

Gases de efecto invernadero generados por la extracción de oro. El ejemplo de la Mina Apumayo, Perú

Isabel Mercedes Solórzano Ortiz y Santiago Gualberto Valverde Espinoza

Universidad Nacional de Ingeniería Lima- Perú.
isolorzano.ortiz@gmail.com; svalverde@uni.edu.pe

RESUMEN

En el Perú, a la fecha, no se han establecido metodologías que evalúen los efectos de las actividades productivas en el cambio climático, probablemente debido a que se no cuenta con investigación que demuestre estos efectos en el ámbito nacional. La minería es la que mayores avances en regulación ambiental ha tenido en los últimos años, ésta no cuenta con investigaciones enfocadas al cambio climático en casos específicos en el Perú. Sin embargo, existen herramientas de cálculo como la huella de carbono, que mide la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) generados por una actividad y nos da un alcance de los impactos en el cambio climático de esta actividad o actividades. En ese sentido, el objetivo del estudio fue determinar la huella de carbono generada por las actividades de explotación de una mina de oro en el Perú, y así dar un alcance de los impactos de esta actividad en el cambio climático, tomando como base la explotación de un yacimiento aurífero conformado por rocas volcánicas y depósitos cuaternarios. Como resultado se obtuvo que, debido al significativo volumen de petróleo utilizado durante el transporte de mineral y desmonte mediante camiones volquete, la explotación de un yacimiento de oro en el Perú contribuye considerablemente con GEI y por ende al cambio climático. Las emisiones totales de GEI o huella de carbono por las actividades de producción de oro en la mina Apumayo en el año 2017 fueron de 24977.1 tCO₂eq.

Palabras clave: depósitos cuaternarios, huella de carbono, minería, metalurgia.

Greenhouse gases generated by gold mining. The example of the Apumayo Mine, Peru

ABSTRACT

In Peru, there are no established methodologies to assess the effects of economic activities on climate change, probably because there is no research to demonstrate these effects at the national level. Even mining being an important economic activity in Peru and the one that has made the greatest progress in environmental regulation in recent years, it does not have research focused on climate change in specific cases. However, there are calculation tools, such as the carbon footprint, that measures the total amount of greenhouse gases (GHG) generated by an activity and gives us a scope of the climate change impacts of this activity or activities. In that sense, the objective of this study was to determine the carbon footprint generated by the exploitation activities of a gold mine in Peru, and thus give a first scope of the impacts on climate change, based on the exploitation of a goldfield formed by volcanic rocks and quaternary deposits. As a result, it was obtained that, due to the significant volume of petrol used in the transportation of ore and waste rock with heavy tippers, the exploitation activities of a gold mine in Peru contributes significantly to GHG and therefore to climate change. Total GHG emissions of carbon footprint from gold production activities at the Apumayo mine in 2017 were 24977.1 tCO₂eq.

Keywords: carbon footprint, mining, metallurgy.

Introducción

El Perú es un país de bajas emisiones de GEI, con un porcentaje de participación mundial de solo 0.3 % sobre el total de emisiones. No obstante, presenta hasta siete de las nueve características reconocidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para calificar como un país “particularmente vulnerable”, debido a su alto grado de vulnerabilidad ante amenazas de origen hidro-meteorológico, como sequías y lluvias excepcionales, inundaciones, heladas, entre otros (MINAM, 2016).

A la fecha, en el Perú se cuentan con los Inventarios Nacionales de GEI los cuales han permitido identificar los sectores económicos con las mayores emisiones generadas y promover esfuerzos nacionales de gestión de emisiones (MINAM, 2018). Sin embargo, no se ha realizado una contabilización detallada de todas las emisiones de GEI de las actividades directas o indirectas que involucran a una organización o la producción de un bien o servicio, conocida como “huella de carbono”.

Algunas empresas mineras han publicado de manera voluntaria (mediante sus reportes de sostenibilidad), las emisiones de GEI producidas de manera directa e indirecta por sus actividades (Minera Yanacocha S.R.L., Compañía Minera Antamina S.A. y Gold Fields La Cima S.A.), en términos de toneladas de dióxido de carbono equivalente. Sin embargo, estos reportes no muestran el detalle de la estimación de las emisiones, por lo que no permite la interpretación de los datos y tampoco permite realizar propuestas de mejora de la gestión ambiental minera.

Por ello la presente investigación, basada en la tesis para obtener el grado de maestro de Solórzano (2019), constituye el primer análisis de la “huella de carbono” de una unidad minera aurífera en el Perú, el cual bien puede ser usado como referente para próximas investigaciones y ampliar la información relacionada a este tema. Además, es importante mencionar que la tesis también presenta propuestas para la reducción o neutralización de las emisiones calculadas, con la aplicación de medidas de eficiencia energética y mejores prácticas ambientales.

Objetivos

1. Calcular la huella de carbono de la mina Apumayo, resultado de las emisiones de GEI generadas por todas las actividades (directas e indirectas) y áreas de soporte involucradas en la producción de las barras de oro.
2. Identificar las actividades con potencialidad de aplicación de mejoras para la reducción de la huella de carbono en la mina Apumayo.

Zona de estudio

El cálculo de la huella de carbono consideró todas las actividades ejecutadas en el año 2017, en la mina Apumayo, desde el minado hasta la obtención de las barras de oro.

Localización

Geopolíticamente, la mina Apumayo se ubica al sur de Perú, en el departamento de Ayacucho, distritos de Sancos y Chaviña; y, geológicamente se ubica sobre una secuencia de rocas del grupo barroso constituido por rocas volcánica de naturaleza lávica; y del grupo Tacaza formado por una secuencia estratigráfica de unidades sedimentarias, intercalaciones volcánico-sedimentarias, rocas volcánicas y depósitos cuaternarios recientes.

Proceso Productivo

La mina Apumayo realiza la explotación mediante el método de extracción a tajo abierto con voladura controlada de tres yacimientos (Apumayo, Huamanloma y Ayahuanca) con contenido de oro con reservas probadas 10.1 millones de toneladas de mineral. Seguidamente realiza el tratamiento del mineral extraído mediante el proceso metalúrgico de lixiviación en pilas con solución cianurada, para luego procesar la solución rica en la Planta Merrill Crowe hasta la obtención de las barras de oro.

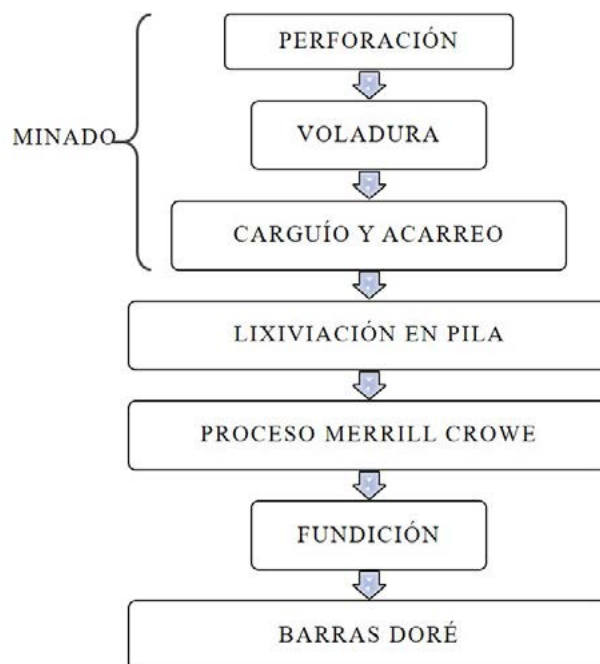


Figura 1. Etapas del Proceso de Producción de Oro en la mina Apumayo. (Mina Apumayo, 2018).

Figure 1. Gold Production Process at the Apumayo mine. (Mina Apumayo, 2018).

1. Minado.

Consiste en la extracción del material que contiene oro en el yacimiento realizado por el método a Tajo Abierto a un ritmo de 15000TM/día. Se realiza en dos fases:

- **Perforación:** Se perfora el terreno para colocar los explosivos y fragmentar el suelo para el carguío.
- **Voladura:** Los agujeros son llenados con material explosivo, que al detonar fragmentan la roca y remueven subterráneamente el material exponiéndolo a la superficie.

2. Carguío y acarreo.

Mediante camiones de 20 toneladas de capacidad, se transporta el mineral extraído del tajo a la pila de lixiviación (Pad) de un área aproximada de 47 hectáreas, acondicionada previamente mediante técnicas estrictas de impermeabilización. Asimismo, el material con baja ley que no resulta rentable de tratamiento se transporta como residuo mineral hacia el depósito de desmonte.

3. Lixiviación en pila(Pad).

El mineral descargado en la pila de lixiviación es lavado con solución cianurada para recuperar el oro con un flujo de riego de 600 m³/h. La solución rica (cargada con oro) es llevada hacia la Poza de Solución Rica (PLS) para después de su tratamiento en la Planta Merrill Crowe, como solución pobre (sin oro), permanecer en la Poza de Solución Intermedia (ILS) y ser rebombada a la pila de lixiviación (circuito cerrado).

4. Proceso Merrill Crowe.

Proceso al que es sometida la solución rica en oro. Primero es clarificada para reducir los sólidos en suspensión; luego se elimina el oxígeno para finalmente añadir polvo de zinc para precipitar el oro y pasar al

proceso de refinación.

5. Fundición.

El precipitado de oro obtenido en el proceso Merrill Crowe es sometido a operaciones de secado en hornos de retortas a 650°C. Finalmente, el producto obtenido pasa por un proceso de fundición para obtener las barras doré como producto final con una producción de 5000 onzas/mes.

Limitaciones

Dado que no existen factores de emisión para todos los materiales e insumos utilizados en el proceso productivo de la mina Apumayo, algunos valores de generación gases de efecto invernadero no pudieron ser contabilizados. Sin embargo, se considera la hipótesis de que estos valores serían despreciables comparado con la cantidad de tCO₂eq contabilizados en toda la mina Apumayo.

Metodología

La Huella de Carbono describe la cantidad de emisiones de GEI causados directa o indirectamente por una organización, producto o evento, a lo largo de su ciclo de vida. (COP20, 2015)

Se determina mediante un inventario de emisiones de GEI, medidas en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂eq) dado que el dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero más significativo (Atlantic Consulting, 2009).

Para el cálculo de la Huella de Carbono de la mina Apumayo se utilizó la metodología GHG Protocol Alcance 3, la cual incluye las emisiones directas, emisiones indirectas y otras emisiones indirectas de las actividades de la organización. Esta metodología es de fácil aplicación y tiene un amplio uso a nivel internacional, contando además con el respaldo de la USAID y de la USEPA.



Figura 3. Pasos de la metodología GHG Protocol utilizados para el cálculo de huella de carbono de la mina Apumayo adaptado de (GHG Protocol, 2011, pág. 19).

Figure 3. Steps of GHG Protocol methodology used to calculate the carbon footprint of Apumayo mine, adapted from (GHG Protocol, 2011, pág. 19).



Figura 2. Esquema de la Producción de Oro en la mina Apumayo (Mina Apumayo, 2018).

Figure 2. Gold Production Scheme at the Apumayo mine (Mina Apumayo, 2018).

Paso 1: Para realizar la “identificación de las actividades hasta el alcance 3”, se realizó un listado de todas las actividades desarrolladas dentro de cada

proceso y área de la mina Apumayo y se las clasificó por su alcance:

Proceso	Área asociada	Alcance
Planeamiento	Geología	Alcances 1 y 3
Minado	Operaciones Mina	Alcances 1 y 3
Carguío y acarreo	Operaciones Mina	Alcances 1 y 3
Lixiviación en pila	Planta-Pad de lixiviación	Alcances 1, 2 y 3
Proceso Merrill Crowe	Planta-Planta Merrill Crowe	Alcances 1, 2 y 3
Fundición	Planta-Fundición	Alcances 2 y 3
	Administración	Alcances 1, 2 y 3
	Almacén	Alcances 1, 2 y 3
	Seguridad de la propiedad	Alcance 3
	Laboratorio químico	Alcances 1, 2 y 3
	Casa de fuerza	Alcance 1
	Departamento eléctrico	Alcance 1
	Taller mantenimiento mecánico	Alcances 1, 2 y 3
	Centro médico	Alcances 1, 2 y 3
	Ingeniería	Alcances 1 y 3
Soporte	Medio Ambiente	Alcances 1, 2 y 3
	Comedor	Alcances 1, 2 y 3

Tabla 1. Alcances según la metodología GHG Protocol por proceso y área asociada de la mina Apumayo (Solórzano, 2019).
Table 1. Scopes according to the GHG Protocol methodology by process and department of Apumayo mine (Solórzano, 2019).

Paso 2: Se estableció el alcance de las actividades de todas las áreas involucradas en la operación de la mina Apumayo, siguiendo los lineamientos del GHG Protocol.

- **Alcance 1:** Emisiones provenientes de la combustión de combustibles fósiles como petróleo diésel en equipos motorizados y Gas Licuado de Petróleo (GLP) en las cocinas del comedor.
- **Alcance 2:** Emisiones por el uso de energía eléctrica adquirida del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) en los equipos de procesamiento (lixiviación, proceso Merrill Crowe y fundición), así como en instalaciones auxiliares (oficinas, campamento, laboratorios, talleres, etc.).
- **Alcance 3:** Emisiones por el transporte y consumo de insumos y materiales y por la generación de residuos sólidos y su transporte al lugar de disposición final.

Paso 3: De acuerdo a los alcances definidos para cada uno de los procesos y áreas involucradas se recolectó la data con el apoyo de personal clave de la mina Apumayo.

Paso 4: Finalmente la asignación (cuantificación) de emisiones para cada tipo de alcance se realizó utilizando las siguientes fórmulas:

Cuantificación de las emisiones de GEI del alcance 1

Esta contabilidad sólo incluye las emisiones por consumo de combustibles fósiles en las diferentes áreas:

Ecuación 1. Cálculo de emisiones de GEI por combustión de Diésel B5 y GLP

Emisiones₁ = CC×PCN/10⁶× (FE_{CO2}+ FE_{CH4}×PCG_{CH4}+ FE_{N2O}×P_{N2O})

Dónde:

- Emisiones₁: Emisiones generadas de GEI por combustión (Diésel B5 y GLP), en tCO₂eq
- CC: Cantidad de combustible consumido, en kg
- PCN: Poder Calórico Neto del Combustible utilizado, en KJ/kg
- FE_{CO2}, FE_{CH4}, FE_{N2O}: Factores de Emisión de CO₂, CH₄, N₂O del Combustible utilizado, en: kgCO₂/GJ, kgCH₄/GJ y kgN₂O/GJ, respectivamente.

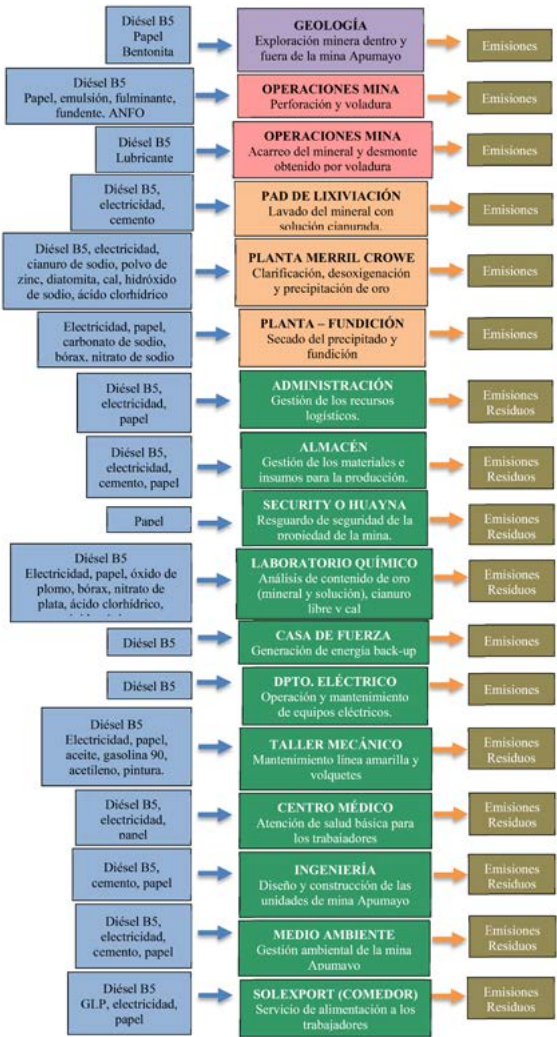


Figura 4. Ingresos y salidas en mina Apumayo (Solórzano, 2019).
Figure 4. Inputs and outputs diagram of Apumayo mine (Solórzano, 2019).

- PCG_{CH_4} , PCG_{N_2O} : Potencial de Calentamiento Global del CH_4 y N_2O (21 y 310 respectivamente).

Tipo de Combustible	Poder Calorífico Neto (KJ/kg)	Densidad (kg/L)	Factor de emisión de CO_2 (kg CO_2 /GJ)	Factor de emisión de CH_4 (kg CH_4 /GJ)	Factor de emisión de N_2O (kg N_2O /GJ)
Diésel B5	45 500	0.87	74.1	0.004	0.004
GLP	47 300	0.542	63.1	0.062	0.0002

Tabla 2. Valores de poder calorífico, densidad y factores de emisión de los combustibles REPSOL (2009), REPSOL (2011) e IPCC (1996).
Table 2. Values of calorific value, density and fuel emission factors REPSOL (2009), REPSOL (2011) e IPCC (1996).

Cuantificación de las emisiones de GEI del alcance 2

Esta contabilidad sólo incluye las emisiones por consumo de energía eléctrica proveniente del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

Ecuación 2. Cálculo de emisiones de GEI por consumo de energía eléctrica

$$\text{Emisiones}_2 = \text{Consumo de Energía (MWh)} \times 0.547 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

Donde:

- Emisiones: Emisiones generadas de GEI por consumo de energía, en tCO_2 eq.
- Consumo de Energía: consumo de energía total reportado en la Unidad Minera, en MWh.
- $0.547 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$: Factor de emisión de CO_2 del SEIN para el año 2007 (FONAM citado por Ponce & Rodríguez, 2016)

Cuantificación de las emisiones de GEI del alcance 3

Para el cálculo de las emisiones de GEI del alcance 3 en la mina Apumayo se consideraron tres aspectos:

- Consumo de insumos
- Generación de residuos sólidos
- Transporte de materiales e insumos y residuos sólidos

Ecuación 3. Cálculo de emisiones de GEI por consumo de insumos.

$$\text{Emisiones}_{3,1} = CC_i \times FE_i$$

Donde:

- $\text{Emisiones}_{3,1}$: Emisiones generadas de GEI por consumo de insumos, en tCO_2 eq
- CC_i : Cantidad de insumo consumido, en kg o litros según corresponda.
- FE_i : Factores de emisión de insumos (ver Tabla 3).

Insumo	Factor de Emisión
Cal ¹	1.22 kgCO ₂ eq/kg de Cal
Hidróxido de Sodio ¹	1.42 kgCO ₂ eq/kg de NaOH
Carbonato de Sodio (Na ₂ CO ₃) ¹	2.03 kgCO ₂ eq/kg de Na ₂ CO ₃
Cemento ¹	0.10 kgCO ₂ eq/kg de concreto
ANFO ²	0.18 kgCO ₂ eq/kg de ANFO
Emulsión ²	0.17 kgCO ₂ eq/kg de emulsión
Fulminante y fundente ³	0.17 kgCO ₂ eq/kg de fulminante o fundente
Lubricante ²	0.081 kgCO ₂ eq/kg de lubricante
Aceite ²	0.08148 kgCO ₂ eq/L de aceite
Gasolina 90 ³	0.18126 kgCO ₂ eq/L de gasolina
Papel ¹	0.00184 ton CO ₂ eq/kg de papel

Tabla 3. Factores de emisión de insumos ¹Software GaBi (Bustos Donoso, 2011), ²NGA Factors En Tabla 4 (Explosive use) (NGA, 2008) y ³(Gold Fields, 2010).

Table 3. Supplies emission factors ¹Software GaBi (Bustos Donoso, 2011), ²NGA Factors. In Table 4 (Explosive use) (NGA, 2008) y ³(Gold Fields, 2010).

Ecuación 4. Cálculo de emisiones de GEI por generación de residuos sólidos.

$$\text{Emisiones}_{3,2} = CC_r \times FE_a$$

Donde:

- $\text{Emisiones}_{3,2}$: Emisiones generadas de GEI por generación de residuos sólidos, en tCO_2 eq
- CC_r : Cantidad de residuo sólido generado según tipo, en TN.
- FE_a : Factores de Emisión por tipo de residuo sólido (ver Tabla 4).

Tipo de residuo	Factor de emisión (tCO ₂ eq/ton residuo)
Papel y cartón	2.5
Orgánicos	0.9
Vidrios	0
Metálicos	0
Plásticos	0
Peligrosos	0.3
Generales *	0.9

Tabla 4. Factores de emisión por tipo de residuo sólido (*) Mezclados es equivalencia con la nomenclatura extranjera. Fuente: (NGA, 2008).

Table 4. Emission factors by type of solid waste .

Ecuación 5. Cálculo de consumo de combustible de vehículos de transporte

$$CC = \text{Distancia}_i \times \text{Frecuencia}_i \times \text{Consumo}$$

Dónde:

- CC: Consumo de combustible total (gal/año)
- Distancia: tramo recorrido para el transporte del material, insumo o residuo i en (km)
- Frecuencia: Número de veces en las que se transporta el material, insumo o residuo i al año
- Consumo: Consumo promedio de combustible del vehículo (gal/km)

Resultados

Las emisiones totales de GEI de la mina Apumayo en el año 2017 fueron de 24977.1 tCO₂eq, siendo que 14869.2 tCO₂eq (60%) corresponden a emisiones directas de alcance 1, un total de 8178.2 tCO₂eq (33%) corresponden a emisiones indirectas de alcance 2, y además 1929.7 tCO₂eq (7%) corresponden a emisiones indirectas de alcance 3.

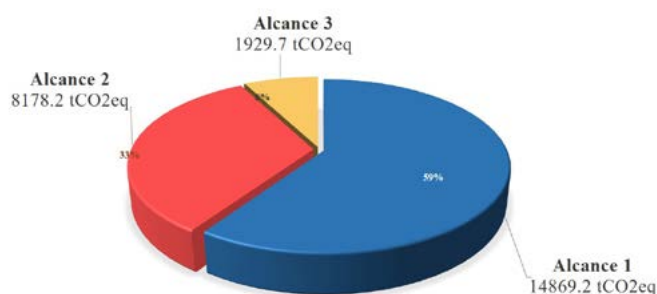


Figura 5. Emisiones según alcance de la mina Apumayo. (Solórzano, 2019)

Figure 5. Emissions by scope of Apumayo mine. (Solórzano, 2019).

En la *Tabla 5*, se presentan los consumos de la mina Apumayo para en todo el proceso del oro y el inventario de GEI por cada uno de ellos.

Alcance 1: Emisiones directas de GEI.

El mayor porcentaje de estas emisiones con aproximadamente 68% corresponden al proceso de carguío y acarreo por el consumo de diésel en camionetas, equipos pesados (volquetes, excavadoras, equipos auxiliares) y camiones cisterna. En segundo lugar, están las actividades de perforación y voladura con un 15.7% por el consumo de diésel en perforadoras, camión fábrica, camionetas, entre otros; y en tercer lugar se encuentra el área de soporte con un 13% por el consumo de diésel en camionetas y equipos auxiliares.

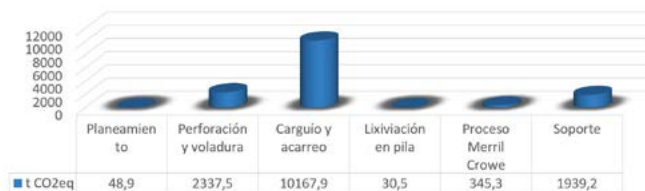


Figura 6. Emisiones de alcance 1 por proceso de la mina Apumayo (Solórzano, 2019).

Figure 6. Scope 1 emissions by process of Apumayo mine (Solórzano, 2019).

Alcance 2: Emisiones indirectas de GEI.

El mayor porcentaje de estas emisiones, aproximadamente 54%, corresponden al proceso de lixiviación en pila, seguido por el proceso Merrill Crowe con un 37%, en tercer lugar, el área de soporte con un 8%, y por último el proceso de fundición con tan sólo el 1%.



Figura 7. Emisiones de alcance 2 por proceso de la mina Apumayo. (Solórzano, 2019).

Figure 7. Scope 2 emissions by process in Apumayo mine. (Solórzano, 2019).

Alcance 3: Otras emisiones indirectas.

Las mayores emisiones corresponden al proceso de minado con aproximadamente 45% debido al consumo de insumos para las actividades de perforación y voladura, en segundo lugar, el área de soporte con un 32% debido al transporte de materiales, insumos y residuos sólidos, así como a la generación de residuos sólidos orgánicos en el comedor y por último, el proceso de Merrill Crowe con un 22% debido al consumo de insumos para la clarificación, desoxigenación y precipitación del oro.



Figura 8. Emisiones de alcance 3 por proceso de la mina Apumayo (Solórzano, 2019).

Figure 8. Scope 3 emissions by process of Apumayo mine (Solórzano, 2019).

INFORMACIÓN DE CONSUMOS DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO PARA CALCULO DE EMISIONES DE GEI - AÑO 2017											
PROCESO	ÁREA ASOCIADA	ACTIVIDADES PRINCIPALES	ACTIVIDADES SECUNDARIAS	ALCANCE	CONSUMO	UNIDAD 1	CONSUMO	UNIDAD 2	CONSUMO	UNIDAD FINAL	t CO2eq
Plancaminto	Geología	Exploración minera dentro y fuera (áreas de ampliación) de la Unidad Minera Apumayo	Combustible diésel en camionetas y maquinaria perforadora	Alcance 1	4,322.6	gal	16,363.0	L	14,235.8	kg	48.9
			Papel	Alcance 3	128.6	kg					0.2
			Dentonita	Alcance 3	4,500.0	kg					N.D.
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	73.6	kg	0.1	ton			0.2
Minado	Operaciones Mina	Perforación y voladura	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados de perforación y voladura	Alcance 1	206,819.2	gal	782,895.5	L	681,119.1	kg	2,337.5
			Papel	Alcance 3	84.2	kg					0.2
			Emulsión	Alcance 3	1,695,205.0	kg					288.2
			Fulminante	Alcance 3	3,685.5	kg					0.6
			Fundente promezclado	Alcance 3	10,075.0	kg					1.7
			Nitrato de amonio (ANFO)	Alcance 3	3,220,745.0	kg					579.7
Carguío y acarreo	Operaciones Mina	Acarreo del mineral y desmonte obtenido posterior a la voladura	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados (volquetes, excavadoras, equipos auxiliares)	Alcance 1	899,661.5	gal	3,405,587.6	L	2,962,861.2	kg	10,167.9
			lubricante	Alcance 3	5.0	gal	18.9	L			0.0
Lixiviación on pila	Planta Pad de lixiviación	Lavado del mineral con solución cianurada	Combustible diésel por camionetas y equipos pesados	Alcance 1	2,701.5	gal	10,226.3	L	8,896.9	kg	30.5
			Energía eléctrica	Alcance 2	8,011,787.6	kWh/año	8,011.8	MWh/año			4,382.4
			Cemento	Alcance 3	85.0	kg					0.0
Proceso Merrill Crowe	Planta-Planta Merrill Crowe	Clarificación, desoxigenación y precipitación de oro	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados	Alcance 1	30,552.9	gal	115,655.3	L	100,620.1	kg	345.3
			Energía eléctrica	Alcance 2	5,455,558.7	kWh/año	5,455.6	MWh/año			2,984.2
			Cianuro de sodio	Alcance 3	340,500.0	kg					N.D.
			Polvo de zinc	Alcance 3	175,000.0	kg					N.D.
			Diatomita	Alcance 3	49,986.7	kg					N.D.
			Óxido de calcio (cal)	Alcance 3	300,000.0	kg					366.0
			Hidróxido de sodio	Alcance 3	45,160.0	kg					64.1
			Ácido clorhídrico industrial	Alcance 3	1,440.0	kg					N.D.
Fundición	Planta-Refinería	Secado del precipitado y fundición	Energía eléctrica	Alcance 2	225,238.7	kWh/año	225.2	MWh/año			123.2
			Papel	Alcance 3	39.8	kg					0.1
			Carbonato de sodio	Alcance 3	8,175.0	kg					16.6
			Bórax	Alcance 3	17,410.6	kg					N.D.
			Nitrato de sodio	Alcance 3	2,363.0	kg					N.D.
	Administración	Administración de los recursos logísticos	Combustible diésel en vehículos de transporte de empleados	Alcance 1	33,836.6	gal	128,085.4	L	111,434.3	kg	382.4
			Energía eléctrica en el campamento y oficinas administrativas	Alcance 2	543,435.1	kWh/año	543.4	MWh/año			297.3
			Combustible de camiones cisterna para el transporte de agua de consumo doméstico	Alcance 3	427.4	gal	1,617.9	L	1,407.6	kg	4.8
			Papel	Alcance 3	851.4	kg					1.6
			Generación de residuos de vidrio	Alcance 3	473.0	kg					0.0
			Generación de residuos metálicos	Alcance 3	30,407.0	kg					0.0
			Generación de residuos plásticos	Alcance 3	1,289.5	kg					0.0
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	472.5	kg	0.5	ton			1.2

Soporte	Almacén	Gestión de los materiales e insumos para el desarrollo de las actividades operativas	Combustible diésel en montacargas y vehículos de materiales e insumos dentro de la unidad minera	Alcance 1	6,496.0	gal	24,590.0	L	21,393.3	kg	73.4
			Energía eléctrica	Alcance 2	30,067.8	kWh/año	30.1	MWh/año			16.4
			Combustible diésel por los vehículos de transporte de materiales e insumos hacia la unidad minera	Alcance 3	37,770.9	gal	142,978.3	L	124,391.2	kg	426.9
			Cemento	Alcance 3	3,825.0	kg					0.4
			Papel	Alcance 3	299.4	kg					0.6
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	298.2	kg	0.3	ton			0.7
			Papel	Alcance 3	156.7	kg					0.3
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	15.5	kg	0.0	ton			0.0
	Seguridad de la propiedad (Security) o Huayna	Resguardo de seguridad de la propiedad de la Unidad Minera Apumayo	Combustible diésel por horno	Alcance 1	106.0	gal	401.3	L	349.1	kg	1.2
			Energía eléctrica	Alcance 2	390,440.4	kWh/año	390.4	MWh/año			213.6
			Papel	Alcance 3	37.4	kg					0.1
			Óxido de plomo	Alcance 3	12,046.0	kg					N.D.
			Bórax	Alcance 3	575.0	kg					N.D.
			Nitrato de plata	Alcance 3	3.0	kg					N.D.
			Ácido clorhídrico industrial	Alcance 3	472.2	kg					N.D.
			Ácido nítrico	Alcance 3	378.5	kg					N.D.
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	236.3	kg	0.2	ton			0.6
	Laboratorio Químico	Análisis de minerales por oro, análisis de soluciones por oro, análisis de cianuro libre y cal en soluciones de lixiviación	Combustible diésel en grupos electrógenos	Alcance 1	25,992.0	gal	98,352.5	L	85,566.7	kg	293.6
			Combustible diésel en retroexcavadoras y camionetas de mantenimiento	Alcance 1	3,448.6	gal	13,054.4	L	11,357.3	kg	39.0
			Combustible diésel en camión lubricador, camión grúa y montacarga	Alcance 1	5,653.4	gal	21,400.4	L	18,618.4	kg	63.9
			Energía eléctrica	Alcance 2	127,847.7	kWh/año	127.8	MWh/año			69.9
			Papel	Alcance 3	63.1	kg					0.1
			Aceite	Alcance 3	963.0	gal	3,645.3	L			0.3
			Gasolina 90	Alcance 3	800.0	gal	3,028.3	L			0.5
			Acetileno	Alcance 3	714.0	kg					N.D.
			Pintura	Alcance 3	282.0	gal					N.D.
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	1,328.4	kg	1.3	ton			3.3
	Casa de fuerza	Operación y mantenimiento de equipos de generación eléctrica	Generación de residuos peligrosos (industriales)	Alcance 3	16,104.4	kg	16.1	ton			4.8
			Generación de residuos generales	Alcance 3	28,468.0	kg	28.5	ton			25.6
	Departamento eléctrico	Mantenimiento línea amarilla, volquetes	Combustible diésel en ambulancia	Alcance 1	481.3	gal	1,821.9	L	1,585.1	kg	5.4
			Energía eléctrica	Alcance 2	20,428.2	kWh/año	20.4	MWh/año			11.2
			Papel	Alcance 3	51.5	kg					0.1
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	50.3	kg	0.1	ton			0.1
			Generación de residuos sólidos peligrosos (hospitalarios)	Alcance 3	46.0	kg	0.0	ton			0.0
	Taller mantenimiento mecánico	Atención de salud básica y principal para los trabajadores de la Unidad Minera Apumayo	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados	Alcance 1	45,082.7	gal	170,656.5	L	148,471.2	kg	509.5
			Papel	Alcance 3	180.1	kg					0.3
			Cemento	Alcance 3	21,547.5	kg					2.2
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	65.8	kg	0.1	ton			0.2
	Centro médico	Construcción de las facilidades requeridas para las actividades de operación de la Unidad Minera Apumayo									
	Ingeniería										

Medio Ambiente	Gestión ambiental de la Unidad Minera Apumayo	Combustible en equipo pesado (retroexcavadora, tractor, motoniveladora, entre otros)	Alcance 1	39,479.1	gal	149,444.4	L	130,016.7	kg	446.2	
		Energía eléctrica por Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	Alcance 2	49,595.4	kWh/año	49.6	MWh/año			27.1	
		Cemento	Alcance 3	170.0	kg					0.0	
		Papel	Alcance 3	63.1	kg					0.1	
		Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	58.1	kg	0.1	ton			0.1	
		Combustible en transporte de residuos hacia lugar de disposición final	Alcance 3	966.4	gal	3,658.2	L	3,182.7	kg	10.9	
		Gas natural para cocina	Alcance 1	18,702.0	gal	70,794.7	L	38,370.7	kg	117.0	
	Solexport (Comedor)	Provisión del servicio de alimentación a los trabajadores	Combustible diésel por horno de panadería	Alcance 1	661.0	gal	2,502.2	L	2,176.9	kg	7.5
			Energía eléctrica	Alcance 2	96,621.8	kWh/año	96.6	MWh/año			52.9
			Combustible en vehículos de transporte de insumos	Alcance 3	2,055.0	gal	7,779.0	L	6,767.7	kg	23.2
			Papel	Alcance 3	39.8	kg					0.1
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	1,274.2	kg	1.3	ton			3.2
			Generación de residuos sólidos orgánicos	Alcance 3	110,583.0	kg	110.6	ton			99.5
			Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por Apumayo S.A.C.								
Total24,977.1											

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por Apumayo S.A.C.

Tabla 5. Consumo por alcance – Inventario de GEI de la mina Apumayo.
Table 5. Consumption by scope - GHG inventory of the Apumayo mine.

Discusión

En la mina Apumayo, el proceso productivo que presentó mayor cantidad de emisiones fue el de carguío y acarreo, alcanzando las 10167.9 tCO₂eq y 41% de las emisiones de GEI totales, por el consumo de gran cantidad de combustible para el funcionamiento de camionetas, equipos pesados (volquetes, excavadoras, equipos auxiliares) y camiones cisterna para el riego de vías.

Por otro lado, los procesos de lixiviación en pila y de Merrill Crowe también tienen un alto porcentaje de emisiones de GEI por su alta demanda eléctrica, representando en conjunto el 33% de las emisiones totales.

Por último, las actividades del área de soporte, representaron un 13% de las emisiones de GEI totales, debido al consumo de combustible para el transporte de personal, materiales e insumos; el consumo de energía eléctrica en el campamento, centro médico y otras áreas auxiliares, así como las emisiones por la generación de residuos sólidos y su transporte hacia el lugar de disposición final.

Debido a que, en el año 2017, las emisiones totales de GEI fueron de 24977.1 tCO₂eq y la producción de oro 60185 onzas troy (1.88 toneladas), se tiene que la ratio de emisión de GEI de la mina Apumayo fue de 13150.6 tCO₂eq/t Au producido.

Las emisiones obtenidas en la mina Apumayo fue-

ron comparados con los resultados presentados en los reportes de sostenibilidad de minas de oro similares como Yanacocha y Cerro Corona de Gold Fields.

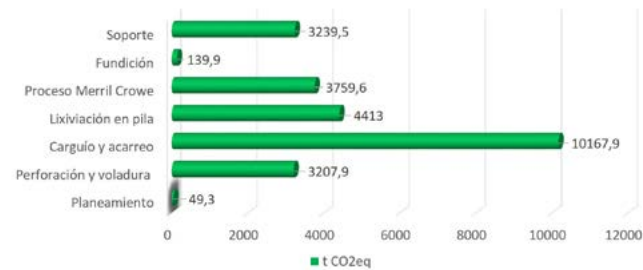


Figura 9. Emisiones totales por proceso de la mina Apumayo. (Solórzano, 2019).
Figure 9. Total emissions by process of Apumayo mine. (Solórzano, 2019).

Minera	Año de cálculo	Producción de Au (onzas/año)	Producción de Au (t/año)	Emisiones totales de GEI (tCO ₂ eq)	Ratio de emisión de GEI (tCO ₂ eq/t Au)
Yanacocha	2013	1017000	31.63	583300.0	18441
Cerro Corona	2016	150210	4.67	80577.0	17254
Apumayo	2017	60185	1.87	24977.1	13357

Tabla 6. Ratio de emisión de GEI por unidad de producto para diferentes mineras de oro. Fuente: (Solórzano, 2019). Equivalencia: 1 tonelada = 32150.7 onzas troy.
Table 6. GHG emission ratio per unit of product for different gold mines.

Conclusiones

- Las emisiones totales de GEI o huella de carbono por las actividades de producción de oro en la mina Apumayo en el año 2017 fueron de 24977.1 tCO₂eq.
- La ratio de emisión de GEI de la mina Apumayo en el año 2017 fue de 13357 tCO₂eq/t Au producido, por debajo de lo presentado en los reportes de sostenibilidad de Yanacocha (18441 tCO₂eq/t Au) y Cerro Corona de Gold Fields (17254 tCO₂eq/t Au).
- El proceso de carguío y acarreo representó el 41% de las emisiones totales de GEI de la mina Apumayo, principalmente por el consumo de combustible en vehículos pesados como volquetes, tractores, cargadores frontales.
- Existen diferentes estrategias que pueden ser implementadas para reducir la huella de carbono en una mina de producción de oro. En principio se deben implementar indicadores de ecoeficiencia para lograr una gestión eficiente en la organización y de esta manera reducir actividades innecesarias que incrementen los GEI.

Recomendaciones

- Ampliar el análisis de la presente investigación estudio para un mayor periodo, por ejemplo, de los últimos 5 años y, de ser posible, para todo el ciclo de vida de la mina Apumayo, incluyendo también las etapas de construcción y cierre.
- Plantear estrategias para la reducción de los GEI en los procesos donde registraron los mayores valores. Las estrategias pueden considerar medidas de eficiencia en el uso de recursos, cambio de tecnología, optimización de los procesos, permuta del tipo combustible (por ejemplo, petróleo a gas natural), entre otros.
- Realizar mayores investigaciones en cuanto a Huella de Carbono relacionadas a proyectos de inversión en el Perú, con el fin de contar con una buena data de información que permita medir

el desempeño de cada actividad productiva.

Referencias

- Atlantic Consulting. 2009. Huella de Carbono del GLP en relación a otros Combustibles.
- Bustos Donoso, J. F. 2011. *Análisis de la Huella de Carbono en una Empresa Minera del Cobre en Chile*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- COP20, L. 2015. LIMA COP20. Recuperado el 2018, de ¿Cómo se mide la Huella de Carbono?: <http://cop20.minam.gob.pe/22973/como-se-mide-la-huella-de-carbono/>
- FONAM, R. R. & Rodríguez, D. A. 2016. *Determinación de la Huella de Carbono del Country Club el Bosque – Sede Chosica*. Trabajo de Titulación para Optar el Título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima.
- GHG Protocol. 2011. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.
- Gold Fields. 2010. Carbon Footprint Report. Financial and Calendar year 2009. . *Promethium Carbon (Pty) Ltd*.
- Mina Apumayo. 2018. Esquema de la Producción de Oro en la mina Apumayo, Perú.
- MINAM. 2016. *La Contribución Nacional del Perú - INDC: agenda para un desarrollo climáticamente responsable*. Lima: Ministerio del Ambiente.
- MINAM. 2018. INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Obtenido de INFOCARBONO: <http://infocarbono.minam.gob.pe/inventarios-nacionales-gei/intro/>
- NGA. 2008. National Greenhouse Accounts (NGA) Factors. Australia: Commonwealth of Australia
- Solórzano, I. 2019. Estimación de la Huella de Carbono en la Unidad Minera Apumayo para el año 2017 y Propuestas para su Incorporación dentro del Estudio de Impacto Ambiental detallado. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Recibido: julio 2020
Revisado: diciembre 2020
Aceptado: enero 2021
Publicado: diciembre 2021