509.8	-30,196.5	-34,725.9	-15,954.6	-30,065.0	-906,619.7	-1,305,831.3
	Max		198,626.7	208,752.6	115,974.6	12,597.6	19,143.1	27,281.3	8,551.0	16,976.6	11,379.5	13,821.9	4,555.4	11,388.5	3,388.6	3,862.3	7,203.2	16,855.5	2,033.4	2,952.5	1,861.6	3,318.3	121,046.7	124,072.9	49,865.3	57,345.1	50,754.5	95,952.1	325,974.6	388,273.1
	Min		-246,579.9	-255,656.1	-167,001.7	-173,011.7	-54,128.4	-71,779.8	-26,695.5	-38,807.7	-26,651.9	-31,233.6	-60,371.8	-159,929.4	-463.5	-450.9	-118,987.3	-278,196.4	-602.7	-616.7	-471.0	-506.8	-0.6	-0.6	-15,904.1	-18,290.0	-1,950.9	-2,023.7	-791,200.6	-1,163,634.6

NP: No paramétrico
P: Paramétrico

Elaboración propia

Tabla 4. Precios sombra de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos calculados a partir de una metodología no paramétrica y paramétrica para el año 2009 (US\$ / Unidad de contaminación)

REGIONES EMPRESAS MINERAS UNIDADES PRODUCTIVAS			PRECIOS SOMBRA																												Total	
			Potencial de Hidrógeno (PH) US\$ / niveles		Sólidos Total Suspendedos (STS) US\$ / mg/l		Plomo (PB) US\$ / mg/l		Cobre (CU) US\$ / mg/l		Zinc (ZN) US\$ / mg/l		Arsénico (AS) US\$ / mg/l		Cadmio (CD) US\$ / mg/l		Mercurio (HG) US\$ / mg/l		Cromo (CR) US\$ / mg/l		Níquel (NI) US\$ / mg/l		Selenio (SE) US\$ / mg/l		Hierro (FE) US\$ / mg/l		Cianuro total (CN) US\$ / mg/l					
			NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P		
Ancash	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	El Recuerdo	-218.530	-244.753	-107.184	-109.864	-83.258	-87.838	-239	-311	-1.363	-1.421	-51.223	-51.940	0	0	-3.710	-4.064	-24.395	-31.103	-17.463	-21.069	-13.275	-17.258	-2.615	-3.051	-34.555	-43.781	-557.811	-616.954		
		Santa Luisa (Huanzala)	-213.546	-239.172	-105.559	-108.238	-81.489	-81.248	-234	-304	-1.355	-1.413	-51.852	-52.378	-3	-3	-3.642	-4.478	-23.992	-30.590	-15.864	-19.260	-13.129	-17.087	-2.985	-3.483	-30.685	-38.878	-549.444	-609.652		
		Berlin	-217.854	-243.996	-107.294	-109.977	-83.739	-88.345	-241	-313	-1.351	-1.409	-51.104	-51.820	-2	-2	-3.698	-3.633	-23.925	-22.951	-17.260	-20.824	-13.287	-12.958	-3.090	-3.606	-34.872	-44.182	-557.716	-604.015		
Arequipa	Compañía Minera Antamina S.A.	Pucarrayo	-217.486	-243.585	-107.318	-110.001	-83.626	-88.225	-237	-308	-1.342	-1.400	-51.325	-52.044	0	0	-3.699	-4.550	-23.860	-30.421	-17.227	-20.785	-13.296	-17.285	-2.547	-3.072	-34.884	-44.198	-556.849	-615.775		
		Cortomona	-218.476	-244.693	-107.061	-109.738	-83.129	-87.701	-223	-290	-1.319	-1.375	-51.216	-49.174	-2	-2	-3.704	-4.556	-23.968	-30.557	-17.568	-21.195	-13.287	-17.273	-2.624	-3.062	-35.862	-45.437	-553.435	-615.053		
		Antamina	-861.042	-964.367	-88.042	-90.243	-153.106	-161.527	-524	-681	-1.125	-1.173	-82.281	-83.433	-30	-31	-7.978	-9.814	-163.006	-207.833	-210.445	-253.902	-75.810	-68.553	-3.362	-3.924	-95.725	-121.284	-1.742.477	-1.996.764		
Cajamarca	Compañía Minera Yanacocha S.R.L.	San Cristobal	-224.203	-251.107	-108.048	-110.750	-82.876	-90.999	-237	-308	-1.366	-1.424	-50.243	-50.946	-1	-1	-3.985	-4.901	-23.749	-30.280	-17.409	-21.004	-13.086	-17.012	-2.720	-3.174	-34.748	-44.026	-565.669	-625.513		
		Cedimín S.A.C	-217.611	-243.725	-107.040	-110.716	-83.794	-88.403	-237	-308	-1.369	-1.428	-51.244	-51.961	-1	-1	-3.801	-4.676	-23.587	-30.073	-18.249	-22.017	-13.003	-17.164	-2.609	-3.040	-34.577	-43.809	-557.317	-616.319		
		Áreas	-221.034	-247.558	-109.177	-111.907	-82.401	-86.933	-217	-282	-1.361	-1.420	-53.788	-54.541	-1	-1	-4.255	-5.234	-23.745	-30.274	-16.502	-19.909	-14.170	-18.421	-2.909	-3.394	-78.920	-99.901	-608.479	-679.855		
Huancavelica	Compañía Minera Buenaventura S.A.A.	Orcopampa	-220.268	-246.700	-108.077	-110.779	-82.174	-86.694	-238	-309	-1.369	-1.427	-50.128	-50.829	-1	-1	-3.689	-4.538	-23.874	-30.440	-17.851	-21.537	-13.253	-17.229	-2.710	-3.163	-35.434	-44.895	-559.066	-618.542		
		Chauploma Sur	-239.596	-268.347	-102.584	-105.148	-77.196	-81.442	-226	-294	-1.346	-1.404	-51.111	-51.826	-3	-3	-3.727	-4.584	-20.959	-26.722	-53.032	-63.983	-12.641	-16.433	-1.930	-2.252	-35.062	-44.423	-599.411	-666.862		
		Chauploma Sur	-244.870	-274.255	-108.123	-110.826	-148.848	-157.035	-2.428	-3.156	-1.451	-1.514	-67.436	-68.878	-15	-15	-7.216	-8.876	-101.279	-129.130	-18.704	-22.566	-146.092	-189.919	-2.822	-3.294	-37.478	-47.485	-1.493.762	-1.631.949		
Junín	Compañía Minera Casapalca SA	Huacocotpa Uno	-217.909	-244.058	-107.247	-109.928	-83.497	-88.089	-239	-310	-1.695	-1.768	-50.682	-51.391	-17	-17	-3.695	-4.545	-23.138	-29.501	-16.411	-19.800	-13.912	-18.085	-2.631	-3.070	-34.694	-43.957	-555.765	-614.520		
		Recuperada	-217.396	-243.483	-107.388	-110.073	-83.561	-81.936	-237	-308	-1.372	-1.431	-51.583	-52.305	0	0	-3.704	-4.556	-23.682	-30.195	-17.430	-21.029	-12.912	-16.785	-2.630	-3.069	-34.852	-44.157	-556.747	-609.328		
		Julcani	-215.729	-241.616	-107.200	-109.880	-83.461	-88.051	-233	-303	-1.369	-1.428	-51.255	-51.973	0	0	-3.674	-4.519	-23.043	-29.380	-18.368	-22.148	-14.188	-18.444	-2.541	-2.965	-34.975	-44.313	-556.026	-615.022		
La Libertad	Compañía Minera El Brolcal S.A.	Castrovirreyña Cia. Minera S.A.	-216.347	-242.309	-106.814	-109.485	-83.513	-88.106	-231	-300	-1.341	-1.398	-51.200	-51.917	-4	-5	-3.683	-4.530	-23.635	-30.134	-18.116	-21.857	-12.697	-16.506	-2.594	-3.027	-34.847	-44.151	-555.021	-613.724		
		Andaychagua	-217.302	-243.378	-108.113	-110.816	-84.568	-89.219	-224	-291	-1.378	-1.437	-52.498	-53.233	0	0	-3.769	-4.636	-22.488	-28.672	-15.322	-18.486	-10.602	-13.783	-2.742	-3.200	-31.982	-40.521	-550.987	-607.872		
		San Cristobal/Mahr Yonel	-220.652	-247.130	-99.254	-101.735	-78.537	-82.857	-244	-313	-1.373	-1.432	-50.615	-51.323	-21	-21	-3.730	-4.551	-23.613	-30.107	-17.708	-21.365	-11.477	-14.920	-37.098	-46.634	-33.139	-44.522	-592.179	-675.030		
Pasco	Compañía Minera El Brolcal S.A.	Carahuacra	-218.598	-244.830	-104.789	-107.409	-85.518	-90.222	-264	-343	-1.589	-1.657	-51.169	-51.886	-1	-1	-3.706	-4.558	-23.718	-30.241	-16.760	-20.221	-13.245	-17.218	-4.615	-5.386	-34.882	-44.196	-558.584	-618.167		
		Quiruvaca	-217.903	-244.052	-107.290	-109.973	-82.020	-86.531	-256	-333	-1.397	-1.457	-51.999	-52.727	-4	-4	-3.723	-4.579	-23.120	-29.479	-16.692	-20.139	-11.951	-15.537	-2.466	-2.878	-37.190	-47.119	-556.012	-614.807		
		La Virgen	-217.440	-243.533	-104.901	-107.524	-84.061	-88.684	-2791	-3.628	-1.367	-1.428	-49.437	-50.129	-3	-3	-3.636	-4.472	-29.908	-26.658	-17.777	-21.448	-13.374	-17.386	-4.075	-4.756	-34.907	-44.227	-554.675	-613.871		
Pasco	Compañía Minera Chancadora Centauro S.A.	Santa Rosa	-218.577	-244.806	-105.332	-107.966	-81.245	-85.713	-749	-973	-1.366	-1.424	-50.719	-51.429	-2	-2	-19.932	-24.517	-26.542	-33.941	-29.265	-35.308	-10.660	-13.858	-1.965	-2.293	-32.742	-41.484	-679.095	-843.615		
		Acumulación Parcoy	-223.011	-249.773	-107.307	-109.989	-82.414	-86.946	-235	-306	-1.369	-1.428	-35.125	-35.617	-2	-2	-3.848	-4.733	-16.594	-21.157	-16.312	-19.681	-14.317	-18.612	-2.785	-3.250	-36.545	-46.302	-539.863	-597.773		
		Oulebrillas	-217.716	-243.842	-107.416	-110.102	-83.037	-87.604	-237	-308	-1.377	-1.437	-51.197	-51.914	0	0	-3.684	-4.532	-23.834	-30.388	-17.222	-20.778	-13.274	-17.256	-2.622	-3.060	-34.910	-44.231	-556.528	-615.452		
Lima	Compañía Minera Casapalca SA	Unidad La Libertad (Pataz)	-217.959	-243.861	-107.387	-104.192	-83.474	-88.065	-237	-303	-1.369	-1.429	-51.297	-52.015	0	0	-5.726	-7.044	-23.818	-30.368	-17.284	-16.456	-13.296	-17.284	-2.630	-3.069	-34.882	-44.196	-559.359	-618.008		
		Unidad Trullillo (Vicos)	-216.707	-242.712	-107.227	-110.421	-82.879	-87.438	-247	-308	-1.374	-1.434	-51.334	-52.053	-1	-1	-3.765	-4.602	-23.661	-29.402	-17.387	-20.877	-11.808	-15.351	-3.047	-3.232	-32.363	-41.004	-551.694	-613.008		
		Ticlo	-215.619	-241.493	-107.429	-110.115	-82.261	-86.786	-234	-304	-1.341	-1.398	-51.920	-52.647	-1	-1	-3.585	-4.409	-23.168	-29.565	-17.052	-20.573	-13.797	-17.937	-2.622	-3.060	-33.122	-41.965	-552.171	-610.253		
Pasco	Compañía Minera Casapalca SA	Americana	-217.962	-244.118	-106.315	-108.972	-83.387	-87.974	-240	-312	-1.367	-1.426	-51.112	-51.827	0	0	-3.708	-4.561	-23.986	-30.582	-17.362	-20.947	-13.915	-18.089	-2.644	-3.085	-34.839	-44.141	-608.429	-667.759		
		Casapalca	-218.628	-244.863	-107.547	-110.236	-84.214	-88.846	-244	-316	-1.349	-1.407	-51.176	-51.892	0	0	-3.680	-4.526	-23.805	-30.352	-17.548	-21.171	-12.005	-15.606	-2.637	-3.077	-35.470	-44.941	-620.696	-696.353		
		Cajamarquilla	-217.197	-243.260	-107.686	-110.378	-83.797	-88.406	-238	-310	-1.349	-1.407	-51.176	-51.892	0	0	-3.680	-4.526	-23.805	-30.352	-17.548	-21.171	-12.005	-15.606	-2.637	-3.077	-35.470	-44.941	-620.696	-696.353		
Pasco	Compañía Minera Casapalca SA	Cajamarquilla	-217.197	-243.260	-107.686	-110.378	-83.797	-88.406	-238	-310	-1.349	-1.407	-51.176	-51.892	0	0	-3.680	-4.526	-23.805	-30.352	-17.548	-21.171	-12.005	-15.606	-2.637	-3.077	-35.470	-44.941	-620.696	-696.353		
		Cerro de Pasco	-217.449	-243.543	-104.901	-107.524	-84.061	-88.684	-2791	-3.628	-1.367	-1.428	-49.437	-50.129	-3	-3	-3.636	-4.472	-29.908	-26.658	-17.777	-21.448	-13.374	-17.386	-4.075	-4.756	-34.907	-44.227	-554.675	-613.871		
		Quicay	-217.670	-243.790	-106.615	-109.485	-84.941	-89.612	-236	-307	-1.370	-1.429	-51.330	-52.048	0	0	-3.544	-4.359	-22.925	-29.229	-17.148	-20.689	-11.367	-14.777	-2.645	-3.087	-31.687	-40.147	-551.678	-608.862		
Pasco	Compañía Minera El Brolcal S.A.	Colquijirca	-218.842	-245.103	-106.217	-108.872	-80.201	-84.612	-5.609	-7.291	-1.575	-1.642	-51.359	-52.078	-28	-28	-3.616	-4.448	-25.177	-32.100	-30.784	-37.140	-16.853	-21.909	-71.694	-83.667	-32.909	-41.696	-644.863	-720.589		
		Anímon	-224.635	-251.591	-106.281	-108.938	-85.884	-90.608	-236	-307	-1.383	-1.443	-52.990	-53.732	-1	-1	-3.141	-3.863	-24.988	-31.860	-17.740	-21.044	-45.331	-58.930	-5.441	-6.350	-34.543	-43.766	-602.596	-672.794		
		Huaron	-217.792	-243.927	-106.735	-109.403	-86.214	-90.956	-214	-278	-1.319	-1.376	-52.254	-53.290	-5	-5	-3.683	-4.531	-24.463	-31.190	-19.735	-23.810	-11.595	-15.074	-16.589	-19.352	-35.986	-45.569	-576.959	-638.891		
Pasco	Compañía Minera Milpo S.A.A.	Milpo N° 1	-225.211	-252.237	-107.101	-109.779	-81.411	-85.888	-237	-308	-1.344	-1.402	-50.144	-50.84																		

Tabla 5. Costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos calculados a partir de una metodología no paramétrica y paramétrica para el año 2008 (en US\$)

REGIONES EMPRESAS MINERAS UNIDADES PRODUCTIVAS			COSTO ECONOMICO																												Total	
			Potencial de Hidrógeno (PH)		Sólidos Total Suspendidos (STS)		Plomo (PB)		Cobre (CU)		Zinc (ZN)		Arsénico (AS)		Cadmio (CD)		Mercurio (HG)		Cromo (CR)		Niquel (NI)		Selenio (SE)		Hierro (FE)		Cianuro total (CN)					
			NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P		
Ancash	Compañía Minera Antamina S.A.	Antamina	-10,426,557	-10,947,885	-611,524	-629,870	-544	-762	-190	-305	-773	-930	-411	-1,028	0	0	-28	-65	-58	-84	-2	-4	-8	-8	-99,328	-114,227	-1,801	-3,403	-11,141,225	-11,698,571		
	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	Santa Luisa	-2,020,935	-2,121,981	-43,791,600	-45,105,348	-95	-133	-2,119	-3,390	-13,713	-16,497	-1,122	-2,804	-1	-2	-31	-73	-5	-8	-9	-16	0	0	-21,254	-24,442	-194	-367	-45,851,078	-47,275,061		
	Minera Huallanca S.A.	Pucallpa	-2,217,324	-2,328,190	-9,930,053	-10,227,955	-3,364	-4,710	-351	-561	-361,147	-434,460	-220	-549	-15	-18	-31	-72	-4	-6	-8	-15	0	0	-6,434	-7,399	-11	-21	-12,518,963	-13,003,957		
Arequipa	Minera Bateas S.A.C.	San Cristóbal	-1,891,121	-1,985,677	-2,276,111	-2,344,394	-378	-530	-3,972	-6,356	-43,609	-52,461	-480	-1,200	-3	-4	-131	-306	-4	-6	-7	-12	0	0	-9,404	-10,814	-227	-428	-4,225,447	-4,402,189		
	Cedimin S.A.C.	Chaquele	-2,082,876	-2,187,020	-1,489,964	-1,534,663	-613	-858	-205	-328	-2,860	-3,440	-2,032	-5,050	0	-1	-93	-217	-1	-2	-1	-2	0	0	-10,413	-11,975	-1,788	-3,379	-3,590,846	-3,746,965		
	Compañía Minera Ares S.A.C.	Ares	-2,147,520	-2,254,896	-1,224,522	-1,261,257	-522	-730	-181	-290	-1,269	-1,526	-674	-1,685	0	-1	-94	-219	-2	-2	-1	-2	0	0	-930	-1,070	-11	-21	-3,375,726	-3,521,699		
Huancavelica	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Arcata	-2,108,815	-2,214,255	-32,851,702	-33,837,253	-489	-684	-109	-174	-1,122	-1,350	-1,455	-3,600	0	-1	-93	-219	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1,164	-1,338	-18	-33	-34,964,971	-36,058,951		
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Orcopampa	-1,909,179	-2,004,638	-1,325,020	-1,364,770	-631	-884	-301	-481	-2,452	-2,950	-621	-1,554	-1	-1	-97	-227	-1	-2	-7	-12	-2	-2	-1,482	-1,704	-92	-174	-3,239,887	-3,377,400		
	Castrovirreyña Compañía Minera S.A.	San Genaro	-2,174,049	-2,282,751	-19,550,393	-20,136,904	-8,886	-12,440	-23,951	-38,322	-79,189	-95,264	-34,807	-87,018	-15	-17	-186	-434	-3	-4	-10	-18	0	0	-194,526	-223,704	0	0	-22,066,014	-22,876,878		
Junín	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Juicani	-2,134,269	-2,240,982	-2,209,773	-2,136,850	-2,497	-3,496	-132,516	-212,025	-2,647	-2,560	-865	-2,183	-1	-1	-93	-217	-1	-2	-2	-2	0	0	-2,372	-2,728	0	0	-4,485,036	-4,601,028		
	Compañía Minera Caudalosa S.A.	Recuperada	-1,904,718	-1,999,953	-2,386,341	-2,457,931	-514	-720	-127	-203	-4,580	-5,510	-4,130	-10,326	-1	-1	-93	-217	-1	-2	-1	-2	0	0	-1,466	-1,686	0	0	-4,301,973	-4,476,553		
	Compañía Minera Caudalosa S.A.	Huachocolpa Uno	-2,662,399	-2,795,519	-15,214,401	-15,670,833	-1,838	-2,573	-2,551	-4,082	-594,620	-715,328	-1,983	-4,959	-3,505,618	-4,119,101	-93	-217	-1	-1	-21	-38	0	0	-4,303	-4,949	0	0	-21,987,830	-23,317,601		
La Libertad	Volcan Compañía Minera SAA	Andaychagua	-2,208,129	-2,318,535	-2,357,414	-2,428,136	-639	-895	-268	-428	-1,401	-1,686	-11,768	-29,420	-1	-1	-95	-223	-1	-2	-2	-3	-1	-1	-1,107	-1,273	0	0	-4,580,827	-4,780,604		
	Volcan Compañía Minera SAA	Caraahuacra	-2,136,250	-2,243,062	-3,937,402	-4,055,524	-727	-1,018	-260	-416	-9,622	-11,575	-898	-2,220	-1	-1	-93	-218	-1	-2	-3	-5	-2	-2	-2,300	-2,645	0	0	-6,097,549	-6,316,669		
	Volcan Compañía Minera SAA	San Cristóbal / Mahr Tunnel	-1,645,013	-1,727,263	-121,171,732	-124,806,884	-6,424	-8,993	-80,344	-128,550	-1,490,934	-1,793,594	-1,161	-2,903	-20	-24	-93	-217	-1	-2	-28	-50	0	0	-1,293,047	-1,487,004	0	0	-125,688,797	-129,955,485		
Lima	Doe Run Perú SRL	Complejo Metalúrgico La Oroya	-2,327,698	-2,444,082	-1,272,367	-1,310,538	-1,419	-1,986	-3,713	-5,941	-43,306	-52,097	-16,515	-41,287	-8	-9	-248	-580	-1	-2	-4	-6	-276,397,315	-283,307,248	-874	-1,005	0	0	-280,063,467	-287,164,783		
	Pan American Silver S.A. - Mina Quiruvilca	Quiruvilca	-1,862,713	-1,955,849	-10,168,834	-10,473,899	-31	-30	-818	-1,309	-35,245	-42,400	-6,388	-15,969	-5	-6	-417	-976	-123	-178	-44,009	-78,336	0	0	-274	-315	-6,334	-11,971	-12,125,191	-12,581,238		
	Compañía Minera San Simón S.A.	La Virgen	-1,482,349	-1,430,467	-70,359,617	-72,470,406	-476	-666	-1,076	-1,063	-43,572	-52,417	-165,862	-414,656	-11	-13	-810	-18,974	-669,056	-970,131	-2,053,142	-3,654,593	-4	-4	-1,318	-1,516	-454	-858	-74,785,045	-79,015,762		
Pasco	Compañía Minera Aurifera Santa Rosa S.A.	Santa Rosa	-1,369,723	-1,438,209	-5,595,145	-5,763,000	-5,292	-7,409	-729	-1,167	-7,156	-8,609	-677	-1,693	-4	-5	-310	-725	-837	-1,214	-136	-243	-5	-5	-216	-248	-8,709	-16,460	-6,988,940	-7,238,985		
	Empresa Minera Los Quenuales S.A.	Casapalca	-1,966,677	-2,065,011	-5,393,608	-5,555,416	-1,314	-1,840	-2,004	-3,207	-9,887	-11,894	-1,378	-3,444	-1	-1	-91	-212	-2	-3	-2	-3	-3	-3	-1,007	-1,158	0	0	-7,375,973	-7,642,192		
	Compañía Minera Casapalca S.A.	Americana	-2,223,591	-2,334,770	-2,133,526	-2,197,531	-1,130	-1,581	-7,470	-11,951	-38,429	-46,231	-829	-2,072	-1	-1	-93	-218	-5	-8	-1	-2	-1	-1	-1,442	-1,658	0	0	-4,406,519	-4,596,027		
Pasco	Votorantim Metales - Cajamarquilla S.A	Refinería Cajamarquilla	-1,978,040	-2,074,842	-3,026,317	-3,117,106	-267	-374	-1,861	-2,978	-597,255	-718,498	-1,457	-3,644	-11	-13	-96	-224	-2	-2	-4	-8	-19	-20	-2,335	-2,686	0	0	-5,605,666	-5,920,396		
	Chancadora Centauro S.A.C.	Quicay	-1,959,815	-2,057,596	-2,924,792	-3,012,935	-139	-194	-1,444	-2,311	-1,999	-2,405	-391	-976	-1	-1	-32	-74	-4	-5	-4	-8	0	0	-15,577	-17,914	0	0	-4,903,997	-5,094,019		
	Volcan Compañía Minera S.A.A.	Cerro de Pasco	-2,049,426	-2,151,897	-54,445,543	-56,079,910	-809	-1,132	-636	-1,018	-100,607	-121,031	-535	-1,337	-3	-3	-65	-151	-4	-6	-10	-17	0	0	-177,069	-203,630	0	0	-56,774,707	-58,559,132		
Pasco	Sociedad Minera El Brocal S.A.	Colquijirca	-2,771,776	-2,910,365	-4,761,711	-4,904,563	-12,166	-17,032	-103,199	-165,119	-6,637	-246	-615	0	0	-32	-74	-2	-3	-16	-28	0	0	-10,354	-11,907	0	0	-7,669,139	-8,021,300			
	Empresa Administradora Chungar S.A.C.	Animón	-2,160,996	-2,269,046	-10,453,806	-10,767,420	-274	-384	-259	-415	-6,305	-7,585	-2,955	-7,387	0	0	-31	-73	-24	-35	-5	-8	0	0	-35,250	-40,538	0	0	-12,659,906	-13,092,891		
	Pan American Silver S.A.	Huarón	-2,182,672	-2,291,805	-4,472,791	-4,606,975	-440	-616	-13,807	-22,091	-27,904	-33,569	-876	-2,191	-1	-2	-31	-72	-1,556	-2,256	-21	-37	0	0	-19,029	-21,883	0	0	-6,719,128	-6,981,498		
TOTAL			-66,199,451	-69,383,424	-445,890,776	-459,128,284	-53,484	-74,865	-385,233	-615,714	-3,531,972	-4,248,338	-262,295	-655,737	-3,505,726	-4,119,227	-10,988	-25,711	-671,706	-973,973	-2,097,460	-3,733,477	-276,397,363	-283,307,297	-1,916,139	-2,203,560	-20,663	-39,653	-800,943,256	-828,508,662		
Media			-2,364,266.1	-2,477,979.4	-15,924,670.6	-16,397,438.7	-1,910.2	-2,673.8	-13,758.3	-21,969.9	-126,141.9	-151,726.4	-9,367.7	-23,419.2	-125,204.5	-147,115.3	-392.4	-918.3	-23,989.9	-34,789.8	-74,909.3	-133,338.5	-8,671,334.4	-9,178,117.8	-68,433.5	-78,998.6	-738.0	-1,394.8	-26,805,116.3	-29,589,595.1		
Desv. Std			1,605,831.9	1,688,892.4	27,011,632.7	27,834,409.1	2,897.3	4,056.5	33,466.2	53,655.9	312,946.0	376,493.1	31,406.1	78,715.2	662,498.8	778,436.0	1,614.7	3,544.6	126,421.6	183,311.3	381,798.2	690,259.6	82,234,182.3	83,640,036.9	245,146.4	291,917.2	2,004.6	3,788.8	56,311,278.0	57,866,530.1		
Max			-1,369,723.1	-1,430,466.8	-611,524.3	-629,870.1	-30.6	-30.0	-108.9	-174.2	-731.7	-880.2	-219.7	-549.2	-0.2	-0.3	-27.7	-64.9	-1.3	-1.4	-1.0	-1.6	0.0	0.0	-215.7	-248.0	-0.2	-0.2	-3,239,886.7	-3,377,400.0		
Min			-10,426,556.7	-10,947,884.6	-121,171,737.6	-124,806,883.6	-12,165.5	-17,031.7	-132,515.9	-212,025.4	-1,490,934.2	-1,793,593.9	-165,862.2	-414,655.6	-3,505,617.9	-4,119,101.1	-8,108.4	-18,973.6	-669,056.0	-970,131.2	-2,053,142.1	-3,654,592.9	-276,397,314.6	-283,307,247.5	-1,293,047.2	-1,487,004.3	-8,709.1	-16,460.1	-280,063,467.1	-287,164,782.9		

NP: No paramétrico
P: Paramétrico

Elaboración propia

Análisis de los resultados para el año 2008

En el año 2008, el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos para el conjunto de 28 unidades productivas mineras ascendió a US\$ 800,9 millones y US\$ 828,5 millones para el caso de metodologías no paramétricas y paramétricas, respectivamente. Cabe indicar que este costo económico representa el costo de contar con recursos hídricos libre de contaminantes, por lo que este debería ser asumido por las empresas mineras en el caso que alguna emisión de miligramos no fuera permitida.

El análisis según unidad productiva minera muestra que el costo económico se concentró en tres unidades productivas mineras: el Complejo Metalúrgico La Oroya de la empresa Doe Run Perú (34,8%), San Cristóbal/Mahr Túnel de la empresa Volcan (15,7%) y La Virgen de la compañía Minera San Simón (9,4%), las cuales en conjunto explicaron el 59,9% del costo económico promedio para 2008, estimado mediante metodologías no paramétricas como paramétricas. Al respecto, cabe indicar que estas tres unidades mineras explicaron un elevado monto del costo de contaminación minera aun cuando sus correspondientes precios sombra no fueron elevados (explicaron, en conjunto, el 12,0% del monto del precio sombra total) y sus ingresos tampoco lo fueron (explicaron el 18,4% de la producción total de minerales), donde el Complejo Metalúrgico La Oroya (que posee el costo económico más elevado) explicó el 14,7%. Este hecho indica que los responsables del costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos son, en mayor medida, empresas mineras con escala productiva media/baja, dado que las diez unidades mineras más contaminantes (sin considerar al Complejo Metalúrgico La Oroya) explicaron el 18,1% de la producción total de minerales.

El análisis según tipo de contaminante indica que los sólidos totales suspendidos (55,5%) y el selenio (34,4%) explicaron, en conjunto, el 89,9% del costo total de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos en 2008. Este hecho indica que por ambos parámetros de contaminación se contaminó más en dicho año. Por el contrario, los contaminantes: plomo (con 0,008%), mercurio (con 0,002%) y cianuro total (con 0,004%) en conjunto solo expresaron, en promedio, un porcentaje reducido de la contaminación ambiental minera, 0,005%. Esto indica que en 2008 el costo de la contaminación de los recursos hídricos por estos contaminantes no fue significativo.

Análisis de los resultados para el año 2009

En el año 2009, el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos, para las 37 unidades productivas mineras bajo estudio, ascendió a US\$ 438,6 millones y US\$ 459,0 millones para el caso de metodologías no paramétricas y paramétricas, respectivamente. En 2009, dicho costo económico fue explicado en más

del 50,0% (52,6%) por las unidades mineras Cajamarquilla de la empresa Votorantim Metais-Cajamarquilla S.A (20,6%), Americana de la empresa de la Compañía Minera Casapalca S.A (19,5%) y Carahuacra de la empresa Volcan (12,6%) y, al igual que en 2008, este se concentró en unidades mineras con escala productiva media/baja (las cuales, en conjunto, representaron 4,8% del total de la producción de minerales en 2008), lo que confirma que el costo de la contaminación minera no se concentra en las empresas que más minerales produjeron en el país.

Tanto en 2008 como en 2009 los sólidos total suspendidos explicaron un elevado porcentaje del costo total de la contaminación minera, ascendiendo, en promedio, al 47,3%, tanto para las metodologías no paramétricas como paramétricas. Además, a diferencia de 2008, en el cual el selenio fue el segundo parámetro más contaminante, en 2009 solo se explicó, en promedio, el 0,005% del costo económico total. Cabe indicar que el potencial de hidrógeno y el cadmio fueron, luego de los sólidos total suspendidos, los parámetros más contaminantes, representando, en promedio, el 15,3% y el 19,6%, respectivamente. Así, puede señalarse que en 2009, la contaminación de los recursos hídricos se encuentra altamente concentrada en tres contaminantes: los sólidos totales suspendidos, el potencial de hidrógeno y el cadmio²⁸.

De los resultados encontrados para los costos económicos en 2008 y 2009 pueden extraerse cuatro conclusiones:

- (i) El costo económico de la contaminación ambiental minera se encuentra altamente concentrado en pocas unidades productivas y es mayor en unidades mineras que concentran un porcentaje relativamente bajo de la producción de minerales. Además, cabe indicar que ninguna de las tres unidades mineras más contaminantes en 2008 y 2009 se repitieron en los dos años analizados. Sin embargo, merece señalar que en ambos años las unidades mineras San Cristóbal/Mahr Túnel y Carahuacra ambas pertenecientes a la empresa Volcan Cía. Minera S.A. se ubicaron entre las tres unidades mineras más contaminantes.
- (ii) El costo económico de la contaminación minera está concentrado en pocos parámetros de contaminación. Tanto en 2008 como en 2009 los sólidos totales suspendidos resultaron ser el parámetro de contaminación más dañino, representando en promedio, para ambos años, el 51,4% del costo económico. Adicional a este parámetro, el potencial de hidrógeno (8,3%) y el selenio (34,4%) en 2008 y el potencial de hidrógeno (15,6%), el cadmio (19,6%) y el zinc (14,1%) en 2009, resultaron ser contaminantes que explicaron un elevado porcentaje del costo económico de la contaminación minera en los años estudiados.

²⁸ Como se verá en la sección 4, estos parámetros coinciden con aquellos que, en promedio, exceden mayormente los valores promedio anuales de los LMP regulados en la normativa en dicho año.

- (iii) El costo económico promedio fue mayor cuando se aplicó una metodología paramétrica que cuando se aplicó una metodología no paramétrica (tanto para 2008 como para 2009). Este hecho estaría indicando que cuando se establece una función de producción a la referencia tecnológica (método paramétrico) se imponen mayores costos marginales por unidad de contaminación.
- (iv) El costo económico fue mayor en el año 2008 (US\$ 814,7 millones) que en 2009 (US\$ 448,8 millones), aun cuando en ese año se evaluaron un mayor número de unidades mineras (37) respecto al año 2008 (28). Ello se debe a dos razones: la primera, a que en 2009 las diez unidades mineras con mayor costo económico concentraron un monto menor de la producción (en promedio 17,4%), en comparación al 32,4% que tuvieron las diez unidades mineras con mayor costo económico en 2008, por lo que un mayor ingreso explica un mayor costo económico. La segunda razón se refiere al hecho que en 2009 el Complejo Metalúrgico La Oroya, perteneciente a la empresa Doe Run Perú SRL, no fue evaluado²⁹, considerando que esta unidad productiva explicó en 2008 el 34,9% del costo económico de la contaminación minera. De haber seguido mantenido este comportamiento ambiental, se podría haber incrementado el costo de la contaminación sobre los recursos hídricos en 2009.

4. HACIA UN SISTEMA DE SANCIONES AMBIENTALMENTE EFICIENTE

4.1. LOS PRECIOS SOMBRA Y LOS MERCADOS DE CONTAMINACIÓN

El economista Pigou (1920) propuso la introducción de un sistema de impuestos con el objetivo de evitar que los empresarios transfieran en su totalidad las externalidades negativas que generaban sus procesos productivos. Este autor señaló que al establecer un impuesto el empresario solo trasladaría una parte de dichas externalidades a un tercero, dado que la otra sería internalizada por los agentes generadores de dicha externalidad.

Faber y Proops (1991) y Färe *et al.* (1993) fueron más allá de lo señalado por Pigou, proponiendo la creación de un mercado para la contaminación, en el cual se podrían usar los precios sombra de la externalidad negativa como referencia del precio a pagar por la contaminación generada, lo cual podría promover una degradación ambiental eficiente.

Como se vio en la sección 2, la lectura de los precios sombra admite la interpretación de «cuánto es el ingreso al cual las unidades productivas deben renunciar para reducir una unidad adicional de degradación ambiental». En ese sentido, y acorde a lo propuesto

²⁹ Esta unidad minera no fue evaluada por el Osinergmin en el marco de la Campaña Nacional de Monitoreo Ambiental de Efluentes y Recursos Hídricos 2008-2009.

por Pigou (1920), Faber y Proops (1991) y Färe *et al.* (1993) los precios sombra pueden considerarse como una aproximación a las multas que deberían establecerse en el sector minero por exceder en una unidad los LMP establecidos en la normativa.

Así, si las empresas mineras excedieran en 1 mg/l el LMP normativo establecido para el plomo, tendrían que pagar, en promedio, US\$ 66 013 y US\$ 89 198 en los años 2008 y 2009, respectivamente (véanse las tablas 3 y 4). Esto representaría el monto en el cual deberían reducir (en promedio) sus ingresos para disminuir en una unidad la contaminación que se desprende de su proceso productivo.

4.2. SIMULACIÓN DE LAS MULTAS EN EL SECTOR MINERO PARA LOS AÑOS 2008 Y 2009

La información que proveen los precios sombra es valiosa para el organismo regulador/fiscalizador de la contaminación ambiental, ya que podría permitir el establecimiento de un mecanismo disuasivo de multas que genere un esquema de incentivos para que las empresas mineras internalicen las externalidades negativas que genera su proceso productivo. En la actualidad, en el Perú la posibilidad de establecer un sistema de multas basado en criterios económicos es de especial relevancia dado que el esquema de multas y sanciones vigente en el sector minero se basa en criterios administrativos, por lo que no se sanciona la nocividad que genera la contaminación minera. Así, por ejemplo, actualmente las multas en el sector minero sancionan el hecho de no contar con un registro de monitoreo de los parámetros de contaminación emitidos o, en su defecto, por llevarlo incompleto, siendo las multas más elevadas mientras mayor sea el número de reincidencias en el incumplimiento.

En las tablas 7 y 8 se muestran las estimaciones de las multas que debieron establecerse en el sector minero a aquellas unidades mineras que excedieron los LMP normativos en los años 2008 y 2009, respectivamente. Estas multas se han estimado al multiplicar los precios sombra calculados en la sección 3 (mostrados en las tablas 3 y 4) por el exceso de los LMP promedios anuales establecidos en la normativa³⁰. Como se observa, en los años 2008 y 2009 las multas ascendieron, en promedio, a US\$ 647,9 millones y US\$ 308,3 millones, respectivamente. Analizando las multas en detalle, los resultados indican que en 2008, de las 28 unidades mineras estudiadas, 26 excedieron algún LMP (promedios anuales), mientras que en el año 2009, 27 de las 37 unidades estudiadas excedieron algún LMP (promedios anuales).

³⁰ De los trece parámetros contaminantes estudiados, el níquel y el selenio no son regulados en la normativa nacional, por lo que en estos casos se emplearon LMP alternativos. Así, en el caso del níquel se empleó el LMP establecido por el United States Government Environmental Protection Agency (US EPA) y por el Grupo del Banco Mundial, el cual asciende a 0,5 mg/l. En el caso del selenio, se empleó el LMP establecido para la clase de agua I de los ECA referido al límite de agua para el abastecimiento doméstico, el cual es de 0,01 mg/l.

Tabla 7. Simulación de multas calculados a partir de una metodología no paramétrica y paramétrica para el año 2008 (en US\$)

REGIONES EMPRESAS MINERAS UNIDADES PRODUCTIVAS			MULTAS																												Total	
			Potencial de Hidrógeno (PH) US\$ / niveles		Sólidos Total Suspendedos (STS) US\$ / mg/l		Plomo (PB) US\$ / mg/l		Cobre (CU) US\$ / mg/l		Zinc (ZN) US\$ / mg/l		Arsénico (AS) US\$ / mg/l		Cadmio (CD) US\$ / mg/l		Mercurio (HG) US\$ / mg/l		Cromo (CR) US\$ / mg/l		Niquel (NI) US\$ / mg/l		Selenio (SE) US\$ / mg/l		Hierro (FE) US\$ / mg/l		Cianuro total (CN) US\$ / mg/l					
			NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P		
Ancash	Compañía Minera Antamina S.A.	Antamina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	Santa Luisa	0	0	39,103,353	40,276,453	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Minera Huallanca S.A.	Contonga	0	0	5,423,221	5,585,918	0	0	0	0	323,764	389,488	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Arequipa	Minera Bateas S.A.C.	San Cristóbal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		Chaquele	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Compañía Minera Ares S.A.C.	Ares	0	0	6,050,233	6,231,740	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Arcata	0	0	27,683,571	28,514,079	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0		
Huancavelica	Castrovirreyña Compañía Minera S.A.	Orcopampa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		San Genaro	0	0	15,024,436	15,475,169	473	662	9,820	15,712	40,410	48,613	29,267	73,167	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Julcani	0	0	0	0	0	0	116,265	186,024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Compañía Minera Caudalosa S.A.	Recuperada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Junín	Volcan Compañía Minera SAA	Huachocolpa Uno	279,703	293,688	10,687,000	11,007,610	0	0	0	0	554,791	667,413	0	0	3,504,882	4,118,236	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		Andaychagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,693	14,233	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Doña Rosa S.A.	Carahuacra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Doña Rosa S.A.	San Cristóbal / Mahr Túnel	0	0	116,698,024	120,198,965	0	0	63,865	102,185	1,444,545	1,737,788	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
La Libertad	Doña Rosa S.A.	Complejo Metalúrgico La Oroya	0	0	0	0	0	0	0	0	6,669	8,023	10,581	26,451	0	0	9	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Pan American Silver S.A. - Mina Quiruvilca	Quiruvilca	0	0	5,642,908	5,812,195	0	0	0	0	0	0	917	2,293	0	0	169	396	100	42,000	74,760	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Compañía Minera San Simón S.A.	La Virgen	0	0	65,841,654	67,816,904	0	0	0	0	4,902	5,897	160,509	401,273	0	0	7,862	18,398	668,240	968,948	2,048,213	3,645,818	4	4	7,862	18,398	0	0	0	0	0	
Lima	Compañía Minera Aurífera Santa Rosa S.A.	Santa Rosa	0	0	1,066,700	1,098,701	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	145	704	1,021	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0		
	Empresa Minera Los Quenuales S.A.	Casapalca	0	0	874,367	900,598	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0		
	Compañía Minera Casapalca S.A.	Americana	0	0	0	0	0	0	0	0	4,047	4,869	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0		
Pasco	Votorantim Metais - Cajamarquilla S.A.	Refinería Cajamarquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	486,895	585,734	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	17	0	0	0	0	0			
	Chancadora Centauro S.A.C.	Quilcay	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Volcan Compañía Minera S.A.A.	Cerro de Pasco	0	0	48,571,813	50,028,968	0	0	0	0	56,450	67,910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69,061	79,420	0	0	0		
	Sociedad Minera El Brocal S.A.	Colquijirca	457,200	480,060	161,439	166,282	0	0	69,545	111,272	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Pasco	Empresa Administradora Chungar S.A.C.	Animón	0	0	6,278,764	6,467,127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Pan American Silver S.A.	Huarón	0	0	0	0	0	0	3,528	5,645	0	0	0	0	0	0	0	0	1,310	1,900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TOTAL			736,903	773,749	349,107,484	359,580,709	473	662	263,024	420,838	2,926,406	3,520,466	206,967	517,417	3,504,883	4,118,238	8,103	18,960	670,324	971,969	2,090,212	3,720,578	276,390,941	283,300,715	1,446,293	1,663,237	0	0	637,352,013	658,607,538		
Media			26,378.0	27,633.9	12,468,124.4	12,842,168.2	16.9	23.7	9,393.7	15,029.9	104,514.5	125,730.9	7,391.7	18,479.2	125,174.4	147,079.9	289.4	677.1	23,940.1	34,713.2	74,650.4	132,877.8	9,871,105.0	10,117,882.7	51,653.3	59,401.3	0.0	0.0	22,762,571.9	23,521,697.8		
Desv. Std			99,605.2	104,585.4	26,341,536.1	27,131,782.2	89.4	125.2	27,264.8	43,623.7	300,337.0	361,305.4	30,571.8	76,429.4	662,360.4	778,273.5	1,484.6	3,473.9	126,271.2	183,093.2	386,863.1	688,616.4	52,232,971.9	53,538,796.2	230,075.3	264,586.5	0.0	0.0	56,486,187.2	58,037,946.4		
Max			457,200.2	480,060.2	116,698,024.3	120,198,965.0	473.1	662.4	116,265.3	186,024.4	1,444,545.4	1,737,788.2	160,509.1	401,272.7	3,504,881.8	4,118,236.1	7,862.4	18,398.1	668,239.9	968,947.9	2,048,212.6	3,645,818.4	276,390,908.9	283,300,681.6	1,213,395.6	1,395,405.0	0.0	0.0	276,408,167.7	283,335,177.1		
Min			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

NP: No paramétrico
P: Paramétrico

Elaboración propia

Tabla 8. Simulación de multas calculados a partir de una metodología no paramétrica y paramétrica para el año 2009 (en US\$)

REGIONES EMPRESAS MINERAS UNIDADES PRODUCTIVAS			MULTAS																								Total				
			Potencial de Hidrógeno (PH)		Sólidos Total Suspendidos (STS)		Plomo (PB)		Cobre (CU)		Zinc (ZN)		Arsénico (AS)		Cadmio (CD)		Mercurio (HG)		Cromo (CR)		Niquel (NI)		Selenio (SE)		Hierro (FE)				Cianuro total (CN)		
			NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P	NP	P			NP	P	NP
Ancash	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	El Recuerdo	0	0	158,715	162,683	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158,715	162,683	
		Santa Luisa (Huanzala)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Minera Huallanca S.A.	Bartin	0	0	4,459,075	4,570,551	0	0	11	14	4,977	5,191	4,327	4,388	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,435	29,683	0	0	4,493,825	4,609,827	
		Pucarrajo	0	0	0	0	0	0	0	0	1,666	1,738	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,666	1,738	
Compañía Minera Antamina S.A.	Antamina	Contonga	0	0	511,583	524,373	0	0	0	0	6,592	6,876	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	518,176	531,249	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Arequipa	Minera Bateas S.A.C.	San Cristobal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Cedimín S.A.C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Cia. Minera Ares S.A.C.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Cia Minera Buenaventura S.A.A.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cajamarca	Minera Yanacocha S.R.L.	Orcopampa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Chaupilloma Sur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	333,846	338,520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,261	4,240	0	0	337,107	342,759	
Huancavelica	Cia Minera Caudalosa S. A.	Huachocolpa Uno	0	0	0	0	0	0	0	0	17,338	18,083	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,339	18,084	
		Cia. de Minas Buenaventura S. A. A.	Recuperada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Castrovirreyna Cia. Minera S.A.	Julcani	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junin	Volcan Cia. Minera S.A.A.	San Genaro	0	0	2,121,124	2,174,153	0	0	0	0	4,202	4,383	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,125,327	2,178,535	
		Andaychagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	708	718	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	708	718	
		San Cristobal/Mah Tunet	0	0	7,456,899	7,643,311	0	0	6,175	8,027	58,193	60,696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,043,633	1,217,920	0	0	8,564,890	8,929,954	
		Carahuacra	0	0	51,375,038	52,659,414	0	0	4	5	38,319	39,965	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,451	58,876	0	0	51,463,811	52,758,261	
La Libertad	Pan American Silver S.A.	Quiruvilca	0	0	17,091,743	17,519,037	0	0	0	0	1,041	1,086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157	205	0	0	17,092,941	17,520,327	
		Cia. Minera San Simón S.A.	La Virgen	0	0	10,442,176	10,703,230	0	0	10,709	13,922	0	0	8,157	8,271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,250	17,797	0	0	10,476,292	10,743,220
		Cia. Minera Aurifera Santa Rosa S.A.	Santa Rosa	0	0	6,013,517	6,163,855	0	0	259	337	0	0	0	0	0	0	936	1,152	0	0	0	0	133	173	178	208	0	0	6,015,024	6,165,725
		Consortio Minero Horizonte S.A.	Acumulación Parcoy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,610	3,661	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,610	3,661
		Cia. Aurifera Real Aventura	Cutebrillas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Cia. Minera Poderosa S.A.	Unidad La Libertad (Pata)	0	0	359,944	349,236	0	0	0	0	0	0	14,021	14,218	0	0	1,683	2,070	0	0	0	0	211	274	0	0	0	0	375,859	365,797
Lima	Volcan Compañía Minera SAA	Unidad Trujillo (Vijus)	0	0	3,969,156	4,068,384	0	0	0	0	0	0	4,527	4,590	0	0	192	237	0	0	0	0	198	257	0	0	0	0	3,974,073	4,073,469	
		Ticlio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	179	0	0	138	179	
		Compañía Minera Casapalca SA	Americana	0	0	23,336,062	23,919,463	0	0	0	0	58,017,497	60,512,250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	313	407	0	0	81,363,872	84,432,120		
		Empresa Minera Los Quenuales SA	Casapalca	0	0	0	0	0	0	8,012,220	10,415,886	2,228,917	2,324,760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	287	373	0	0	10,241,424	12,741,019		
		Votorantim Metais- Cajamarquilla SA	Cajamarquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	1,333,826	1,391,181	0	0	87,050,882	88,791,899	0	0	0	0	0	0	322	418	0	0	88,385,030	90,183,498		
		Pasco	Volcan Compañía Minera S.A.A.	Cerro de Pasco	0	0	5,930,864	6,079,135	0	0	0	0	2,599	2,710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,024	1,331	309,882	361,632	0	0	6,244,368
Compañía Minera Chancadora Centauro S.A.	Quicay			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	265	345	0	0	267	347		
Compañía Minera El Brocal S.A.	Colquijirca			0	0	1,793,900	1,838,748	0	0	17,588	22,865	13,961	14,561	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	590	767	2,683,342	3,131,460	0	0	4,509,383	5,008,402
Empresa Administradora Chungar S.A.C.	Animon			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,813	2,357	0	0	0	0	1,813	2,357
Pan American Silver S.A.	Huaron			0	0	5,885,239	6,032,370	0	0	94	122	1,682	1,754	12,477	12,652	0	0	0	0	0	0	0	0	516	671	500,717	584,337	0	0	6,400,725	6,631,906
Compañía Minera Milpo S.A.A.	Milpo N° 1			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,761	2,290	0	0	0	0	1,761	2,290
TOTAL	Compañía Minera Atacocha S.A.A.	Atacocha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,110	1,444	0	0	0	0	1,110	1,444	
		Media	0	0	3,805,244	3,902,917	0	0	217,469	282,735	1,668,400	1,740,141	10,315	10,460	2,332,727	2,399,781	78	94	0	0	0	0	327	425	126,105	145,998	0	0	8,162,663	8,462,557	
		Desv. Std	0	0	9,507,135	9,745,013	0	0	1,317,046	1,712,160	9,530,348	9,940,153	54,769	55,636	14,311,077	14,597,398	313	385	0	0	0	0	676	879	473,186	552,208	0	0	20,655,375	21,238,866	
		Max	0	0	51,375,038	52,659,414	0	0	8,012,220	10,415,886	58,017,497	60,512,250	333,846	338,520	87,050,882	88,791,899	1,683	2,070	0	0	0	0	3,261	4,240	2,683,342	3,131,460	0	0	88,385,030	90,183,498	
TOTAL	Compañía Minera Atacocha S.A.A.	Atacocha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,110	1,444	0	0	0	0	1,110	1,444	
		Media	0	0	3,805,244	3,902,917	0	0	217,469	282,735	1,668,400	1,740,141	10,315	10,460	2,332,727	2,399,781	78	94	0	0	0	0	327	425	126,105	145,998	0	0	8,162,663	8,462,557	
		Desv. Std	0	0	9,507,135	9,745,013	0	0	1,317,046	1,712,160	9,530,348	9,940,153	54,769	55,636	14,311,077	14,597,398	313	385	0	0	0	0	676	879	473,186	552,208	0	0	20,655,375	21,238,866	
		Max	0	0	51,375,038	52,659,414	0	0	8,012,220	10,415,886	58,017,497	60,512,250	333,846	338,520	87,050,882	88,791,899	1,683	2,070	0	0	0	0	3,261	4,240	2,683,342	3,131,460	0	0	88,385,030	90,183,498	
TOTAL	Compañía Minera Atacocha S.A.A.	Atacocha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,110	1,444	0	0	0	0	1,110	1,444	
		Media	0	0	3,805,244	3,902,917	0	0	217,469	282,735	1,668,400	1,740,141	10,315	10,460	2,332,727	2,399,781	78	94	0	0	0	0</									

Merece la pena analizar cuáles son las unidades mineras a las que se les ha atribuido una multa alta, así como aquellas a las que no. En 2008, las unidades mineras Complejo Metalúrgico La Oroya de la empresa Doe Run Perú, la unidad San Cristóbal/Mahr Túnel de la empresa Volcan y la unidad La Virgen de la compañía Minera San Simón explicaron el 43,2%, 18,7% y 10,9% del monto total de las multas en 2008, respectivamente, concentrando en conjunto, el 72,9% del total de las multas en dicho año. En 2009, en esta condición estuvieron las unidades mineras Cajamarquilla de la empresa Votorantim Metais-Cajamarquilla S.A., Americana de la Compañía Minera Casapalca S.A. y Carahuacra de la empresa Volcan Cía. Minera S.A.A., las cuales explicaron, respectivamente, el 29,0%, 26,9% y 16,9%, abarcando el 72,7% del total de las multas en dicho año.

Un patrón de comportamiento común en estas unidades mineras que explicaron en 2008 y 2009 un alto porcentaje del monto de las multas, es que todas excedieron en cantidades descomunales al menos algún LMP normativo. Así, por ejemplo, analizando el comportamiento de las tres empresas que demostraron, en ambos años, los mayores porcentajes de las multas simuladas, se tiene que en 2008 el Complejo Metalúrgico La Oroya excedió el LMP del selenio en porcentaje superior a cuatro millones³¹; la unidad San Cristóbal/Mahr Túnel superó el LMP de los sólidos totales suspendidos en 2 608,5%³²; al igual que la unidad minera La Virgen, que sobrepasó el LMP de los sólidos totales suspendidos en 1457,3% y de níquel en 260 214,0%³³. Por su parte, en 2009 la unidad Cajamarquilla excedió en un porcentaje mayor a 1,8 millones y en más de 11 000,0% el LMP promedio anual establecido para el cadmio y para el zinc, respectivamente³⁴, mientras que la unidad Americana superó el LMP promedio anual de los sólidos totales suspendidos y del zinc en 878,0% y 94 876,0%, respectivamente. Finalmente, la unidad Carahuacra excedió los LMP normativos correspondientes a los sólidos total suspendidos y al zinc en aproximadamente 2000,0%.

Tanto en 2008 como en 2009, la unidad minera Antamina de la empresa Antamina fue la única unidad que cumplió con todos los LMP normativos, razón por la cual no se le atribuyó ninguna multa. En esta misma situación se encontraba la unidad minera Quicay de la empresa Chancadora Centauro S.A.C., en 2008, así como las siguientes nueve unidades mineras en 2009: Santa Luisa (Huanzala), Ares, Culebrillas, San Cristóbal, Orcopampa, Recuperada, Julcani, Arcata y UEA Chaquelle. De este análisis puede

³¹ Esta unidad minera obtuvo un valor promedio anual por selenio de 431,4 mg/l, cuando el LMP es de 0,01 mg/l.

³² El LMP normativo para este contaminante es de 25 mg/l y esta unidad minera tuvo una emisión promedio anual por este contaminante de 677,1 mg/l. Esta unidad, además, superó los LMP normativos en 6 de los 13 parámetros de contaminación estudiados.

³³ El LMP correspondiente a los sólidos totales suspendidos es de 25 mg/l y esta unidad minera tuvo una emisión promedio anual de 389,4 mg/l. En el caso del níquel el LMP es de 0,08 y la unidad obtuvo una emisión promedio anual de 208,2 mg/l.

³⁴ Esta unidad minera obtuvo 751,2 mg/l y 136,9 mg/l para los contaminantes cadmio y zinc, respectivamente, cuando el LMP promedio anual para el primero es de 0,04 mg/l y para el segundo es de 1,2 mg/l.

concluirse que las unidades mineras evaluadas en 2009 tuvieron un comportamiento ambiental mejor que las unidades estudiadas en 2008, dado que más unidades cumplieron con todos los LMP.

El sistema de fiscalización y sanciones actual por el incumplimiento de los LMP mantiene dos deficiencias estructurales. En primer lugar, este sistema no establece cuál es el marco normativo de las multas y sanciones que deberán establecerse en el sector minero ante el incumplimiento de los LMP. Esto es de particular relevancia, dado que el marco normativo de escalas de multas y sanciones en vigencia se basa en normas del Osinergmin y en la actualidad esta entidad, desde octubre de 2010, ya no es el ente fiscalizador en el sector minero en los asuntos ambientales. En segundo lugar, el sistema actual en cuestión, por el momento, no está operando, dado que el Decreto Supremo 010-2010-MINAM, en el cual se establecieron nuevos LMP en 2010, otorgó un período de veinte meses contado a partir de agosto de 2010, para que las empresas mineras que actualmente operan en el país adecuen sus procesos productivos con la finalidad de cumplir con los LMP establecidos en dicha norma. Este plazo incluso puede alcanzar los 36 meses si la empresa minera decide invertir en nueva infraestructura de tratamiento para el cumplimiento de los LMP, es decir, que estas empresas mineras deberían cumplir con los LMP hacia agosto de 2013. En otras palabras, en la actualidad, y hasta abril de 2012 o hacia agosto de 2013, la OEFA-MINAM no puede sancionar a las empresas mineras que incumplan con los LMP normativos dado que el marco legal así lo establece.

Finalmente, cabe indicar que a partir de febrero de 2011 la OEFA-MINAM inició actividades de sanción a las empresas mineras-metalúrgicas que habían incumplido en años anteriores a 2011 con sus obligaciones ambientales. Se establecieron así 23 multas a 16 empresas por un monto aproximado de US\$ 3 millones, correspondiendo la mayoría de estas a las impuestas por el MINEM en el año 2006 y que fueron transferidas al Osinergmin en 2007³⁵. Además, en marzo de 2011 la OEFA-MINAM multó a la empresa Doe Run Perú con 2000 unidades impositivas tributarias (UIT), lo cual equivale a US\$ 2,5 millones, debido a que incumplió con compromisos ambientales asumidos anteriormente. El caso de esta empresa es de especial relevancia dado que en el año 2008 explicó el 43,2% del monto de las multas simuladas en este estudio. Sobre el particular cabe indicar que la empresa Doe Run Perú en junio de 2009 paralizó las operaciones del Complejo Metalúrgico La Oroya luego de que diversos bancos le cortaran sus líneas de crédito debido a problemas de insolvencia patrimonial. Hacia abril de 2010, la empresa debía a sus proveedores mineros US\$ 39,3 millones y tenía inversiones pendientes por US\$ 53,6 millones para la culminación del Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA). Hacia abril de 2011, dicha empresa

³⁵ Entre los principales incumplimientos de las mineras se encuentran las infracciones a los LMP de efluentes mineros-metalúrgicos, el inadecuado manejo de residuos sólidos generados en la actividad minera y otros contemplados en el Reglamento de Protección Ambiental.

se encontraba inmersa en un proceso concursal en el Indecopi, en el cual se decidiría su reestructuración o liquidación.

De los resultados encontrados en la presente sección puede concluirse que:

- (i) Las multas simuladas se encuentran concentradas en pocas unidades mineras. En los años 2008 y 2009, en promedio, el 72,8% de las multas fue explicado por tres unidades mineras diferentes en ambos años. Además, las multas se concentraron en unidades mineras de producción (ingresos) medianos/bajos, estando el 72,8% de las multas concentrado en el 32,4% de la producción minera en ambos años.
- (ii) En los dos años estudiados, las unidades que explicaron el mayor porcentaje del monto de las multas fueron las unidades metalúrgicas y no mineras³⁶.
- (iii) En ambos años bajo estudio la unidad minera Antamina de la empresa Antamina cumplió con todos los LMP normativos (promedio anual), razón por la cual no se le atribuyó multa alguna.
- (iv) Las multas simuladas se concentraron en pocos parámetros de contaminación, siendo los sólidos totales en suspensión y el selenio los que explicaron, en promedio, cerca del 98,0% de las multas en 2008. Por su lado, en 2009 fueron los sólidos totales en suspensión, el zinc y el cadmio los parámetros de contaminación que explicaron aproximadamente el 95,0% de las multas en dicho año.
- (v) Todas las unidades de la muestra cumplieron en 2008 y 2009 con los LMP (promedios anuales) correspondientes al cianuro total, razón por la cual no generaron multas por ese contaminante en ambos años. Además, en 2008 las unidades mineras evaluadas excedieron el promedio anual de los LMP en alguno de los otros doce parámetros contaminantes, hecho contrario a lo sucedido en 2009, en el cual todas las unidades de la muestra cumplieron, además del LMP correspondiente al cianuro total, con los correspondientes al potencial de hidrógeno, cromo y níquel.

4.3. Componentes del Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente

Estos resultados no hacen más que resaltar la necesidad de rediseñar el actual sistema de sanciones y multas en el sector minero-metalúrgico con la finalidad de crear un mecanismo de incentivos que genere que las empresas mineras internalicen la contaminación ambiental que generan sus actividades productivas. En ese sentido, a continuación se proponen cuatro componentes que debería contener un Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente fundamentado en criterios económicos.

³⁶ En 2008 el Complejo Metalúrgico La Oroya de la empresa Doe Run Perú explicó, en promedio, el 43,2% de las multas, mientras que en el 2009 la unidad Cajamarquilla de la empresa Votorantim Metais - Cajamarquilla S.A, explicó, en promedio, el 29,0%.

Componente 1. Sistematización de la información

Este componente debería contener la información de las emisiones realizadas por las unidades mineras sobre los parámetros de contaminación emitidos en los recursos hídricos sean o no regulados en la normativa. Además, debería incluir los montos de producción diferenciados según minerales y tipos de productos, así como la cantidad y los tipos de insumos productivos.

Componente 2. Determinación de los precios sombra y del monto de la multa

Este componente debería contener la(s) metodología(s) no paramétricas y/o paramétricas, para estimar los precios sombra y las multas en caso de que las empresas excedan los LMP normativos. Los cálculos de los precios sombra deberían ser publicados con la finalidad de que la empresa minera conozca con antelación cuales con los costos marginales por la emisión en los recursos hídricos de los contaminantes que se regulan en la normativa, los cuales corresponderían a su escala de multas individualizada.

Componente 3. Regla de conducta productiva- ambiental

Este componente debería establecer los planes de convergencia y/o ajuste hacia los LMP normativos para aquellas empresas que excedieron los LMP y que, por lo tanto, fueron multadas. Para ello deben establecerse reglas de conducta productiva-ambiental sobre la base de los niveles de contaminación existentes. Sobre el particular podrían definirse tres grupos de contaminación: alta, media y baja, a partir de los cuales determinar reglas de conducta según cada uno de estos grupos. Para los niveles bajos de contaminación podría establecerse una regla de conducta que obligue a reducir la contaminación ambiental generada sin necesidad de afectar los niveles de producción. Para niveles de contaminación media podría establecerse una regla de conducta que implique una reducción progresiva de los niveles de producción, hasta que se cumplan con los LMP normativos. En los casos de niveles descomunales de contaminación debería establecerse una regla de conducta que impida la producción minera, hasta que se resuelve el problema de contaminación generado³⁷.

Componente 4. Destino de los recursos

Los montos que se recauden debido a las multas que se establezcan por exceder los LMP deben servir para financiar la contaminación del medio ambiente, el cual descapitaliza el stock de riqueza de la economía de las localizaciones afectadas por la contaminación de los recursos hídricos. Además, debería servir para compensar directamente a los pobladores afectados sobre la base de criterios de mercado. Los montos recaudados deben ser

³⁷ Una empresa no puede contaminar los recursos hídricos hacia el infinito, por lo que, en este caso, debería limitarse la producción minera. Si esta empresa continua produciendo, podría verse en la situación, si sus niveles de emisión de contaminantes son muy abundantes, de que los montos de las multas que debiera pagar podría exceder el monto de sus ingresos.

administrados por la OEFA-MINAM, siendo una de las tareas de esta entidad la determinación del mecanismo de las transferencias a los afectados, el cual debe realizarse previa evaluación de campo de los daños. Cabe señalar que como no en todos los casos se deberá compensar por los daños generados (debido a emisiones reducidas de contaminantes que no generan afectados directos involucrados); los montos que no se transfieran deben ir a un fondo que compense los daños de otros lugares, cuya remediación pueda quedar desfinanciada³⁸.

Para el óptimo funcionamiento del Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente los cuatro componentes deberían funcionar de manera articulada. Esto dado que, como se observa, la información del componente 1 es un insumo para calcular los precios sombra y las multas del componente 2, las cuales a su vez constituyen un insumo para establecer las reglas de conducta ambiental-productiva de las empresas multadas del componente 3. El componente 4 es el que compila en términos monetarios la contaminación minera.

Respecto a la temporalidad de la información de los componentes, estos deberían contener información mensual para poder determinar oportunamente las reglas de conducta productiva-ambiental y remediar así los daños generados por la contaminación ambiental. En lo que concierne a la viabilidad técnica y económica de la puesta en marcha del Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente, todas las actividades se enmarcan en las competencias y funciones de la OEFA-MINAM. El mayor costo hundido se relaciona con la construcción y calibración de los modelos económicos para calcular los precios sombra y determinar las multas. El mayor costo recurrente se vincula al recojo de las muestras de agua de los efluentes minero-metalúrgicos, así como con el análisis químico posterior de dichas muestras, el cual debe realizarse en laboratorios acreditados. Cabe indicar que este costo puede (debe) ser asumido por los titulares mineros tal como se hizo

³⁸ En un contexto donde existen problemas de asimetrías de información en los mercados, así como incentivos para que los participantes exploten y aumenten esas asimetrías, pueden surgir incentivos perversos asociados a los mecanismos compensatorios por el daño ambiental que se genera. De esta manera, los afectados por la contaminación minera de los recursos hídricos pueden acrecentar los daños reales que se generan, mantenerlos en el tiempo o, en todo caso, trasladar como daños aquellos que no necesariamente corresponden a los generados por las actividades productivas mineras. Controlar estos incentivos perversos que surgen alrededor de estos sistemas compensatorios es una tarea de mediano plazo en la que se debe establecer, de manera adecuada, derechos de propiedad en los recursos hídricos, así como establecer sistemas de precios al agua. Una vez que se establecen derechos de propiedad claramente definidos y fácilmente transables, se podrá arribar a una solución eficiente para la sociedad (fundamento del «Teorema de Coase»), en la cual la contaminación de los recursos hídricos se reduce en el tiempo y, en los casos que surjan, opera un sistema de precios que limpia los mercados. Mientras no se establezcan derechos de propiedad sobre los recursos hídricos, la única manera de mermar la contaminación del agua y por tanto lidiar con los incentivos perversos que se crean alrededor de los sistemas compensatorios de la contaminación, es establecer normas que impongan costos efectivos a las empresas que las incumplan. Los precios sombra calculados en este estudio constituyen una aproximación para establecer sanciones pecuniarias a las empresas contaminadoras, pero es imperfecta pues no son compensatorios, por lo que para alcanzar soluciones eficientes en los mercados se requiere que el Estado trabaje en el establecimiento de derechos de propiedad en los recursos hídricos.

en la Campaña Nacional de Monitoreo Ambiental de Efluentes y Recursos Hídricos de 2008 y 2009, lo cual está acorde a la normatividad vigente³⁹.

Finalmente, en lo que respecta a la institucionalidad de la sistematización y recojo de la información del componente 1, es el Minem quien debería continuar proveyendo la información de producción de minerales según empresa minera y unidad productiva minera, así como empezar a proporcionar la información de los insumos empleados en los procesos productivos mineros. Por su parte, el Minam debería hacerse cargo de las tomas de las muestras de agua para su posterior análisis químico en laboratorios acreditados, lo cual permitirá garantizar la transparencia del proceso de fiscalización. Esta propuesta sin embargo, implicará la modificación del Decreto Supremo 010-2010-Minam, dado que en su artículo 6 señala que las empresas mineras son las responsables de remitir al Minem la información sobre el cumplimiento de los LMP, para que luego esta entidad la sistematice y se la proporcione al Minam para que realice las funciones de fiscalización (artículo 7 de la misma norma).

Por tanto, el cambio normativo en cuestión sería el de establecer la responsabilidad del Minam en el recojo y sistematización de las tomas de las muestras de agua, así como establecer que la metodología para el recojo de la toma de muestras debería ser inopinada (en la cual las muestras de agua se toman sin informar previamente a la empresa minera), igual a la aplicada en la Campaña Nacional de Monitoreo Ambiental de Efluentes y Recursos Hídricos 2008-2009. Además, un cambio adicional a la misma norma (anexo 1), en el cual se establece el período temporal para el cumplimiento del LMP del parámetro contaminante que debería ser mensual y no anual como actualmente establece el decreto supremo 010-2010-MINAM. Estos cambios normativos en su conjunto permitirán garantizar la transparencia e imparcialidad del proceso de fiscalización, así como la implementación, puesta en marcha y funcionamiento del Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente propuesto en este estudio.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se aproximó el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos para los años 2008-2009 a partir del marco conceptual de la Eficiencia Medioambiental, el cual supone que las empresas mineras son ambientalmente eficientes si tienen la habilidad para incrementar su producción sin dañar el medio ambiente, es decir, para producir sobre la frontera de posibilidades

³⁹ En el artículo 3 de la Resolución Ministerial 180-2003-EM/DM, que aprobó el Arancel de Fiscalización Minera en abril de 2003, establece que los gastos en bienes y servicios que irroga la realización de la fiscalización tales como el transporte, alojamiento y alimentación del fiscalizador, análisis de muestras y alquiler de equipos, serán asumidos por el titular de la actividad minera.

Esta norma indica que las empresas correrán con los gastos adicionales que se necesiten para llevar a cabo la fiscalización, entre ellas las tomas de muestras y sus análisis de laboratorio.

de producción ambiental, dada la tecnología. En términos cuantitativos, el costo de la contaminación ambiental minera se aproximó a partir de los precios sombra de las externalidades ambientales negativas, las cuales corresponden a la pendiente de la proyección de una empresa minera sobre la frontera de posibilidades de producción, esta última construida a partir de un conjunto de inputs y de *outputs deseables y no deseables*.

El proceso productivo minero fue caracterizado como aquel en el cual las empresas mineras generan un *output deseable*, producción minera medida en millones de dólares, mediante el empleo de un conjunto de factores productivos denominados inputs. Como resultado de ello se generan contaminantes, *output no deseables*, los cuales son depositados en las fuentes hídricas ubicadas en las áreas cercanas a la actividad minera. De esta manera, se produce la contaminación minera sobre los recursos hídricos cuyo costo marginal o precio sombra fue aproximado a partir del valor monetario que las empresas mineras dejarían de ganar si tuvieran que reducir en 1 mg/l la contaminación ambiental que generan. A partir de los precios sombra, se calculó el costo económico de la contaminación ambiental minera mediante el producto de dichos precios sombra según parámetros contaminantes, por los LMP promedios anuales emitidos en los recursos hídricos y por las unidades mineras bajo estudio.

El costo económico fue calculado a partir de metodologías no paramétricas y paramétricas para un conjunto de 28 y 37 unidades mineras de la gran y mediana minería para los años 2008 y 2009, respectivamente, las cuales estuvieron bajo el ámbito de la Campaña Nacional de Monitoreo Ambiental de Efluentes y Recursos Hídricos que realizó el Osinermin en dichos años. Los resultados del estudio indicaron que en el año 2008 el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos ascendió, en promedio, a US\$ 814,7 millones, y, en 2009, a US\$ 448,8 millones, siendo el costo en ambos años mayor cuando se aplicaron metodologías paramétricas. Dicho costo económico, que estuvo altamente concentrado en pocas unidades productivas, resultó ser mayor en unidades mineras con producción media/baja de minerales y estuvo concentrado en pocos parámetros de contaminación, siendo los sólidos total suspendidos el parámetro más contaminante en ambos años, pues explicó, en promedio, el 51,4% del costo económico.

A partir de los precios sombra estimados, se simuló las multas que deberían haber sido establecidas en 2008 y 2009 a aquellas unidades mineras que excedieron los LMP promedios anuales establecidos en la normativa. Estas multas fueron estimadas al multiplicar los precios sombra por el exceso de dichos LMP normativos, las cuales ascendieron en los años 2008 y 2009, en promedio, a US\$ 647,9 millones y US\$ 308,3 millones, respectivamente. En 2008, 26 de las 28 unidades mineras estudiadas y en 2009, 27 de las 37 unidades evaluadas, excedieron algún LMP promedio anual. Además, y similar a los resultados obtenidos para el costo económico de la contaminación ambiental minera, las multas simuladas estuvieron concentradas en pocas unidades mineras y pocos parámetros de contaminación, así como en unidades mineras con producción media/baja de minerales. El patrón de comportamiento común encontrado en las unidades mineras

que explicaron un alto porcentaje del monto de las multas resultó ser que todas excedieron en cantidades descomunales al menos algún LMP normativo.

Un hecho que llama la atención fue que tanto en 2008 como en 2009 las unidades productivas que explicaron el mayor porcentaje del monto de las multas fueron unidades metalúrgicas y no mineras, lo cual podría estar indicando que, en zonas de actividad minera no estudiadas aquí, las unidades metalúrgicas podrían estar ocasionando una elevada contaminación mayor a la ocasionada por las unidades mineras. De otro lado, cabe indicar que todas las unidades de la muestra cumplieron en 2008 y 2009 con los promedios anuales de los LMP correspondientes al cianuro total, razón por la cual no generaron multas por ese contaminante en ambos años. Sobre este mismo punto, cabe señalar que en 2008 las unidades mineras evaluadas excedieron el promedio anual de los LMP en diversos parámetros contaminantes, hecho contrario a lo sucedido en 2009, en el cual todas las unidades de la muestra cumplieron, además del LMP del cianuro total, con aquellos referidos al potencial de hidrógeno, cromo y níquel.

Las multas simuladas en este estudio excedieron a las que Osinergmin estableció en 2008 y 2009, las cuales ascendieron a US\$ 4,3 millones y US\$ 5,9 millones, respectivamente, mientras que las calculadas en este trabajo ascendieron, en promedio, a US\$ 647,9 millones en 2008 y a US\$ 308,3 millones en 2009. Es decir, en ambos años las multas establecidas por el Osinergmin representaron el 1,1% de aquellas simuladas en el presente estudio (ascendentes a US\$ 956,2 millones en total para ambos años). Además, las multas aquí calculadas en los dos años analizados superaron el monto de las multas que este organismo impuso en el período 2007-2010, las cuales fueron de US\$ 36 millones. Esta diferencia se explica por el hecho de que las primeras han sido calculadas sobre la base de criterios económicos fundamentados en la teoría microeconómica de la producción, es decir, sobre la base del valor de mercado de la contaminación que han generado las unidades mineras; mientras que las últimas han sido determinadas sobre la base de criterios administrativos. En ese sentido, podría señalarse que el precio de la contaminación, expresado en valores de mercado, dado que se aproxima a partir de los ingresos de las propias empresas mineras y la contaminación que generan sus actividades productivas, constituyen una mejor aproximación del valor de las multas que debieran pagar dichas empresas por contaminar los recursos hídricos. Se constituiría así un mejor mecanismo disuasivo que el actualmente vigente, para generar que las empresas mineras internalicen las externalidades negativas que se desprende de su proceso productivo.

Los resultados encontrados resaltan la necesidad de rediseñar el actual sistema de sanciones y multas en el sector minero con la finalidad de generar los incentivos para que las empresas mineras internalicen la contaminación ambiental que generan sus actividades productivas. Lamentablemente, en la actualidad, el marco normativo de multas se encuentra basado en criterios administrativos; este sanciona las infracciones a partir de una escala monetaria fija (unidad impositiva tributaria) y no sobre la base de criterios económicos, basado en el potencial daño ambiental que podría generarse. Esta necesidad

es realizada por la promulgación del decreto supremo 010-2010-MINAM en agosto de 2010, el cual otorgó un período de veinte meses, contado a partir de ese mismo mes, para que las empresas mineras que operan actualmente en el país adecuen sus procesos productivos para cumplir con los LMP. Este plazo incluso podría extenderse hasta los 36 meses si la empresa minera decide invertir en nueva infraestructura de tratamiento para el cumplimiento de los LMP. Por tanto, hasta abril de 2012, o en su defecto hasta agosto de 2013, las empresas mineras-metalúrgicas podrán seguir excediendo los LMP normativos y no ser sancionadas, dado que el marco normativo actual lo permite.

En la actual coyuntura, la OEFA-MINAM requiere potenciar sus capacidades técnicas con la finalidad de que se convierta en una institución capaz de hacerse responsable de la importante tarea de fiscalización y sanción en el sector minero-metalúrgico. Esta tarea será amplia considerando que es una institución relativamente nueva que recién en octubre de 2010 recibió del Osinergmin las competencias de supervisión y fiscalización del sector minero. Una de las tareas urgentes que debería realizar la OEFA-MINAM es la de desarrollar e implementar un sistema de sanciones disuasivo basado en criterios económicos que se nutra de los cuatro componentes propuestos en el presente estudio. Para ello se necesita hacer cambios al Decreto Supremo 010-2010-MINAM, los cuales, adicionales a restablecer el sistema de sanciones (dado que actualmente no se encuentra en funcionamiento), pero sobre la base de criterios económicos, deberían incluir modificaciones con respecto a la entidad responsable del recojo de las muestras de aguas en los puntos de monitoreo de las empresas mineras (pues actualmente las empresas mineras son las responsables de dicho recojo), la temporalidad de dicho recojo (el cual debe ser mensual y no anual, como actualmente se establece), así como la metodología que debe seguir la toma de dichas muestras, las cuales deberían ser inopinada (cuando se toman sin informar previamente a la empresa minera). Adicionalmente, convendría establecer el marco de escala de multas y sanciones propio de la OEFA-MINAM (basado en criterios económicos) pues el actualmente vigente corresponde al Osinergmin y está basado en criterios administrativos. Estos cambios normativos, en su conjunto, permitirán garantizar la transparencia e imparcialidad del proceso de fiscalización, así como la implementación, puesta en marcha y buen funcionamiento del Sistema de Sanciones Ambientalmente Eficiente propuesto en este estudio.

La necesidad de contar con un sistema de multas y sanciones que sea verdaderamente disuasivo, basado en criterios económicos y no administrativos, es realizada por la importancia que la actividad minera tendrá en el futuro cercano en el país. Así, se espera que en el período 2012-2016 las inversiones en el sector asciendan a US\$ 25 346 millones, monto 200,0% mayor a lo invertido en el sector en el período 2005-2009. Esto es compatible con el hecho de que el desarrollo actual de los proyectos mineros representa solo el 1,0% del territorio nacional, existiendo un 10,0% de dicho territorio que ha sido concesionado pero que no ha sido explorado, por lo que se encuentra apto para la exploración minera.

Este potencial minero augura a futuro el desarrollo de una intensa actividad en el sector por lo que se requiere implementar un marco institucional ambiental sólido para evitar los problemas que la ausencia de este acarrea. Uno de los mayores problemas que se genera es el de los conflictos sociales, los cuales según la Defensoría del Pueblo, hacia febrero de 2011, de un total de 234 conflictos sociales registrados, 113 conflictos (es decir el 48,3%) correspondieron a conflictos socioambientales. Así, considerando que la mayor parte de estos conflictos son generados por las empresas mineras mayormente en torno al agua (según Glave y Kuramoto, 2007), si bien es necesario reforzar las capacidades, las herramientas y los mecanismos para la promoción del diálogo y el manejo de conflictos sociales en el país, el tema de fondo para evitar estos conflictos es establecer un marco normativo fortalecido, vinculado a la fiscalización y sanción de las actividades minero-metalúrgicas (marco del cual se carece en el país).

Finalmente, debe advertirse que los cálculos realizados sobre el costo económico de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos, así como de las correspondientes multas, subestima la verdadera valoración ambiental del daño que las empresas mineras generan al medio ambiente. Esto se debe a que muchos de los yacimientos mineros se encuentran en cabeceras de cuenca o zonas donde existen lagunas, bosques secos o de neblina con una rica biodiversidad, páramos o zonas de riego, por lo que las operaciones mineras no solo afectan los recursos hídricos, sino también otros recursos naturales. Por tanto, el daño ambiental es más amplio dado que afecta el ecosistema de una localidad en su conjunto en lo que concierne a la calidad de las aguas superficiales, que a su vez pone en riesgo la desaparición de la fauna y la flora acuática; la contaminación del aire que genera problemas respiratorios y en la piel; la contaminación de las aguas subterráneas debido al drenaje ácido de la mina; la degradación del suelo y sus efectos nocivos sobre la agricultura, lo que además acarrea graves consecuencias sobre la cadena alimenticia y la salud.

Por ello, las multas calculadas en este estudio, aún cuando se han estimado sobre la base de criterios económicos, no son necesariamente congruentes con aquellas de «real impacto» en el medio ambiente. En ese sentido, a lo que debería apuntarse a futuro es al desarrollo de un sistema de multas por impacto de los contaminantes en el medio ambiente y no por el volumen del contaminante emitido, es decir, no basado en un sistema que sancione si se excede o no un LMP normativo, sino por el daño económico que se genera. Un paso intermedio hacia ese sistema de sanciones es avanzar con propuestas para la implementación de un sistema de multas y sanciones basadas en criterios económicos para el resto de recursos naturales afectados por las actividades mineras-metalúrgicas, como el aire y el suelo. Esta tarea, así como el estudio de metodologías para analizar la contaminación que generan las empresas de la minería informal (no estudiada en la presente investigación) constituyen líneas para futuras investigaciones.

ANEXOS

Anexo 1. Unidades productivas mineras bajo estudio, número de afluentes monitoreados y fuente hídrica a la que descarga según empresas mineras para el año 2008

Región	Empresa Minera	Unidades Productivas Mineras	Número de Efluentes (Puntos de Monitoreo)	Fuente hídrica a la que descarga
Ancash	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	Santa Luisa (Huanzala)	12	Río Torres
	Minera Huallanca S.A.	Pucarájio y Contonga		Quebrada Tayash y Laguna Shahuana
	Compañía Minera Antamina S.A.	Antamina		Río Puchca y Qda. Carash
Arequipa	Minera Bateas S.A.C.	San Cristóbal	14	Río Santiago
	Cedimin S.A.C.	Chaquellie		Río Caucamayo y Quebrada Miña
	Cia. Minera Ates S.A.C.	Ates y Alcalá		Río Colpa y Río Atoxpampa
	Cia Minera Buenaventura S.A.A.	Orocpampa		Río Chilcaymarca y Río Orocpampa
	Cia Minera Caudalosa S. A.	Huachocolpa Uno		Río Escalera
Huancavelica	Cia Minera Buenaventura S.A.A.	Recuperada y Julcani	12	Río Paillacopampa y Río Opameyo
	Castrovirreyna Cia. Minera S.A.	San Genaro		Laguna Orcococha y Laguna Chocobococha
Junín	Volcan Cia. Minera S.A.A.	Andayhagua, San Cristóbal / Mañr Túnel y Carahuaqra	9	Río Andayhagua, Río Yauli y Río Runitichaca
	Doe Run Perú SRL	Complejo Metalúrgico La Oroya		Río Mantaro
	Pan American Silver S.A.	Quituvilca		Río Moche
La Libertad	Compañía Minera San Simón S.A.	La Virgen	9	Río Paloquián y Río Suro
	Compañía Minera Aurífera Santa Rosa S.A.	Santa Rosa		Río Ucumal y Quebrada Maleta
Lima	Compañía Minera Casapalca SA	Americana	6	Río Rimac
	Empresa Minera Los Quenuales SA	Casapalca		Río Rimac
	Votorantim Metals- Cajamarquilla SA	Cajamarquilla		Río Rimac
	Volcan Cia. Minera S.A.A.	Cerro de Pasco		Canal de Cerro de Pasco
Pasco	Compañía Minera Chancadora Centauro S.A.	Quicay	15	Río Quicay
	Compañía Minera El Brocal S.A.	Colujirca		Río San Juan
	Empresa Administradora Chungar S.A.C.	Animon		Laguna Naticocha Centro
	Pan American Silver S.A.	Huaron		San José
Total	20	28	77	32

Elaboración propia.

Anexo 2. Unidades productivas mineras bajo estudio, número de afluentes monitoreados y fuente hídrica a la que descarga según empresas mineras para el año 2009

Región	Empresa Minera	Unidades Productivas Mineras	Número de Efluentes / Puntos de Monitoreo	Fuente hídrica a la que descarga
Ancash	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	El Recuerdo, Santa Luisa (Huanzala) y Berflin	21	Río Torres, Río Chuspic y Río Liamac
	Minera Huallanca S.A.	Pucarrayo y Contonga		Quebrada Pucarrayo, Quebrada Tayash, Quebrada Shahuana-Tayash, Laguna Contonga y Laguna Pajococha
	Compañía Minera Antamina S.A.	Antamina		Quebrada Tucush, Río Ayash y Quebrada Antamina
	Minera Bateas S.A.C.	San Cristóbal		Río Santiago
	Cedimin S.A.C.	Chaquelle		Quebrada Puncutuavcco, Río Cacamayo, Río Collpamayo y Quebrada Ares y Arcaia
Arequipa	Cia. Minera Ares S.A.C.	Ares y Arcaia	17	Río Collpa y Río Arocapampa
	Cia Minera Buenaventura S.A.A.	Orcopampa		Río Chilcaymarca
Cajamarca	Minera Yanacocha S.R.L	Chapiploma Sur	9	Canal Tual, Quebrada Omamo, Quebrada Shillamayo, Quebrada San Jose, Quebrada Occuchamachay, Canal Encajon Collotan, Quebrada paccha y Quebrada Encajon
Huancavelica	Cia Minera Caudalosa S. A.	Huachocolpa Uno	16	Río Escalera
	Cia Minera Buenaventura S.A.A.	Recuperada y Julcani		Río Paliccapampa, Quebrada Chontacancha y Río Opamayo
	Castrovirreyna Cia. Minera S.A.	San Genaro		Laguna Yanacocha, Laguna Orcococha y Quebrada San Julian
Junin	Volcan Cia. Minera S.A.A.	Andyachagua, San Cristóbal/ Mahr Túnel y Carahuacra	7	Río Yauli
	Pan American Silver S.A	Quiruvilca		Río Morche
La Libertad	Cia. Minera San Simón S.A.	La Virgen	16	Río Suro
	Cia. Minera Aurifera Santa Rosa S.A.	Santa Rosa		Río Ucumal
	Consorcio Minero Horizonte S.A.	Acumulación Parcoy		Río Parcoy
	Cia. Aurifera Real Aventura	Culebrillas		Río Parcoy
	Cia. Minera Poderosa S.A.	Unidad La Libertad (Pataz) y Unidad Trujillo (Vius)		Quebrada Honda (desemboca en el río Francés), Quebrada El Tingo y Río Marañón
	Volcan Cia. Minera S.A.A.	Ticlio		Quebrada Antiranra
	Compañía Minera Casapalca SA	Americana		Río Rimac
Lima	Empresa Minera Los Quenuales SA	Casapalca	7	Río Rimac
	Votorantin Metals- Cajamarquilla SA	Cajamarquilla		Río Rimac
Pasco	Volcan Cia. Minera S.A.A.	Cerro de Pasco	24	Río San Juan
	Compañía Minera Chancadora Centauro S.A.	Quicay		Río Quicay
	Compañía Minera El Brocal S.A.	Colquijirca		Río San Juan
	Empresa Administradora Chungar S.A.C.	Animon		Laguna Natococha Norte
	Pan American Silver S.A.	Huaron		San José
	Compañía Minera Milpo S.A.A.	Milpo N° 1		Río Lioclla y Río Huallaga
Compañía Minera Atacocha S.A.A.	Atacocha	Río Huallaga		
Total	25	37	117	50

Elaboración propia.

Anexo 3. Variables output deseable, output no deseable e input de las unidades mineras bajo estudio del año 2008

Región	REGIÓN, EMPRESA Y UNIDAD MINERA		OUTPUT DESEABLE		OUTPUT NO DESEABLE											INPUT	
	Empresa Minera	Unidad Minera	PRODUCCION TOTAL (Millones de US\$)	pH (niveles)	STs (mg/L)	Pb (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Hg (mg/L)	Cr (mg/L)	Ni (mg/L)	Se (mg/L)	Fe (mg/L)		CN Total (mg/L)
Arequipa	Compañía Minera Antamina S.A.	Antamina	3785.2	7.9554	3.6485	0.0038	0.0067	0.0252	0.0047	0.0004	0.0002	0.0103	0.0036	0.0098	0.3574	0.0067	1249.1
	Compañía Minera Santa Luisa S.A.	Santa Luisa	75.3	7.7361	233.5180	0.0019	0.0583	0.4253	0.0165	0.0029	0.0002	0.0085	0.0178	0.0098	1.2506	0.0287	24.8
	Minera Huallanca S.A.	Contonga	37.4	8.3953	55.0833	0.0865	0.0097	11.5928	0.0033	0.0328	0.0002	0.0080	0.0158	0.0098	0.3801	0.0050	12.3
	Minera Bataas S.A.C.	San Cristóbal	42.4	7.1074	12.5381	0.0075	0.1097	1.3189	0.0071	0.0067	0.0008	0.0067	0.0131	0.0098	0.5799	0.0330	14.0
Arequipa	Cedimín S.A.C.	Chaquille	54.9	7.8398	8.2400	0.0118	0.0056	0.0884	0.0301	0.0010	0.0006	0.0020	0.0024	0.0208	0.0340	0.0963	18.1
	Compañía Minera Ares S.A.C.	Ares	35.7	7.9744	6.7750	0.0100	0.0393	0.0214	0.0226	0.0033	0.0015	0.0006	0.0023	0.0200	0.0542	0.0057	11.8
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A	Orcopampa	174.9	8.2825	58.5786	0.0303	0.0214	0.0226	0.0033	0.0015	0.0006	0.0023	0.0200	0.0260	0.1093	0.0582	28.6
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A	Orcopampa	233.6	8.1530	156.9148	0.0100	0.0330	0.0349	0.0213	0.0010	0.0006	0.0022	0.0200	0.0230	0.0964	0.0045	57.7
Huancaavelica	Castrovirreyra Compañía Minera S.A.	San Gemaro	36.0	7.7428	7.2780	0.0185	0.0081	0.0755	0.0093	0.0011	0.0006	0.0023	0.0148	0.0203	0.0890	0.0069	77.1
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A	Julcani	28.9	8.1866	107.9804	0.1890	0.8780	2.4805	0.8026	0.0310	0.0012	0.0049	0.0199	0.0491	10.1417	0.0001	11.9
	Compañía Minera Caudalosa S.A.	Huachocolpa Uno	41.4	8.0744	12.2023	0.0481	0.3218	0.0620	0.0128	0.0025	0.0006	0.0024	0.0032	0.0227	0.1386	0.0001	9.6
	Volcan Compañía Minera SAA	Andaychagua	169.8	7.2210	13.1863	0.0100	0.0035	0.1415	0.0612	0.0013	0.0006	0.0020	0.0022	0.0200	0.0853	0.0001	6.7
Junin	Carhuacra	Carhuacra	74.9	10.0565	84.0129	0.0360	0.0702	17.9149	0.0293	190.4924	0.0006	0.0023	0.0409	0.0263	0.2521	0.0001	13.7
	San Cristóbal / Mahr Túnel	San Cristóbal / Mahr Túnel	251.1	8.5983	12.8389	0.0113	0.0073	0.0436	0.1550	0.0013	0.0006	0.0021	0.0031	0.0256	0.0650	0.0001	56.0
	Complejo Metalúrgico La Oroya	Complejo Metalúrgico La Oroya	1259.6	8.3493	21.5187	0.0133	0.0072	0.2820	0.0132	0.0025	0.0006	0.0021	0.0058	0.0393	0.1320	0.0001	24.7
	Pan American Silver S.A. - Mina Quiruvilca	Quiruvilca	64.7	6.1951	677.1327	0.1303	1.9503	38.5680	0.0171	0.0431	0.0006	0.0021	0.0650	0.0346	25.9741	0.0001	82.9
La Libertad	Compañía Minera San Simón S.A.	La Virgen	65.0	8.5100	7.0400	0.0264	0.0991	1.4185	0.2226	0.0172	0.0017	0.0023	0.0069	431.4803	0.0605	0.0001	415.7
	Compañía Minera Auríferos Santa Rosa S.A.	Santa Rosa	148.5	7.0213	56.1869	0.0006	0.0236	1.0899	0.0934	0.0110	0.0027	0.1841	1.09539	0.0063	0.0160	0.2656	21.4
	Empresa Minera Los Queñuales S.A.	Casapalca	151.3	5.9553	395.3326	0.0933	0.0286	1.3521	2.4757	0.2322	0.0528	65.5903	206.2514	0.3889	0.0770	0.1980	21.5
	Compañía Minera Casapalca S.A.	Americana	121.8	5.1657	30.8869	0.1065	0.0200	0.2234	0.0100	0.0081	0.0020	0.5032	0.2604	0.0877	0.0126	0.1881	46.0
Lima	Votoranin Metales - Cajamarquilla S.A	Refinería Cajamarquilla	301.4	7.7487	29.8369	0.0263	0.0592	0.3136	0.0205	0.0019	0.0006	0.0035	0.0036	0.0359	0.0572	0.0001	49.9
	Chancarcuro S.A.C.	Quicay	41.5	8.3489	11.7111	0.0205	0.1822	1.3413	0.0121	0.0026	0.0006	0.0090	0.0026	0.0300	0.0840	0.0001	40.2
	Volcan Compañía Minera S.A.A.	Cerro de Pasco	500.6	7.5587	16.9429	0.0050	0.0499	6.4843	0.0211	0.0239	0.0006	0.0026	0.0084	0.0813	0.1489	0.0001	99.5
	Sociedad Minera El Brocal S.A.	Cobujirca	360.7	7.8496	16.1187	0.0027	0.0401	0.0620	0.0058	0.0012	0.0002	0.0060	0.0086	0.0098	0.8384	0.0001	13.7
Pasco	Empresa Administradora Chungar S.A.C.	Anímon	112.2	7.8940	231.7333	0.0178	0.0179	2.7341	0.0080	0.0052	0.0004	0.0060	0.0189	0.0098	2.6200	0.0001	165.2
	Pan American Silver S.A.	Huastón	305.6	10.7778	25.8773	0.1407	1.2286	0.2851	0.0036	0.0002	0.0031	0.0294	0.0124	0.5286	0.0001	119.0	
	Media	Media	305.6	7.7415	62.5970	0.0057	0.0072	0.1887	0.0489	0.0006	0.0002	0.0318	0.0097	0.0098	1.0203	0.0001	94.6
	Desv. Sid	Desv. Sid	723.7	8.0993	24.6687	0.0088	0.5373	8.8766	0.0130	0.0028	0.0002	0.5063	0.0402	0.0099	1.0470	0.0001	37.0
Pasco	Max	Max	3785.2	7.8488	84.8656	0.0339	0.3034	3.1966	0.1377	6.8115	0.0026	2.3896	7.9499	16.4477	1.6717	0.0321	100.8
	Min	Min	20.3	1.0989	146.4785	0.0460	0.7290	7.9668	0.4698	35.9981	0.0099	12.3869	39.3292	81.5348	5.1352	0.0697	238.8
	Min	Min	20.3	10.7778	677.1327	0.1690	3.2618	38.5680	2.4787	190.4924	0.0528	65.5903	206.2514	431.4803	25.9741	0.2656	1249.1
																	6.7

Elaboración propia.

Anexo 4. Variables output deseable, output no deseable e input de las unidades mineras bajo estudio, año 2009

Región	REGIÓN, EMPRESA Y UNIDAD MINERA	OUTPUT DESEABLE											OUTPUT NO DESEABLE											INPUT
		PRODUCCIÓN TOTAL (Millones de US\$)	pH (niveles)	STS (mg/l)	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	As (mg/l)	Cd (mg/l)	Hg (mg/l)	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Se (mg/l)	Fe (mg/l)	CN total (mg/l)	COSTO TOTAL (Millones de US\$)								
Ancash	Empresa Minera Unidad Minera Compañía Minera Santa Luisa S.A.	18.6	7.8682	28.4808	0.0131	0.0113	0.4791	0.0026	0.0030	0.0001	0.0066	0.0045	0.0015	0.0417	0.0155	6.1								
		91.4	7.6407	22.9889	0.0115	0.0033	0.3679	0.0113	0.0042	0.0001	0.0009	0.0152	0.0013	0.8972	0.0453	30.2								
		6.4	6.8328	66.5553	0.0339	0.4442	4.8848	0.1647	0.1088	0.0001	0.0005	0.0201	0.0006	0.8326	0.0042	2.1								
		4.9	7.9048	11.9607	0.0064	0.0068	2.4412	0.0165	0.0070	0.0001	0.0010	0.0104	0.0006	0.9644	0.0044	1.6								
		2303.2	7.7116	5.6458	0.0042	0.0027	0.0292	0.0069	0.0007	0.0001	0.0016	0.0039	0.0016	0.0749	0.0042	958.1								
		21.9	7.9231	29.7784	0.0089	0.2417	6.1895	0.2002	0.0339	0.0001	0.0011	0.0172	0.0025	0.0613	0.1977	7.0								
		41.9	7.9231	29.7784	0.0089	0.2417	6.1895	0.2002	0.0339	0.0001	0.0011	0.0172	0.0025	0.0613	0.1977	7.0								
		20.4	6.9285	20.9426	0.0028	0.0233	0.0366	0.1688	0.0097	0.0007	0.0008	0.0065	0.0032	0.1348	0.1438	69.1								
		51.2	8.3250	0.3250	0.0086	0.0023	0.0126	0.0009	0.0001	0.0001	0.0001	0.0021	0.0004	0.0950	0.0029	16.9								
		Cajamarca	Compañía Minera S.A.A. Orcoampa	268.5	8.0388	9.8576	0.0063	0.0043	0.0469	0.0036	0.0011	0.0001	0.0010	0.0023	0.0014	0.1260	0.0038	88.6						
2046.9	7.4506			8.8689	0.0414	0.1268	0.1538	0.5750	0.0037	0.0009	0.0100	0.0054	0.0323	0.0318	0.1656	67.5								
45.6	7.3454			10.2592	0.0012	0.0037	0.2397	0.0343	0.0006	0.0001	0.0109	0.0291	0.0098	0.2519	0.1511	3.5								
10.7	8.0881			7.3889	0.0015	0.0079	0.0730	0.0012	0.0018	0.0001	0.0051	0.0205	0.0098	0.1278	0.0022	10.0								
26.4	7.9049			44.8580	0.0121	0.0980	4.3345	0.0012	0.0286	0.0001	0.0030	0.0253	0.0098	0.2198	0.0036	8.7								
144.7	8.2857			14.0555	0.0033	0.0061	0.0598	0.0935	0.0003	0.0002	0.0031	0.0061	0.0098	0.1722	0.0119	47.8								
221.6	8.4769			100.1286	0.0337	1.7905	16.0552	0.1004	0.0393	0.0001	0.0030	0.0196	0.0098	19.8778	0.0086	73.1								
49.9	7.1084			915.2716	0.0843	0.4148	25.3216	0.0864	0.0187	0.0001	0.0030	0.0578	0.0098	12.5309	0.0068	18.5								
59.5	6.7893			84.3034	0.0300	0.0978	3.9449	0.0448	0.0289	0.0005	0.0100	0.0097	0.0232	1.4517	0.0619	19.6								
158.3	8.2857			87.5929	0.0143	0.0763	0.3000	0.0920	0.0080	0.0001	0.0030	0.0150	0.0220	3.5408	0.0924	51.9								
La Libertad	Compañía Minera S.A.A. Acumulación Parcoy	158.3	8.2857	87.5929	0.0143	0.0763	0.3000	0.0920	0.0080	0.0001	0.0030	0.0150	0.0220	3.5408	0.0924	51.9								
		7.1	6.6772	19.2222	0.0403	0.0050	0.9338	0.0414	0.0081	0.0005	0.0100	0.0038	0.0020	0.0687	0.0050	2.3								
		13.3	8.0369	28.3519	0.0324	0.0050	0.2930	0.3533	0.0045	0.2955	0.0100	0.0020	0.0258	0.0479	0.0063	4.4								
		57.1	7.5078	61.8444	0.0192	0.0050	0.2331	0.1682	0.0046	0.0283	0.0100	0.0029	0.0268	0.2283	0.2207	25.0								
		118.1	7.0773	244.5000	0.0200	0.0182	1139.7108	0.0200	0.0037	0.0005	0.0100	0.0042	0.0325	0.0547	0.0075	39.0								
		128.5	7.3432	13.4118	0.0287	0.0084	136.9045	0.0400	0.0240	0.0059	0.0095	0.0100	0.0099	0.0339	0.0568	42.4								
		248.8	7.3408	86.8765	0.0054	0.2555	2.6439	0.0157	0.0176	0.0004	0.0078	0.0091	0.0408	9.6422	0.0332	105.8								
		320.5	7.3408	86.8765	0.0054	0.2555	2.6439	0.0157	0.0176	0.0004	0.0078	0.0091	0.0408	9.6422	0.0332	105.8								
		49.8	7.7452	19.8980	0.0392	0.0467	0.0383	0.0200	0.0008	0.0020	0.0100	0.0093	0.0333	0.1020	0.0931	16.4								
		Pasco	Compañía Minera S.A.A. Goquilayca	289.2	8.8878	41.8890	0.0289	3.5560	10.0856	0.0112	0.0831	0.0019	0.0100	0.1064	0.0450	39.0279	0.0252	88.8						
171.7	7.8631			21.6431	0.0108	0.0056	0.1922	0.1611	0.0011	0.0010	0.0041	0.0063	0.9000	1.2236	0.0051	56.7								
98.4	7.1611			80.1389	0.0680	0.6881	2.4750	0.3174	0.0540	0.0010	0.0288	0.0801	0.0545	31.7948	0.1356	32.5								
175.9	8.1162			13.3062	0.0145	0.0212	0.4568	0.0129	0.0032	0.0010	0.0089	0.0050	0.0500	0.6824	0.0039	58.1								
161.3	7.9333			13.3651	0.0135	0.0312	0.1820	0.0188	0.0019	0.0010	0.0042	0.0058	0.0506	0.1231	0.0112	53.2								
233.7	7.5239			53.8722	0.0229	4.3062	48.6997	0.0703	0.203067	0.0105	0.0081	0.0236	0.0162	3.7181	0.0366	76.8								
559.3	0.5498			93.7891	0.0843	24.0241	190.8632	0.1299	123.5027	0.0490	0.0385	0.0176	8.8222	0.0554	184.6									
2903.2	8.2857			515.2716	0.0843	146.3850	1139.7108	0.2985	0.0342	0.2985	0.0342	0.1599	0.0545	39.0279	0.2207	958.1								
4.9	5.7676			5.0000	0.0012	0.0006	0.0126	0.0003	0.0001	0.0005	0.0020	0.0004	0.0004	0.0149	0.0022	1.6								

Elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

- Aigner, D. J. y S. Chu (1968). On Estimating the Industry Production Function. *American Economic Review*, 58, 826-839.
- Birol, E., K. Karousakis y P. Koundouri (2006). Using economic methods and tools to inform water management policies: A survey and critical appraisal of available methods and an application. *Science of the Total Environment*, 365(1-3), 105-122.
- Charnes, A.; Cooper, W. y Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.
- Coelli, T., S. Perelman y D. van Lierde (2006). «CAP Reforms and Total Factor Productivity Growth: An Analysis of Belgian Farm-level Data». Documento preparado para la 26va Conference of the International Association of Agricultural Economists (IAAE) realizada del 12-18 de agosto. Australia.
- Coggins, J. S. y J. R. Swinton (1996). The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO₂ Allowances. *Journal of Environmental Economics and Management*, 30, 58-72.
- Consejo de la Minería Ambiental de la Columbia Británica. (2000). *Drenaje ácido de la minería. Minería y contaminación de agua en la Columbia Británica*. Canadá.
- De Borger, B. y K. Kerstens (1996). Cost Efficiency of Belgian Local Governments: A Comparative Analysis of FDH, DEA, and Econometric Approaches. *Regional Science and Urban Economics*, 26, 145-170.
- De Rosa, C. y J. Lyon (1997). *Sueños dorados, sueños envenenados*. Washington D. C.: Centro de Política Minera.
- Defensoría del Pueblo del Perú (2011). *Reporte de Conflictos Sociales N° 84*. Lima: Adjuntía para la Prevención de Conflictos Sociales y la Gobernabilidad.
- Estudios Mineros del Perú (2005). *Manual de Minería*. Lima.
- Fäber, M. y J. L. R. Proops (1991). National Accounting, Time and the Environment: A Neo-Austrian Approach. En R. Costanza (ed.), *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. Nueva York: Columbia University Press.
- Färe, R., S. Grosskopf, C.A.K. Lovell y C. Pasurka (1989). Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs Are Undesirable: A Nonparametric Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), 90-98.
- Färe, R., Grosskopf, S.C., Lovell, K. y S. Yaisawarng (1993). Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 75, 374-380.
- Färe, R., Grosskopf, S. (1998). Shadow pricing of good and bad commodities. *American Journal of Agricultural Economics*, 80, 584-590.
- Färe, R., Grosskopf, S., Noh, D.-W. y W. Weber (2003). Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice. Mimeo.
- Fraser Institute Annual (2010). Survey of Mining Companies. 2009/2010. Vancouver: Fraser Institute.

- Glave, M. y J. Kuramoto (2002). Minería, minerales y desarrollo sustentable en Perú. En *Minería, minerales y desarrollo sustentable* (pp. 529-591). Londres: CIIPMA, IDRC, IIED.
- Glave, M. y J. Kuramoto (2007). La minería peruana: lo que sabemos y lo que aún nos falta por saber. En *Investigación, políticas y desarrollo en el Perú* (pp. 135-181). Lima: GRADE.
- Gollop, F. M. y G. P. Swinand (1998). From Total Factor Productivity to Total Resource Productivity: An Application to Agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*, 80(3), 577-583.
- Greene, W. (1981). On the Asymptotic Bias of the Ordinary least Squares estimator of the Tobit Model. *Econometrica*, 49, 505-513,
- Greene, W. (2008). *Econometric Analysis*. Sexta edición. Nueva Jersey: Pearson-Prentice Hall.
- Hernández, F., A. J. Picazo y E. Reig (1997). *Análisis no paramétrico de eficiencia en presencia de output no deseables*. Documento de Trabajo 97-09. Valencia: Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas.
- Koundouri, P. (2000). *Three approaches to measuring natural resource scarcity: theory and application to groundwater*. Tesis de doctorado en Economía. Universidad de Cambridge.
- Krutilla, J.V. (1967). Conservation reconsidered. *American Economic Review*, 57(3), 777-786.
- Lee, J. D., Park, J. B., y T. Y. Kim (2002). Estimation of the shadow prices of pollutants with production/environment inefficiency taken into account: A nonparametric directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*. 64, 365-375.
- Lovell, C. (1993). Production Frontiers and Productive Efficiency. En H. Fried, C. Lovell y S. Schmidt (eds.), *The Measurement of Productive Efficiency* (pp. 3-67). *Techniques and Applications*. Nueva York: Oxford University Press.
- Ministerio de Economía y Finanzas - MEF (2011). *Informe Preelectoral Administración 2006-2011*. Lima.
- Ministerio de Energía y Minas - Minem (2006). *Inventario de pasivos ambientales mineros. Informe preliminar*. Lima.
- Ministerio de Energía y Minas - Minem (2008). *Anuario Minero 2008*. Lima.
- Ministerio de Energía y Minas - Minem (2010). *Perú. Anuario Minero. Annual Mining Report 2009*. Lima.
- Ministerio de Energía y Minas (2011). *Pasivos ambientales mineros*. Lima.
- Núñez-Barriga, A. e I. Castañeda-Hurtado (1999). Environmental Management in a Heterogeneous Mining Industry: The Case of Peru. En A. Warhurst (ed.), *Mining and the Environment*. Ottawa: International Development Research Centre.
- Organismo Supervisor de Inversión Energía y Minería - Osinergmin (2008). Balance de la fiscalización en el sector minero: febrero 2007-abril 2008. Lima.
- Organismo Supervisor de Inversión Energía y Minería - Osinergmin (2009). Conservación y protección del ambiente en la minería polimetálica. Resultados de la supervisión ambiental 2008. Gerencia de Fiscalización Minera. Lima.

- Organismo Supervisor de Inversión Energía y Minería (2008-2009). Bases de los Procesos de Selección N° 01-2008-OSINERGMIN-GFM, N° 02-2008-OSINERGMIN-GFM y N° 03-2009-OSINERGMIN-GFM. Lima.
- Pearce, D. W. (2001). *Lecture notes*. Londres: University College London.
- Pearce, D. W. y K. Turner (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Londres: Harvester Wheatsheaf.
- Picazo, A. *et al.* (2001). La medición de la eficiencia medioambiental. En A. Álvarez (coord.), *La medición de la eficiencia y productividad*. Madrid: Ediciones Pirámide.
- Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. Londres: Macmillan.
- Pittman, R. W. (1981). Issues in pollution control: Interplant cost differences and economies of scale. *Land Economics*, 57, 1-17.
- Pittman, R. W. (1983). Multilateral productivity comparisons with undesirable outputs. *Economic Journal*, 93, 883-891.
- Pollak, R. A., R. C. Sickles y T. J. Wales (1984). The CES-Translog: Specification and Estimation of a New Cost Function. *The Review of Economics and Statistics*, 66(4), 602-607.
- Rao, P. K. (2000). *Sustainable Development: Economics and Policy*. Malden: Blackwell Publishers.
- Reig-Martínez, E., Picazo, A. y F. Hernández (2001). The Calculation of Shadow Prices for Industrial Wastes Using Distance Functions: An Analysis for Spanish Ceramic Pavements Firms. *International Journal of Production Economics*, 69(3), 277-285.
- Salnykov, M. y V. Zelenyuk (2005). *Estimation of Environmental Efficiencies of Economies and Shadow Prices of Pollutants in Countries in Transition*. Documento de Trabajo. 05-06e. EERC Research Network, Russia and CIS.
- Shephard, R. W. (1970). *Theory of Cost and Production Functions*. Princeton: Princeton University Press.
- Swinton, J. R. (1998). At what cost do we reduce pollution? Shadow prices of SO₂ emissions. *Energy Journal*, 19, 63-83.
- Torres, V. (2007). *Minería artesanal y a gran escala en el Perú: el caso del oro*. Lima: Cooperación Solidaria.
- Verbeek, M. (2008). *A Guide to Modern Econometrics*. Tercera edición. Chippenham, Wiltshire: John Wiley & Sons.
- Worthington, A. y Dollery, B. (2000a). *Efficiency Aspects of NSW Local Governments' Domestic Waste Management Service*. Working Paper Series in Economics. School of Economic Studies. University of New England.