



Environmental management, sustainability and competitiveness in mining. Contextualization of situation, and challenges of the approach through the life-cycle assessment

Uriel Carmona-García^a, Harold Cardona-Trujillo^b & Inés Restrepo-Tarquino^a

^a Universidad del Valle, Cali, Colombia. uriel.carmona@correounivalle.edu.co, ines.restrepo@correounivalle.edu.co

^b Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. harold.cardona@udea.edu.co

Received: September 27th, 2016. Received in revised form: March 22th, 2017. Accepted: April 18th, 2017.

Abstract

Mining is an economic activity that takes place in much of the Colombian territory. The total area granted for exploration and exploitation of mineral resources is 4'485.910 ha. The main mining activities in Colombia they are gold (1'743.721 ha) and coal (1'204.238 ha) [1], generating over 227,000 jobs, according to the Ministry of Mining [2]. The mining industry has been concerned with including elements of "sustainability" in its operations, seen these, as the contributions that the industry can make to Sustainable Development. The objective of this article is to analyze how the concept of sustainability in mining operations is involved, and how through the LCA as a tool of environmental management, it is possible to obtain a simplified and scientific approach to demonstrate progress in this area.

Keywords: Gold and coal mining; mining sustainability; environmental conflicts; cleaner production; life cycle assessment.

Gestión ambiental, sostenibilidad y competitividad minera. Contextualización de la situación y retos de un enfoque a través del análisis del ciclo de vida

Resumen

La minería es una actividad económica que se desarrolla en gran parte del territorio colombiano, con un área total concedida para exploración y explotación de recurso minero de 4'485.910 ha. Las principales actividades mineras desarrolladas en Colombia son la explotación de oro (2'365.500 ha) y carbón (1'234.220 ha) [1], generando según datos del Ministerio de Minas más de 227.000 empleos [2]. La industria minera se ha preocupado por incluir elementos de "sostenibilidad" en sus operaciones, vistos estos, como los aportes que la industria pueda hacer al Desarrollo Sostenible. El objetivo de este artículo es Analizar cómo se involucra el concepto de sostenibilidad en las operaciones mineras, y como a través del ACV como herramienta de la gestión ambiental, es posible obtener un método simplificado y con enfoque científico para demostrar el avance en este tema.

Palabras clave: Minería de oro y carbón; sostenibilidad minera; producción más limpia; análisis del ciclo de vida.

1. Introducción

El carbón y los metales preciosos, entre ellos el oro, representan la mayor proporción de hectáreas concedidas para exploración y explotación con 1.234.220 ha y 2.365.500

ha respectivamente [1], por lo que es fácil inferir que se trata de las dos principales actividades mineras que se desarrollan en Colombia, generando -según datos del Ministerio de Minas más de 227.000 empleos [2]. Los impactos ambientales generados por éste tipo de minería abarcan desde

How to cite: Carmona-García, U., Cardona-Trujillo, H. and Restrepo-Tarquino, I. Gestión ambiental, sostenibilidad y competitividad minera. Contextualización de la situación y retos de un enfoque a través del análisis del ciclo de vida DYNA 87 (201) pp. 50-58, 2017.

el otorgamiento de títulos mineros en parques naturales (alrededor de 36.000 ha) [3], la disposición de metales pesados en afluentes hídricos, la erosión, la contaminación de suelos y el desvío de causas, hasta el traslado de cabeceras municipales enteras, para el mejor beneficio de la actividad minera. Sin embargo, los grupos de interés (stakeholders) como la academia, la comunidad, los entes gubernamentales y no gubernamentales y el mercado mismo, han motivado que la industria minera incluya la gestión ambiental no sólo como un elemento de mero cumplimiento de la normatividad legal, sino además como un instrumento que aporte a la competitividad del negocio.

Las empresas mineras más consolidadas involucran la gestión ambiental no como un elemento individual, sino como un componente integral de la Sostenibilidad Minera; en este orden de ideas, las estrategias de avance en el aspecto ambiental están acompañadas y articuladas a las estrategias en los aspectos social y económico. Grandes y pequeños mineros cuentan con diferentes motivaciones para incluir el concepto de “sostenibilidad” en sus estrategias competitivas; para el caso de los pequeños mineros, la motivación está relacionada con la generación de valores agregados en sus productos finales, mientras que para las grandes empresas están relacionadas con compromisos asumidos a nivel internacional con las partes interesadas. Se puede apreciar como en Colombia grandes y pequeñas empresas mineras vienen incluyendo el tema de Sostenibilidad en sus operaciones. Es necesario entonces analizar las alternativas que las herramientas de la gestión ambiental y la producción más limpia puedan aportar en el mejor entendimiento de los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de la actividad minera y, en este sentido, generar propuestas que conlleven a una extracción más limpia del recurso.

2. Gestión ambiental y competitividad minera

El desarrollo de la actividad minera lleva de forma implícita la generación de impactos ambientales, manifestados principalmente en el agotamiento de los recursos naturales no renovables, por lo que no es posible hablar de la realización de una minería sostenible. Sin embargo el proyecto “Minería, Minerales y Desarrollo Sostenible” (MMSD – por sus siglas en inglés), llevado a cabo en el año 2000 en asociación productiva entre el Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED) y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBSCD), buscó analizar de qué manera el sector de los minerales podría aportar al desarrollo sostenible y cómo sería posible aumentar dicho aporte. Para lograr éste análisis, el proyecto MMSD tuvo en cuenta la noción de “capital” como un elemento central del desarrollo sostenible, discriminando éste elemento en cinco formas principales [3]:

- i. capital natural, que proporciona un ingreso sostenido de los beneficios del ecosistema, tales como la diversidad biológica, los recursos minerales, el aire y el agua limpios;
- ii. capital manufacturado, tal como las máquinas, las edificaciones y la infraestructura;
- iii. capital humano, en la forma de conocimientos,

- iv. habilidades, salud y patrimonio cultural;
- v. capital social, las instituciones y estructuras que hacen posible la colaboración entre personas y grupos;
- v. capital financiero, cuyo valor es una simple representación de las otras formas de capital.

En este sentido el enfoque “Blando” del desarrollo sostenible implica que estas cinco formas de capital son “intercambiables”, lo que implica que las generaciones venideras podrían recibir menores cantidades de un capital, en tanto una mayor cantidad de otro lo compense. Así pues, para el enfoque del desarrollo sostenible “blando”, los recursos naturales son sólo otra forma de capital y pueden ser compensados por cualquiera de las cuatro restantes. El enfoque Duro del desarrollo sostenible, sostiene que las diferentes formas de capital no son intercambiables, y que el agotamiento de algunas de estas formas de capital, como es el caso del capital natural, puede ser irreversible entre distintas generaciones y por ende no deberían ser usufructuados [3].

Para el caso de la sostenibilidad minera, los esfuerzos están orientados hacia el enfoque de la sostenibilidad Blanda, tomando como base la integración de las tres dimensiones del desarrollo: Económico, Ambiental y Social, que incluye además un componente de gobernanza y toma de decisiones [4]. Teniendo en cuenta lo anterior, se empieza a usar el término de sostenibilidad minera, para aquellas organizaciones o empresas mineras que realizan un aporte al desarrollo sostenible en torno a estos ejes o dimensiones. Es posible, desde el análisis del ciclo de vida como herramienta de la gestión ambiental, obtener un método simplificado y con enfoque científico para demostrar el avance en este tema.

2.1. Gestión ambiental y competitividad en la minería artesanal y de pequeña escala

En países considerados en desarrollo, como es el caso de Colombia, los criterios de competitividad minera están ligados a la disponibilidad del recurso natural, seguido por la producción, el mercado, los beneficios arancelarios y finalmente la protección ambiental [5]. Por su parte, iniciativas como la liderada por la Alianza por la Minería Responsable” (ARM), fomentan la responsabilidad ambiental, comunitaria y social, como estrategia de competitividad, a través de la orientación de su público objetivo hacia al logro de la certificación “*Fair Mined*”, que está enfocado a Unidades de Minería a Pequeña Escala de oro, entendidos éstos como aquellos que producen cuatro gramos de oro por minero registrado por día [6].

La Alianza por la Minería Responsable nace de una primera iniciativa denominada “Oro Verde”, que se empezó a desarrollar en el departamento del Chocó en el año 2002[7]. Esta iniciativa ofrecía un estímulo de un 15% como valor agregado por cada gramo de oro a aquellos mineros artesanales que cumplieran con 10 criterios de certificación, entre los que se encuentran la no utilización de químicos tóxicos como mercurio, cianuro y otros contaminantes en los procesos de extracción y beneficio, en lugar de esto se utiliza un jugo viscoso que se extrae de las hojas del árbol de balsa (*Ochroma pyramidale*) [8], una planta que contiene un elemento que permite limpiar el oro y separar la jagua [9]. El programa oro

verde enfrentó varios retos, entre ellos la presión de la minería ilegal y la baja producción lograda a través de los métodos netamente artesanales, que no alcanzan a suplir la demanda que existe de este tipo de mineral certificado desde Europa [7], ya que su producción anual no supera los seis kilos. Este tipo de mineral certificado tiene un nicho de mercado en Inglaterra, Finlandia y Canadá, pero estos métodos tradicionales no alcanzan a satisfacer la demanda.

La ARM orienta a los pequeños mineros en la formalización de sus títulos mineros, el uso responsable de los insumos químicos y el manejo de sus impactos ambientales, logrando una producción de 400 kg/año [8]. De esta manera, el oro producido en los entables mineros que cumplen con los estándares “Fair Mined” es certificado, garantizando al consumidor final que el material que está comprando ha sido extraído de forma respetuosa con el medio ambiente. A través de la certificación “Fair Mined” se incentiva al pequeño empresario artesanal a que mantenga una producción trazable tanto en sus prácticas medio ambientales como de responsabilidad comunitaria y social [10], éste incentivo consiste en:

“un Premio Fair Mined de 4.000USD por cada kilo de oro o platino Fair Mined y 100USD por cada kilo de plata del mismo tipo. Cuando cumple con requisitos ambientales adicionales más estrictos, accede al Premio Fair Mined Ecológico, el cual corresponde a 2.000USD más por cada kilo de oro o platino y 50USD por cada kilo de plata de la clase mencionada” [10]

La certificación “Fair Mined” está orientada a la Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) de extracción de oro; lamentablemente la pequeña minería de carbón no cuenta con éstos tipos de incentivos, por tratarse de un bien que se comercializa sin diferenciación cualitativa, su valor está regulado por el precio del petróleo, las condiciones de oferta y demanda del mercado, las reservas a explotar, la calidad del mineral, entre otros [11].

2.2. Gestión ambiental y competitividad en la minería de mediana y gran escala

Para el caso de la minería de mediana y gran escala tanto de oro como de carbón (que no cuenta con un incentivo similar al Fair Mined), al igual que en otros sectores de la

economía, el interés por el cuidado del medio ambiente está directamente relacionado ya sea por las exigencias del gobierno o del cliente final; sin embargo, y para aquellas empresas mineras más comprometidas se empieza a observar un cambio en el tema de competitividad minera, cuyo paradigma inicia con: “quien tiene los mayores depósitos”, pasando por: “quien tiene la tecnología de extracción menos costosa” y finalmente llegando a: “quien tiene la tecnología más limpia” [12]. Éste cambio de paradigma se hace evidente con el surgimiento de organizaciones como el Consejo Internacional de Minería y Metales (“International Council on Mining and Metals” - ICMM), que fomenta entre sus asociados prácticas conducentes al desarrollo sostenible y la producción responsable de los recursos de minerales y metales.

Para lograr este propósito, las empresas asociadas deben cumplir con tres elementos: Aplicar los diez principios de desarrollo sostenible del ICMM en todas sus operaciones (Tabla 1); presentar informes en consonancia con el marco G4 de la Iniciativa Mundial de Presentación de Informes (Global Reporting Initiative, GRI) y sujetarse a un aseguramiento independiente que garantice el cumplimiento de los compromisos con el ICMM [13].

Los diez principios del ICMM se concentran en tres grandes áreas de interés: Ambiental, Social y Económico. De esta forma, se empieza a introducir el concepto de Sostenibilidad Minera bajo el enfoque denominado “Triple Bottom Line”, es decir, teniendo en cuenta el desempeño de la organización en éstas tres áreas [14]. Con el fin de demostrar el cumplimiento o grado de avance en el tema de Sostenibilidad Minera, las organizaciones miembros del ICMM presentan informes en el marco de los lineamientos establecidos por la Guía GRI para el sector de Minería y Metales, la cual brinda las pautas para la elaboración de memorias de sostenibilidad bajo el enfoque del “Triple Bottom Line”. Así, se busca que los datos cuenten con la calidad suficiente como para ser equiparados con informes financieros en cuanto a comparabilidad, rigor, credibilidad, periodicidad y verificabilidad [15].

Tabla 1.
Principios del Desarrollo Sostenible del ICMM

1	“Aplicar y mantener prácticas comerciales éticas y sistemas sólidos de gobernanza de la empresa”.	6	“Procurar el mejoramiento continuo de nuestro desempeño ambiental”.
2	“Integrar las consideraciones sobre desarrollo sostenible al proceso de toma de decisiones de la empresa”.	7	“Contribuir a la conservación de la biodiversidad y a los enfoques integrados para la planeación del uso de la tierra”.
3	“Defender los derechos humanos fundamentales y respetar las culturas, costumbres y valores en el trato con los empleados y otras personas afectadas por nuestras actividades”.	8	“Facilitar y estimular el diseño, uso, reutilización, reciclaje y disposición responsables de nuestros productos”.
4	“Aplicar estrategias de manejo de riesgos basadas en datos válidos y en el conocimiento científico”.	9	“Contribuir al desarrollo social, económico e institucional de las comunidades donde se ubican nuestras operaciones”.
5	“Procurar el mejoramiento continuo de nuestro desempeño en materia de salud y seguridad”.	10	“Aplicar mecanismos eficaces y transparentes para la participación, la comunicación y la verificación independiente de los informes con nuestras partes interesadas”.

Fuente: modificado de: [13]

Entre las compañías pertenecientes al ICMM con presencia en Colombia se encuentran AngloGold Ashanti, Glencore, Angloamerican y Bhpbilliton, éstas tres últimas operan conjuntamente la extracción minera más grande de Colombia (El Cerrejón); en sus informes de sostenibilidad, y teniendo en cuenta el enfoque del “*Triple Bottom Line*”: para el componente de responsabilidad social la compañía resalta haber realizado una inversión superior a los 55.000 millones de pesos; para el componente ambiental muestran una reducción progresiva en la captación de aguas superficiales y del acuífero, pasando de un 40% en 2009, a aproximadamente un 13% en 2014, mostrando además un avance en la rehabilitación de suelos, pasando de 2892 ha acumuladas en 2011, a 3321 ha acumuladas en 2013; en el componente económico, la compañía resalta como el 50% de las personas que trabajan para ella o en su nombre son oriundas de la Guajira, y como la operación de la mina ha generado contratos con proveedores nacionales y locales por el orden de los 260.000 millones de pesos [16].

Aun mostrando estos resultados, la compañía sigue siendo fuertemente cuestionada, la comunidad académica resulta ser una de las más increíbles en cuanto a los avances que ésta empresa o cualquier otra empresa minera muestran en materia de sostenibilidad. Para este predicamento, que no sólo se presenta a nivel nacional sino también a nivel mundial, la Gestión Ambiental cuenta con una herramienta denominada Análisis del Ciclo de Vida, con la que se puede generar un método simplificado para demostrar de forma reproducible y verificable los avances en sostenibilidad, y que podría articularse a los informes *GRI*.

3. Análisis del ciclo de vida como herramienta de la gestión ambiental en la minería

La gestión ambiental cuenta con diferentes herramientas, entre ellas: los Sistemas de Gestión Ambiental, la Evaluación de Impactos Ambientales, la Producción Más Limpia, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), entre otros [17]. En el presente análisis se hará énfasis en la aplicación de éste último en la industria minera, y de los retos que se deben afrontar desde la perspectiva del ACV frente al aporte que puede generar en el marco del enfoque “*Triple Bottom Line*” para demostrar con un enfoque científico, es decir, de forma reproducible y verificable, y además como herramienta que permita advertir los avances o retrocesos potenciales y reales de la industria minera en materia de sostenibilidad según sean los escenarios involucrados.

El ACV de un producto es una metodología estandarizada a partir de la norma ISO 14044 que tiene en cuenta la premisa que “los recursos energéticos y materias primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido de cómo se remplazan o como surgen nuevas alternativas” [18]. Así, para el diseño o rediseño de los productos, el ACV se vale de modelaciones que permiten caracterizar y cuantificar los impactos ambientales potenciales asociados a las diferentes etapas de su ciclo de vida [19], logrando así la identificación de escenarios de producción eco-eficientes, entendidos como la combinación de procesos, o cambio de materias primas o insumos que conlleven a una menor utilización de recursos y a la generación de menores impactos

ambientales en las etapas del ciclo de vida del producto: desde la extracción de materias primas, su transformación en un producto, su uso por el consumidor y finalmente su disposición final o aprovechamiento.

3.1 Experiencias de las aplicaciones del ACV en la minería

La implementación de la metodología de ACV en la industria minera como herramienta de gestión ambiental se ha enfocado en la identificación de impactos ambientales, como lo demuestra el estudio realizado por Mangema & Brent, en el contexto de la minería de carbón en Sudáfrica, en donde se identifican los impactos ambientales considerando cuatro escenarios: carbonos típicos de alto y bajo grado, provenientes tanto de minería en socavón como a cielo abierto. Los investigadores pudieron evidenciar que para el caso de estudio, el recurso más afectado era el hídrico, a pesar de no representar un insumo principal para el desarrollo de la minería de carbón; sin embargo, toma relevancia debido a la intoxicación potencial de poblaciones humanas, resultantes de las descargas de sulfato, así mismo, los investigadores concluyen que para el estudio de caso el impacto sobre el recurso aire es el de menor importancia [20], a diferencia de otras extracciones típicas de carbón, donde éste es el componente más afectado debido a las emisiones de material particulado, a tal punto que la exposición de este tipo de emisión ha sido relacionada con la aparición de cáncer pulmonar en algunas localidades donde se practica éste tipo de minería [21].

A pesar de los reveladores resultados, éste estudio sólo se limitó a usar la metodología para determinar impactos ambientales del ciclo de vida, tanto de la minería a cielo abierto como en la de extracción subterránea, y no presentó ningún direccionamiento estratégico, que aportara a la competitividad de la actividad de extracción minera. En este sentido, Durucan et al. realizan un acercamiento de un estudio de ACV orientado a mejorar la competitividad minera. Para alcanzar este objetivo, se desarrolló un modelo de ACV que integra la producción minera, el procesamiento, el tratamiento y eliminación de los residuos, y finalmente la rehabilitación y los cuidados posteriores a la vida útil de la mina [23].

El modelo permite el cálculo de los impactos específicos en el sitio de generación, basado en datos reales, proporciona trazabilidad y asignación real de las cargas ambientales, además ofrece el nivel de detalle necesario para facilitar la evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida. A partir de este estudio se concluye que el modelo de ACV es una herramienta útil para el procesamiento y la planificación de los escenarios de gestión ambiental en la minería, permitiendo la optimización de los procesos, la eficiencia de los recursos y la mejora en el desempeño ambiental [23].

Se puede observar que el ACV ha sido una herramienta utilizada para medir impactos ambientales en el desempeño minero; sin embargo, se deben enfrentar algunos retos para que los estudios de ACV demuestren de forma simplificada holística, sistémica, rigurosa, reproducible y verificable los avances de la industria minera en materia de sostenibilidad, integrando tanto lo económico, como lo ambiental y lo social, y que a la larga se conviertan en un instrumento que influya

en el direccionamiento estratégico, en el que el tema de sostenibilidad sea tomado como un verdadera estrategia de competitividad.

3.2. Retos del ACV como herramienta metodológica de modelación de sostenibilidad en la industria minera

Son diversos los retos que enfrenta el ACV para que sea incluido como una herramienta que demuestre los avances de la industria minera en materia de sostenibilidad, y que a la larga logre que ésta sea tomada como un elemento estratégico en la competitividad minera; muchos de éstos retos incluso están por fuera de la gobernanza de la metodología en sí, como factores culturales, de normatividad, de mercado, entre otros; en este análisis se tratarán aquellos retos que la metodología puede enfrentar a partir del mejoramiento de la misma.

El primer reto es la unión de criterios y métodos, en la actualidad la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) propone tres metodologías de ACV distintas que podrían usarse para medir la sostenibilidad de un producto, discriminadas en: ACV Ambiental, ACV Social y ACV Económico. De las anteriores sólo la metodología de ACV Ambiental se encuentra normalizada a través de una norma ISO (ISO 14040, ISO 14044), y cuenta con métodos estandarizados de evaluación del impacto, así como herramientas que facilitan su uso objetivo (softwares) [23]. Es válido pensar que a partir de esta metodología de ACV ambiental que se encuentra ya normalizada y estandarizada, se pueda plantear un método simplificado que modele escenarios potenciales y reales de sostenibilidad minera. A partir de este punto se hará énfasis en esta metodología de ACV más desarrollada, reconocida y estandarizada, y como a partir de ella se podrían llegar a generar indicadores que lleven a un método simplificado de modelación de sostenibilidad minera.

La norma ISO 14044 estandariza los procedimientos para la aplicación de la metodología de ACV, en ésta uniformización del método se establecen cuatro fases: Objetivo y alcance del Análisis del Ciclo de Vida (ACV); Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (I.C.V); Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (E.I.C.V) e Interpretación del estudio de análisis del ciclo de vida [24]. En la fase de E.I.C.V se hace uso de los Métodos de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (MEICV), siendo los más conocidos el ecoindicador 99, el CML 2001, Ecological scarcity 2006, ReCiPe Endpoint, ReCiPe Midpoint y IPCC 2007 GWP, entre otros [25,25]; estos métodos se diferencian entre sí por las categorías de impacto con las que cuentan, así como en los criterios usados para la normalización y ponderación de cada uno de los impactos.

El uso de uno u otro MEICV dependerá de las necesidades y criterios del investigador en cuanto a qué tipo de impacto está dirigido su análisis [26], así por ejemplo, si el investigador, necesita observar y analizar el aporte de CO₂eq de un proceso o producto en particular y la variación que pueda ocurrir en éste aporte al hacer cambios en las materias primas u otros componentes del producto, seguramente el método más apropiado sea el IPCC 2007 GWP, ya que este método se caracteriza por generar los

resultados en una única categoría de impacto medido en Kg de CO₂eq; si por el contrario, la investigación requiere que los datos sean analizados a la luz de los impactos que el proceso productivo o el producto tienen en la salud humana, calidad del ecosistema y de los recursos, entonces los métodos más apropiados serán el eco-indicador 99 y el ReCiPe.

El punto en común de los MEICV es que la valoración de los impactos se hace en términos globales, es decir, el impacto total global que puede tener un proceso o producto en el cambio climático, en la degradación de la capa de ozono, en el uso de combustibles fósiles entre otros. El reto entonces en el uso de los métodos de evaluación de impactos ambientales del análisis del ciclo de vida será la regionalización de los impactos [27], lo cual es particularmente cierto para la actividad minera, ya que la disponibilidad del recurso minero no es el mismo en todos los países o incluso regiones. En la minería, especialmente la de oro, el tema de regionalización de los impactos se debe tener en cuenta tanto para la disminución del recurso mineral como para la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico por contaminación con metales pesados.

3.3. ACV regionalizado como herramienta de modelación de sostenibilidad minera

Un estudio de ACV genera estimaciones del impacto ambiental de forma global, ej: en un ACV típico para un proyecto minero, las valoraciones de las categorías de impacto mostrarán las mismas puntuaciones para un proyecto realizado en la zona de amortiguación de un parque natural que para uno realizado en una zona que presente degradación ambiental previa. Así pues, uno de los principales retos en la aplicación de la metodología será mostrar la diferencia de los impactos según sea la localización del proyecto. Ésta diferenciación de los impactos según sea la ubicación o localización se denomina en ACV “regionalización”, lo que puede mejorar la exactitud de los resultados y hacerlo más relevante para la toma de decisiones [28].

Una de las formas de obtener un ACV Regionalizado es mediante la formulación y aplicación de “indicadores de restricción al uso de los recursos naturales”. En el presente estudio se propone abordar esta regionalización a partir de la generación indicadores de restricción al recurso hídrico por contaminación e indicadores de extracción del recurso mineral que se articulen a los actuales MEICV.

3.3.1. Indicador de agotamiento del recurso hídrico

En el caso del agotamiento del recurso hídrico, ya se han realizado diferentes esfuerzos para incorporar este indicador a los resultados obtenidos al hacer uso de los MEICV [29], es decir, no están incluidos dentro de estos métodos (Eco-indicador 99, CML 2001, Ecological scarcity 2006, ReCiPe 2008 y IPCC 2007 GWP, entre otros), por lo que es necesario realizar los análisis de agotamiento del recurso hídrico de forma separada y articularlos o hacerlos compatibles con los puntajes arrojados por los métodos existentes y así tener una misma unidad de medida.

Como se explicó anteriormente, los MEICV se

diferencian entre sí por las categorías de impacto con las que cuentan; en este sentido, los MEICV que podrían mostrar una evaluación más integral son el Eco-indicador 99 (EI99) y el ReCiPe, debido a que pueden expresar los daños ambientales potenciales en tres áreas de protección o categorías de daño de punto final [30]: salud humana, calidad de los ecosistemas y calidad de los recursos.

Pfister et al. desarrollaron un método para la medición de los efectos de la escasez ecológica de agua dulce debido a su uso, el cual integra estas tres categorías de daño, y que podría ser adaptado como indicador de agotamiento por uso o contaminación del recurso hídrico para el caso minero [33]. Entonces, es posible basarse en modelos como el WaterGAP2 que describe la relación de consumo de agua vs agua disponible de más de 10.000 cuencas individuales, el modelo cuantifica la disponibilidad anual de agua dulce y las captaciones realizadas por los diferentes usuarios para cada cuenca [31], la información permitiría obtener un Índice de Estrés Hídrico [32]. A partir de este índice será posible determinar posibles efectos en la salud humana ocasionados por la privación del recurso hídrico ya sea por contaminación o agotamiento.

Para el caso de integrar la categoría de “daño a la calidad del ecosistema” en un indicador de agotamiento por uso o contaminación del recurso hídrico, se han diseñado índices con valores de 0 a 1 para cuantificar restricciones al crecimiento de las plantas vasculares debido a la temperatura, la radiación y la disponibilidad de agua, lo cual puede considerarse como un indicador de la calidad del ecosistema [33]. En EI99, el daño a los recursos se expresa como el "exceso de energía" (MJ) necesario para hacer que el recurso esté disponible en el futuro [30]; para el caso de un indicador de agotamiento por uso o contaminación del recurso hídrico en minería, este puede calcularse teniendo en cuenta el concepto de “tecnología de respaldo”, es decir el cálculo de la energía necesaria para extraer agua subterránea fósil o para

algunos casos, la desalinización del agua de mar para compensar el agotamiento de los recursos hídricos [34]

3.3.2. Indicador de agotamiento de los recursos abióticos

Se han propuesto diferentes metodologías para incorporar el agotamiento de los recursos abióticos en las categorías de impacto y en los indicadores de categoría de recursos abióticos en la Evaluación del Impacto Ciclo de Vida. En principio, hay cuatro tipos de indicadores a partir de las siguientes propuestas [35]:

- (a) la energía o masa,
- (b) la relación del uso de depósitos (es decir, velocidad de agotamiento),
- (c) las consecuencias futuras de las extracciones de recursos,
- (d) el consumo exergético o entropía de producción.

Los métodos de evaluación del impacto del agotamiento de los recursos abióticos se pueden caracterizar en cinco grupos como se indica en la Tabla 2, lo que ha sido criticado por algunos investigadores que sostienen que la existencia de más de un método de categorización conduce a diferentes modelos y por lo tanto a dar resultados diferentes [36].

Al observar los diferentes métodos de cálculo del impacto del agotamiento del recurso abiótico, se puede inferir que éstos sólo se centran en el impacto de la extracción sobre el agotamiento o disponibilidad del recurso minero, dejando de lado el impacto que la actividad de remoción de estos recursos pueda tener sobre la salud y los ecosistemas, por lo que se abre la ventana investigativa para desarrollar un método de evaluación regionalizado que integre estas tres categorías de impacto.

Finalmente, el desarrollo y uso de indicadores regionalizados en ACV tanto para el recurso hídrico como para el recurso abiótico o mineral, que involucren las categorías de impacto inherentes a “La Salud Humana” como indicador del componente social, “Calidad de los Ecosistemas” como indicador del componente ambiental, y a

Tabla 2. Métodos de evaluación de impacto de los recursos abióticos

GRUPO	MÉTODO DE EVALUACIÓN	FORMULA EMPÍRICA
Grupo 1	La agregación de extracción de recursos naturales sobre la base de masas [37][37]	$ADP_1 = \sum_i CF_i \times m_i$ (1) donde $CF_i = 1$
Grupo 2	La agregación y la evaluación basada en los impactos energéticos basados en la sustitución del proceso de extracción actual o el mejoramiento de procesos futuros [38] [38]	$ADP_1 = \sum_i WTP \times m_i$ (2)
Grupo 3	La agregación y la evaluación basada en la exergía o contenido de entropía o cambio [39] [39].	$ADP_1 = \sum_i CF_i \times m_i$ (3) donde $CF_i = EX_{ch,i}$
Grupo 4	La agregación y la evaluación basada ya sea en la cantidad de recurso que esta finalmente disponible, o la parte de la base de reserva que puede ser económicamente extraído, y la tasa de extracción en el momento de la evaluación [40][40].	$CF_i = ADP_1 = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}}$ (4)
Grupo 5	La agregación y la evaluación basada en el cambio en el impacto previsto ambiental del proceso de extracción de recursos debido a los menores depósitos de grado que tienen que ser extraído en el futuro [30][30]	$ADP_1 = \sum_i CF_i \times m_i$ (5) donde $CF_i = SPE_i$

Fuente: Modificado de [35]

Dónde:

ADPi	potencial de agotamiento del recurso Abiótico i (kg Sb-equivalente/kg recurso i);
CFi	factor de caracterización del agotamiento del recurso abiótico i ,
m	la masa de los recursos que se consumen en el proceso;
WTP	es la disposición a pagar para restaurar impactos, en este caso las reservas de los recursos abióticos, valores expresados en unidades de carga del medio ambiente (ELU,€);
EXch, i	exergía química de los recursos i (MJ / kg);
DRi	la tasa de extracción del recurso i (kg /año),
Ri	la reserva de último recurso i (kg);
Rref	la reserva final del recurso de referencia – antimonio (kg);
DRref	la tasa de extracción del recurso de referencia – antimonio (kg /año);
SPEi	el exceso de energía (MJ) necesaria para extraer 1kg de un recurso de un mineral de menor grado.

los “Recursos” como indicador del componente económico, aunado a un índice derivado de los indicadores de sostenibilidad *GRI* y del *Global Compact* brindarían al ACV el enfoque “*Triple Bottom Line*”, que permitiría no sólo demostrar los avances, sino además, predecir los futuros y mejores escenarios en materia de sostenibilidad para las industrias mineras.

4. Conclusiones

Las experiencias logradas en pequeñas unidades mineras de explotación de oro como es el caso de “oro verde” y la certificación “*Fair Mined*”, dan cuenta que es posible generar valores agregados en el producto minero, ya que hay un mercado dispuesto a reconocer e incentivar la inversión que éstos empresarios mineros realizan en sostenibilidad minera. Incluir dentro de los requisitos de certificación modelaciones de escenarios reales y potenciales de sostenibilidad minera haciendo uso de indicadores regionalizados de ACV, que expresen sus resultados en términos o unidades ambientales, de salud humana y económicas, permitirían una mejor justificación y argumentación de estos valores agregados en el producto final.

La gestión ambiental vista como un elemento que conlleve a la competitividad, se ha venido introduciendo sobre todo en aquellos procesos mineros donde su implementación representa una generación de valor agregado al producto final. En este orden de ideas, pequeñas unidades mineras de carbón tienen una clara desventaja frente a sus símiles de oro, ya que por tratarse de un bien cuya función no va más allá de su uso como combustible o en la producción de acero, su precio dependerá directamente de los precios del petróleo, así que la inversión adicional en el cuidado ambiental no se verá reflejado en un precio final o difícilmente se encontrará un mercado que reconozca este esfuerzo adicional. Sin embargo y debido a las cada vez más

severas condiciones o requisitos que se establecen para desincentivar el uso del carbón, la motivación para los empresarios de éste sector de la minería para invertir en el tema de sostenibilidad y a su vez el reto desde la creación de un método simplificado de modelado de sostenibilidad minera a través de la metodología de ACV será demostrar a los actores interesados que la extracción del mineral se realiza bajo el mejor escenario posible de sostenibilidad minera.

En la actualidad no se presentan certificaciones para la gran industria minera como el “*Fair Mined*”; sin embargo, las empresas más importantes se han comprometido a generar informes de sostenibilidad, en el marco de los enfoques del “*Global Reporting Initiative*”, “*Global Compact*”, entre otras. Un método simplificado de modelado de sostenibilidad minera que incluya Indicadores Regionalizados de ACV permitiría no sólo una mayor aceptación y credibilidad dentro de la comunidad académica, sino además, incorporar una herramienta con enfoque científico que permitiría demostrar que se está desarrollando el mejor escenario posible de minería.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por Colciencias a través del programa nacional de formación de investigadores “Generación del Bicentenario” “Francisco José de Caldas”, y a la Universidad del Valle, por su apoyo a través del programa doctoral en ingeniería énfasis en Sanitaria y Ambiental.

Referencias

- [1] Unidad de Planeación Minero Energética., Plan Nacional de Desarrollo Minero 2007-2010, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, [en línea]. 2007. Disponible en: <https://goo.gl/v67JkB>.
- [2] Unidad de Planeación Minero Energética UPME., Anuario Estadístico Minero Colombiano, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 2011.
- [3] Contraloría General de la República., Informe del Estado de los recursos naturales y del ambiente 2010-2011, Bogotá, 2011.
- [4] Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED), Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sustentable (WBSCD), Resumen ejecutivo. Abriendo brecha: Minería, minerales y desarrollo sustentable (MMSD), [En línea]. 2002. [Último acceso: 4 abril 2017]. Disponible en: <http://pubs.iied.org/pdfs/9287IIED.pdf>.
- [5] Polo-Robilliard, C., Autor(es) Institucional(es): German Agency for Technical Cooperation NU. CEPAL y División de Recursos Naturales e Infraestructura., Los ejes centrales para el desarrollo de una minería sostenible, [En línea]. Mayo 2006. Disponible en: <http://www.cepal.org/es/publicaciones/6306-ejes-centrales-desarrollo-mineria-sostenible>. [Último acceso: 04 Abril 2017].
- [6] Jinghua, S., Xinxin, M. y Nan, X., The comparative study on the mining industry competitiveness of Xiangjiang in China. *Energy Procedia*, [online]. 5, pp. 158-162, 2010. Available at: <https://www.elsevier.com/locate/procedia>.do?fileId=236687&method=getFile
- [7] ARM, Stándar fairmined para oro de minería artesanal y de pequeña escala, incluyendo metales preciosos asociados, Versión 2.0, Alianza por la minería responsable, 2014a.
- [8] Echavarría-Usher, C., ¿Qué es legal?. Formalización de la minería artesanal y de pequeña escala en Colombia., Envigado: Alianza por la minería responsable, [en línea]. 2015. Disponible en: <http://lasillavacia.com/silla-llena/red-minera/historia/qu-es-legal-formalizaci-n-de-la-miner-artesanal-y-de-peque-escala-en>

- [9] Morales, L., Un oro verde en las selvas de Colombia. [En línea]. 12 agosto 2011. Available at: <http://www.semana.com/nacion/articulo/un-oro-verde-selvas-colombia/244669-3>. [Último acceso: 21 marzo 2016].
- [10] PROCASUR, Corporación Oro Verde: La minería no es sólo extracción medio ambiente y cambios climáticos, Colombia, 2009., Colombia: Procasur Corporation, 2009.
- [11] ARM, Impulsando buenas prácticas de minería artesanal y de pequeña escala en el contexto latinoamericano: El estándar de minería justa fairmined, Alianza por la Minería Responsable, [en línea]. Envigado, 2014b. Disponible en: <http://www.fairmined.org/es/download/impulsando-buenas-practicas/>
- [12] Linares, W.C. y Sepúlveda, G.F., Implementación bajo incertidumbre de mercado del algoritmo de optimización Lerchs Grossmann en depósitos de carbón. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 33, pp. 147-154, 2013.
- [13] Nilsson, M., Comment: The environment and competitiveness in mining: Is there room for the environmental-self regulation in the mining sector? (by O Bomsel et al), *Resources Policy*. 22(1-2), pp. 87-89, 1996. DOI: 10.1016/S0301-4207(96)00031-1
- [14] ICMM, Marco para un desarrollo sostenible: Procedimiento de aseguramiento. ICMM - International Council on Mining and Metals, Londres, 2008.
- [15] GRI, Suplemento GRI del sector de minería y metales. GRI- Global reporting Initiative, Amsterdam, [en línea]. 2005. En <http://www.observatorio-rse.org.es/Publicaciones/SuplementoGRI.pdf>
- [16] Navarro-García, F., Responsabilidad social corporativa: Teoría y práctica. *Revista del Ministerio De trabajo E Inmigración*, [en línea]. 76, pp. 196-195. Disponible en: http://www.esic.edu/documentos/editorial/resenas/9788473568241_Revista%20del%20M%C2%BA%20de%20Trabajo_01-12-08.pdf
- [17] CERREJÓN, Resumen de desempeño [En línea]. 2013, 2014. Disponible en: http://www.cerrejon.com/site/Portals/0/Documents/pdf/informes_sostenibilidad/Resumen_IS2013-ESP.pdf. [Último acceso: 03 05 2016].
- [18] Van Hoof, B., Monroy, N. y Saer, A., Producción más limpia: Paradigma de gestión ambiental, México: Alfaomega, [en línea]. 2008. Disponible en: <https://encrypted.google.com/books?id=eWS-MwEACAAJ>. Doi:10.1016/j.jclepro.2004.04.012
- [19] Romero, B., El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental, *Boletín IIE Julio - Septiembre*, pp. 92-98, 2003.
- [20] Sáenz, B. y Zúñiga, J., Análisis de ciclo de vida para la reducción de impactos medioambientales Generados por el sector agroalimentario Vasco, *Rev. Agroalimentaria*, 49, pp. 48-50, 1996.
- [21] Mangema, S. and Brent, A., Application of life cycle impact assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economics values of supplied coal products, *Journal of Cleaner Production*, 14, pp. 1071-1084, 2005.
- [22] Hendrix, M., O'Donell, K. and Horn, K., Lung cancer mortality is elevated in coal-mining areas of Appalachia, *Lung Cancer*, 62, pp. 1-7, 2008. DOI: 10.1016/j.jungcan.2008.02.004
- [23] Durucan, S., Korre, A. and Muñoz-Meléndez, G., Mining life cycle modelling: A cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. *Journal of Cleaner Producción*, 14(12-13), pp. 1057-1070, 2006. DOI: .1016/j.jclepro.2004.12.021.
- [24] UNEP, SETAC, Life cycle initiative, Guidelines for social life cycle assessment of products. United Nations Environment Programme, Bruselas, 2009.
- [25] ICONTEC, NTC-ISO 14044. Gestión ambiental, análisis del ciclo de vida. requisitos y directrices. Requisitos del ciclo de vida. ICONTEC, Bogotá, [en línea]. 2007. Disponible en <http://tienda.icontec.org/brief/NTC-ISO14040.pdf>
- [26] Lasvaux, S., Achim, F., Garat, P., Peuportier, B., Chevalier, J. and Habert, G., Correlations in life cycle impact assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters?, *Ecological Indicators*, [online]. 67, pp. 174-182, 2016. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.01.056. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16300103>
- [27] Bueno, C., Hauschild, M.Z., Rossignolo, J.A., Ometto, A.R. and Crespo -Mendes, N., Sensitivity analysis of the use of life cycle impact assessment methods: A case study on building materials, *Journal of Cleaner Production*, [online]. 112, pp. 2208-2220, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.006. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615013876>
- [28] Rack, M., Valdivia, S. y Sonnemann, G., Life cycle impact assessment - Where we are, trends, and next steps: A late report from a UNEP/SETAC life cycle initiative workshop and a few updates from recent developments, *Int. J. Life. Cycle. Assess.*, 18, pp. 1413-1420, 2013. DOI:10.1007/s11367-013-0569-1
- [29] Yang, Y., Toward a more accurate regionalized life cycle inventory, *Journal of Cleaner Production* 112, pp. 308-315, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.091
- [30] Berger, M. and Finkbeiner, M., Water footprinting: How to address water use in life cycle assessment?, *Sustainability*, [online]. 2(4), pp. 919-944, 2010. DOI: 10.3390/su2040919. Available at: <http://www.mdpi.com/2071-1050/2/4/919/htm>
- [31] Goedkoop, M., Effting, S. and Collignon, M., The Eco-indicator 99 manual for designers. A damage oriented method for life cycle impact assessment, Ministry of Housing Spatial Planning and the Environment, Amsterdam, [online]. 2000. Available at: https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_annexe_v3.pdf
- [32] Alcamo, J., Dol, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rosch, T. and Siebert, S., Development and testing of the watgap 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), pp. 317-337, 2003. DOI: 10.1623/hysj.48.3.317.45290.
- [33] Pfister, S., Koehler, A. and Hellweg, S., Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA, *Environ. Sci. Technol.* (43), pp. 4098-4104, 2009.
- [34] Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni R.B. and Running, S.W., Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, [online]. 300(5625), pp. 1560-1563., 2003. DOI: 10.1126/science.1082750. Available at: <http://science.sciencemag.org/content/300/5625/1560/tab-pdf>
- [35] Stewart, M. and Weidema, B., A consistent framework for assessing the impacts from resource use - A focus on resource functionality. *Int. J. Life Cycle Assess*, [online]. (4), pp. 240-247, 2005. DOI:10.1065/lca2004.10.184. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2004.10.184>
- [36] Mohan, Y., Gavin, M. and Ranjith, P., The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?, *Journal of Cleaner Production*, [online]. (19), pp. 78-90, 2011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.08.020. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610003483>
- [37] Reap, J., Roman, F., Duncan, S. and Bras, B., A survey of unresolved problems in life cycle assessment, Part 2: Impact assessment and interpretation., *Int. J. LCA*, (13), pp. 374-388, 2008. DOI: 10.1007/s11367-008-0009-9
- [38] Finnvedn, G. and Lindfors, L.-G., On the nordic guidelines for life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), pp. 45-48 1996. DOI: 10.1007/BF02978635
- [39] Steen, B., A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS), Version 2000d Models and Data., Chalmers University of Technology. Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems, Göteborg, Sweden, 1999. ISSN 1403-2694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.11.282>.
- [40] Bösch, M.H.S.H.M.F.R., Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database, *Int. J. LCA*, 12, pp. 181-190, 2007.
- [41] Guinée, Handbook of Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 917-925. DOI: 10.1007/BF02978897

U.F. Carmona-García, se graduó de Administrador Ambiental en 2004 de Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, Esp. En 2008 y candidato a Dr. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, de la Universidad del Valle, Colombia, su proyecto doctoral está orientado a la identificación de escenarios reales y potenciales de sostenibilidad minera a través del Análisis

del Ciclo de Vida (ACV). Para la formulación de este modelo realizó una estancia académica en la universidad de Zaragoza en España, donde logra publicar dos artículos sobre ACV en las revistas científicas más influyentes a nivel mundial sobre éste tema (“The International Journal of Life Cycle Assessment”; “Journal of Cleaner Production”). Así mismo realizó la evaluación del impacto ambiental de la minería artesanal de carbón en la cuenca del Sinifaná a partir del ACV, y formuló y publicó una guía dirigida a los mineros artesanales, donde se muestran estrategias para el cumplimiento de los Planes de Manejo Ambiental.
ORCID: 0000-0002-5352-6300

H. Cardona-Trujillo, es Administrador Ambiental graduado en el año 2004 de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, MSc. en Desarrollo Rural, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia en 2011, profesor investigador asociado a la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad de Antioquia, Colombia, enfocado en los campos del desarrollo rural y regional, el desarrollo económico local y la sostenibilidad, actualmente dirige el Grupo de Investigación en Estudios Regionales.
ORCID: 0000-0002-9260-8798

I. Restrepo-Tarquino, es Ingeniera Sanitaria (1980) y MSc. en Ingeniería de Sistemas (1995) de la Universidad del Valle, Colombia. PhD de la Universidad de Leeds, Reino Unido (2002). Vinculada al Instituto Cinara desde 1991. Participó por Colombia en el Comité Técnico Suramericano (SAMTAC) del Global Water Partnership (GWP)-(1998-2004) y formó parte del equipo de trabajo en la elaboración del currículo de los programas de posgrado en Ingeniería en Ingeniería Sanitaria y Ambiental y Gestión Integrada de Recursos Hídricos. Ha liderado la gestión y coordinación de importantes proyectos sobre la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) en el ámbito nacional e internacional: fortalecimiento de capacidades, diplomados, desarrollo de modelos conceptuales, estrategias socioeducativas y usos múltiples del agua. La profesora Inés Restrepo ejerció la dirección de Cinara durante el período 2010-2014. En la actualidad coordina el Grupo de Investigación en Saneamiento Ambiental.
ORCID: 0000-0003-4705-206



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de
Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105