

# Documentos de Trabajo

Escuela de Negocios de  
la Universidad de Lima

Año 1, Nro. 2

Trabajador + Mineral + Manufactura + Industria + Exploración

# MINERÍA

Exploración + Estructura + Energía + Carbón

**Modelo instrumental  
para medir la sostenibilidad  
en la gestión de compañías  
mineras metálicas  
formales en el Perú**



**Modelo instrumental para medir la sostenibilidad en la gestión de compañías  
mineras metálicas formales en el Perú**

Dr. Ing. Max Schwarz  
Escuela de Negocios de la Universidad de Lima  
mschwarz@ulima.edu.pe

## Resumen

La investigación propone un modelo instrumental para medir la sostenibilidad de una mediana compañía minera formal peruana. Dicho modelo está basado en indicadores integrados de eficiencia, eficacia, productividad, confiabilidad, rentabilidad, transparencia, gestión geoeconómica, gestión ambiental, gestión social y gestión de riesgos de las operaciones mineras. Para ello, se realiza una revisión del desempeño de los factores operacionales desarrollados en compañías mineras metálicas formales peruanas entre los años 2000 y 2015, así como un análisis comparado de la literatura de referencia. La investigación concluye con el desarrollo de un nuevo modelo instrumental basado en los componentes clave agregados de conflictividad, productividad y rentabilidad sobre la base del diseño originalmente propuesto, lo que permite reflejar mejor la sostenibilidad de las compañías mineras en el mercado.

*Palabras clave:* sostenibilidad (Q56), conflictos mineros (Q340), procesos (M150), control corporativo (L210), productividad (O470)

*JEL Classification:* L11, L13, L20, L21, M15, O470, Q340 y Q56

*Disclosure:* Las opiniones, errores u omisiones en este trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

**Modelo instrumental para medir la sostenibilidad en la gestión de compañías  
mineras metálicas formales en el Perú**

El problema de la sostenibilidad de las operaciones mineras es complejo y depende de diversos factores como el tipo de las operaciones extractivas; la naturaleza del proceso metalúrgico; la naturaleza, tamaño y sistema laboral de la organización; las relaciones con las comunidades, vecinos y partes interesadas; la complejidad y sensibilidad del entorno ambiental; los métodos de explotación y beneficio; la naturaleza de la subcontratación especializada; el conocimiento, estilo y estrategia de gestión de la gerencia; las restricciones legales y regulatorias de aplicación; el precio de los minerales; los costos de operación; las condiciones económicas; las capacidades tecnológicas, operativas y humanas de la empresa; los factores del entorno y similares, como los principales factores que afectan la sostenibilidad de las compañías mineras.

La naturaleza de las operaciones extractivas requiere para su control la adopción de un enfoque de procesos basado en el control del ciclo de minado (perforación, voladura, carguío, transporte) y de los servicios especializados que la mina requiere (ventilación, bombeo, sostenimiento, relleno, etc.). De esta manera, el tiempo del ciclo (TC) queda definido como el tiempo total que toma el proceso para producir una tonelada (t) de mineral, mientras que el *lead time* (LT) queda definido como el tiempo necesario para producir esa tonelada (t) y entregarla a la planta para su procesamiento.

Para calcular el TC tenemos:

$$TC = Tp + Tv + Tcmd + Tt + Tsm$$

Donde:

Tp: tiempo de perforación

Tv: tiempo de carguío de taladros y voladura

Tcmd: tiempo de carguío de mineral y desmonte

Tt: tiempo de transporte de mineral hasta la boca de mina

Tsm: tiempo total de servicios a mina

De igual forma para calcular el LT tenemos:

$$LT = TC + Tmp + Tb + Te$$

Donde:

Tmp: tiempo de transporte de boca de mina a planta

Tb: tiempo en balanza

Te: tiempo de entrega en tolva de gruesos

En este contexto, definimos el *takt time* (TT) como el ritmo con el cual la planta requiere toneladas de la mina y es calculado de la siguiente manera:

$$TT = \frac{\text{Horas disponibles}}{\text{Demanda}}$$

En forma análoga, el número de ciclos requeridos (N) se calcula de la siguiente manera:

$$N = \frac{TT}{TC}$$

De igual forma, la naturaleza del proceso metalúrgico requiere para su control la adopción de un enfoque de procesos basado en el control del ciclo de beneficio del mineral (*blending*, chancado, molienda, concentración, lixiviación, adsorción, desorción, refinación, etc.) que depende específicamente del tipo de mineral que se procesa. En este caso, el tiempo del ciclo TC es igual al tiempo del beneficio del

mineral hasta obtener el producto final, sea concentrado de mineral para la venta o sea metal fino para la venta. Se calcula de la siguiente manera:

$$TC = Tbl + Tch + Tml + Tcm + Tlx + Tad + Tref$$

Donde:

Tbl: Tiempo del proceso de *blending*

Tch: Tiempo de chancado

Tml: Tiempo de molienda

Tcm: Tiempo de concentración en celdas de flotación

Tlx: Tiempo de lixiviación

Tad: Tiempo del proceso de adsorción y desorción

Tref: Tiempo en refinería

A partir de estos cálculos, se puede determinar el tiempo del ciclo del beneficio del mineral y deducir el tiempo efectivo de procesamiento para poder planear la sostenibilidad de la planta en el largo plazo considerando factores clave como el mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo; la renovación por obsolescencia; la modernización y automatización de las instalaciones; y los proyectos de mejora en la recuperación metalúrgica que puedan desarrollarse para optimizar el proceso de beneficio en la planta de la compañía minera.

La naturaleza, tamaño y sistema laboral de la organización es un factor que afecta la sostenibilidad del negocio minero, puesto que las corporaciones que manejan múltiples minas y plantas se vuelven esencialmente complejas en su estructura funcional y administrativa, lo que afecta directamente los esfuerzos de control de las organizaciones. De igual forma ocurre con los sistemas laborales con los cuales trabaja

el personal de las operaciones (sistemas 20x10, 14x7, 4x3, o similares). Ello puede afectar sensiblemente los procesos de aprendizaje, la curva de experiencia, el grado de concentración, la motivación y otros factores similares que inciden sobre la productividad laboral de las operaciones, su competitividad y, por lo tanto, su sostenibilidad para el largo plazo.

Las relaciones con las comunidades, vecinos y partes interesadas constituyen un factor gravitante que afecta la sostenibilidad del negocio minero, pues definen directamente su existencia en el mercado. Este proceso ha representado un cambio radical en la manera de entender el negocio minero desde inicios de 1990 y es que la variable social antes de esa fecha no era parte de la ecuación de negocio minero, pero luego se ha presentado como la pieza clave que define la existencia o no del proyecto, en cuanto sea factible desarrollarlo.

Se requiere, para ello, lograr un acuerdo social, el cual supone identificar previamente las partes interesadas; alinear sus intereses comunales, profesionales y personales; establecer vínculos efectivos con ellas basados en la confianza; incorporarlos al modelo de negocio formal asociándolos en cuanto sea posible, generando desarrollo y progreso con oportunidades de negocio vinculadas a la presencia local de la mina para garantizar la sostenibilidad de largo plazo del negocio.

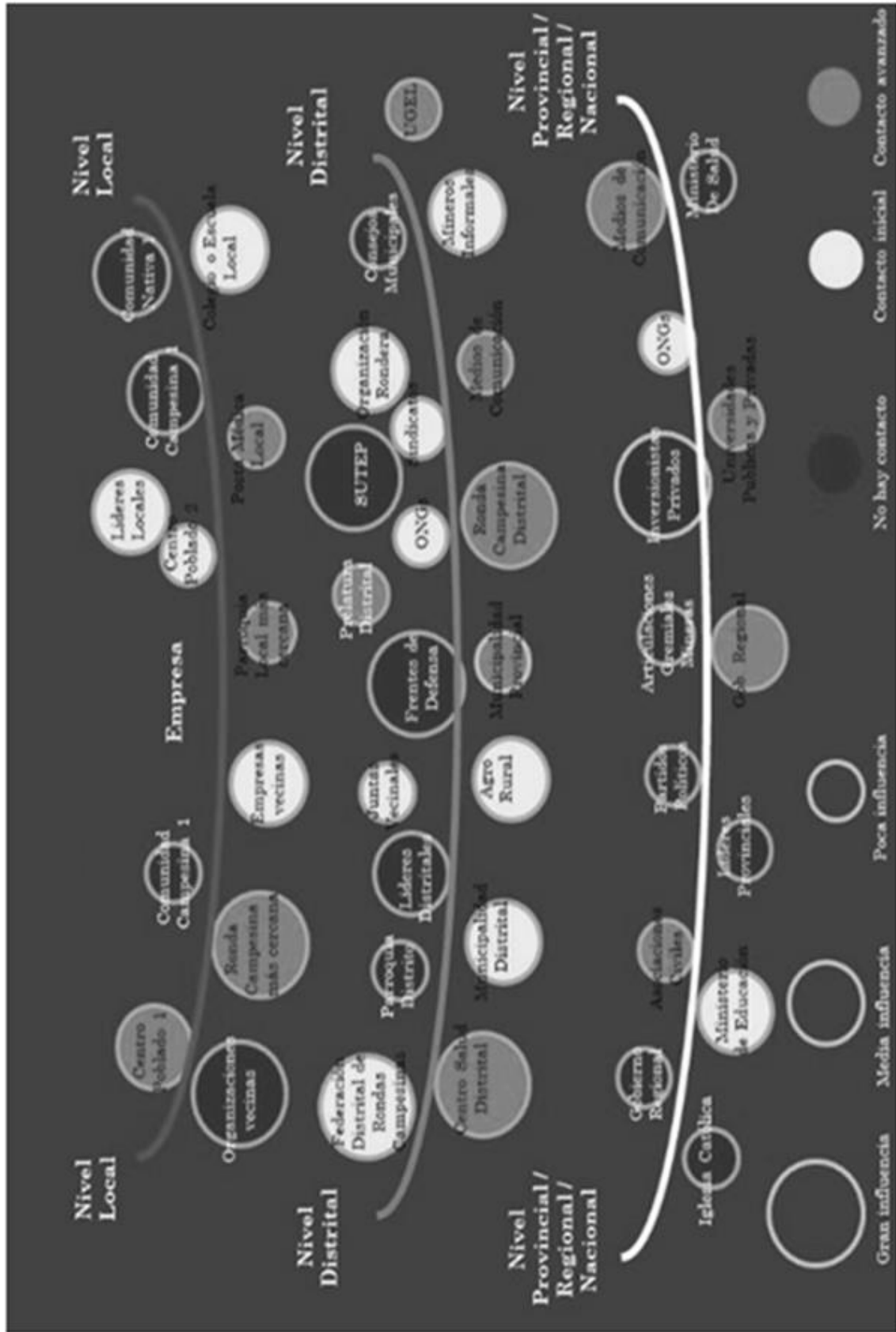


Figura 1. Mapa de actores sociales. Elaboración propia, con datos tomados del blog de Max Schwarz (max-schwarz.blogspot.com).



Los conflictos sociales constituyen el principal freno para la inversión minera, y sus dimensiones pueden ser múltiples y complejas. Por un lado, se encuentra el tema de la propiedad, que define parte del conflicto y pocas veces es claro. En el Perú, tenemos serios problemas por la naturaleza de la propiedad, puesto que, desde el punto de vista legal y constitucional, el Estado es el propietario del subsuelo y la riqueza mineral que allí existe, mientras que la propiedad superficial puede ser legalmente considerada como propiedad privada.

La propiedad del subsuelo y la riqueza mineral que ahí se encuentre es normalmente concesionada por el Estado peruano a través de la llamada *concesión minera*, la cual es irrevocable en tanto el concesionario cumpla con las obligaciones para mantenerla bajo el pago de tasas insignificantes en términos de dólares por hectárea-año: USD 3/Ha-año para casos regulares, USD 1/Ha-año para pequeños productores mineros y USD 0.5/Ha-año para el caso de los mineros artesanales (MEM 2014). En tal sentido, coexisten derechos diferenciados de concesión minera con derechos sobre la propiedad superficial en propietarios generalmente distintos. Por ello, teniendo en cuenta la cosmovisión de un ciudadano que es propietario individual, es difícil dar a entender esta distinción sobre el recurso existente en el terreno superficial que forma parte de su propiedad formal.

En múltiples ocasiones, la propiedad real se superpone, a su vez, a los derechos formales de superficie. En los casos donde el propietario superficial es una comunidad, la situación se complica aún más, debido a varias razones complejas como la designación formal o informal de poseedores individuales (integrantes o no de la comunidad) y por la presencia eventual o permanente de mineros informales que usurpan terrenos de la comunidad, lo que genera conflictos internos adicionales al conflicto extractivo que se desarrolla en el entorno de un yacimiento mineralizado. En

este contexto, las comunidades tienen un problema complejo adicional: la falta de representatividad y legitimidad de sus dirigentes. Ello genera que las decisiones deban tomarse prácticamente ante acuerdos plenarios, con casi todos sus miembros presentes (lo que es inmanejable en cualquier negociación seria), pues la comunidad simplemente no confía en sus dirigentes ante la evidencia estadística de una gran tradición de corrupción de estos en una etapa temprana o tardía de su mandato. Así, intereses particulares generan pugnas al interior de las propias comunidades y la negociación para reducir el conflicto se enfrenta a una barrera difícil de superar para poner en valor el yacimiento mineralizado.

A este problema, se suma la excusa ambiental, real o ficticia, que se utiliza para legitimar un conflicto social. Esta excusa es real a partir de la experiencia de la minería del pasado, la cual ha dejado pasivos ambientales visibles que no han sido correctamente gestionados (en el pasado, el principal minero era el propio Estado peruano), y real también por la existencia de empresarios mineros aún hoy poco sensibles a las consecuencias ambientales que sus operaciones generan o pueden generar. De igual forma, esta excusa es ficticia cuando se hace frente a la predicción manipulada de impactos ambientales de proyectos que aún no se ejecutan o de operaciones actuales que sí han incorporado debidamente la variable ambiental a sus diseños y generan un mínimo impacto ambiental, pero que igualmente se usan como excusa para definir daños inexistentes que permitan legitimar un conflicto social. El problema se vuelve aún más complejo cuando aparecen organizaciones no gubernamentales (ONG) antimineras con financiamiento externo, que dependiendo del caso utilizan a las poblaciones para frenar la inversión en el campo mencionado.

El problema del conflicto social y su impacto en la sostenibilidad del negocio minero se vuelve clave para destrabar la inversión y, por ello, debe enfrentarse a partir

de la realidad de la contribución social que genera la base del conflicto. En ese sentido, se requiere identificar la presencia de las comunidades para entender el marco de su actuación y, de haber propietarios, estos deben ser incluidos en el negocio como socios reales que aportan la propiedad superficial para el desarrollo del modelo de negocio minero.

Igualmente, la modelación minera debe incluir la estimación del monto del retorno de la inversión y de la contribución tributaria global del proyecto para actualizar su valor financiero y negociar su adelanto con el Estado peruano. De esta manera, se genera valor agregado social y sostenibilidad económica de largo plazo alrededor de los proyectos mineros. Con esos fondos, el Estado debe hacer la parte que le corresponde en relación con las necesidades de las poblaciones vinculadas a los proyectos mineros. En ese contexto, es necesario entender que los programas de desarrollo socio-comunal de las empresas mineras son complementarios a la inversión estatal y no la reemplazan de ninguna manera; además, por su naturaleza, deben ser enfocados con retornos claros para la mejora de la sociedad como parte de la responsabilidad social empresarial que las empresas mineras tienen que realizar dentro del desarrollo de la sostenibilidad de su modelo de negocio.

Para complementar el análisis de la naturaleza de los conflictos sociales asociados a los proyectos mineros —tal como lo proponen Ballard y Banks (2003); Gerth, Küster, Luckey y Engels (2013); y Su, Zhu y Zeng (2014)— se requiere que al inicio de las operaciones de la mina o en una etapa muy temprana del ciclo de vida de esta, se genere un modelo de negocio alternativo de similar rentabilidad futura (como el agroexportador, el forestal, etc.), que sea factible, de manera tal que, al finalizar el desarrollo del modelo de negocio minero y, cuando la mina deba iniciar su proceso de cierre, este otro modelo alternativo haga sustentable la salida de la mina del escenario

en el contexto de la expectativa social y comunal de largo plazo. Es decir, el modelo debe contemplar qué sucede en el largo plazo con las comunidades cercanas cuando la mina salga del escenario y deba cerrar (las minas tienen una corta vida útil en función a sus reservas), ya que, si no se genera un modelo alternativo sustentable, entonces el conflicto aumenta en la etapa de cierre y la mina sencillamente no debe cerrar dejando un pasivo perpetuo en custodia de las comunidades. Ese aspecto y la reserva de fondos para el cierre de mina deben ser incluidos en la modelación económica de los nuevos proyectos mineros para su futura sostenibilidad .

La complejidad y sensibilidad del entorno ambiental es otro factor que afecta la sostenibilidad del negocio minero, puesto que el tema ambiental es el principal argumento para dar legitimidad a los conflictos y al cuestionamiento del modelo de negocio minero a nivel mundial. Por ello, es particularmente importante tener en cuenta que, para los proyectos antiguos, se requiere una apropiada adecuación ambiental y para los proyectos nuevos se requiere el desarrollo de estudios de impacto ambiental (EIA) consistentes para poder garantizar una protección ambiental efectiva en el entorno de corto, mediano y largo plazo de las operaciones mineras.

Con respecto a los EIA, debemos entender previamente que no se trata solo del documento técnico del cálculo de los impactos de un proyecto (con un estudio como mínimo a nivel de factibilidad) sobre una línea base determinada (con un completo estudio de línea base ambiental [ELB]), sino que estos estudios son principalmente una combinación entre un documentado estudio técnico y un engorroso proceso de trámites regulatorios que permiten convertirlo en un instrumento de gestión de cumplimiento obligatorio una vez aprobado con el regulador. En ese contexto, tenemos en la práctica una serie de problemas, pues los procesos intermedios de socialización y cálculo, así como tiempos del trámite son normalmente extensos: demoran en condiciones normales

de 1 a 3 años solo para lograr aprobar un EIA en el Perú en el caso de la mediana minería.



Figura 2. Estudio de línea base ambiental (ELB). Elaboración propia.

En el proceso de aprobación de un EIA, uno de los principales problemas es la pobreza del ELB que le sirve de sustento, debido a múltiples razones: carece de un periodo mínimo aceptable (2 años) de data colectada de fuente primaria para ver las estacionalidades y los ciclos ambientales, el muestreo no es suficiente, los modelos hidrogeológicos no son completos o no cuentan con las perforaciones y muestreos que permitan sustentarlo, y normalmente adolece de imprecisión en el desarrollo de las líneas bases temáticas. De esta manera, es de esperar que el EIA tenga, durante su proceso de aprobación, múltiples ajustes para formar una idea ambiental completa de la línea base ambiental antes del inicio de las operaciones mineras.

Otro de los problemas es que muchas veces las empresas mineras pretenden aplicar un proyecto que no ha completado su etapa de factibilidad a la incipiente línea base presentada (lo hacen para ganar tiempo frente al extenso trámite), con lo cual la incertidumbre respecto a la ubicación, tamaño y características de los componentes se vuelve variable; y cuando se pretende ajustar en el camino, se genera una mayor confusión en el regulador y en la comunidad.

A pesar de lo mencionado, el problema principal radica en la socialización del EIA desde el involucramiento temprano de los pobladores en la construcción de la línea base ambiental, debido a que muchas veces se contratan consultores golondrina, que toman datos sin mayor explicación a pesar de tener permisos formales. Esto constituye un gran problema, pues la línea base debe armarse en conjunto entre los consultores, los técnicos de las compañías y las comunidades para entender la lectura de la línea base ambiental previa a la existencia de la mina. El paso siguiente debe ser la explicación clara del proyecto, en términos simples, y lo que representa económica, social, ética y ambientalmente para las poblaciones cercanas en el área de influencia del proyecto. La explicación y difusión debe darse en forma completa y participativa, recogiendo las opiniones, experiencias y recomendaciones de todas las partes interesadas antes de completar la modelación del EIA final, que será sometido al trámite formal de aprobación. La sostenibilidad de la mina depende de un EIA aprobado; sin este, el proyecto no puede desarrollarse, pues la autorización de operación depende del mencionado estudio y de la entrega de una ingeniería de detalle completa antes del inicio de las operaciones mineras.

Los métodos de explotación y beneficio constituyen otro factor que afecta la sostenibilidad del negocio minero, se trate de una operación a tajo abierto, en socavón como minería subterránea, o de forma mixta, según el diseño preparado para el

yacimiento mineralizado. En ese contexto, es necesario tener en cuenta que la sostenibilidad depende en gran medida del diseño de la mina, de manera tal que si aplicamos a una mina de tajo abierto deberemos tener consideraciones especiales para ciclar la distancia mina-planta y la distancia mina-botaderos, minimizando las rutas en la mayor medida posible y teniendo especial cuidado con la selección y caracterización apropiada de los materiales de mina. En particular, el desmonte que cuente con potencial generación de acidez (Acid Rock Drainaje o ARD) debe ser caracterizado apropiadamente desde la investigación preliminar de los taladros que dieron origen al cuerpo mineralizado en los simuladores; este proceso permite identificar material de desmonte ARD que debe ser encapsulado.

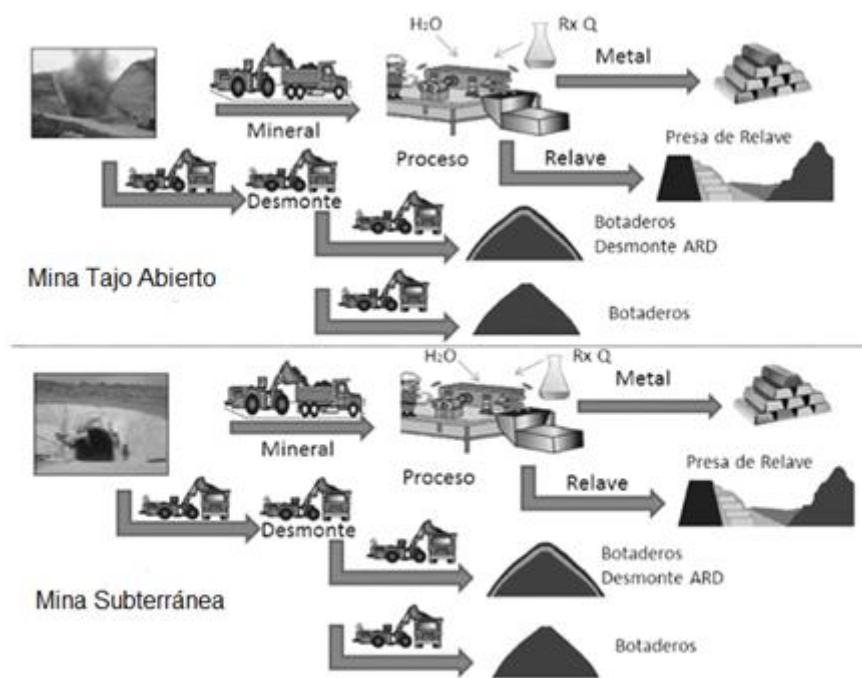


Figura 3. Proceso minero convencional. Elaboración propia.

La naturaleza de la subcontratación especializada es otro factor que afecta la sostenibilidad del negocio minero, dado que en la práctica la tendencia moderna es que el propietario de la mina únicamente proporcione los diseños, los modelos y los estándares de operación, así como los controles; pero la ejecución y el desarrollo están a

cargo de empresas contratistas especializadas. Este proceso de subcontratación ha generado la existencia de empresas especializadas en laboreos mineros cubriendo todas las etapas del proceso sobre la base del pago de una tarifa por cubo de mineral extraído o por metro de avance, según sea el caso. Este modelo de tarifas es, a la larga, perverso porque la compañía minera siempre va a presionar por reducir la tarifa en la búsqueda de su competitividad y el contratista va a reducirla tarde o temprano, a costa de sacrificar calidad, seguridad, empleo, servicios o protección ambiental, lo cual no genera un modelo beneficioso para el largo plazo de la relación contratista-empresa (Loosemore, 2014; Buessing y Boden, 2016).

La distorsión en el modelo de tarifas se hace visible y se traslada directamente a la fuerza laboral. Si a ello se suma que la compañía minera mantiene diferencias significativas en los niveles de sueldos y salarios respecto a los trabajadores de las compañías contratistas y que eventualmente los trabajadores del contratista son migrados a la empresa principal cuando esta lo considera necesario, entonces el problema de fondo se acumula y se genera una distorsión del modelo que, en la mayoría de los casos, solo funciona cuando la tarifa es conscientemente actualizada conforme ambas partes alcanzan ciertos estándares. Sin embargo, esto sucede en la menor parte de los casos.

De esta forma, las compañías mineras modernas procuran, más bien, migrar hacia modelos de contratos de alianza antes que de tarifas. En los modelos de alianza, se establecen ciertos entregables (tonelajes y leyes mínimas alcanzables) para el pago de una tarifa mínima; a partir de estos, por cada dólar que se ahorre o por cada tonelada de material extra que pueda entregarse incrementando la productividad, se comparten los beneficios obtenidos en proporciones especificadas entre el contratista y la empresa minera (50-50, 60-40, 70-30, etc.). Esto genera un efecto virtuoso y es que ahora el



contratista se concentra principalmente en generar eficiencia, seguridad, calidad y productividad para alcanzar los resultados y procurar así mejoras concretas y tangibles incrementando su rentabilidad y la de la compañía minera principal.

El proceso de subcontratación especializada ha transformado también la manera de mirar la logística de mina, ya que ahora se compran soluciones y no productos. Por ejemplo, el mecánico de la mina ya no requiere componentes como filtros, fajas y aceite por separado (antes tenía contenedores llenos de cada proveedor, en la modalidad de comodato); ahora, más bien, requiere un *pack* integrado (*kit* de los 20,000 km, *kit* de los 50,000 km, etc.) en el que no le sobra nada: tiene todo lo que requiere para el cambio e incluso puede descartar ahí los repuestos gastados. Así, el proveedor ahora le proporcionará una solución y no solo productos. Este cambio ha permitido la existencia de proveedores integradores que brindan sostenibilidad a la logística minera moderna con costos más competitivos.

Otro de los factores que afecta la sostenibilidad del negocio minero es el conocimiento, el estilo y la estrategia de gestión de la gerencia, la cual ha tenido una evolución desde un estilo antiguamente muy vertical de dirección hacia un estilo más horizontal y plano, con mayor acercamiento entre la gerencia y el personal colaborador. El estilo del gerente define la cultura de la gestión y la naturaleza e intensidad de los esfuerzos de control en las organizaciones. Con esto, se vuelve clave para la sostenibilidad el desarrollo de una política de transparencia con información clara y precisa, de modo que mantenga el respeto y la apropiada comunicación interna y externa hacia todas las partes interesadas, incluyendo el componente humano interno y externo, que se encuentre asociado con el modelo de negocio minero.

De igual forma, las restricciones legales y regulatorias de aplicación constituyen otro factor que afecta la sostenibilidad del negocio minero, puesto que se trata de un

sector altamente regulado con la aplicación de estrictos requisitos legales por parte de la autoridad regulatoria. En el Perú, es aún más complicado, debido a la necesidad de una opinión técnica sectorial que da origen a trámites en múltiples ventanillas (Instituto Nacional de Recursos Naturales [Inrena], Dirección General de Salud Ambiental [Digesa], Autoridad Nacional del Agua [ANA], Ministerio de Agricultura [Minagri], etc.) y no solo en el Ministerio de Energía y Minas (Minem) como tendría que ser. Todo esto da lugar a la existencia de 426 pasos en 9 ventanillas distintas, que son necesarias para poner a operar una mina en condiciones normales (Schwarz, 2013).

Finalmente y de manera decisiva, como lo indican Chen, Lee y You (2014); Fan, Fang y Lu (2014); y Bialkowski, Bohl, Stephan y Wisniewski (2015), es claro que el precio de los minerales constituye un factor gravitante que afecta la sostenibilidad del negocio minero y representa una variable no controlable para las operaciones mineras, las cuales frente a cualquier escenario de precios deben concentrarse casi exclusivamente en el control de los costos para ser competitivos. El precio de los minerales es variable y, cuando inicia ciclos a la baja, las compañías mineras deben reducirse, cancelar proyectos, minimizar sus costos y hasta cerrar para evitar cargar con costos que no pueden manejar.

Es importante analizar el comportamiento de los precios en el mercado mundial, como puede apreciarse en la figura 4, donde aparecen ciclos de alta y de baja, que requieren ser explicados en el entorno al negocio minero. Este proceso permite diferenciar claramente el comportamiento del precio del oro del resto de metales, puesto que el valor de mercado del oro depende principalmente del precio del mercado de metales de Londres, y su movimiento refleja las transacciones de bancos centrales, fondos de inversión y similares sobre la base de reserva para respaldo de la emisión monetaria, sin embargo, es necesario complementar los *stocks* del metal precioso con un creciente

consumo de oro físico principalmente por parte del consumo en la India, donde existe una tradición de consumo de oro personal y donde el metal es usado como joya y no es guardado en bóvedas como medio de respaldo económico o financiero.

Igualmente, debemos añadir la compra mundial de concentrados de oro por parte de China. Estos sirven al gigante asiático como medio de pago para la obtención de petróleo y gas en la compra a países que no aceptan dólares. En el caso del resto de metales, el precio depende principalmente de China, ya que cuando este país empieza a comprar para renovar su *stock* base, entonces los precios suben y cuando satura su *stock* y deja de comprar, entonces los precios se desploman y caen en un ciclo continuo que depende del crecimiento de la demanda del gigante asiático. Se trata de un carrusel de precios que el minero no puede controlar y debe asumir en riesgo del entorno de sus operaciones.

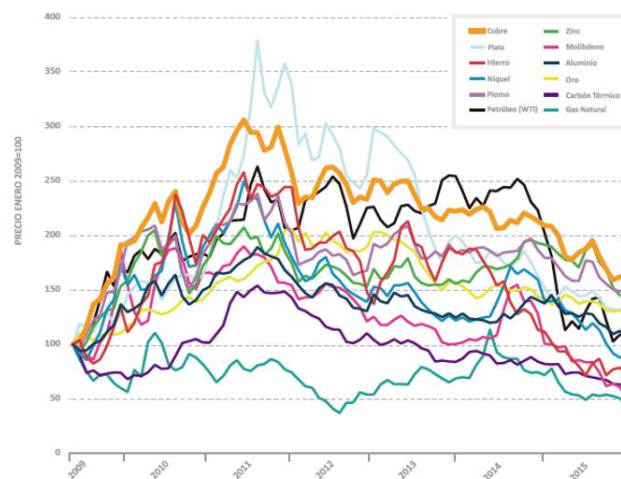


Figura 4. Evolución del precio de los metales. Tomado de World y London Metal Exchange, en Guzmán y Marañón (2015).

## Metodología

La presente investigación tiene como objetivo generar un indicador de sostenibilidad por medio de un modelo instrumental que sea capaz de implementarse por las empresas mineras, sin mayor ayuda que el modelo mismo, sobre la base de los aspectos tratados

en las consideraciones previas para el conocimiento de gestión de las operaciones mineras. La investigación desarrollada es de tipo aplicada, de nivel explicativo, diseño no experimental y enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), puesto que pretende generar un estándar que pueda ser replicado en organizaciones mineras a efectos de identificar, controlar y mejorar su sostenibilidad para el largo plazo de sus operaciones. La recolección de datos incluye información geológica, financiera y operacional histórica documentada de yacimientos minerales de las bases de datos de Hochschild, Volcan, Milpo, Río Alto-Tahoe disponibles entre los años 2000 y 2015. El indicador propuesto se ha configurado de la siguiente manera:

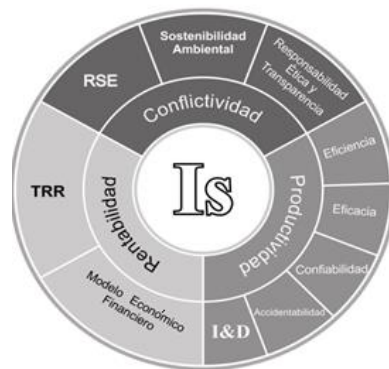


Figura 5. Indicador de sostenibilidad propuesto. Elaboración propia.

### Marco teórico

El marco teórico desarrollará los aspectos necesarios para comprender el problema de la sostenibilidad mediante la conceptualización de eficiencia, eficacia, efectividad, productividad, confiabilidad, accidentabilidad, relación con el medio ambiente, rentabilidad, conflictividad, responsabilidad ética y transparencia, así como la necesaria sostenibilidad geoeconómica que las compañías mineras deben exhibir en las distintas etapas de su ciclo de vida. A continuación, desarrollaremos estos conceptos:

### *Sostenibilidad*

La sostenibilidad es la capacidad para actuar de manera sustentable en el largo plazo de las operaciones de una compañía minera. La sostenibilidad es una consecuencia de la autonomía de las operaciones cuando alcanzan un grado que les permite ser simultáneamente eficientes, eficaces, productivas, confiables, rentables, transparentes, limpias y seguras en términos tecnológicos, económicos, ambientales, operacionales, éticos y sociales.

### *Eficiencia*

La eficiencia es la capacidad de utilización de los recursos. Está particularmente asociada a los recursos tiempo y costo. La eficiencia de las compañías mineras se mide de la siguiente manera:

$$Eficiencia (\%) = \frac{Tiempo\ programado}{Tiempo\ real}$$

En este contexto, el tiempo real es igual al tiempo del ciclo. Como podemos apreciar en la ecuación de eficiencia, si el tiempo del ciclo se incrementa, entonces, la eficiencia disminuye; en cambio, si el tiempo del ciclo se reduce, entonces, la eficiencia aumenta. Esto significa que el control del tiempo del ciclo para adecuarse al tiempo estándar de diseño se vuelve clave en el logro de una eficiencia apropiada para las operaciones mineras.

*Eficacia*

La eficacia es la capacidad de alcanzar resultados o metas. Para el caso de la investigación, consiste en entregar el volumen y la calidad de mineral a las plantas (combinación meta requerida por el diseño en términos de tonelaje-ley) para cumplir el programa de producción de mina que el diseño requiere.

Para ello, es necesario entender la eficacia en el contexto de la complejidad de la mina. Allí, dado el plan de operaciones, se requiere habilitar tajos y sectores de los cuales se pueda lograr una combinación apropiada de tonelajes y leyes. En ese contexto, algunos tajos pueden aportar tonelaje y otros pueden aportar ley, de manera que la combinación genera el *mix* tonelaje-ley que la mina requiere para cumplir con sus programas de producción de mineral de cabeza.

La eficacia de diseño queda calculada de la siguiente manera:

$$Eficacia (\%) = \frac{Logro\ obtenido}{Meta\ propuesta}$$

La producción de mineral, según el programa de diseño, también da origen al proceso de priorización de los tajos. Es evidente que no todos los tajos son iguales, por lo que el mecanismo de priorización de tajos debe lograr encontrar cuáles serán designados como “tajos reguladores”. Ellos requieren mayor cuidado para no fallar y exigen de la planificación los mejores recursos disponibles, pues son los que aportan la diferencia en caso de perder ciclo en el proceso de minado con miras a completar la meta requerida por los planificadores de la mina.

### *Efectividad*

La efectividad es una combinación de eficiencia y eficacia, y se representa de la siguiente manera:

$$Efectividad = Eficiencia * Eficacia$$

La efectividad representa el logro de los resultados deseados mediante la utilización apropiada y racional de los recursos disponibles para lograr dichos resultados. Se trata de una combinación apropiada de esfuerzos para conseguir mejoras racionales en el desempeño de la organización, el cual se ve reflejado directamente en el valor de la compañía y su desempeño interno y externo, en el entorno donde opera la organización.

### *Productividad*

La productividad es la capacidad de obtener productos a partir de los recursos disponibles. Se define de la siguiente forma:

$$Productividad = \frac{Producto}{Recursos}$$

La productividad constituye la clave del logro de valor de las organizaciones para obtener mayores rendimientos y resultados a partir de los recursos disponibles con una consecuente reducción de los costos y desperdicios asociados a los procesos, lo que genera un mayor valor para la compañía (Bleischwitz, 2001; Steindel y Stiroh, 2001; Lindsay, 2004).

La productividad puede ser enfocada desde diversos aspectos gestionables dentro del modelo de negocio minero. Por ejemplo, en la productividad laboral (TM/Hombre-guardia), la productividad eléctrica (TM/Kw-h), la productividad de la extracción (Kg metal/TM extraídas), etc., la productividad total puede ser calculada a partir de la productividad de los factores de acuerdo con la teoría económica básica, en tanto se conozca la contribución individual de cada factor en la producción de las operaciones. En ese contexto, para la gestión, es realmente relevante concentrarnos en la variación de la productividad más que en la productividad misma, de manera que se pueda lograr incrementos de productividad que agregan valor a la compañía. Estos incrementos pueden calcularse de la siguiente manera:

$$\Delta P = (P_f - P_i) / P_i$$

Donde:

$\Delta P$ : Variación de la productividad

$P_f$ : Productividad final

$P_i$ : Productividad inicial

Los incrementos en la productividad ( $\Delta P$ ) tienen como consecuencia directa la generación de una mayor producción, rendimiento y rentabilidad, y menores costos, desperdicios y riesgos, así como una conveniente reducción global de los tiempos de ciclo, lo que se traduce en una aceleración del ciclo de caja que agrega valor a las organizaciones, en general, y a las empresas mineras, en particular.



### *Confiabilidad*

La confiabilidad es la capacidad de hacer frente a las fallas y se calcula bajo una escala de 0-100% a partir de la ecuación de distribución de Weibull:

$$C = e^{-t/MTBF}$$

Donde:

C: Confiabilidad expresada en porcentaje (%)

e: Constante universal equivalente al número 2.718281828459...

t: Tiempo de operación

MTBF: Tiempo promedio entre fallas (*Mean Time Between Failures*)

La determinación de la confiabilidad requiere hacer previamente una definición precisa del concepto de falla, es decir, si definimos como falla un quiebre de atención en un servicio, entonces podremos calcular la confiabilidad de los servicios; si definimos como falla un desperfecto en un equipo, entonces tendremos el cálculo de la confiabilidad de los equipos o de su mantenimiento; si definimos como falla la ocurrencia de un accidente, entonces tendremos el cálculo de la confiabilidad de la seguridad. Todo depende de nuestra precisa definición de falla.

En ese contexto, como puede apreciarse claramente, si el tiempo promedio entre fallas (MTBF) es muy largo (es decir, MTBF tiende a infinito), entonces el denominador de la fracción de la ecuación de confiabilidad tiende a cero. En ese caso, la confiabilidad es máxima (C = 100%). Análogamente, si el MTBF es muy bajo (falla

continuamente o falla frecuentemente), entonces la fracción no tenderá a cero y por lo tanto la confiabilidad final será consecuentemente muy baja.

### *Accidentabilidad*

La accidentabilidad es un indicador del nivel de riesgo de seguridad y salud ocupacional en el que opera una organización. Dicho indicador depende directamente de la combinación entre frecuencia y severidad de la ocurrencia de accidentes en las operaciones de una organización. El índice de accidentabilidad (IA) puede calcularse de la siguiente manera:

$$IA = IF \times IS$$

Donde:

IF: Índice de frecuencia

IS: Índice de severidad (IS)

Los índices de frecuencia y severidad se calculan, a su vez, de la siguiente manera:

$$IF = \frac{\text{Número de accidentes} * 1,000,000}{\text{Número total de horas – hombre trabajadas}}$$

$$IS = \frac{\text{Número de días perdidos por accidentes} * 1,000,000}{\text{Número total de horas – hombre trabajadas}}$$

### *Sostenibilidad ambiental*

La sostenibilidad ambiental es la capacidad de interactuar con el entorno en el que opera la organización. Incluye el agua, el aire, el suelo y todos los factores ambientales que

conforman el entorno o las áreas de influencia de las operaciones de la organización. Esta sostenibilidad se logra con la inserción técnica de variables ambientales a la planificación. De este modo, puede contarse con diseños apropiados para todos los oponentes del proyecto considerando su elección de emplazamiento, construcción, operación y cierre con seguros geoquímicos, físicos y de valorización ambiental para el largo plazo (Hilson y Basu, 2003; Voulvoulis, Skolout, Oates y Plant, 2013; Asif y Chen, 2016).

En este contexto, las minas han avanzado hacia diseños de componentes emplazados en entornos que toman en cuenta las condiciones del futuro cierre de la operación, el diseño de operaciones en circuito cerrado con altos grados de reciclaje, la gestión de aguas neutras, el manejo de materiales peligrosos y el tratamiento apropiado de los efluentes para lograr una sostenibilidad ambiental apropiada.

Es claro que la sostenibilidad ambiental planeada para proyectos nuevos es un requisito del negocio y, como tal, puede perfectamente incluirse en el modelo económico del negocio minero, especialmente para el caso de las operaciones nuevas. En cambio, en el caso de los pasivos ambientales mineros, provenientes de operaciones antiguas, se requiere una recuperación más compleja porque, en muchos casos, cerrar apropiadamente esas operaciones requiere inversiones que pueden llegar a representar hasta un tercio de su CAPEX original. Esto, en un contexto donde el operador original ya no existe o era el Estado, es complejo de desarrollar, mucho más cuando la mina está cerrada y ya no genera fondos. En estos casos, se requiere el desarrollo de nuevos fondos de inversión y programas técnicos de cierre de minas, combinados entre el Estado, que originalmente era el propietario (donde sea el caso), y los inversionistas privados (donde aplique), que al adquirir nuevos activos mineros se encarguen a su vez

de remediar el pasivo ambiental de las concesiones que adquieren y de esta manera los inserten en la ecuación económica del modelo de negocio minero.

### *Rentabilidad*

La rentabilidad es la capacidad de obtener renta a partir del capital contable inicial (Return on Equity o ROE) o bien la generación de renta que pueda obtenerse a partir de la capacidad de gestión que puedan ofrecerse de los activos (*Return on Assets* o ROA, o *Return on Investment* o ROI). Las ecuaciones generales para medir la rentabilidad son las siguientes:

$$ROE = \frac{\text{Utilidad neta}}{\text{Capital contable}}$$

$$ROI = ROA = \frac{\text{Utilidades antes de intereses e impuestos}}{\text{Activos}}$$

### *Conflictividad*

La conflictividad es la capacidad de la organización de generar y mantener conflictos con las partes interesadas vinculadas a su modelo de negocio y representa quizá la variable de sostenibilidad más importante, en tanto que la existencia de las operaciones requieren reducir la conflictividad a un nivel mínimo razonable que les permita operar en armonía social y ambiental con su entorno de influencia local, regional, nacional y mundial.

La conflictividad se mide de la siguiente manera:

$$\text{Conflictividad} = \frac{\text{Número de días en conflicto}}{\text{Número total de días disponibles al año}}$$

La conflictividad incorpora, a su vez, diversos factores y engloba los resultados de gestión de la capacidad de responsabilidad social de la empresa, los resultados de su sostenibilidad ambiental y los resultados de su comportamiento de responsabilidad ética y transparencia con todas las partes interesadas vinculadas al modelo de negocio minero.

#### *Responsabilidad ética y transparencia*

La responsabilidad ética implica conducirse en la gestión de las operaciones de la empresa con estricto respeto a los valores aspirados y a los compromisos adquiridos con todas las partes interesadas vinculadas al modelo de negocio minero. Los principios de gobierno corporativo y las exigencias de transparencia por parte de los mercados requieren ahora el estricto apego a normas, protocolos y pautas de conducta que permitan conducirse en forma ética con respecto a los valores, al resguardo de la información privilegiada, a las reglas de gobierno corporativo, y a la suscripción o adhesión a los códigos de ética corporativos, gremiales y profesionales de aplicación en el modelo de negocio minero. Este proceso requiere disciplina y ejemplo por parte de las más altas autoridades de la organización (el directorio y la gerencia), y debe convertirse en una práctica habitual del quehacer operacional de los colaboradores y la organización.

*Geoeconomía minera*

La sostenibilidad económica del modelo de negocio minero depende de la geoeconomía del yacimiento mineralizado en función de las reservas disponibles. Estas son calculadas sobre la base de información confiable y certificada bajo reportes internacionalmente aceptados como NI43101 o similares basados en el Código JORC e ICCM y suscritos formalmente por especialistas calificados (QPs). A partir de las reservas de la mina expresadas en millones de toneladas de mineral con una ley superior a la ley de corte económica (*Cut Off*), puede iniciarse el cálculo debido de la tasa de reposición de reservas que requiere la sostenibilidad geoeconómica de la mina para su sobrevivencia como negocio en el largo plazo (Rothgeb, 2002; Grifell-tatjé y Lovell, 2014)

La tasa de reposición de reservas (TRR) que permite la sostenibilidad puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$TRR = \frac{\text{Reservas repuestas}}{\text{Reservas consumidas}}$$

Las reservas repuestas o reposición de reservas que la mina requiere pueden lograrse, bien pasando inventario de recursos a reservas por medio de trabajos adicionales de perforación, bien explorando yacimientos para encontrar reservas adicionales, bien agregando reservas nuevas vía compras, fusiones o adquisiciones para enriquecer el inventario de reservas. En este contexto, la importancia del inventario de reservas es clave, pues, si dividimos el inventario entre la tasa de extracción, obtenemos el número de años de vida que la mina sustenta. Por ello, la TRR se convierte en un claro indicador de sostenibilidad geoeconómica para la mina. El cálculo del tiempo de vida útil de la mina se estima de la siguiente manera:

$$\text{Años de vida de mina (años)} = \frac{\text{Reserva (MM TM)}}{\text{Tasa de extracción } \left(\frac{\text{TM}}{\text{año}}\right)}$$

El cálculo de la vida útil de la mina y su TRR tiene impactos operacionales, ambientales, sociales, económicos y financieros importantes, puesto que define directamente la sostenibilidad del ciclo de mina, la sostenibilidad laboral y de las oportunidades económicas alrededor de la operación minera, la sostenibilidad de los plazos de financiamiento, y el periodo de acumulación para la reserva económica y contable que se requiere para el cierre y postcierre de la mina.

### **Revisión de la literatura**

La literatura respecto al desarrollo de indicadores de sostenibilidad ha sido teorizada por diversos autores e incluida contextualmente en múltiples instrumentos de gestión internacionalmente aceptados como el Global Reporting Initiative (GRI, 2002), las métricas de sostenibilidad (Institution of Chemical Engineers, 2005), el índice de sostenibilidad Dow Jones (Jones, 2005), y las guías para empresas corporativas multinacionales de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2005), como los principales referentes en materia de sostenibilidad. En ese contexto, de manera complementaria, los pilares del desarrollo sustentable planteados por la United Nations Commission on Sustainable Development (UNCmSD, 2013) están principalmente basados en los componentes económico, social, ambiental e institucional como base de la sostenibilidad empresarial desarrollando el concepto del uso racional actual de recursos disponibles, sin comprometer los recursos futuros sobre la base de una visión de largo plazo para las organizaciones y su entorno.

Las investigaciones de Hardi y Zdan (2000); Veleva y Ellenbecker (2001); Warhurst (2002); Azapagic (2004); Krajnc y Glavic (2005); Labuschagne, Brent. y van Erck (2005); Wang (2005); Hill y Seabrook (2013); y Sodhi y Yatskovskaya (2014) enfocan la sostenibilidad como el desarrollo de modelos de negocio en el contexto interrelacionado de aspectos económicos, sociales, ambientales y éticos, sobre la base de la interacción con las partes interesadas, la responsabilidad social, la responsabilidad de la seguridad y salud de los colaboradores, la necesidad de reportar resultados de manera transparente y los principios de gestión de buen gobierno corporativo en las prácticas empresariales.

Los modelos conceptuales para medir la sostenibilidad empresarial han sido teorizados por Veleva y Ellenbecker (2001), Warhurst (2002), Goyal, Rahman, y Kazmi (2013), John y Narayanamurthy (2015). Estos modelos se basan principalmente en combinaciones de componentes económicos, sociales, éticos y ambientales desarrollados sobre la base de factores que afectan el desempeño de las organizaciones, sin embargo, los modelos planteados no han sido instrumentalizados de manera que puedan aplicarse directamente en la medición de indicadores de sostenibilidad en las organizaciones, por lo que requiere previamente establecer pesos, escalas y métodos de cálculo de manera previa para dejar la operatividad de estos a criterio de los investigadores que lo aplican.

De igual forma, los modelos conceptuales para medir la sostenibilidad aplicada, específicamente en la industria minera, han sido teorizados por Hilson y Murk (2000); Humphreys (2001); Jenkins y Yakovleva (2006); y Solomon, Katz y Lovel. (2008). Se basan principalmente en la integración de componentes económicos, ambientales, éticos y sociales, de modo que se incluya en estas dimensiones consideraciones de gran importancia como la necesidad de reportes públicos bajo códigos internacionalmente



aceptados (JORC, ICCM, etc.); la suscripción de códigos técnicos para consideraciones ambientales (Cyanide Code, Códigos de Ética, etc.); las relaciones con las comunidades y partes interesadas del área de influencia directa e indirecta de las operaciones mineras; los reportes de sostenibilidad, seguridad y salud ocupacional, medio ambiente, generación de empleo local, generación de crecimiento económico y valor agregado social hacia las comunidades y el ambiente, además de la inclusión de una visión de largo plazo que incluya el cierre de las operaciones mineras y la sostenibilidad futura del entorno ambiental, social y humano que queda luego del cierre de mina.

En general, la literatura de referencia respecto a índices de sostenibilidad aplicados a la industria minera nos muestra modelos conceptuales que han sido planteados con fundamentos sólidos en el uso de buenas prácticas de gobierno corporativo y en el marco de consideraciones de responsabilidad socioeconómica y ambiental para el largo plazo. Sin embargo, no se contemplan mecanismos específicos para calcular indicadores de sostenibilidad con métricas comparables que puedan ser utilizados por los investigadores dejando la instrumentalización de estos a criterio de los investigadores que los utilizan.

### **Discusión de resultados**

La recolección de datos del comportamiento operacional de minas subterráneas y de tajo abierto vinculadas a la minería formal para los casos estudiados en Perú ha requerido agrupar data significativa de los ciclos operacionales de las minas para establecer una comparación de las métricas estipuladas en los conceptos teóricos, a manera de

indicadores de gestión, con la finalidad de desarrollar el indicador de sostenibilidad propuesto en la investigación. Los resultados son mostrados a continuación:

La eficiencia del ciclo de minado puede apreciarse en la tabla 1, a partir de un tiempo programado de ocho horas por turno. Se encontraron tiempos de ciclo que varían entre 7.5 horas (eficiencia: 107%) y 11.95 horas (eficiencia: 67%).

Tabla 1.  
Eficiencia del ciclo de minado

Zona	Veta	RQD	Clasific. RQD	Operación	Desate	Bombeo	Perforación	Tiempo del ciclo del proceso (horas)						Ventilación	Tiempo ciclo	Eficiencia
								Voladura	Cargulo	Transporte	Sostenimiento	Relleno				
A	A1	90-100%	Muy buena	Mecanizada	0.3000	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.4000	7.5000	107%	
	A2	90-100%	Muy buena	Semimecanizada	0.3000	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	0.9500	0.8500	0.7500	0.4000	7.8000	103%	
	A3	90-100%	Muy buena	Manual	0.3000	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	1.2500	0.9500	0.7500	0.4000	8.2000	98%	
B	B1	75-90%	Buena	Mecanizada	0.4500	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	0.8500	0.7500	0.7500	0.4000	7.7500	103%	
	B2	75-90%	Buena	Semimecanizada	0.4500	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	1.0500	1.0000	0.7500	0.4000	8.2000	98%	
	B3	75-90%	Buena	Manual	0.4500	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	1.3500	1.2500	0.7500	0.4000	8.7500	91%	
C	C1	50-75%	Regular	Mecanizada	0.5500	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	1.0000	1.2500	0.7500	0.4000	8.5000	94%	
	C2	50-75%	Regular	Semimecanizada	0.5500	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	1.5000	1.4500	0.7500	0.4000	9.2000	87%	
	C3	50-75%	Regular	Manual	0.5500	0.3000	1.7500	0.7500	1.7500	2.0500	1.7500	0.7500	0.4000	10.0500	80%	
D	D1	25-50%	Pobre	Mecanizada	0.6500	0.3000	2.1500	0.7500	1.7500	1.0500	2.0000	1.2500	0.4000	10.3000	78%	
	D2	25-50%	Pobre	Semimecanizada	0.6500	0.3000	2.1500	0.7500	1.7500	1.4500	2.0500	1.7500	0.4000	11.2500	71%	
	D3	25-50%	Pobre	Manual	0.6500	0.3000	2.1500	0.7500	1.7500	2.1500	2.2000	1.7500	0.4000	12.5000	64%	
E	E1	< 25%	Muy pobre	Mecanizada	0.7500	0.3000	2.2500	0.7500	1.7500	1.1500	2.2500	0.7500	0.4000	10.3500	77%	
	E2	< 25%	Muy pobre	Semimecanizada	0.7500	0.3000	2.2500	0.7500	1.7500	1.7500	2.3500	0.7500	0.4000	11.0500	72%	
	E3	< 25%	Muy pobre	Manual	0.7500	0.3000	2.2500	0.7500	1.7500	2.2500	2.7500	0.7500	0.4000	11.9500	67%	

Nota: Eficiencia = Tiempo programado/Tiempo real = Tiempo programado / Tiempo de ciclo. Eficiencia calculada para un tiempo programado de 8 horas por turno de trabajo. Elaboración propia, con datos tomados de vetas en mina subterránea de Hochschild, Volcan y Milpo (2014-2015).

La eficacia de las operaciones puede apreciarse en la tabla 2; varía dependiendo de las condiciones del ciclo, el perfil de los equipos, el secuenciamiento y organización de las operaciones entre un 75 y 102%, dependiendo del tipo de operación.

Tabla 2  
Eficacia de las operaciones mineras

Zona	Veta	RQD	Clasific.RQD	Operación	Producción meta	Producción real	Eficacia (%)
					TMD	TMD	
A	A1	90-100%	Muy buena	Mecanizada	2,500	2,550	102%
	A2	90-100%	Muy buena	Semimecanizada	1,500	1,450	97%
	A3	90-100%	Muy buena	Manual	800	750	94%
B	B1	75-90%	Buena	Mecanizada	2,500	2,330	93%
	B2	75-90%	Buena	Semimecanizada	1,500	1,380	92%
	B3	75-90%	Buena	Manual	800	720	90%
C	C1	50-75%	Regular	Mecanizada	2,500	2,200	88%
	C2	50-75%	Regular	Semimecanizada	1,500	1,300	87%
	C3	50-75%	Regular	Manual	800	690	86%
D	D1	25-50%	Pobre	Mecanizada	2,500	2,100	84%
	D2	25-50%	Pobre	Semimecanizada	1,500	1,200	80%
	D3	25-50%	Pobre	Manual	800	630	79%
E	E1	< 25%	Muy pobre	Mecanizada	2,500	2,000	80%
	E2	< 25%	Muy pobre	Semimecanizada	1,500	1,150	77%
	E3	< 25%	Muy pobre	Manual	800	600	75%

Nota: Eficacia = Logro obtenido/Meta propuesta. Eficiencia calculada como % sobre el resultado esperado. Elaboración propia, con datos tomados de vetas en mina subterránea de Hochschild, Volcan y Milpo (2014-2015).

La productividad de las operaciones mineras puede apreciarse en la tabla 3. Se encuentra medida en términos de producto/recurso (toneladas/hombre-guardia) y varía de 1.5 a 12.8 TM/hombre-guardia, dependiendo de una serie de factores de influencia como la naturaleza de la mina, el ciclaje de las operaciones, la experiencia y calificaciones del equipo humano, la disponibilidad y perfil de los equipos en la operación, y el control de los avances. Además, se mide en términos agregados como el cociente entre la producción obtenida en un periodo y la cantidad de personal asignado a la labor en este mismo periodo .

**MODELO INSTRUMENTAL PARA MEDIR LA SOSTENIBILIDAD EN LA GESTIÓN DE COMPAÑÍAS MINERAS**

Tabla 3

Productividad de las operaciones mineras

Zona	Veta	RQD	Clasific.RQD	Operación	Personal en labor	Producción real	Productividad
					hombres-guardia	TMD	TM/Hombre-guardia
A	A1	90-100%	Muy buena	Mecanizada	200	2,550	12.8
	A2	90-100%	Muy buena	Semimecanizada	250	1,450	5.8
	A3	90-100%	Muy buena	Manual	350	750	2.1
B	B1	75-90%	Buena	Mecanizada	200	2,330	11.7
	B2	75-90%	Buena	Semimecanizada	250	1,380	5.5
	B3	75-90%	Buena	Manual	380	720	1.9
C	C1	50-75%	Regular	Mecanizada	220	2,200	10.0
	C2	50-75%	Regular	Semimecanizada	280	1,300	4.6
	C3	50-75%	Regular	Manual	380	690	1.8
D	D1	25-50%	Pobre	Mecanizada	200	2,100	10.5
	D2	25-50%	Pobre	Semimecanizada	270	1,200	4.4
	D3	25-50%	Pobre	Manual	380	630	1.7
E	E1	< 25%	Muy pobre	Mecanizada	220	2,000	9.1
	E2	< 25%	Muy pobre	Semimecanizada	250	1,150	4.6
	E3	< 25%	Muy pobre	Manual	400	600	1.5

Nota: Productividad = Producto/Recursos = TM/hombre-guardia. Elaboración propia, con datos tomados de vetas en mina subterránea de Hochschild, Volcan y Milpo (2014-2015).

La confiabilidad de las operaciones puede apreciarse en la tabla 4. Se encuentra referenciada al tiempo promedio entre fallas (MTBF) y muestra valores que van desde el 70.78% hasta el 91.31%. El cálculo de la confiabilidad incorpora variables- causa como la antigüedad de la maquinaria, la competencia del operador y el nivel del mantenimiento efectuado sobre los equipos. Estas variables tienen un fuerte impacto en la confiabilidad de los equipos y de la operación de manera agregada.

Tabla 4

Confiabilidad de las operaciones mineras

Zona	Veta	RQD	Clasific.RQD	Operación	Equipo	MTBF	MTTR	Confiabilidad	Disponibilidad
						horas	horas	(%)	
A	A1	90-100%	Muy buena	Mecanizada	M1	95,000	500	91.31%	99.48%
	A2	90-100%	Muy buena	Semimecanizada	M2	65,000	1,000	87.55%	98.48%
	A3	90-100%	Muy buena	Manual	M3	35,000	1,500	78.13%	95.89%
B	B1	75-90%	Buena	Mecanizada	M4	85,000	700	90.33%	99.18%
	B2	75-90%	Buena	Semimecanizada	M5	60,000	1,300	86.59%	97.88%
	B3	75-90%	Buena	Manual	M6	50,000	1,800	84.13%	96.53%
C	C1	50-75%	Regular	Mecanizada	M7	80,000	1,000	89.76%	98.77%
	C2	50-75%	Regular	Semimecanizada	M8	55,000	1,600	85.46%	97.17%
	C3	50-75%	Regular	Manual	M9	25,000	2,000	70.78%	92.59%
D	D1	25-50%	Pobre	Mecanizada	M10	75,000	1,200	89.12%	98.43%
	D2	25-50%	Pobre	Semimecanizada	M11	50,000	1,800	84.13%	96.53%
	D3	25-50%	Pobre	Manual	M12	18,000	2,200	61.88%	89.11%
E	E1	< 25%	Muy pobre	Mecanizada	M13	65,500	1,500	87.64%	97.76%
	E2	< 25%	Muy pobre	Semimecanizada	M14	38,500	2,000	79.90%	95.06%
	E3	< 25%	Muy pobre	Manual	M15	25,000	2,500	70.78%	90.91%

Nota: Confiabilidad =  $e^{-\lambda(\text{tiempo}/\text{MTBF})}$ , donde MTBF = Tiempo promedio entre fallas. Disponibilidad =  $\text{MTBF}/(\text{MTBF}+\text{MTTR})$ , donde MTTR = Tiempo promedio de reposición a las fallas. Tiempo disponible para 360 días/año en tres turnos de 8 horas/turno = 8640 horas. Elaboración propia, con datos tomados de vetas en mina subterránea de Hochschild, Volcan y Milpo (2014-2015).

La rentabilidad de las operaciones permite mejorar su atractivo y genera un sustento económico que asegura la sostenibilidad económico-financiera del modelo de negocio minero en un entorno donde la operación de la mina depende fuertemente del precio del mineral. Como esta es justamente una variable que la empresa minera no controla, se trata de lograr rentabilidades sobre la base del uso racional de los recursos y el control de la eficiencia de costos en las operaciones. La rentabilidad calculada puede apreciarse en la tabla 5, donde se inserta el cálculo del ROE y ROA por tonelada para cada veta de operación, a partir de datos clave del CAPEX/TM, el OPEX/TM y el Cash Cost de cada veta en operaciones mineras. Puede apreciarse que el control de los costos se vuelve un aspecto clave para la gestión de las operaciones de una mina porque tiene un impacto directo en la rentabilidad global de la operación.

Tabla 5  
Rentabilidad de las operaciones mineras

Zona	Veta	RQD	Clasific.RQD	Operación	CAPEX \$MM	OPEX \$/TM	Reserva MM TM	CAPEX/TM \$/TM	Activos \$MM	Valor activo \$/TM	Cash cost \$/TM	Valor mineral \$/TM	ROE %	ROA %
A	A1	90-100%	Muy buena	Mecanizada	15	60	1.00	15.00	10	10.00	48	75	180%	150%
	A2	90-100%	Muy buena	Semimecanizada	12	64	1.00	12.00	7	7.00	50	75	208%	157%
	A3	90-100%	Muy buena	Manual	8	70	1.00	8.00	4	4.00	56	75	238%	125%
B	B1	75-90%	Buena	Mecanizada	15	64	1.00	15.00	10	10.00	51	75	160%	113%
	B2	75-90%	Buena	Semimecanizada	10	66	1.00	10.00	7	7.00	53	75	220%	125%
	B3	75-90%	Buena	Manual	8	73	1.00	8.00	4	4.00	58	75	213%	63%
C	C1	50-75%	Regular	Mecanizada	15	66	1.00	15.00	10	10.00	53	75	147%	88%
	C2	50-75%	Regular	Semimecanizada	12	69	1.00	12.00	7	7.00	55	75	167%	89%
	C3	50-75%	Regular	Manual	10	75	1.00	10.00	4	4.00	60	75	150%	0%
D	D1	25-50%	Pobre	Mecanizada	15	69	1.00	15.00	10	10.00	55	75	133%	63%
	D2	25-50%	Pobre	Semimecanizada	12	70	1.00	12.00	6	6.00	60	75	125%	83%
	D3	25-50%	Pobre	Manual	10	73	1.00	10.00	4	4.00	62	75	130%	50%
E	E1	< 25%	Muy pobre	Mecanizada	15	73	1.00	15.00	12	12.00	58	75	113%	21%
	E2	< 25%	Muy pobre	Semimecanizada	15	74	1.00	15.00	8	8.00	59	75	107%	16%
	E3	< 25%	Muy pobre	Manual	12	74	1.00	12.00	5	5.00	62	75	108%	20%

Nota: Vetas con reserva promedio de 1MM de TM de mineral de un valor promedio de \$75/TM. Elaboración propia, con datos tomados de vetas en mina subterránea de Hochschild, Volcan y Milpo (2014-2015).

La sostenibilidad geoeconómica minera puede apreciarse en la tabla 6, donde se muestran los inventarios de reservas inicial y final, las tasas de extracción, los aportes de nuevas reservas, así como los cálculos de la tasa de reposición de reservas y de los

**MODELO INSTRUMENTAL PARA MEDIR LA SOSTENIBILIDAD EN LA GESTIÓN DE COMPAÑÍAS MINERAS**

años de vida útil de la mina. Puede notarse claramente que la reposición de reservas es un trabajo permanente de los departamentos de exploraciones-mina; por ello, se generan periodos de vida útil de 4 a 6 años en casos de minas subterráneas, y de 8 a 12 años en casos de minas a tajo abierto. La vida útil de ambos tipos de minas puede aumentar hasta 12 e incluso hasta 20 años, respectivamente, si se incorporan los recursos medidos, indicados e inferidos conforme avance el tiempo de minado y conforme logren calificar como reservas probadas de mina.

Tabla 6  
Tasa de reposición de reservas minerales

			Minas subterráneas			Minas de tajo abierto		
			Mina A	Mina B	Mina C	Mina D	Mina E	Mina F
Recursos	Medidos	MM TM	0.7	0.5	0.3	3.8	2.5	2.8
	Indicados	MM TM	1.2	0.8	0.5	8.5	6.7	4.8
	Inferidos	MM TM	2.5	1.5	0.9	12.2	10.5	8.5
Reservas	Probadas	MM TM	3.8	1.8	1.2	58.0	35.0	18.0
	Probables	MM TM	3.5	2.2	1.8	15.4	12.5	10.5
Inventario Inicial Reservas		MM TM	3.8	1.8	1.2	58.0	35.0	18.0
Tasa de Extracción		TM/día	2,600	1,200	850	15,000	8,500	5,500
Tasa de Extracción (355 días/año)		TM/año	923,000	426,000	301,750	5,325,000	3,017,500	1,952,500
Tasa de Extracción		MM TM/año	0.92	0.43	0.30	5.33	3.02	1.95
Aporte de nuevas reservas		MM TM	0.75	0.55	0.45	2.50	3.50	2.20
Inventario Final Reservas		MM TM	3.6	1.9	1.3	55.2	35.5	18.2
Vida útil de mina		años	4.1	4.2	4.0	10.9	11.6	9.2
Tasa de Reposición		%	95%	107%	112%	95%	101%	101%

Nota: Elaboración propia, con datos tomados minas de Hochschild, Vocan, La Arena y Milpo (2014-2015).

Finalmente, en la tabla 7, presentamos el despliegue del modelo instrumental propuesto, con el fin de que el usuario pueda aplicarlo luego de realizar los cálculos que contempla la construcción del índice de sostenibilidad (IS) (1.00) sobre la base de la combinación entre conflictividad (0.334), productividad (0.333) y rentabilidad (0.333) con factores agregados conforme al modelo propuesto.

Tabla 7  
Modelo instrumental de cálculo de indicador de sostenibilidad

IS (1.000)	Conflictividad (0.334)	Responsabilidad social (RSE)	0.112	
		Sostenibilidad ambiental	0.111	
		Responsabilidad ética y transparencia	0.111	
	Productividad (0.333)	Eficiencia	0.067	
		Eficacia	0.067	
		Confiabilidad	0.067	
		Accidentabilidad	0.067	
		Investigación y desarrollo	0.067	
	Rentabilidad (0.333)	Tasa de reposición reservas (TRR)	0.165	
		Modelo económico financiero (ROE, ROA)	0.165	

Nota: Elaboración propia, sobre bases de datos del estudio 2010-2015.



### **Conclusiones, limitaciones y recomendaciones**

El modelo instrumental propuesto en la investigación comparada permite medir de manera cuantitativa el índice agregado de sostenibilidad de una compañía minera sobre la base de sus resultados de gestión, en una escala comparable entre compañías mineras del mismo tipo. Este indicador puede ser agregado a la gestión de las compañías mineras de manera simple y a partir de los reportes regulares del resultado de sus operaciones. Las ventajas en la toma de decisiones son importantes, puesto que el desarrollo de cada componente permite, a la vez, comparar la performance del desempeño con su propia operación en periodos anteriores o hacer una comparación entre compañías mineras o unidades, o incluso vetas de similar método de explotación y grado de mecanización en su desempeño organizacional. El método propuesto requiere el alineamiento de la gestión gerencial en un nuevo concepto que integre eficiencia, eficacia, efectividad, productividad, confiabilidad y rentabilidad, con una apropiada gestión socio-ambiental y una reducción sostenida de la conflictividad asociada a la industria extractiva.

Las principales limitaciones tienen que ver con el control de calidad de la toma de datos, ya que normalmente se requiere acceder a las bases de datos de las compañías que no siempre mantienen su información operacional en forma pública. Se podrían obtener notables resultados complementarios si las autoridades o los gremios especializados pudieran recopilar la información operacional de sustento y publicarla de manera regular para optimizar su aplicación y adecuación en el contexto de la medición de la sostenibilidad que las organizaciones requieren alcanzar.

Las principales recomendaciones se relacionan con la potencial *customización* del indicador propuesto a efectos de ser aplicado a industrias similares como las petroleras, químicas o manufactureras donde pueda aplicarse, ya que está diseñado

sobre la base de componentes universales que pueden ser similares a los modelos de negocio, principalmente industriales, previstos en la base de cálculo del indicador propuesto.

### Referencias

- Asif, Z. y Chen, Z. (2016). Environmental management in North American mining sector. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(1), 167-179. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5651-8>
- Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639-662.
- Ballard, C. y Banks, G. (2003). Resource wars: The anthropology of mining. *Annual Review of Anthropology*, 32, 287-314.
- Bialkowski, J., Bohl, M., Stephan, P., y Wisniewski, T. (2015). The gold price in times of crisis. *International Review of Financial Analysis*, 41, 329-339.
- Bleischwitz, R. (2001). Rethinking productivity: Why has productivity focussed on labour instead of natural resources? *Environmental and Resource Economics*, 19(1), 23-36.
- Buessing, M. y Boden, L. (2016). The impact of contract operations on safety in underground coal mines. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 58(9), 952-956.
- Chen, K., Lee, J. y You, C. (2014). Who upholds the surging gold price? The role of the central bank worldwide. *Applied Economics*, 46(22), 2557-2575.

- Delai, I. y Takahashi, S. (2011). Sustainability measurement system: A reference model proposal. *Social Responsibility Journal*, 7(3), 438-471.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1108/17471111111154563>
- Fan, W., Fang, S. y Lu, T. (2014). Macro-factors on gold pricing during the financial crisis. *China Finance Review International*, 4(1), 58-75.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1108/CFRI-09-2012-0097>
- Gerth, C., Küster, J. M., Luckey, M. y Engels, G. (2013). Detection and resolution of conflicting change operations in version management of process models. *Software and Systems Modeling*, 12(3), 517-535.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s10270-011-0226-8>
- Global Commission on Sustainable Development. (2002). *Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies*. Recuperado de [www.un.org/esa/sustdev/csd.htm](http://www.un.org/esa/sustdev/csd.htm)
- Global Reporting Initiative [GRI]. (2002). *Sustainability reporting guidelines*. Recuperado de [www.globalreportinginitiative.org](http://www.globalreportinginitiative.org)
- Grifell-tatjé, E. y Lovell, C. (2014). Productivity, price recovery, capacity constraints and their financial consequences. *Journal of Productivity Analysis*, 41(1), 3-17.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11123-013-0373-8>
- Goyal, P., Rahman, Z. y Kazmi, A. (2013). Corporate sustainability performance and firm performance research. *Management Decision*, 51(2), 361-379.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1108/00251741311301867>

Guzmán, J. I. y Marañón, M. (2015). Crisis en el mercado del cobre: macro no micro. *Perspectiva*, 12. Recuperado de <https://perspectivagem.files.wordpress.com/2015/12/persp- n12-esp.pdf>

Hardi, P. y Zdan, T. (2000). *The Dashboard of Sustainability*. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development [IISD].

Hill, D. C. y Seabrook, K. A. (2013). Safety & sustainability: Understanding the business value. *Professional Safety*, 58(6), 81-92.

Hilson, G. y Basu, A. J. (2003). Devising indicators of sustainable development for the mining and minerals industry: An analysis of critical background issues. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 10(4), 319-331.

Hilson, G. y Murck, B. (2000). Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective. *Resources Policy*, 26(4), 227-238.

Humphreys, D. (2001). Sustainable development: can the mining industry afford it? *Resources Policy*, 27(1), 1-7.

Institution of Chemical Engineers [IChemE]. (2002). *The sustainability metrics*. Recuperado de [http://www.icheme.org/communities/subject\\_groups/sustainability/resources//~/media/Documents/Subject%20Groups/Sustainability/Newsletters/Sustainability%20Metrics.pdf](http://www.icheme.org/communities/subject_groups/sustainability/resources//~/media/Documents/Subject%20Groups/Sustainability/Newsletters/Sustainability%20Metrics.pdf)

Jenkins, H. y Yakovleva, N. (2006). Corporate social responsibility in the mining industry: exploring trends in social and environmental disclosure. *Journal of Cleaner Production*, 14(3), 271-284.

- John, L. y Narayanamurthy, G. (2015). Converging sustainability definitions: Industry independent dimensions. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, 12(3), 206-232.
- Jones, D. (2005). *Dow Jones sustainability world indexes guide v. 7.0*. Recuperado de [www.sustainability-indexes.com](http://www.sustainability-indexes.com)
- Krajnc, D. y Glavic, P. (2003). Indicators of sustainable development. *Clean Technology Environment Policy*, 5, 279-88.
- Krajnc, D. y Glavic, P. (2005). A model for integrated assessment of sustainable development. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(2), 189-208.
- Labuschagne, C., Brent, A. C. y van Erck, R. P. G. (2005). Assessing the sustainability performance of industries. *Journal of Cleaner Production*, 13(4), 373-385.
- Lindsay, C. (2004). Special feature: Labour productivity. *Labour Market Trends*, 112(11), 447-454.
- Loosemore, M. (2014). Improving construction productivity: A subcontractor's perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 21(3), 245-260. doi:<http://dx.doi.org/10.1108/ECAM-05-2013-0043>
- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2005). Measuring sustainable development: achievements and challenges. Artículo presentado en *Conference of European Statisticians, Statistical Commission and Economic Commission for Europe, United Nations, Geneva*.
- Rothgeb, J. M. Jr. (2002). Foreign investments, privatization, and political conflict in developing countries. *Journal of Political and Military Sociology*, 30(1), 36-50.

Schwarz, M. (2013). Licencias y permisos generales para operar una mina [artículo de blog]. Recuperado de <http://max-schwarz.blogspot.pe/2013/04/licencias-y-permisos-generales-para.html>

Schwarz, M. (2013). Recursos y Reservas Mineras bajo el Código JORC [artículo de blog]. Recuperado de <http://max-schwarz.blogspot.pe/2012/10/recursos-y-reservas-mineras-bajo-el.html>

Schwarz, M. (2013). Estructura de costos en las operaciones mineras [artículo de blog]. Recuperado de <http://max-schwarz.blogspot.pe/2012/10/estructura-de-costos-en-las-operaciones.html>

Solomon, F., Katz, E. y Lovel, R. (2008). Social dimensions of mining: research, policy and practice challenges for the minerals industry in Australia. *Resources Policy*, 33(3), 142-149.

Sodhi, M. S. y Yatskovskaya, E. (2014). Developing a sustainability index for companies' efforts on responsible use of water. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 63(7), 800-821.

Steindel, C. y Stiroh, K. J. (2001). Productivity: What is it, and why do we care about it? *Business Economics*, 36(4), 13-31.

Su, P., Zhu, D. y Zeng, D. (2014). A new approach for resolving conflicts in actionable behavioral rules. *The Scientific World Journal*. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2014/530483>

United Nations Commission on Sustainable Development [UNCmSD]. (2013). Report of the Commission on Sustainable Development on the 20<sup>th</sup> Session. Recuperado de <https://sustainabledevelopment.un.org/%20>

- Veleva, V. y Ellenbecker, M. (2001). Indicators of sustainable development: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, 9(6), 519-49.
- Voulvoulis, N., Skolout, J. W., Oates, C. J. y Plant, J. A. (2013). From chemical risk assessment to environmental resources management: The challenge for mining. *Environmental Science and Pollution Research International*, 20(11), 7815-7826. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11356-013-1785-8>
- Wang, L. (2005). *A methodology of sustainability, accountability and management for industrial enterprises* (tesis para optar el título de magíster en la Faculty of Graduate School). The State University of New York.
- Warhurst, A. (2002). *Sustainability indicators and sustainability performance management* (informe técnico). Coventry: Warwick Business School, University of Warwick.