

LA EXPLOTACIÓN MINERA EN LA REGIÓN ANDINA: UN ENFOQUE TERMODINÁMICO

José-Luis Palacios, Guiomar Calvo, Alicia Valero y Antonio Valero

Resumen

La extracción de recursos naturales en América Latina ha sido y sigue siendo una actividad que tiene diversas implicaciones tanto en aspectos sociales como culturales, económicos y políticos. El presente trabajo busca, a través del uso del concepto de *Coste exergético de reposición (ERC)*, desarrollado por Valero et al., determinar el coste de reposición de los minerales combustibles y no-combustibles en la Región Andina (Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia). El concepto de *ERC* se basa en la Segunda Ley de la Termodinámica y determina el coste necesario en términos de exergía para recuperar los minerales, combustibles y no-combustibles, una vez han sido utilizados y dispersados completamente, a sus condiciones iniciales empleando las mejores tecnologías disponibles. Combinando el *ERC* con el precio de mercado de los minerales se puede estimar el coste que tendría su recuperación empleando energías primarias. Después, comparando este coste de recuperación de los minerales con el *PIB* total de cada país, se puede estimar el coste que representa la explotación de minerales para un año específico. Esta relación permite llevar a cabo una comparativa para poder analizar si los costes asociados a volver a concentrar los minerales están siendo compensados por los beneficios mineros obtenidos por cada país.

En el estudio se lleva a cabo un análisis de la producción, importación y exportación para la región para el año 2013. Dicho balance se lleva a cabo en términos físicos (toneladas) y también en términos exergéticos (Mtoe). En el caso de los cálculos de los costes para la recuperación de los minerales, se consideran los costes más bajos y más altos teniendo en cuenta los precios de la energía primaria disponibles en cada país (electricidad, carbón, petróleo o gas natural).

Los resultados indican que en el caso de Venezuela, Colombia, Ecuador y Bolivia existe una diferencia muy elevada entre la ganancia de la actividad extractiva respecto a la inversión que se tendrían que realizar para recuperar dichos minerales respecto al *PIB* total en el 2013, considerando que la recuperación se realizaría con electricidad. En cambio, si la recuperación de los minerales se realizara con petróleo, dicha diferencia sería todavía mayor para todos los países. De forma general se observa que las rentas recibidas por la venta de minerales (combustibles y no-combustibles) en el año 2013, expresadas en el *PIB*, no compensan la pérdida de patrimonio natural causada por la extracción de los minerales. Esta situación da a entender que existe la necesidad de establecer una nueva estructura para el manejo más adecuado y justo de los recursos naturales en la Región Andina.

1. Introducción

En la Región Andina se encuentran las reservas principales y los países productores más representativos de combustibles fósiles en toda América Latina y el Caribe (AL&C). En 2013 las reservas de petróleo, gas natural y carbón se

estimaron en 54931 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep), equivalentes al 11% de las reservas de AL&C. En el mismo año la producción de combustibles fósiles fue de 375 millones tep, correspondiendo con el 45% de AL&C ((OLADE), 2015). En el caso de los recursos minerales, se estimó que las reservas de la Región Andina en el 2015 de plata, cobre, zinc y estaño a nivel mundial ascendieron a un 25%, 11%, 15%, y 11% del total mundial respectivamente (US Geological Survey, 2016).

Las exportaciones de combustibles y productos mineros de los países de América del Sur y América Central en el 2014 ascendieron a 277 billones USD, siendo los principales destinos de exportación Asia, América del Norte y Europa con unos porcentajes de 32%, 28% y 13% respectivamente ((WTO), 2015).

Por otra parte, en los países de la región, entre el 2010 y 2014, las inversiones extranjeras directas dedicadas a la minería metálica supusieron el 23% de las totales realizadas en AL&C ((CEPAL), 2016). En América Latina y el Caribe, entre el 2003 y el 2015, se anunciaron 510 proyectos en minería metálica con una inversión aproximada de 150 billones de USD. La mayoría de estos proyectos (44%) fueron para la explotación de oro y plata, aproximadamente 37% fueron para cobre, níquel, plomo y zinc ((CEPAL), 2016b). En Junio de 2016 se anunciaron resultados favorables del estudio de factibilidad para un proyecto de minería de oro en Ecuador. Se estima que las reservas totales probadas de ese proyecto serían de 4,82 millones de onzas de oro y 6,34 millones de onzas de plata. La construcción de la mina subterránea se espera para mediados de 2017 con una inversión de 669 millones de USD (Lipiec et al., 2016).

La explotación minera también ha tenido diversas implicaciones en la región de carácter social y medioambiental. En el 2015 se contabilizaron un total de 64 conflictos reportados por ((OCMAL), 2016) en Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. Otro problema serio es la minería ilegal, en 2016 se reportó que en Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia entre el 80-90%, 80%, 77%, 28 % y 30% respectivamente del oro extraído es ilegal (Crime, 2016). Otro problema a escala mundial es la minería artesanal, en particular en el caso del oro, ya que normalmente dicha producción no figura en las estadísticas mineras oficiales. En 2011 se estimó que alrededor de 15 millones de personas trabajaron en la minería artesanal de oro (Tissafi, 2011). Debido a que en las distintas etapas de la minería artesanal se emplean diversos componentes muy contaminantes, esto provoca daños ambientales y para la salud humana, siendo un ejemplo el mercurio que se añade para la purificación de oro (Long Sieber & Brain, 2014). Aunque han existido diversos intentos para promover la formalización de este tipo de minería (Hentschel, Hruschka, & Priester, 2002; Human Rights Watch, 2011) y se han publicado estudios sobre los riesgos para la vida humana del uso de mercurio (Hentschel et al., 2002; Human Rights Watch, 2011; Long Sieber & Brain, 2014; Telmer & Stapper, 2012), el problema persiste.

El enfoque general de la mayoría de las publicaciones se centra en temas económicos, sociales o de sostenibilidad ambiental, en los que actividades de minería han estado directa o indirectamente involucrados (Altomonte & Sánchez, 2016; Bastida, 2002). Investigaciones publicadas por Calvo, Valero, & Valero, (2016), Gabriel Carmona, Whiting, Valero, & Valero (2015) han empleado el concepto de ERC para el análisis de flujo de materiales en Colombia y Europa. En esta investigación se perfecciona la metodología y se aplica a los países de

la Región Andina, con el objetivo final de proporcionar información cuantitativa adicional con fundamento en la Segunda Ley de la Termodinámica para enriquecer la discusión sobre la explotación minera en América Latina.

2. Metodología

La exergía ha sido empleada tradicionalmente para cuantificar una fuente de energía y se define como la cantidad mínima de trabajo teórico que debería ser realizado para llevar a un sistema al equilibrio con el ambiente que lo rodea. Es una propiedad de combinación de sistema-ambiente (Cengel & Boles) y es útil para identificar impactos ambientales y consumo de recursos no-renovables, especialmente combustibles fósiles (Bejan, Tsatsanoris, & Moran, 1996; Dincer & Rose, 2013; Sato, 2005).

La Exergoecología, que se engloba dentro de la Geonomía Física, es una disciplina que ha sido empleada para la evaluación de sustancias inorgánicas. Los análisis convencionales de exergía solo consideran la exergía consumida desde el inicio hasta el final de un estado, es decir, desde la cuna hasta la tumba. Sin embargo, con este nuevo enfoque se cierra el ciclo, considerando también en el análisis la etapa de la tumba a la cuna. Por tanto, la presente investigación del deterioro mineral va a ser realizado empleando la Geonomía Física tal y como la define Valero (Valero, 1998).

La exergía de los minerales tiene principalmente dos componentes, por un lado la exergía química y por otro la exergía de concentración. La exergía total, definida como cantidad de exergía mínima requerida para concentrar un mineral desde un ambiente de referencia denominado Thanatia (Alicia Valero & Valero, 2013) hasta las condiciones iniciales de un depósito mineral, se determina sumando ambos componentes; siendo Thanatia la conceptualización de un planeta comercialmente muerto donde todos los minerales han sido utilizados y dispersados. Por tanto, la ecuación para calcular la exergía total (b_t) viene dada por la siguiente fórmula (Ecuación 1):

$$b_{ii} = b_{chi} + b_{ci} \quad (1)$$

Para calcular el término b_{ci} se deben considerar las concentraciones en la mina (x_m) y en la corteza terrestre (x_c), por ello, es necesario también tener en cuenta la siguiente ecuación (Ecuación 2):

$$b_{ci} = -RT_i \left[\ln x_i + \frac{(1 - x_i)}{x_i} \right] \ln(1 - x_i) \quad (2)$$

Donde x_i representa la concentración de la sustancia i , R es la constante ideal de los gases (8.314 J/molK) y T^0 es la temperatura de referencia absoluta (298.15 K).

La cantidad mínima de energía (Δb_c) que la naturaleza emplea en concentrar los minerales en una mina viene determinada por la diferencia entre la concentración en la mina y la concentración en la corteza de Thanatia, x_m y x_c , tal y como se define en la ecuación 3.

$$\Delta b_c = b_c(x = x_c) - b_c(x = x_m) \quad (3)$$

Por tanto, el coste exergético de reposición (b^*) se puede calcular aplicando la Ecuación 4.

$$b^* = k(x_c)\Delta b(x_c \rightarrow x_m) \quad (4)$$

El parámetro adimensional k es la unidad de coste exergético de un mineral y se calculado como la relación entre la energía invertida en el proceso real de minería y la concentración del mineral, y la energía teórica mínima requerida si dicho proceso fuese reversible.

Un aspecto importante que diferencia a costes exergéticos de reposición (ERC) de otras propiedades termodinámicas es que ERC contempla las mejores tecnologías disponibles para la extracción de minerales.

Debido a la cantidad de minerales considerados en este estudio, solo los valores de los costes exergéticos de reposición (ERC) de los principales minerales seleccionados aparecen en la siguiente tabla (Tabla 1).

	Mineral Principal	ERC (GJ/ton)
<i>Minerales</i>		
Aluminio	Gibbsita	627
Cobre	Calcopirita	292
Oro	Oro nativo	553,250
Yeso	Yeso	15
Hierro	Hematites	18
Caliza	Calcita	3
Sodio	Halita	44
Plata	Argentita	7,371
Zinc	Esfarelita	1,627
Plomo	Galena	37
Roca fosfática	Fluorapatito	0.4
Magnesita		
<i>Combustibles fósiles</i>		
Petróleo		46.3
Carbón		24.3-31.6
Gas natural		39.4

Tabla 1. Principales valores de los costes exergéticos de reposición (ERC) de algunos minerales empleados en este estudio. Fuente: (Alicia Valero & Valero, 2014)

En el caso de los combustibles fósiles, cuando estos se emplean, se consumen, se dispersan completamente y su ERC podría ser considerarse su correspondiente poder calórico superior. Dichos valores han sido obtenidos de Alicia Valero & Valero (2012).

Los principios de la exergoecología propuestos por Valero (Antonio Valero, 1998) han sido empleados en este estudio para llevar a cabo una evaluación más robusta y completa de la Pérdida de Riqueza Mineral en la región. A continuación se describen las principales etapas seguidas en este estudio.

La primera etapa ha consistido en la recopilación de información sobre producción, exportación e importación de combustibles fósiles y minerales para

cada uno de los países de la Región Andina. Cuando ha sido posible, se ha empleado como fuente principal información oficial de autoridades locales. Este es por ejemplo el caso de Colombia donde se ha empleado la información del Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO). La producción mineral de Ecuador ha sido obtenida de la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM). La información sobre exportación e importación de minerales de Ecuador procede del Banco Central del Ecuador (BCE) y la información mineral del Perú ha sido obtenida del (Ministerio de Energía y Minas).

En el caso de no disponer información de agencias o autoridades locales, se han empleado las bases de datos del Servicio Geológico Británico (BGS), de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe ((CEPAL), 2016a) y la base de datos de comercio exterior de la Naciones Unidas (UN). Toda la información de los minerales ha sido correlacionada y completada con la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (US Geological Survey, 2016).

Para tener un marco adecuado de comparación entre los cinco países de la región, se ha tomado el año 2013 como referencia al disponer de toda la información necesaria. Los datos de producción, exportación e importación de los combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) procede de la Organización Latinoamericana de Energía (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 2015).

Para calcular el flujo total de materiales, además de conocer la producción interna, las exportaciones e importaciones, también hay que disponer de información del consumo interno. Por tanto, el consumo interno de cada país ha sido calculado como la diferencia entre la producción más la importación menos las exportaciones. En este estudio no se ha tenido en cuenta el reciclado debido a la falta de información al respecto.

Conociendo la cantidad de mineral producida y comercializada se ha obtenido el balance de energía en Mtep aplicando el concepto de ERC a los datos en toneladas recopilados. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el ERC es un concepto desarrollado por Valero et. al (Alicia Valero & Valero, 2014) que sirve para determinar de forma cualitativa el costo en términos exergéticos para, mediante el uso de las mejores tecnologías disponibles, volver a concentrar los minerales en yacimientos una vez han quedado completamente dispersos después de su uso. Cuando el ERC se aplica a minerales y combustibles fósiles, el resultado es un análisis más completo y robusto, que se basa únicamente en cualidades físicas.

Con la información ya expresada en exergía, se ha llevado a cabo el análisis económico para poder presentar los datos de otra forma más directa y poder así comparar la pérdida de capital mineral asociado a la extracción con el PIB minero de cada país. Para esta tarea se han empleado los valores del Producto Interno Bruto (PIB) publicados por la CEPAL ((CEPAL), 2016a). Finalmente, para determinar el coste de recuperación de los minerales, se han considerado los valores de mercado de las distintas fuentes de energía primaria disponibles en cada país. Para poder obtener un rango de valores, se ha tomado el valor más bajo del precio de la energía para calcular el Precio Límite Inferior (LBP) y el valor más alto para calcular el Precio Límite Superior (UBP). Los datos de los valores de la energía proceden de la (Organización Latinoamericana de Energía

(OLADE), 2015). El coste de recuperación se calcula mediante la siguiente fórmula (Ecuación 5):

$$\text{Recuperación} = b^* \times \text{UBP or LBP} \quad (5)$$

Después, la proporción entre LBP o UBP respecto del PIB total se ha obtenido para cada país. Se han evaluado estas comparaciones con el ratio del GDP extractivo frente al PIB total de cada país. Empleando el ERC es posible dar una expresión cuantitativa a los minerales y realizar una comparación con las ganancias económicas de su venta para los países de la región. Así mismo, empleando el ERC, se pueden comparar fácilmente minerales y combustibles fósiles en una misma unidad, USD/Mtoe.

3. Resultados y análisis

País	Combustibles fósiles			Minerales			TOTAL		
	Producción	Importación	Exportación	Producción	Importación	Exportación	Producción	Importación	Exportación
Bolivia	18.7	-	12.6	0.5	0.0	0.2	19.2	0.0	12.8
Colombia	154.0	-	119.0	15.2	1.5	0.0	169.0	1.5	119.0
Ecuador	26.5	-	18.3	7.1	-	0.0	33.6	-	18.3
Peru	17.3	4.8	5.4	25.8	-	3.4	43.1	4.8	8.8
Venezuela	6.0	2.2	97.1	16.2	13.6	3.2	182.0	15.8	100.0

Tabla 2. En la siguiente tabla se resumen los datos de los combustibles fósiles y minerales comercializados en los cinco países de la región para el año 2013.

Durante este estudio se han considerado tres combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) y 19 minerales. Los minerales que han sido estudiados son los siguientes: aluminio, antimonio, bauxita, cadmio, cobre, oro, hierro, plomo, caliza, molibdeno, níquel, roca fosfórica, platino, sal, selenio, plata, estaño, wolframio y zinc. La Región Andina produce otros minerales industriales como arcillas, caolín, etc. que no han sido considerados en este análisis porque son consumidos localmente y no tienen un impacto significativo en la comercialización de minerales.

En términos másicos (toneladas), el petróleo y el carbón fueron los combustibles fósiles con una mayor extracción, con 59% y 24%, respectivamente del total en 2013. Los minerales con tasas mayores de extracción fueron caliza 36%, hierro 27% y roca fosfórica 23%, respecto del total de minerales extraídos en 2013. En la Tabla 3 se identifican los principales minerales extraídos en cada uno de los países de la Región Andina.

Al evaluar el consumo interno (calculado como producción más importación menos exportación), el petróleo y gas natural fueron los combustibles fósiles más consumidos. Los minerales más consumidos en 2013 fueron hierro, caliza y sal. Minerales industriales como caliza, roca fosfórica, etc., son ampliamente consumidos y su valor comercial es bajo.

El consumo interno de Ecuador y Perú de oro arrojaron valores negativos, esto se debe a que existe una mayor cantidad de mineral que se exporta respecto a la producción local. Esto se explica por influencia significativa de la minería ilegal en los dos países de la región.

Por otra parte, cuando se analiza la extracción de los principales minerales en términos de ERC (Mtep) el zinc, aluminio, cobre y hierro fueron los más extraídos con unos respectivos porcentajes de 53%, 27%, 7% y 6%. Tal y como se explica anteriormente, al emplear el ERC se pueden identificar factores adicionales que un análisis en masa no permite determinar. El balance mineral para la Región Andina en ERC aparece en la Tabla 4.

País	Combustibles fósiles			Minerales			TOTAL		
	Producción	Importación	Exportación	Producción	Importación	Exportación	Producción	Importación	Exportación
Bolivia	18.7	-	12.6	0.5	0.0	0.2	19.2	0.0	12.8
Colombia	154.0	-	119.0	15.2	1.5	0.0	169.0	1.5	119.0
Ecuador	26.5	-	18.3	7.1	-	0.0	33.6	-	18.3
Peru	17.3	4.8	5.4	25.8	-	3.4	43.1	4.8	8.8
Venezuela	6.0	2.2	97.1	16.2	13.6	3.2	182.0	15.8	100.0

Tabla 2 Balance mineral de la Región Andina en 2013 (unidades: toneladas)

Región Andina	Principales minerales
Bolivia	zinc, plomo, estaño
Colombia	caliza, hierro, sal
Ecuador	caliza, cobre, oro
Peru	hierro, zinc, cobre, oro
Venezuela	hierro, aluminio, caliza

Tabla 3 Principales minerales extraídos en la Región Andina en el 2013 (respecto a su producción en toneladas).

País	Combustibles fósiles			Minerales			TOTAL		
	Producción	Importación	Exportación	Producción	Importación	Exportación	Producción	Importación	Exportación
Bolivia	29.9	-	11.9	16.8	0.02	7.8	34.8	0.02	19.6
Colombia	68.1	53.3	37.1	2.8	1.9	0.7	122.9	1.9	87.2
Ecuador	29.2	-	20.3	2.0	-	0.2	31.1	-	20.4
Peru	21.0	4.8	5.7	67.4	-	55.2	84.2	5.1	60.4
Venezuela	179.2	2.9	106.5	40.0	0.0003	1.4	214.9	2.1	108.4

Tabla 4 Balance mineral de la Región Andina en ERC para 2013 (unidades: Mtep)

Perú, Venezuela y Bolivia representan más del 96% de la producción mineral en ERC para el 2013 del total de la Región Andina. Perú y Bolivia fueron los principales productores de zinc con 52,3 y 15,8 Mtep respectivamente, Venezuela fue el mayor production de aluminio, con 35 Mtep, y Perú fue el principal de cobre, con 7,28 Mtep.

Una vez se tiene la información relativa al flujo de materiales, se puede representar gráficamente empleando diagramas de Sankey. Dichos diagramas representan los flujos de forma proporcional a los valores, por lo que así se puede ver de forma directa qué tiene más peso a nivel nacional. A manera de ejemplo se ha realizado el diagrama Sankey para Venezuela. En el diagrama se han tomado en cuenta todos los minerales extraídos, sin embargo, solo se muestran en la leyenda los que pueden ser visualizados con facilidad.

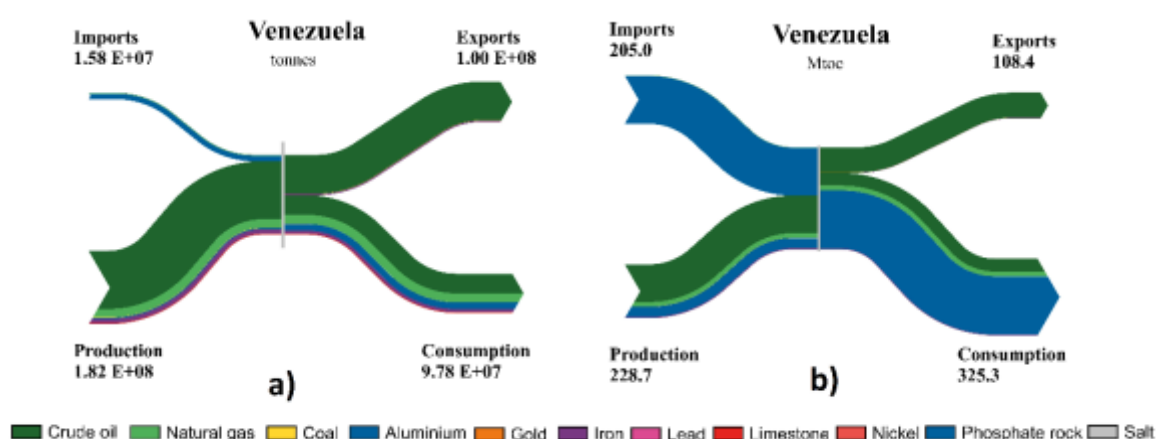


Fig. 1 Diagrama Sankey para minerales y combustibles fósiles de Venezuela 2013, a) en masa, b) en ERC

Al analizar la Fig. 1 a) (en toneladas), se observa de manera general que la producción de combustibles fósiles es mayor que la producción de minerales. La producción de petróleo en Venezuela fue 1.4 veces superior a la de otros combustibles fósiles. Las exportaciones son principalmente de petróleo y hierro, juntas ascendieron a 151 millones de toneladas en 2013.

Por otro lado, la Fig. 1b, diagrama Sankey en términos de ERC, muestra que la importación de aluminio fue similar en comparación con la producción interna de combustibles fósiles, 205,0 y 228,7 Mtoe respectivamente. Al igual que en la Fig. 1a, el principal producto exportado es el petróleo. Al contrario que en el diagrama en toneladas, se observa que el consumo en términos de ERC fue mayoritariamente de aluminio, con un valor de 35 Mtep. El diagrama en ERC revela que el consumo de aluminio y combustibles fósiles en su conjunto, fue tres veces superior a la exportación, principalmente de petróleo.

Como se mencionó en la metodología, el coste asociado al restablecimiento de los minerales a sus condiciones naturales se realiza empleando las fuentes de energía disponibles en cada país. Los precios de mercado de las fuentes de energía para la recuperación de minerales para el cálculo de LBP y UBP en los países de la Región Andina, se indican en la *Tabla 5*. En los países de la región Andina la energía más barata en 2013 fue la electricidad y el petróleo el más

caro con un precio promedio de 9.54×10^2 USD/Mtoe y 6.54×10^8 USD/Mtoe, respectivamente.

Respecto a la electricidad se debe considerar se encuentra en mayor o en menor grado subsidiada. El valor del subsidio no se encuentra publicado, por tanto, considerar valores internacionales, como en el caso del petróleo, no ha sido posible.

Nº	País	LBP		UBP	
		fuelle	(USD/Mtoe)	fuelle	(USD/Mtoe)
1	Bolivia	electricidad	5.81×10^2	petróleo	5.18×10^8
2	Colombia	electricidad	2.33×10^3	petróleo	6.79×10^8
3	Ecuador	electricidad	6.98×10^2	petróleo	6.96×10^8
4	Peru	electricidad	9.30×10^2	petróleo	6.96×10^8
5	Venezuela	electricidad	2.32×10^2	petróleo	6.80×10^8

Tabla 5 Precios comerciales de la energía para cada país.

El coste de la explotación minera a partir de la aplicación del concepto de ERC en la Región Andina se ha determinado empleando la metodología descrita para el año de referencia 2013 (*Tabla 6*). La producción de combustibles fósiles y minerales expresados en porcentajes se ha calculado a partir del análisis en masa. Las proporciones del PIB extractivo, y de las relaciones LBP y UBP con el PIB total han sido calculados tal y como se explica en el apartado de metodología.

Nº	País	Producción	Producción	PIB	LBP/	UBP/
		Combustibles Fósiles	Minerales			
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	Bolivia	97.27	2.73	14.28	22.42	73.30
2	Colombia	91.04	8.96	9.18	14.03	14.60
3	Ecuador	79.02	20.98	10.41	23.81	25.48
4	Perú	40.17	59.83	10.98	2.83	29.49
5	Venezuela	91.13	8.87	24.80	41.75	51.96
	Región Andina	85.55	14.45	14.55	21.32	31.44

Tabla 6 Costo de la explotación minera en la Región Andina para 2013.

En promedio, en los países de la Región Andina la actividad extractiva se concentra en los combustibles fósiles (86%), muy superior a la actividad extractiva mineral (14%). De manera general se observa que para todos los países de la región los ingresos económicos de la venta de minerales y combustibles fósiles no compensan los costes que serían necesarios para reponerlos si este proceso se realizase a partir de petróleo (UBP). Los países en los cuales predomina la explotación de combustibles fósiles en comparación con la producción nacional total (PIB_{extractivo/total}) la reposición sería aproximadamente

el doble empleando petróleo (UBP/PIB_{total}). Un ejemplo de esto es Venezuela, con un 91% de explotación de combustibles fósiles. En el 2013 la relación $PBI_{extractivo/total}$ fue aproximadamente 15% y si la reposición total de minerales fuese con petróleo (UBP/PIB_{total}) esta sería casi el doble (31%).

Si la recuperación de minerales se realizase con la fuente de energía más barata (LBP) sucedería algo similar que con el petróleo (UBP). Una excepción es Perú, en el cual la actividad extractiva se fundamenta más en la explotación de minerales (60%) que en la de combustibles fósiles (60%). Además, Perú tiene una producción importante de oro respecto al resto de países de la región.

4. Conclusiones

En América Latina y el Caribe (AL&C) una de las regiones de mayor interés es la Región Andina conformada por cinco países: Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. En la región se encuentran las reservas principales y los países productores más representativos de combustibles fósiles de AL&C.

El estudio del capital mineral de la región ha sido realizado considerando un concepto novedoso denominado Coste exergético de reposición (ERC). El ERC tiene su fundamento en la Segunda Ley de la Termodinámica y permite realizar una evaluación cuantitativa de los combustibles fósiles y minerales. Después de recopilar datos de producción interna de cada país, exportaciones e importaciones, se ha determinado el coste de la explotación minera en la Región Andina tomando como año de referencia el 2013. Esta metodología permite comparar los ingresos económicos de la venta de combustibles fósiles y minerales a través de la comparación del $GDP_{extractivo/total}$ con el coste que conllevaría volver a concentrar los minerales a sus condiciones iniciales. Para ello, se han tenido en cuenta los precios superior e inferior de energía que se emplearía para reconcentrar esos minerales, obteniendo así los indicadores LBP/GDP_{total} and UBP/GDP_{total} . Mediante la comparación de estos indicadores es posible establecer si la reposición de combustibles fósiles y minerales sería compensada por la venta de los mismos. Los resultados del estudio indican que para el año 2013 los ingresos fueron inferiores a lo que costaría reponerlos con los dos precios energéticos. Por lo tanto, las condiciones y precios actuales de mercado no parecen ser un mecanismo adecuado para evaluar la explotación minera en la Región Andina.

Con este análisis, se busca llamar la atención de los responsables en crear políticas públicas y también de las autoridades locales en la Región Andina sobre la necesidad de buscar mecanismos más adecuados y sostenibles para la comercialización de combustibles fósiles y minerales que no tengan solo en cuenta factores económicos sin también factores físicos.

Reconocimientos

El primer autor agradece el auspicio de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) [Beca de doctorado 53, 2016].

Gracias a la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en particular a Paola Carrera, por facilitar el acceso a la base de datos de información económica y energética.

Bibliografía

- (ARCOM), A. de R. y C. M. de E. Producción Mineral Reportada 2000-2014. Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM).
- (BCE), B. C. del E. Sistema de Información Macroeconómica-BCE (Versión BETA). Banco Central del Ecuador (BCE).
- (BGS), B. G. S. World minerla statistics data. Retrieved June 20, 2011, from <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS>
- (CEPAL), C. E. para A. L. y el C. (2016a). Estadísticas e Indicadores. Retrieved from http://estadisticas.cepal.org/cepalstat/WEB_CEPALSTAT/estadisticasIndicadores.asp?idioma=e
- (CEPAL), C. E. para A. L. y el C. (2016b). La Inversión Extranjera Directa en América Latina y el Caribe (LC/G.2680-P). Santiago.
- (OLADE), O. L. de E. (2015). Informe de Estadísticas Energéticas 2015. Quito.
- (OLADE), O. L. de E. (2015). Sistema de Información Económico Energético (SIEE) Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).
- (SIMCO), S. de I. M. C. Sistema de Información Minero Colombiano. Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO). Retrieved from <http://www.simco.gov.co/simco/Estadísticas/Producción/tabid/121/Default.aspx>
- (UN), U. N. UN Comtrade Database. United Nations (UN). Retrieved from <https://comtrade.un.org/data/>
- Altomonte, H., & Sánchez, R. J. (2016). Hacia una nueva gobernanza de los recursos naturales en América Latina y el Caribe. Santiago.
- Bastida, E. (2002). Integrating Sustainability into Legal Frameworks for Mining in Some Selected Latin America Countries. *Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD)*.
- Bejan, A., Tsatsanoris, G., & Moran, M. (1996). *Thermal Design & Optimization*. Canada: John Wily & Sons, Inc.
- Calvo, G., Valero, A., & Valero, A. (2016). Material flow analysis for Europe: An exergoecological approach. *Ecological Indicators*, 60, 603–610. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.005>
- Cengel, Y., & Boles, M. *Thermodynamics an Engineering Approacho* (5th.). McGraw-Hill.
- Dincer, I., & Rose, M. A. (2013). *EXERGY Energy, Environment and Sustainable Development* (2nd.). Oxford: Elsevier.
- Gabriel Carmona, L., Whiting, K., Valero, A., & Valero, A. (2015). Colombian mineral resources: An analysis from a Thermodynamic Second Law perspective. *Resources Policy*, 45, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.03.005>
- Hentschel, T., Hruschka, F., & Priester, M. (2002). Global Report on Artisanal & Small-Scale Minig. International Institute for Environment and Development (IIED).
- Human Rights Watch. (2011). A Poisonous Mix Child Labor, Mercury, and Artisanal Gold Mining in Mali. United States. <https://doi.org/1-56432-831-7>
- Lipiec, I., Braown, J., Allard, S., Masala, C., Searston, S., Watts, B., & Sepúlveda, A. (2016). *Fruta del Norte Project Ecuador NI 43-101 Technical Report on Feasibility Study*.
- Long Sieber, N., & Brain, J. (2014). Health Impact of Atisinal Gold Mining in Latin America. *Revista, Harvard Review of Latin America*, Winter 201(Mining), 66–68.

- Ministerio de Energía y Minas. Perú 2015 Anuario Minero Reporte Estadístico. Miinisterio de Energía y Minas.
- Sato, N. (2005). *Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics*. UK: Elsevier.
- Telmer, K., & Stapper, D. (2012). A Practical Guide Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. United Nations Environment Programme (UNEP).
- Tissafi, M. (2011). SDC experiences with Formalization and Responsible Environmental Practices in Artisanal and Small-scale Gold Mining in Latin America and Asia (Mongolia). Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC).
- US Geological Survey. (2016). Mineral Commodity Summaries 2016 Mineral Commodity Summaries 2016.
- Valero, A. (1998). *Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis*. (S. Ulgiati, Ed.), *Advances in Energy studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Musis, Roma.
- Valero, A., & Valero, A. (2012). What are the clean reserves of fossil fuels? *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.08.004>
- Valero, A., & Valero, A. (2013). From Grave to Cradle. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 43–52. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00529.x>
- Valero, A., & Valero, A. (2014). *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources. A thermodynamic cradle-to-cradle assessment*. United Kingdom: World Scientific Press.