

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO PARA LA INCORPORACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LOS PRINCIPALES MINERALES EN EL ECUADOR**

#### **CASO DE ESTUDIO: PRODUCCIÓN DE ORO EN EL PROYECTO SANTA BÁRBARA DE ECUADOR.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA**

**KATHERINE LIZETH CRUZ ORTA**

**[katherine.cruz@epn.edu.ec](mailto:katherine.cruz@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ**

**[santiago.vaca@epn.edu.ec](mailto:santiago.vaca@epn.edu.ec)**

**DMQ, Febrero 2022**

## CERTIFICACIONES

Yo, KATHERINE LIZETH CRUZ ORTA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

*Katherine Cruz*

---

**KATHERINE LIZETH CRUZ ORTA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por KATHERINE LIZETH CRUZ ORTA, bajo mi supervisión.

Firmado digitalmente por:  
**SANTIAGO DAVID VACA JIMENEZ**  
Fecha: 2022.09.27 10:47:56.66-05:00

---

**SANTIAGO DAVID VACA JIMENEZ**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

KATHERINE LIZETH CRUZ ORTA

SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA

## DEDICATORIA

*A mis padres, José y María.  
Allá arriba en el cielo, a mi abuelita Mariana.*

## AGRADECIMIENTO

*Hoy miro atrás y tengo tanto que agradecerle a la vida.*

*Gracias por los aciertos y fracasos porque me han enseñado de lo que soy capaz, por las alegrías y tristezas porque me han enseñado a valorar cada momento, por los amigos que se volvieron familia y por los sueños que hoy se vuelven realidad.*

A mis padres, José y María, sin duda los seres más maravillosos. Gracias a todo el esfuerzo, apoyo y dedicación que me han brindado a lo largo de estos años.

A Alex, mi hermano, sus consejos y motivación me han ayudado a llegar a este punto de mi vida.

A Nala por llegar a completar ese vacío que había en mi corazón y llenar mi vida de alegría.

A Víctor Hidalgo, gran profesor y amigo, gracias por estar presente en los momentos difíciles que en su momento parecían no tener solución. Gracias también por brindarme la oportunidad de compartir y ser parte de su grupo de investigación.

A la Ing. Narcisa Romero por ser la segunda madre que la vida me dio, por ser esa persona que siempre tuvo para mí una palabra de motivación y ánimo para continuar en la lucha por un sueño.

Al Ing. José Luis Palacios por permitirme desarrollar este proyecto y guiarme en el camino. A su vez agradezco al Ing. Santiago Vaca por aceptar ser el director de este proyecto y realizar las correcciones pertinentes.

Por último, pero no menos importante, gracias a todas las personas que llegaron a mi vida, en especial a esos amigos que hicieron que la etapa universitaria sea más amena.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIONES</b> .....	I
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b> .....	II
<b>DEDICATORIA</b> .....	III
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	IV
<b>RESUMEN</b> .....	VII
<b>ABSTRACT</b> .....	VIII
<b>1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO</b> .....	1
1.1 Objetivo general. ....	2
1.2 Objetivos específicos. ....	2
1.3 Alcance. ....	2
1.4 Marco teórico. ....	2
Importancia de la Minería en el Mundo.....	2
Importancia de los Minerales.....	3
Importancia de la Minería en Ecuador.....	4
Proyectos Mineros en Ecuador.....	5
Energía.....	8
Energías Renovables.....	8
Energías No Renovables.....	9
Sistemas Fotovoltaicos.....	10
<b>2 METODOLOGÍA</b> .....	13
2.1 Inventario de los Procesos de la Planta.....	13
2.2 Cuantificación Energética.....	13
2.3 Estimación del Potencial Energético Renovable.....	14
2.4 Diseño del Sistema Energético.....	14
<b>3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	17

3.1	Resultados .....	17
	Inventario de Procesos .....	17
	Flujo de Material y de Energía entre Procesos .....	20
	Tipos de Energías Renovables presentes en el Sector .....	22
	Elección de la Mejor Alternativa de Energía Renovable .....	24
	Modelación del Sistema Energético Renovable No Convencional. ....	25
3.2	Discusión.....	29
4.1	Conclusiones.....	31
4.2	Recomendaciones.....	32
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	33
6	ANEXOS.....	35
	<b>ANEXO I. Reporte de la Modelación en SAM para 70 MW .....</b>	<b>36</b>
	<b>ANEXO II. Reporte de la Modelación en SAM para 16 MW .....</b>	<b>37</b>

## RESUMEN

La minería verde consiste en reducir el impacto ambiental generado por las actividades mineras. Una gran parte de esta reducción del impacto corresponde al uso de energías renovables para proveer la demanda energética total o parcial de la mina.

Este proyecto estudió el potencial energético para la incorporación de energía renovable en los procesos de producción de oro en el Proyecto Minero Santa Bárbara ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe.

Para esto se realizó un inventario de procesos que permitió conocer el flujo de energía y material para la producción de oro. También se analizó, de manera cualitativa, el potencial energético de energía renovable no convencional en zonas aledañas al sector y se identificó que la energía solar fotovoltaica se adapta de manera adecuada al requerimiento energético del proyecto. Se dimensionó el sistema energético mediante el uso del software SAM. Este programa estima la cantidad de área superficial de apertura del sistema fotovoltaico para satisfacer el requerimiento energético.

Se determinó que, no es factible proporcionar la energía para todo el proyecto minero, debido a las limitaciones de espacio. Considerando un área de 14 hectáreas, se pudo suplir el 23% de la demanda energética. Esto significa que, se podría generar energía para suplir el requerimiento de la máquina Molino de Bolas (16 MW). Esto implica que, si se puede proveer una parte del requerimiento energético de la mina, usando energías renovables.

**PALABRAS CLAVE:** energía, energía renovable, minería, solar, fotovoltaica, oro.

## **ABSTRACT**

Green mining consists of reducing the environmental impact generated by mining activities. A large part of this reduction occurs when the mine uses renewable energy to supply the energy sources to supply the energy demand of the mine (even partially).

This project studied the energy potential for the incorporation of non-conventional renewable energy in the gold production processes in the Santa Bárbara Mining Project located in the province of Zamora Chinchipe.

For this, an inventory of processes was carried out that allowed the flow of energy and material for the gold production. Then, the energy potential of renewable energy in areas surrounding the sector was qualitatively analyzed. Based on the analysis, the photovoltaic solar energy was chosen, as it adapts to the energy requirement of the project. The energy system was designed using the SAM software. This program estimates the surface area covered with PV required to satisfy the energy demand of the mine.

It was determined that producing enough energy for all the processes was unrealistic, due to space limitations. Considering a realistic covered area of maximum 14 hectares, only 23% of the energy demand could be supplied, which could be enough to provide electricity to the Ball Mill machine, which requires 16 MW. This implies that, a part of the energy requirement of the mine can be supplied, by renewable energies.

**KEYWORDS:** energy, renewable energy, mining, solar, photovoltaics, gold.

# **1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.**

La minería es uno de los tantos procesos industriales a los que se atribuye una alta producción de gases de efecto invernadero (GEI). Por esto se busca que este sector reduzca los GEI emitidos a la atmósfera, tanto por los insumos con los que se abastecen, la energía utilizada, como por los gases liberados por actividades propias de la explotación.

Dado a esta problemática surgen leyes cuyo fin es controlar que la contaminación siga creciendo cada vez más. En la actualidad, en varios países del mundo son exigidos los metales con certificación de origen sostenible, o también llamados metales verdes.

En la región existen países como Chile que ya cumplen con estas leyes sobre la minería verde. Estas leyes implican un gran vínculo entre la inclusión y sostenibilidad, es decir no es necesario terminar con la minería, sino que estos cumplan con el objetivo de ser lo más amigables posibles con el ambiente.

Las leyes que se tienen en Ecuador en la actualidad no especifican la implementación de energías renovables o la optimización de recursos a la hora de realizar las operaciones de extracción minera. Sin embargo, considerando la tendencia global hacia los metales verdes, el país debe pensar en ir incorporando soluciones sostenibles a su explotación minera.

El caso de estudio es el Proyecto Minero Santa Bárbara ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, Cantón Nangaritza, parroquia Zurmi, sector Santa Bárbara poblado de Pachicutza (Chacón Carla, 2018), cuyas coordenadas lugar son: -4.121493, -78.628581 y tiene un área superficial de 36 hectáreas.

En la ejecución de este trabajo se realizó una revisión bibliográfica profunda que permitió conocer acerca de los procesos de producción de oro y los requerimientos energéticos de este. Mediante un diagrama de flujo se muestra el inventario de procesos, flujo energético y de material. Se identifican los tipos de energías renovables no convencionales en zonas aledañas al sector y se selecciona aquella con mayor potencial energético y que se adecua de mejor manera a los requerimientos del proyecto. Se realiza la modelación del sistema energético en el software SAM con información sobre los arreglos del sistema lo que permite conocer el área superficial necesaria para la instalación de este. Por último, se analiza si los resultados son coherentes y cumplen con el requerimiento energético del proyecto minero o al menos con un porcentaje de este.

## **1.1 Objetivo general.**

Estimar el potencial energético para la incorporación de energía renovable no convencional en los procesos de producción de oro del proyecto Santa Bárbara con posterior dimensionamiento del sistema energético renovable.

## **1.2 Objetivos específicos.**

Determinar el requerimiento de energía eléctrica en el proyecto Santa Bárbara.

Evaluar el potencial de energía renovable en zonas cercanas al proyecto seleccionado.

Realizar el dimensionamiento de un sistema de energía renovable para el caso de estudio.

## **1.3 Alcance.**

Para la realización de este trabajo es importante como primer apartado la selección de un caso de estudio que permita determinar el potencial de energía eléctrica necesario para cumplir con la demanda requerida por los procesos de producción de oro.

Una vez realizada esta actividad es necesario identificar las fuentes de energía renovable no-convencionales en zonas aledañas y a su vez elegir una de estas alternativas como la fuente energética para estos procesos.

Al conocer la información antes mencionada parte de las tareas finales es que se procederá con el diseño de un sistema energético que pueda ser sustentable para el proyecto en cuestión.

## **1.4 Marco teórico.**

### **Importancia de la Minería en el Mundo.**

La minería es un proceso industrial complejo (Concha, 2017) que permite la obtención de sustancias minerales sólidas, líquidas o gaseosas existentes en la tierra (Herrera & Castilla, 2012). Estos minerales son necesarios para cubrir la demanda de una sociedad que crece a un paso acelerado.

Los minerales obtenidos de esta actividad son de gran importancia en el desarrollo económico de muchos países en el mundo (Viana Ríos, 2018). Sin embargo, las circunstancias actuales (cuidado del medio ambiente) exigen que las actividades mineras sean llevadas de manera amigable con el medio ambiente para evitar poner en riesgo el desarrollo minero y la economía (Viana Ríos, 2018).

Varios países desarrollados como Australia, Canadá, Finlandia, Suecia y Estados Unidos han sido beneficiados debido a la extracción minera pues gran parte de su desarrollo se debe a esta industria (*Minerales y Desarrollo Económico*, n.d.). Otro caso muy relevante es el de Chile ya que la producción de cobre de este país representa el 35% de la producción global y de esta forma ocupa un puesto (39) en el grupo de países con Desarrollo Humano Alto (*Minerales y Desarrollo Económico*, n.d.).

### **Importancia de los Minerales.**

Los minerales son conocidos por ser sólidos que se encuentran en la naturaleza formados a partir de erupciones volcánicas. Los minerales tienen una composición química y propiedades físicas definidas (Banco Central del Ecuador, 2016).

Estos minerales pueden ser metálicos y no metálicos. Los minerales metálicos según la RAE (Real Academia de la Lengua Española) son denominados elementos químicos que poseen buena conductividad eléctrica y calorífica, con brillo característico y comúnmente se los encuentra en estado sólido a excepción del mercurio. Estos elementos representan la mayor parte de todos los que se encuentran en la tabla periódica (Villanueva Rodríguez, 2008). En cambio, los no metálicos, son todo lo contrario a los mencionados anteriormente razón por la cual la finalidad con que se los extrae es para generación energética, en el sector de la construcción, etc. (Banco Central del Ecuador, 2016).

Una vez definidos los tipos de minerales que existen en los diferentes yacimientos que se encuentran dispersos alrededor del mundo se puede decir que desde épocas remotas el ser humano ha sido dependiente de estos recursos para poder progresar a nivel tecnológico y económico (Herrera & Castilla, 2012).

El oro, la plata y el cobre fueron de los primeros metales encontrados en la naturaleza y utilizados por el hombre (Villanueva Rodríguez, 2008). Conforme pasaba el tiempo se dieron más avances como el descubrimiento del bronce, hierro, mercurio, aleaciones de cinc, plomo, platino, arsénico, antimonio (Villanueva Rodríguez, 2008). El avance más importante en el hallazgo de estos metales yace en el desarrollo de la Revolución Industrial pues se descubren el níquel, cobalto, manganeso, wolframio, titanio, cromo y aluminio (Villanueva Rodríguez, 2008). En la Segunda Guerra Mundial nace el interés por los metales radiactivos como el uranio (Villanueva Rodríguez, 2008).

## Importancia de la Minería en Ecuador.

Ecuador es un país con gran cantidad de reservas de oro, plata, cobre y otros minerales. Por esta razón, el desarrollo de proyectos mineros es clave para reforzar la economía del país (Banco Central del Ecuador, 2016).

Según información presentada por (Viana Ríos, 2018) se tiene que la participación de la minería en el PIB es del 4.6% lo que merece una importancia media, en comparación con el petróleo. Sin embargo, la idea es que se incremente esta producción. En la **Tabla 1** se muestra para el año 2016 la participación de industrias mineras incluyendo el petróleo en el PIB de los países de América Latina y el Caribe, también se indica la participación de los minerales en el porcentaje de participación en las exportaciones totales.

**Tabla 1.** Participación de la Minería en el PIB y exportaciones en países de América Latina y el Caribe.

País		Participación PIB minero* 2016	Participación exportaciones** %	País		Participación PIB minero* 2016	Participación exportaciones** %
1	Antigua y Bermuda	0,9%	S.I.	18	Haití	0,2%	S.I.
2	Argentina	4,0%	<1%	19	Honduras	0,6%	<1%
3	Bahamas	0,9%	S.I.	20	Jamaica	1,7%	45,9%
4	Barbados	0,2%	3,6%	21	México	3,9%	<1%
5	Belize	0,5%	<1%	22	Nicaragua	3,0%	<1%
6	Bolivia	10,4%	34,7%	23	Panamá	2,2%	<1%
7	Brasil	1,1%	7,3%	24	Paraguay	0,2%	<1%
8	Chile	8,9%	44,0%	25	Perú	9,0%	42,1%
9	Colombia	5,9%	14,9%	26	República Dominicana	2,0%	S.I.
10	Costa Rica	0,3%	<1%	27	Saint Cristobal y Nevis	0,1%	S.I.
11	Cuba	0,6%	2,5%	28	San Vicente y las Granadinas	0,2%	S.I.
12	Dominica	1,5%	9,4%	29	Santa Lucía	0,4%	S.I.
13	Ecuador	4,6%	<1%	30	Suriname	6,6%	S.I.
14	El Salvador	0,3%	<1%	31	Trinidad y Tobago	9,2%	2,5%
15	Granada	0,2%	S.I.	32	Uruguay	0,5%	<1%
16	Guatemala	1,5%	5,3%	33	Venezuela	28,4%	0,3%
17	Guyana	16,8%	S.I.				

Fuente: (Viana Ríos, 2018)

En los últimos años se ha observado gran interés por parte de empresas nacionales y extranjeras para realizar proyectos mineros metálicos y no metálicos en el país. Algunos

proyectos se encuentran en la fase de exploración y otros ya en la extracción (Sandoval Moreano et al., n.d.). Entre estas figuran empresas como BIRA, Imgold, Ecuacorrientes, Tena Resources, Nacional, Selva Alegre, Chimborazo y Guapán (Sandoval Moreano et al., n.d.).

De los proyectos mineros con más envergadura se encuentran relacionados con el oro (Banco Central del Ecuador, 2016). Existen yacimientos donde el oro se encuentra bastante puro y fuertemente adherido entre rocas, pero también se lo puede encontrar con cuarzo, pirita, otros minerales tales como plata, cobre, bismuto, mercurio, antimonio, pirita u otros minerales (López Fernández, n.d.).

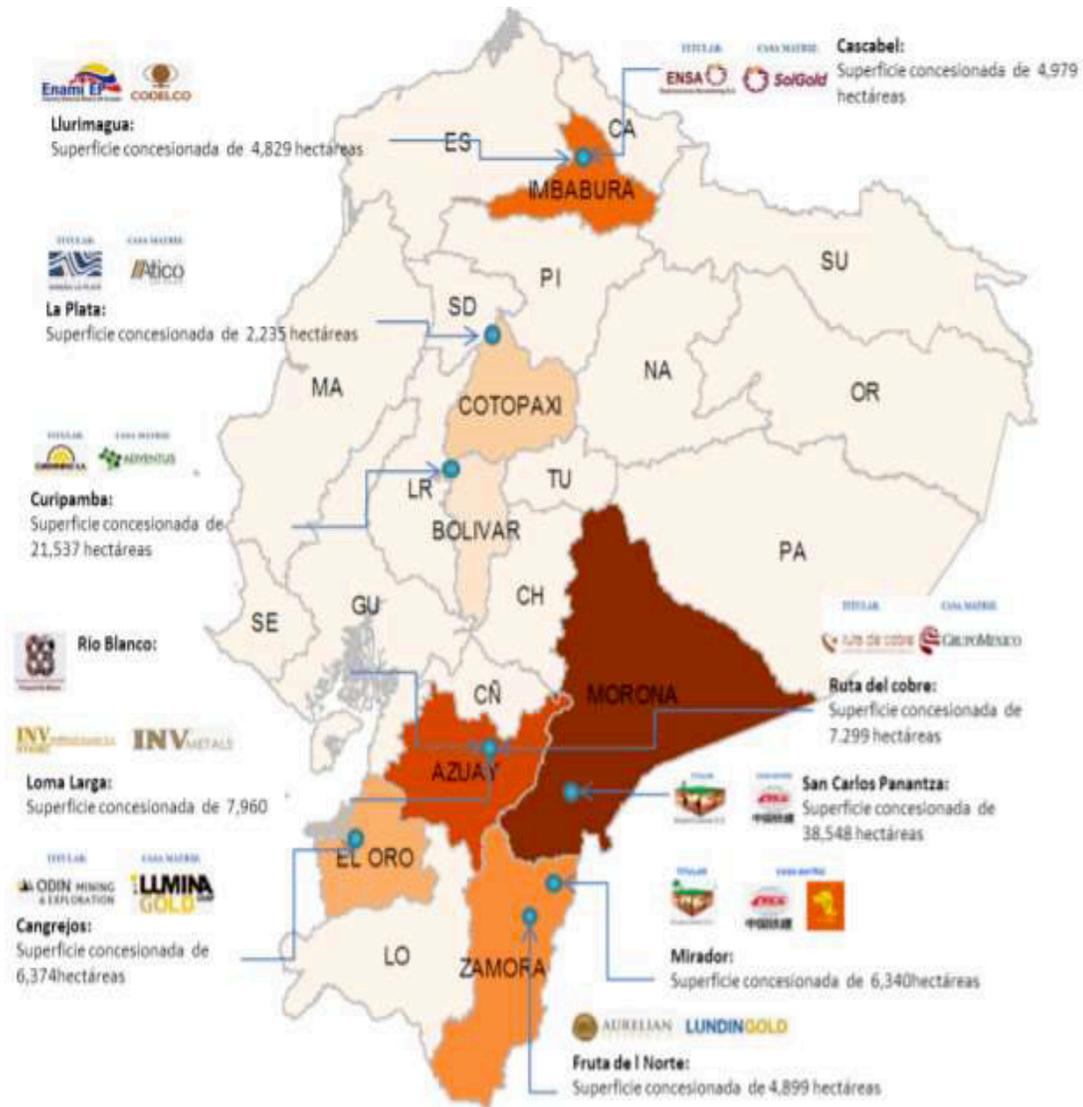
Existen varias aplicaciones de este metal (López Fernández, n.d.). Algunas de las actividades que usan este mineral según (López Fernández, n.d.) son:

- Recubrimiento de salones, templos y esculturas religiosas.
- En la industria electrónica formando parte de ordenadores, teléfonos, calculadoras, equipos de televisión, celulares, etc.
- Revestimientos en cascos de los bomberos, trajes de astronautas y sus naves.
- Revestimiento de contenedores y tuberías para gases corrosivos.
- Instrumentos de precisión para medir temperaturas muy elevadas.
- Entre otras.

Sin embargo, cabe destacarse que alrededor del 80% de oro producido es ocupado por la joyería (López Fernández, n.d.). Es muy probable que esta industria sea una de las que mejor recicla pues llevan a cabo la reutilización de metal deteriorado durante los procesos de elaboración (López Fernández, n.d.).

### **Proyectos Mineros en Ecuador.**

En Ecuador existen 105,000 hectáreas otorgadas a minas y proyectos mineros, se encuentran distribuidas en 7 provincias al sureste del país en su gran mayoría (Banco Central del Ecuador, 2021). En la **Figura 1** se puede observar las provincias con actividad minera mencionadas anteriormente.



**Figura 1.** Provincias con Actividad Minera.

Fuente: (Banco Central del Ecuador, 2021)

**Minas a Gran Escala.**

La mina a gran escala consiste en la extracción de grandes cantidades de mena (toneladas/día) (Ministerio de Minas y Energía República de Colombia, 2015).

Mina Fruta del Norte: concesionada a la empresa Aurelian Ecuador S.A., subsidiaria de Lundin Gold Inc., se encuentra en la provincia de Zamora Chinchipe (Banco Central del Ecuador, 2021).

Mina Mirador: otorgada la empresa Ecuacorriente S.A. (ECSA), subsidiaria de CRCC-Tonguan Investment, se localiza en la provincia de Zamora Chinchipe (Banco Central del Ecuador, 2021).

### **Proyectos Mineros Estratégicos.**

Son proyectos que se encuentran aún en fase de evaluación económica o en la fase de exploración del lugar (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero Loma Larga: titulado por la empresa INV Minerale Ecuador S.A., subsidiaria de INV Metals INC., se encuentra situada en la provincia del Azuay (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero San Carlos Panantza: ubicado en la provincia de Morona Santiago, adjudicada a la empresa ExplorCobres S.A., subsidiaria de CRCC-Tonguan Investment (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero Río Blanco: concesionada de Junefield Resources Ecuador, se localiza en la provincia del Azuay (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero Santa Bárbara: adjudicado a la empresa Lumina Gold, yace en la provincia de Zamora Chinchipe, Cantón Nangaritza (Banco Central del Ecuador, 2021).

### **Proyectos Mineros de Segunda Generación.**

Proyectos que tienen definido el tiempo de vida útil, son desconocidos los métodos de exploración del lugar y aún se encuentran presentando documentación para la otorgación de licencias medioambientales (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero Cascabel: localizado en la provincia de Imbabura, otorgado a la empresa Exploraciones Novomining S.A. (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero Cangrejos: perteneciente a la provincia de El Oro, concesionada a la empresa Odin Mining del Ecuador S.A. (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero Ruta del Cobre: se encuentra situada en la provincia del Azuay, adjudicada a la Compañía Minera Ruta del Cobre (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Minero Llumirahua: situado en la parroquia García Moreno Peñaherrera en la provincia de Imbabura ha sido otorgado a la Empresa Nacional Minera del Ecuador S.A. (ENAMI EP) y a la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto Curipamba: se desarrolla en la provincia de Bolívar, concesionada a la empresa Curimining S.A. (Banco Central del Ecuador, 2021).

Proyecto La Plata: titulada a la empresa internacional Toachi Mining Inc., yace en la provincia de Cotopaxi (Banco Central del Ecuador, 2021).

### **Energía.**

Según lo menciona la Secretaría de Energía de Buenos Aires (2003) se define como la capacidad que tiene la materia o los cuerpos para generar calor, trabajo en forma de movimiento, luz. Existen varias maneras en que la energía se puede manifestar y estos son mecánica, térmica, química, eléctrica, electromagnética y nuclear (Schallenberg Rodríguez, 2008a).

La mayoría de energía es proveniente del Sol, produce viento, evapora aguas superficiales, forma nubes, lluvias, etc (Schallenberg Rodríguez, 2008a). El calor y la luz producidas se originan en varias reacciones químicas y que se vuelven imprescindibles para el crecimiento vegetal y animal (Schallenberg Rodríguez, 2008a).

Las fuentes de energía se las puede clasificar de acuerdo con su disponibilidad por lo que son renovables y no renovables (Schallenberg Rodríguez, 2008a).

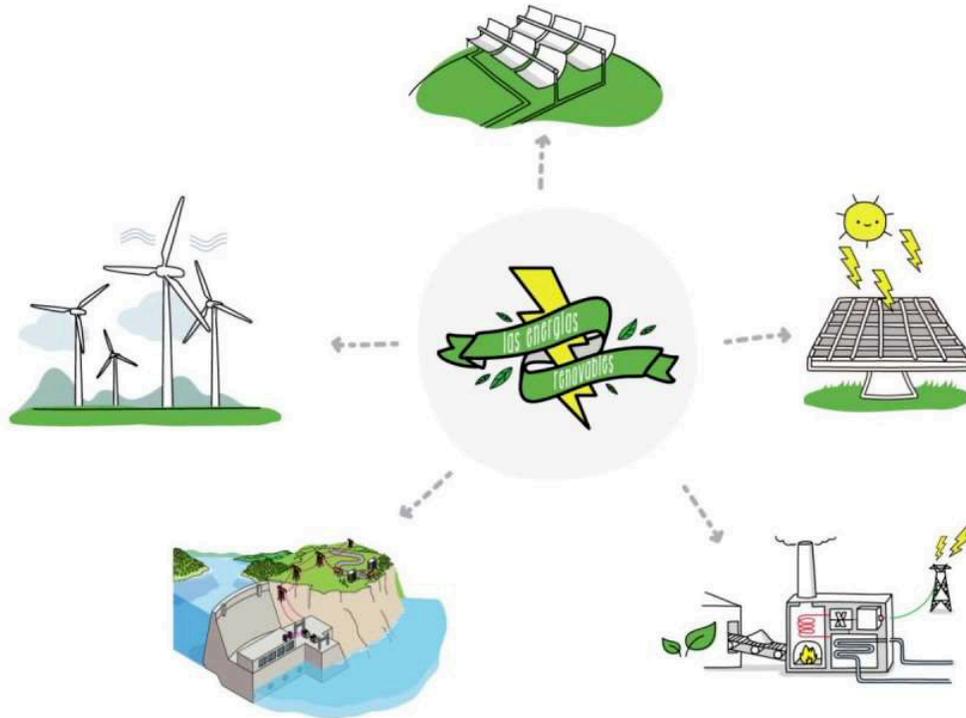
### **Energías Renovables.**

Desde el inicio de la humanidad, el hombre utilizó fuentes de energías renovables para su desarrollo hasta que llegó la Revolución Industrial que marcó el inicio de la utilización de combustibles fósiles (Schallenberg Rodríguez, 2008a). Se dice que 2000 años atrás el hombre empieza a utilizar el agua, viento y demás recursos de la naturaleza para satisfacer su demanda alimenticia, es ahí que aparecen los molinos de agua y viento para moler granos (Schallenberg Rodríguez, 2008a).

Llegando a finales de siglo XVII aparece la máquina de vapor que es la primera en convertir el calor en una fuerza, para esto utilizaban carbón y agua (Schallenberg Rodríguez, 2008a). Con este principio aparecen los motores de combustión interna en la segunda mitad del siglo XIX (Schallenberg Rodríguez, 2008a). A partir de esto la humanidad ha desarrollado maquinaria y artefactos que permitan mantener un nivel de vida alto generando un avance tecnológico importante trayendo consigo una elevada contaminación ambiental (Schallenberg Rodríguez, 2008a).

Corresponde a cualquier forma de energía ya sea de origen solar, geológico o biológico que pueda ser renovada por procesos que se llevan a cabo en la naturaleza y que son

inagotables (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2014). Entre estas se tienen la energía solar, hidroeléctrica, eólica, mareomotriz y undimotriz, térmica oceánica y de biomasa (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2014).



**Figura 2.** Tipos de Energías Renovables.

Fuente: (Acciona, s. f.)

### **Energías No Renovables.**

Se definen así a las que se encuentran de manera limitada en la naturaleza y no pueden ser renovadas en un corto tiempo (Schallenberg Rodríguez, 2008a). Aquí se tiene fuentes energéticas como carbón, petróleo, gas natural y uranio (Schallenberg Rodríguez, 2008a).



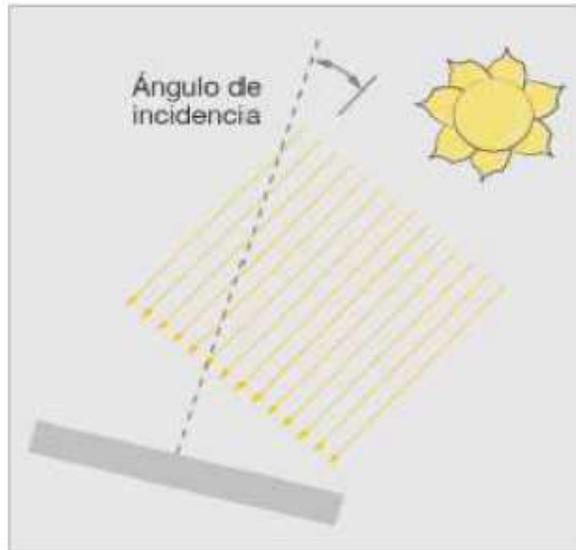
**Figura 3.** Tipos de Energías No Renovables.

Fuente: (Catorce6, 2020)

### **Sistemas Fotovoltaicos.**

Son sistemas energéticos renovables (Gina Rodríguez - Borges & Sarmiento - Sera, 2011) que transforman la radiación solar en electricidad (Schallenberg Rodríguez, 2008b). La radiación solar es un conjunto de campos eléctricos y magnéticos emitidos por el sol (Milena et al., 2017).

La irradiancia es una magnitud que mide la radiación solar que llega a la tierra (Milena et al., 2017).



**Figura 4.** Representación Gráfica del Ángulo de Incidencia.

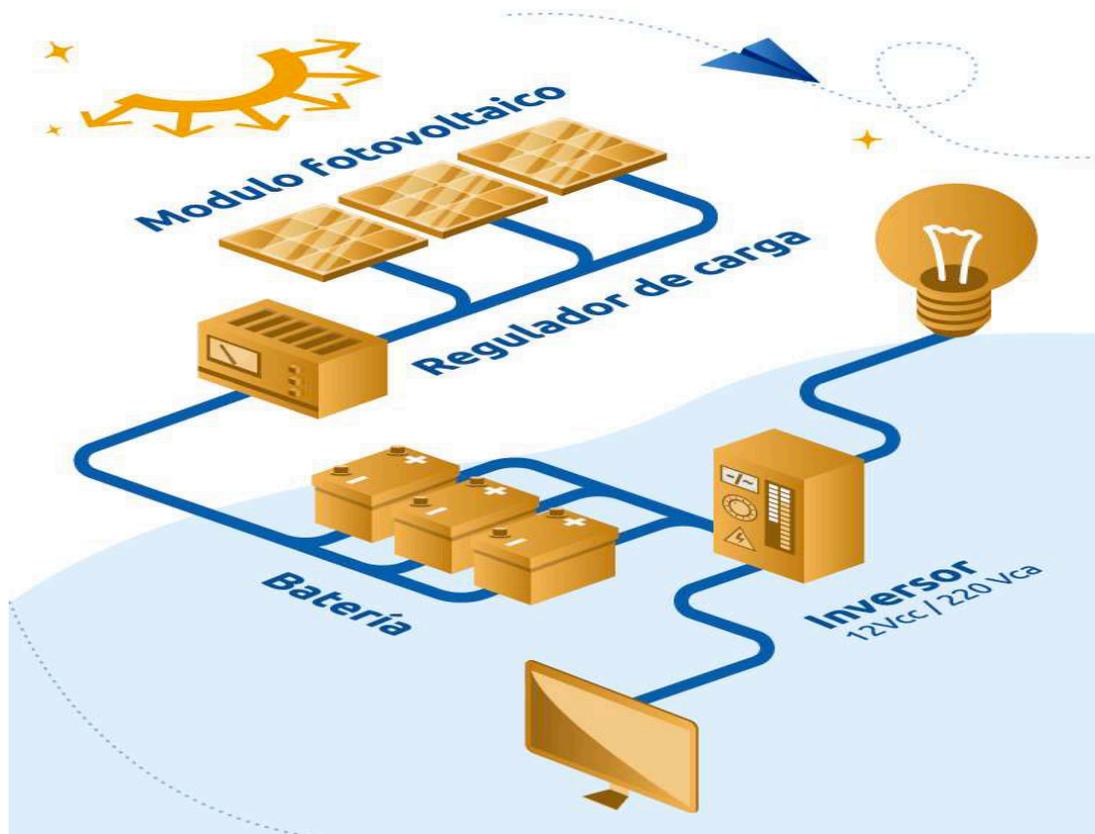
Fuente: (Milena et al., 2017)

La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre se puede presentar de 3 diferentes formas: radiación directa (rayos que inciden de manera directa desde el sol), radiación difusa (rayos que inciden con cambios importantes en la dirección) y radiación albedo (rayos de sol reflejados por el suelo) (Milena et al., 2017).

Los paneles fotovoltaicos se encuentran formados por la unión de celdas cuya función es generar electricidad a partir de radiación que incide sobre estos (Milena et al., 2017). La potencia pico es la potencia máxima que el módulo puede proveer siempre y cuando se mantenga una temperatura de 25°C y una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> (Milena et al., 2017). Existen varios tipos de células: monocristalinas (eficiencia teórica: 23%, eficiencia real: 13 y 20%), policristalinas (eficiencia real: 15 y 18%), amorfas y de Arseniuro de Galio (eficiencia real: 30%) (Milena et al., 2017).

El ángulo de incidencia corresponde al que se forma entre los rayos del sol y una recta perpendicular a la superficie (Milena et al., 2017).

La producción de energía debe ser optimizada por lo que se debe fijar la orientación e inclinación de los paneles mediante un soporte que puede ser fijo y móvil (Milena et al., 2017).



**Figura 5.** Componentes de un Sistema Solar Fotovoltaico.

Fuente: (Selectra, 2021)

En la **Figura 5** se observan los componentes que posee un sistema solar fotovoltaico y que son muy importantes para el funcionamiento de este.

Parte importante de estos sistemas son los reguladores de carga cuya función consiste en controlar la carga y descarga de la batería (Milena et al., 2017).

Los inversores DC/AC sirven para transformar la electricidad de corriente continua a alterna que va a ser utilizada por los equipos eléctricos (Milena et al., 2017). Existen 3 tipos de onduladores: onda cuadrada, onda modificada senoidal y onda senoidal (Milena et al., 2017).

## **2 METODOLOGÍA.**

En el capítulo se describe la metodología a utilizar para realizar la estimación del potencial energético renovable que cubra la demanda total o parcial de los procesos de producción de oro en el proyecto Santa Bárbara de Ecuador.

### **2.1 Inventario de los Procesos de la Planta.**

Para estimar la cantidad de energía necesaria para la producción de oro en el proyecto Santa Bárbara de Ecuador es necesario realizar un inventario de procesos de la planta. Este inventario se lo realiza mediante una revisión bibliográfica con el fin de seleccionar los procesos y definir sus características energéticas.

A continuación, se identifica los flujos de material presentes en cada uno de los procesos. Estos datos serán tomados del reporte técnico del proyecto Santa Bárbara de Ecuador (Short et al., n.d.-a) y del artículo “Producing Metals from Common Rocks: The Case of Gold” (Palacios et al., 2019). Todos los datos recolectados serán presentados en un diagrama de flujo que indique como sucede la entrada del material a la máquina y como es la salida de este además de los requerimientos energéticos de cada uno de los procesos.

### **2.2 Cuantificación Energética.**

Se realizará una estimación acerca del requerimiento energético para cada uno de los procesos de producción de oro. La cuantificación energética total de la planta, y de algunos de los procesos de esta, será tomado del reporte técnico del proyecto Santa Bárbara de Ecuador (Short et al., n.d.-a).

Una vez que ha sido revisada la bibliografía y en caso de que para determinado proceso no se cuente con la información necesaria o el valor preciso se recurrirá a realizar un análisis cualitativo para dicho proceso de producción del proyecto.

A falta de datos de cantidad de energía requerida, este análisis cualitativo consiste en definir características del consumo de energía de los procesos para cada uno ya que provee cierta información o indicaciones que se vuelven importantes a la hora de considerar el proceso que pueda intercambiar el tipo de energía que utiliza actualmente por energía renovable. Entre las características que se evaluarán serán la continuidad del requerimiento energético, tipo de energía (electricidad, calor, movimiento).

## 2.3 Estimación del Potencial Energético Renovable.

Para el desarrollo de este apartado es fundamental identificar los tipos de energía renovable presentes en la zona o sectores aledaños al sector en donde es ejecutado el proyecto Santa Bárbara de Ecuador. Las herramientas que se utilizan para desarrollar este punto son los Atlas solar (Vaca Diego & Ordoñez Freddy, 2019), el Atlas Eólico (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013) y el Atlas Bioenergético (Guzmán et al., 2014) del Ecuador. Estos Atlas permiten identificar los valores promedio (velocidad de aire, radiación solar y potencial bioenergético) con mayor probabilidad de ocurrir en esta zona.

Una vez que se ha identificado los tipos de energía renovable presentes en la zona, se elige la mejor alternativa mediante una matriz de priorización que conlleve un análisis cualitativo tomando en cuenta costos, potencial energético y las condiciones en que se encuentre este lugar. La matriz antes mencionada valorará con 1 al más costoso, con mayor potencial y cuyas condiciones sean las mejores, se utilizará 0.5 para los factores con costo medio, potencial energético medio y condiciones más o menos buenas y con 0 cuando los costos sean bajos, potencial energético bajo y malas condiciones del terreno. Para el análisis acerca del potencial energético que se tiene en la zona se tomará como referencia los Atlas Solar, Atlas Eólico y Atlas Bioenergético del Ecuador. Un análisis geográfico permitirá determinar las condiciones en que se encuentra situada la mina y si es factible o no la construcción de este sistema energético.

## 2.4 Diseño del Sistema Energético.

En este apartado se utiliza el software SAM (System Advisor Model) del NREL (National Renewable Energies Laboratory) (Gilman, 2015). Este programa permite la modelación de diferentes tipos de energía renovable (solar, eólica y biomasa) y ayuda a que la toma de decisiones sea más sencilla.

Los principales aspectos para obtener la producción de energía son: datos del clima de la locación, especificaciones del sistema y posibles pérdidas dependiendo del tipo de sistema.

A continuación, se detalla en la **Tabla 2** como para realizar el modelamiento de rendimiento fotovoltaico de SAM son combinados varios submodelos de módulos e inversores con código complementario que permite obtener el valor de la salida de AC/hora en un sistema energético fotovoltaico juntamente con registros meteorológicos y datos que indican características del módulo inversor y matriz (Gilman, 2015).

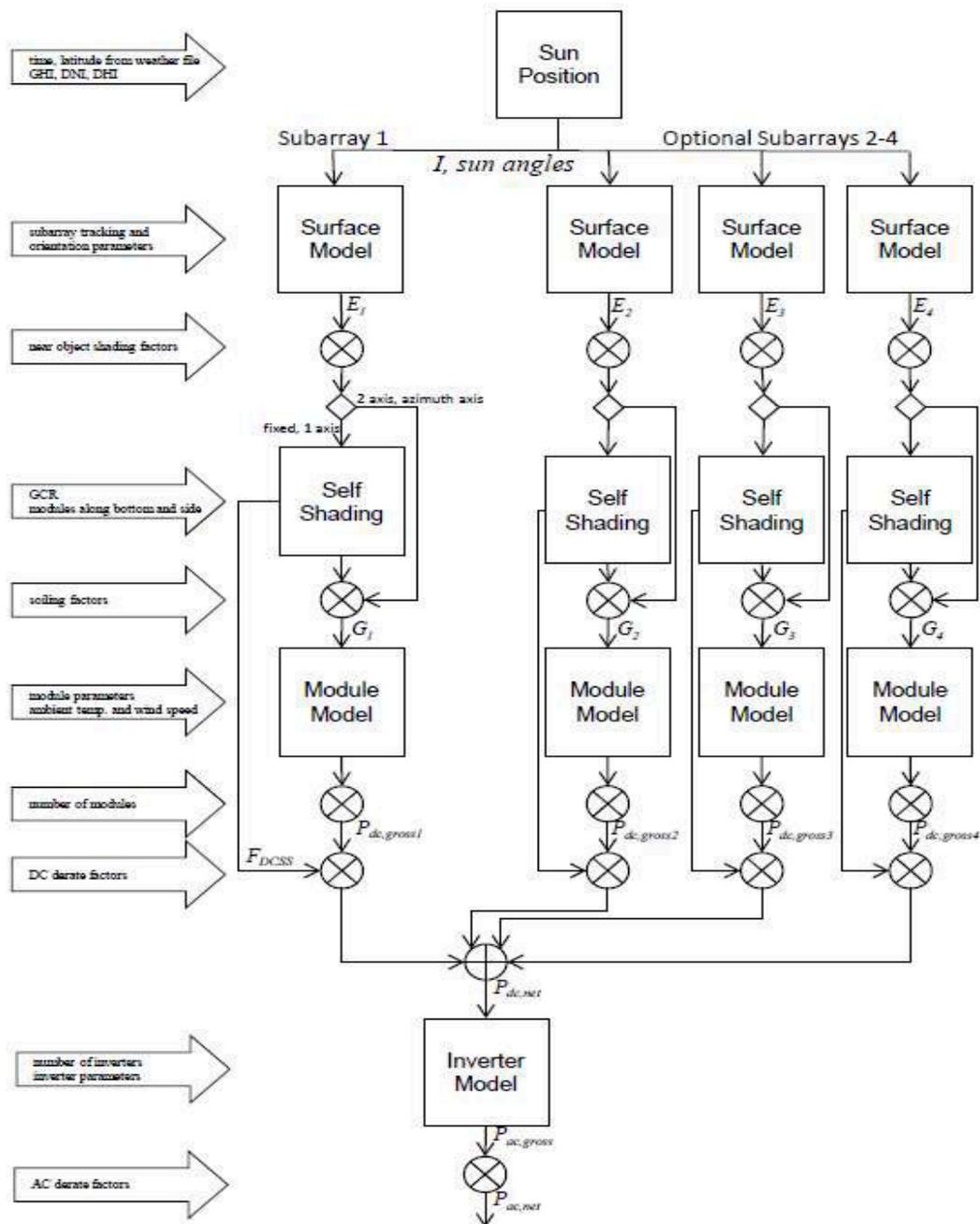
El modelo de rendimiento fotovoltaico está en la capacidad de simular cualquier tamaño del sistema desde lo más pequeño y simple hasta sistemas con varios subarreglos y conjuntos de inversores. Calcula la salida AC del sistema en un año, utilizando una matriz de 8760 valores de potencia AC/hora (Gilman, 2015). Maneja valores de temperatura y recurso solar por hora de registros meteorológicos, que muestra como es el recurso en la ubicación del sistema para un año, y los emplea con entradas que muestran el diseño del sistema en ecuaciones para calcular la eficiencia de conversión del módulo, inversor y pérdidas energéticas (Gilman, 2015).

**Tabla 2.** Submodelos primarios del modelo de rendimiento fotovoltaico SAM.

Submodel	Reference
Weather file reader	NREL
Sun position	Michalsky (1988), Iqbal (1983), NREL
Surface angles	standard geometry
Backtracking for one-axis trackers	NREL
Isotropic incident irradiance model	Liu (1963)
HDKR incident irradiance model	Duffie and Beckman (2013), Reindl (1988)
Perez 1990 incident irradiance model	Perez (1988), Perez (1990)
Self shading model for fixed arrays	Deline (2013)
Self shading model for one-axis trackers	NREL
Sandia module model	King (2004)
CEC module model	De Soto (2004a)
Simple efficiency module model	NREL
Subarray mismatch calculator	NREL
Sandia inverter model	King (2007)
Part load inverter model	NREL

Fuente: (Gilman, 2015)

El algoritmo básico del modelo de rendimiento fotovoltaico está descrito en la **Figura 6**, indica que el sistema modelado consiste en un solo tipo de módulo fotovoltaico y un solo tipo de inversor, no se pueden combinar tamaños o marcas de estos (Gilman, 2015). El conjunto puede tener hasta 4 subarreglos individualmente con su propio grupo de parámetros de seguimiento, ángulos de superficie, sombreado, suciedad y pérdidas (Gilman, 2015). El arreglo debe estar conectado únicamente a un solo inversor o en su defecto a un banco de inversores que se deben encontrar acoplados en paralelo.



**Figura 6.** Diagrama de Bloques simplificado del modelo de rendimiento fotovoltaico.

Fuente: (Gilman, 2015)

Una vez que se obtienen los resultados se procede con el análisis, también se determina si se pudo suplir la energía eléctrica por energía renovable en los procesos de producción de oro del proyecto Santa Bárbara de Ecuador o a un solo proceso del proyecto.

### **3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el presente capítulo se presentan los resultados del estudio realizado acerca del proyecto Santa Bárbara de Ecuador. En primera instancia se muestra el inventario de los procesos de producción de oro acompañado de una corta descripción. Posterior, se realiza la cuantificación energética de cada proceso. Una vez que se cuenta con el requerimiento energético para cada etapa se determina el requerimiento general de todo el proceso de producción de oro. A continuación, se identifican los tipos de energía renovable presentes en la zona y mediante una matriz de priorización se selecciona el adecuado para el desarrollo de este trabajo. Por último, mediante el software SAM (System Advisor Model) del NREL (National Renewable Energies Laboratory) (Gilman, 2015) se realiza la simulación misma que permite conocer la cantidad, tipo y disposición del equipo de generación de energía renovable que podrá suplir parcial o totalmente el requerimiento energético del proyecto minero Santa Bárbara de Ecuador.

#### **3.1 Resultados**

##### **Inventario de Procesos.**

Dentro de los procesos que abarca la producción de oro se tiene el ROM (run of mine) que nos indica el inicio de nuestro estudio. Esta entrada se conecta al Molino Giratorio que consiste en que el material planeado a ser procesado (MPP por sus siglas en inglés) ingresó a esta máquina para reducir su tamaño. Para realizar la selección de esta máquina se utilizó una metodología cualitativa asumiendo que el MPP era duro y abrasivo. También se tomó en cuenta que este molino giratorio tiene un alto rendimiento. Terminado este proceso el MPP es almacenado.

Una vez que el MPP sale del molino giratorio, se conecta a un circuito cerrado entre el molino SAG (semi-autógeno), criba y molino de guijarros. En el molino SAG el material nuevamente disminuye su tamaño. Luego pasa a una criba que también busca reducir el tamaño del MPP. A continuación, pasa al molino de guijarros en donde se filtra y nuevamente pasa al molino SAG, se reduce en tamaño y pasa a la criba. Esta alimenta a un circuito de 2 molinos de bolas que se encuentran conectadas a el ciclón que corta el material. Después este MPP pasa a la criba y repite el proceso.

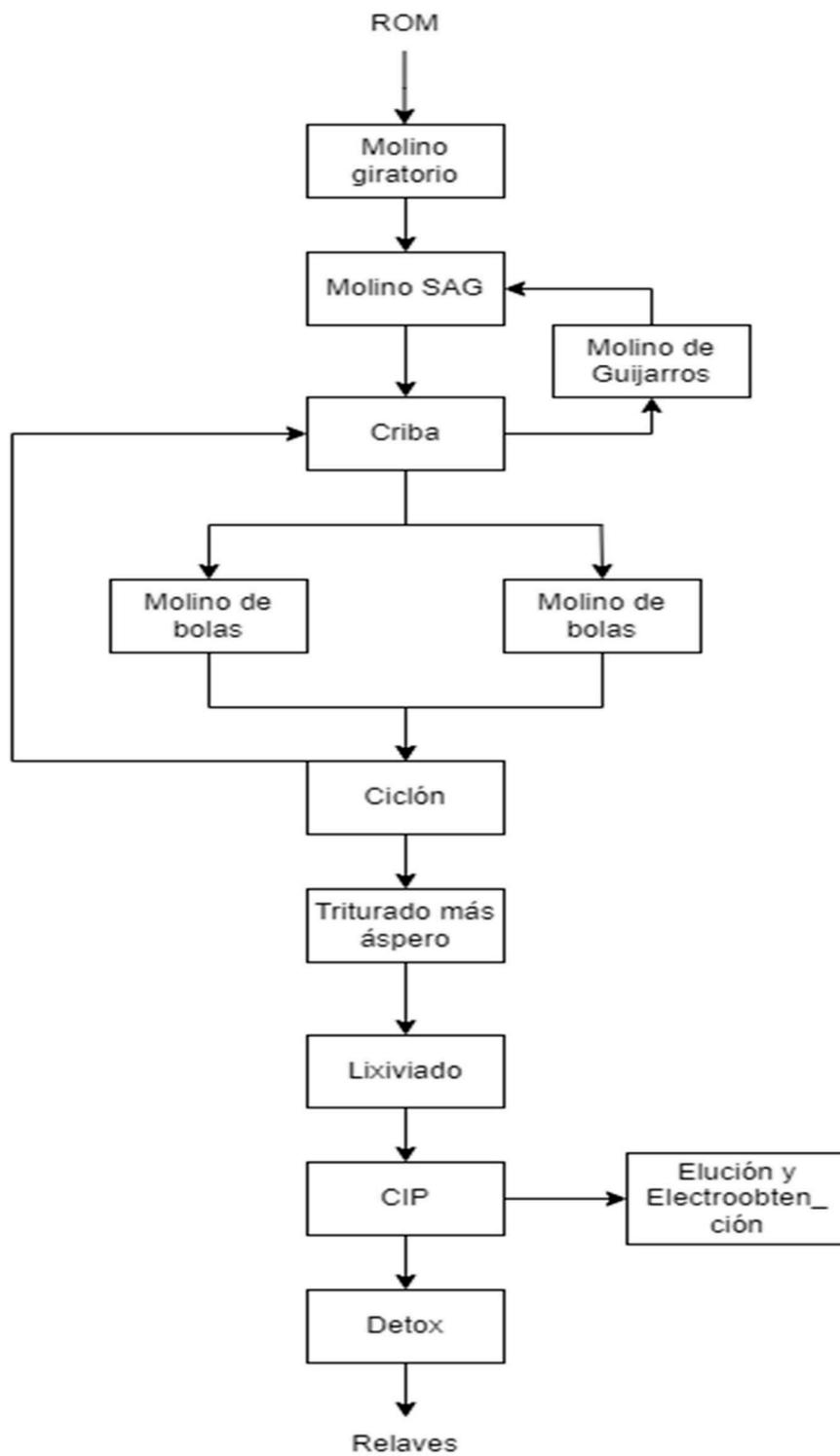
El proceso de molienda o triturado más áspero consiste en moler aún más el MPP para seguir reduciendo el tamaño y que llegue en las condiciones aptas para el proceso de lixiviación. En la Lixiviación se tiene un conjunto de 6 tanques para este proceso. En el primer tanque se agrega cianuro y cal para controlar el pH. En los 6 tanques se aplica aire

comprimido a baja presión para administrar el oxígeno necesario. El flujo ocurre en cascada por los canales abiertos en los tanques de lixiviación llegando al circuito CIP.

En el CIP (carbon in pulp o carbón activado para la recuperación de oro) se tienen 7 etapas y 3.5 horas para la adsorción de oro sobre el carbón activado. Estos tanques se encuentran equipados de cribas giratorias para retener el carbón cargado. El carbón no es transferido entre tanques. El carbón permanece en cada tanque hasta que sean transferidos a una pantalla para recuperar el carbón cargado. Mientras se descarga un tanque el resto siguen funcionando. En cada tanque descargado se coloca nuevamente carbón. El carbón activado indica en los relaves la existencia de falla en un proceso anterior.

Para la Elución y electroobtención se tiene que todo el carbón cargado en los tanques del proceso anterior pasa a esta etapa en donde ocurre el lavado y elución con ácido clorhídrico. El proceso empieza con un lavado en solución de ácido clorhídrico y posterior enjuagado con agua tratada. A continuación, es transferido a una columna de elución que elimina el carbón cargado lavado con ácido a presión y temperatura elevada. La solución que se encarga de la separación consiste en cianuro de sodio y solución cáustica que circula desde la columna de elución hasta las celdas de electrodeposición de oro. Para el último proceso Detox se utilizan tanques que agitan la solución y esta fluyen entre todos los tanques a través de limpiadores revestidos de caucho antes de llegar a la instalación de manejo de relaves.

En la **Figura 7** se presenta el diagrama con el inventario de procesos para la producción de oro en el proyecto Santa Bárbara de Ecuador.

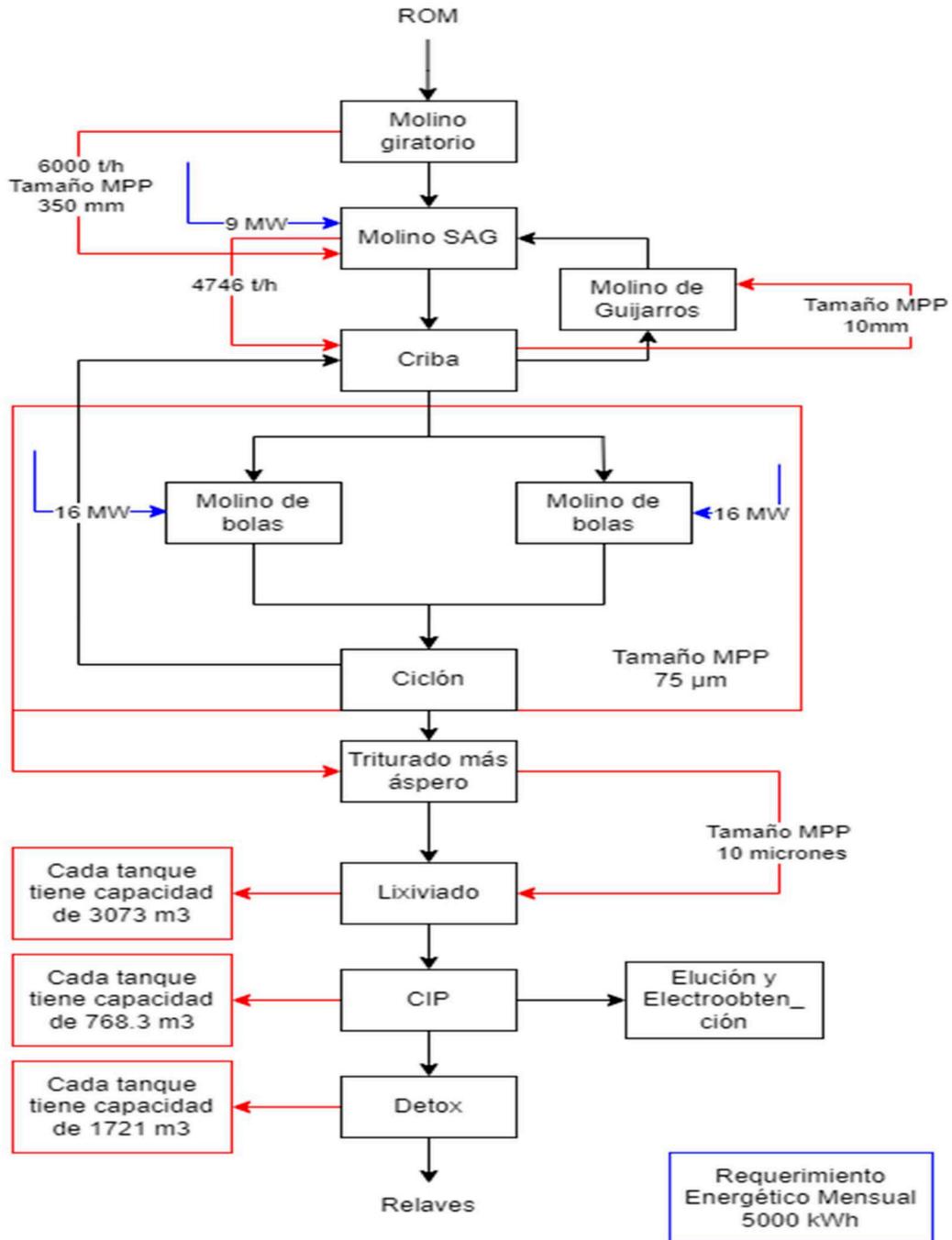


**Figura 7.** Diagrama de flujo del inventario de procesos.

Fuente: Propia.

## Flujo de Material y de Energía entre Procesos.

En la **Figura 8** se presenta el flujo de material y tamaño de MPP entre los procesos para la producción de oro en el proyecto Santa Bárbara de Ecuador.



**Figura 8.** Flujo de material y energético entre los procesos de producción de oro.

Fuente: Propia.

La **Figura 8** muestra mediante las flechas rojas como ocurre la disminución de tamaño del MPP desde que entra al Molino Giratorio hasta el Triturado más áspero para después ingresar al proceso de lixiviación y por último a la limpieza. También se puede observar los valores del flujo másico (t/h) en los primeros pasos para la producción de oro.

El requerimiento energético mensual para todos los procesos de la planta es de 5000 kWh, se encuentra representado por las flechas de color azul, y la potencia instalada es de 70 MW según lo indica el reporte técnico del Proyecto Minero Santa Bárbara (Short et al., n.d.-b).

En la **Tabla 3** se presenta la cuantificación energética de los procesos que son llevados a cabo para la producción de oro en el Proyecto Santa Bárbara. Estos datos se presentan de manera cuantitativa y cualitativa.

**Tabla 3.** Cuantificación energética de los procesos de producción de oro.

<b>Máquina</b>	<b>Cuantificación Energética (Análisis cuantitativo o cualitativo)</b>
Molino giratorio	Continuo
Molino SAG	9 MW
Molino de guijarros	Continuo
Molino de bolas 1	16 MW
Molino de bolas 2	16 MW
Ciclón	Continuo
Triturado más áspero	528 kW
Lixiviado	7.5 kW
CIP	7.5 kW
Detox	750 kW

Fuente: Propia.

## Tipos de Energías Renovables presentes en el Sector.

Para identificar los tipos de energías renovables con mayor potencial en el sector se utiliza los Atlas Eólico (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013), Atlas Solar (Vaca Diego & Ordoñez Freddy, 2019) y Atlas Bioenergético (Guzmán et al., 2014).

El Proyecto Minero Santa Bárbara se encuentra ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, Cantón Nangaritza, parroquia Zurmi, sector Santa Bárbara poblado de Pachicutza (Chacón Carla, 2018).

De acuerdo con la ubicación antes mencionada se identifica el potencial energético eólico, solar y de biomasa y se tiene lo siguiente:

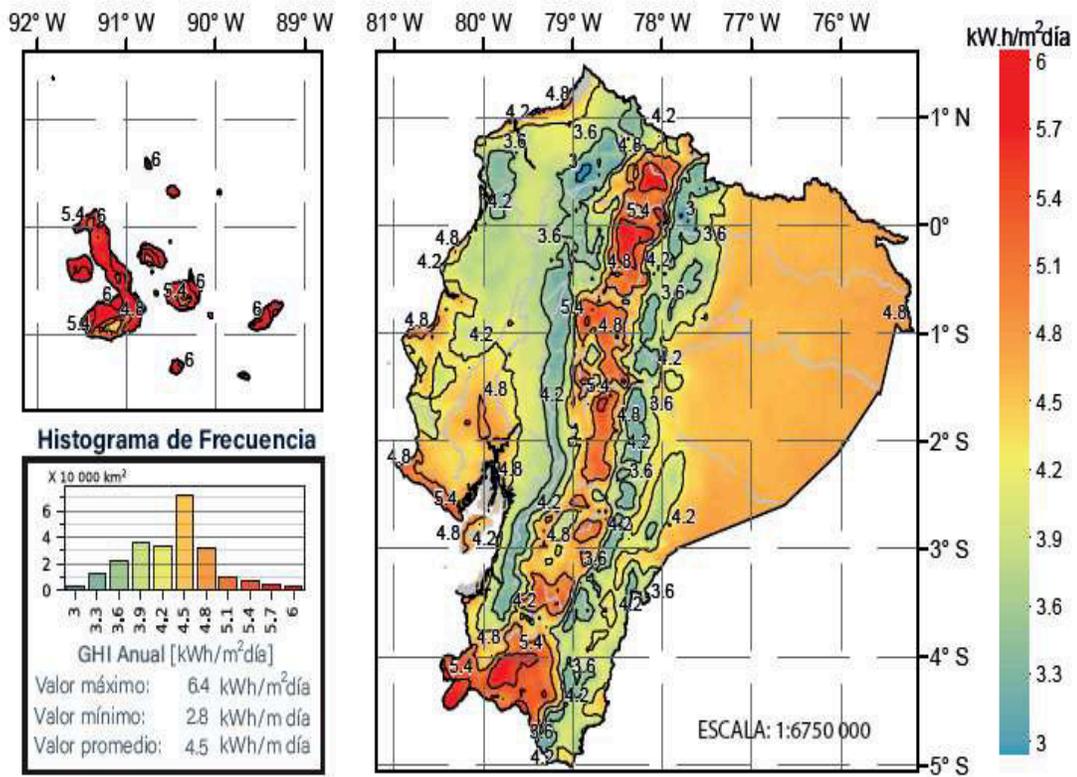
En la **Figura 9** se observa el potencial eólico instalable en la Provincia de Zamora Chinchipe, en esta se puede identificar la velocidad del aire y energía anual que puede proveer.

POTENCIAL INSTALABLE					
PROVINCIA	RANGO VELOCIDAD m/s	ÁREA [km <sup>2</sup> ]	POTENCIA INSTALABLE [MW]	FACTOR DE CAPACIDAD	ENERGÍA ANUAL [GWh/año]
Zamora Chinchipe 	7,0 - 7,5	1,97	5,91	0,20	10,15
	7,5 - 8,0	2,30	7,17	0,25	15,38
	8,0 - 8,5	0,35	1,04	0,30	2,68

**Figura 9.** Potencial eólico instalable en la Provincia de Zamora Chinchipe.

Fuente: (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013)

En la **Figura 10** se visualiza el potencial solar en la Provincia de Zamora Chinchipe y se puede identificar según el histograma de frecuencia que en la zona se tiene una irradiancia solar global horizontal de alrededor de 3.6 y 4.2 kW h/m<sup>2</sup> día.



**Figura 10.** Potencial solar instalable en la Provincia de Zamora Chinchipe.

Fuente: (Vaca Diego & Ordoñez Freddy, 2019)

En la **Tabla 4** se presentan los datos de potencial bioenergético en la Provincia de Zamora Chinchipe, los datos son de los productos como: plátano, cacao, banano, café y maíz duro.

**Tabla 4.** Potencial bioenergético en la Provincia de Zamora Chinchipe.

PROVINCIA	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )	PRODUCTO	PRODUCCIÓN ABSOLUTA (t/año) o (cabezas/año)	RESIDUOS (t/año)	ENERGÍA BRUTA (TJ/año)
ZAMORA CHINCHIPE	10,565.79	PLÁTANO	22,415.14	14,793.99	186.78
		CACAO	626.51	7,756.93	52.47
		BANANO	3,500.62	2,310.41	29.17
		CAFÉ	320.28	1,735.59	16.76
		MAÍZ DURO	1,851.21	833.04	10.39
		<b>TOTAL</b>	<b>28,713.75</b>	<b>27,429.96</b>	<b>295.56</b>

Fuente: (Guzmán et al., 2014)

Como se puede observar en la Tabla 4 se posee las cantidades para la producción absoluta (t/año) o (cabezas/año), los residuos (t/año) y la energía bruta (TJ/año) para cada uno de los productos antes mencionados. De manera que la energía bruta total (TJ/año) es de 295.56 (TJ/año).

#### **Elección de la Mejor Alternativa de Energía Renovable.**

Para realizar la selección del tipo de energía renovable se analizarán los factores: costo, potencial energético y las condiciones del lugar para la construcción de dicho sistema de energía renovable no convencional tal como se muestra en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Matriz de Priorización.

Factores Energía Renovable	Costo	Potencial energético	Condiciones Adecuadas	Total
	Eólica	1	0.5	0.5
Solar Fotovoltaica	0.5	1	1	2.5
Bioenergética	1	0.5	0	1.5

Fuente: Propia.

Como se puede observar en la **Tabla 5** el sistema energético renovable no convencional que se adecua de mejor manera a los requerimientos del proyecto minero es la Energía Solar Fotovoltaica.

### **Modelación del Sistema Energético Renovable No Convencional.**

En el modelamiento del sistema energético renovable no convencional se utiliza el software SAM (Gilman, 2015).

Para la realización de este modelamiento se introducen las coordenadas (latitud y longitud) del lugar en donde se desarrolla el proyecto. Como se mencionó anteriormente el proyecto minero Santa Bárbara se encuentra ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, Cantón Nangaritzta, parroquia Zurmi, sector Santa Bárbara poblado de Pachicutza (Chacón Carla, 2018).

Otro de los parámetros que se deben definir es el tipo de modulo e inversor, estos son definidos de acuerdo con la disponibilidad en el país.

El módulo seleccionado es de la marca Apollo Solar Energy ASEC-180G6S que tiene una capacidad de 90 DC MW y su material es de Mono-C-Si. En el caso del inversor es de la marca Sungrow Power Supply Co - Ltd: SG250HX-US cuya capacidad es 74.91 AC MW.

El ángulo de inclinación de los paneles solares es de 11° ya que según la recomendación de expertos en el área de paneles solares de esta manera se puede aprovechar al máximo la radiación solar en la zona. También algo que se pudo observar al realizar la modelación es que al utilizar ángulos entre los 10° y 12° se tiene un mayor aprovechamiento del recurso energético.

Una vez ingresadas las variables antes mencionadas se obtienen los siguientes resultados y se presentan en la **Tabla 6**.

**Tabla 6.** Resultados del modelamiento del sistema energético.

<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>
Área total	649 986 m <sup>2</sup>
Número de módulos	498 456
Número de filas	11 592
Número de módulos por fila	43
Número de inversores	330
Capacidad total de los inversores	74.91 AC MW
Energía Anual Producida	100 380,048 kWh

Fuente: Propia.

Como se puede observar en los resultados obtenidos el área total necesaria para la instalación de este sistema renovable es de alrededor de 65 hectáreas lo cual duplica el área superficial del proyecto minero que posee 36 hectáreas tal cual se puede observar en la **Figura 11**.



**Figura 11.** Área superficial de la mina y del sistema energético.

Fuente: Google Earth

Debido a esto se realiza una nueva modelación para el requerimiento energético de la maquinaria con mayor requerimiento energético. Por esto se selecciona el molino de bolas cuyo requerimiento es de 16 MW tal como se observa en la **Figura 8**.

**Tabla 7.** Resultados del modelamiento del sistema energético para suplir el requerimiento energético del Molino de Bolas.

<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>
Área total	144,441 m <sup>2</sup>
Número de módulos	110 768
Número de filas	2 576
Número de módulos por fila	43
Número de inversores	73
Capacidad total de los inversores	16.57 AC MW
Energía Anual Producida	22 304 AC kWh

Fuente: Propia.

Como se puede observar en la **Tabla 7** el área superficial total para reemplazar el requerimiento energético por el Molino de Bolas es de 14 hectáreas lo cual es un valor inferior al área superficial total del proyecto minero.

## **3.2 Discusión.**

Después del estudio realizado para evaluar la factibilidad de la implementación de un sistema energético renovable no convencional se determinó que si es posible otorgar al menos un porcentaje de energía limpia a parte de los procesos para la producción de oro en el proyecto minero. La energía que permitió cubrir el 23% de la energía requerida por el proyecto es la energía solar fotovoltaica. Debido a que en Ecuador la idea de implementar energías limpias en la minería es algo que se encuentra aún en estudios, se puede pensar que los resultados presentados para el Proyecto Minero Santa Bárbara permiten que esta sea considerada Mina Verde.

### **Implicaciones.**

El potencial energético solar del proyecto se encuentra en valores medios por lo que, otros proyectos con valores más altos de radiación podrían cubrir un mayor requerimiento energético.

Los resultados obtenidos luego de realizar la modelación en el software SAM indica que el área necesaria para la instalación del sistema fotovoltaico que pueda suplir el cien por ciento del requerimiento energético es de 65 hectáreas equivalente a 130 canchas de fútbol, lo que implica la deforestación de la zona que conlleva a incrementar los valores de contaminación ambiental.

Al realizar la segunda modelación en el software SAM para cubrir el 23% del requerimiento energético total, que equivale a cubrir los 16 MW requeridos por el Molino de Bolas, implica un espacio de 14 hectáreas lo cual es un valor muy inferior comparado con el área total de la mina por lo que se convierte en un valor aceptable.

La razón por la que se escogió cubrir el requerimiento energético del Molino de Bolas es porque es una de las máquinas con un mayor requerimiento reportado por el proyecto minero y al ser importante en la producción de oro es utilizada todo el día.

### **Limitaciones.**

Dado a la falta de datos proporcionada por el Proyecto Minero Santa Bárbara y demás proyectos que se ejecutan en el país ha sido necesario tomar datos de proyectos mineros fuera del país, así como también el estudio realizado para el caso específico del oro por (Palacios et al., 2019). En Ecuador son llevados a cabo varios proyectos mineros de gran envergadura sin embargo en todos estos no se cuenta con toda la información para realizar un análisis más real de la situación. En caso de que se contara con una información

completa en los reportes de los proyectos mineros el estudio que se podría realizar sería más apegado a la realidad permitiendo que la modelación muestre resultados que indiquen que el porcentaje de energía limpia que se puede implementar en el proyecto sea mayor que el presentado en este trabajo.

Debido al corto tiempo que se tuvo para la realización de este proyecto, el análisis realizado para la selección de la fuente energética renovable no convencional fue únicamente cualitativo por lo que, si se realiza un análisis cuantitativo, es posible que el potencial fotovoltaico no sea el más adecuado para la generación energética y una mejor alternativa sea el eólico, biomasa o micro generación hidroeléctrica.

Dado al potencial fotovoltaico en la zona se limita el poder suplir el 100% de la demanda energética del proyecto, otra de las limitaciones es que actualmente en el país no existen muchas empresas que se dediquen a la importación de paneles solares razón por la cual no se cuentan con muchos modelos de estos que permitan una selección más detallada.

## **4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **4.1 Conclusiones.**

En este estudio se inventarió los procesos, requerimientos energéticos y flujos de material para la producción de oro en el proyecto Santa Bárbara. Utilizando el requerimiento energético, se determinó la factibilidad técnica para la implementación de un sistema energético renovable no convencional que pueda suplir un porcentaje o la totalidad del requerimiento a través del uso de un sistema fotovoltaico, cuyo dimensionamiento fue hecho usando el Software SAM (System Advisor Model).

Con la bibliografía recolectada se logró conocer acerca del requerimiento energético del Proyecto Minero Santa Bárbara. Esto permitió identificar que el requerimiento energético total es de 70 MW distribuidos en 13 procesos, sin embargo, la maquinaria con un mayor requerimiento energético son los Molinos de Bolas seguido por el Molino SAG.

La provincia de Zamora en donde se desarrolla el proyecto minero tiene un potencial energético solar que se encuentra entre los 3.6 y 4.2 kWh/m<sup>2</sup> día. Esta radiación se usó para el diseño de un sistema fotovoltaico de 70 MW correspondientes al requerimiento energético total de los procesos de producción de oro del proyecto. Este sistema ocuparía un área superficial de 65 hectáreas lo cual es demasiado alto en comparación al área total de la mina. Debido a esto se volvió a dimensionar el sistema energético pero esta vez considerando solo para un porcentaje del requerimiento total, aproximadamente un 23%, satisfaciendo el requerimiento energético de la máquina Molino de Bolas (16 MW). En este caso, el sistema ocupa un espacio de 14 hectáreas.

El trabajo muestra que es posible diseñar un sistema que otorgue toda la energía del sistema. Sin embargo, este resultado no es práctico debido a que son necesarias 65 hectáreas lo cual duplica al área utilizada por el proyecto minero (36 hectáreas). De todas maneras, este proyecto indicó que si es posible otorgar una fracción del requerimiento energético total del proyecto minero (23%).

El sistema dimensionado está definido para el Proyecto Santa Bárbara y, por lo tanto, los resultados y su aplicación solo se puede dar para este proyecto. Sin embargo, otros proyectos similares podrían utilizar una aproximación metodológica similar.

## **4.2 Recomendaciones.**

La realización de este proyecto consideró la utilización de energía solar por lo que se recomienda estudiar otros tipos de energías renovables no convencionales como energía eólica, biomasa o microgeneración hidroeléctrica.

Este proyecto ocupó la base de datos del software SAM para la selección de los elementos que conforman el sistema fotovoltaico. Se recomienda hacer un análisis de resultados con algún otro software con características similares, o considerando datos de fábrica de productos que se encuentran en el mercado local.

Para evaluar el potencial energético de las fuentes renovables no convencionales en Ecuador se recomienda realizar un estudio similar en otros proyectos mineros situados en otras provincias del país.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acciona. (s. f.). La importancia de las energías renovables [Gráfico]. Energías Renovables.  
[https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?\\_adin=02021864894](https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=02021864894)
- Banco Central del Ecuador. (2016). Reporte de Minería.
- Banco Central del Ecuador. (2021). Reporte de Minería. [www.bce.ec](http://www.bce.ec)
- Catorce6. (2020, 28 mayo). Energías renovables vs energías no renovables [Gráfico].  
Energías renovables vs energías no renovables.  
[https://www.catorce6.com/images/noticias/breves/Energias\\_renovables.jpg](https://www.catorce6.com/images/noticias/breves/Energias_renovables.jpg)
- Chacón Carla. (2018). MODELO GEOLÓGICO DE LA ZONA NORTE DEL PROYECTO MINERO SANTA BÁRBARA UBICADO EN EL CANTON NANGARITZA, PROVINCIA DE ZAMORA CHINCHIPE.
- Concha, E. (2017). Minería global contemporánea o financierizada. *Ola Financiera*, 10(27).  
<https://doi.org/10.22201/fe.18701442e.2017.27.61009>
- Gilman, P. (2015). SAM Photovoltaic Model Technical Reference. [www.nrel.gov/publications](http://www.nrel.gov/publications).
- Gina Rodríguez - Borges, C., & Sarmiento - Sera, A. (2011). Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural. *Ingeniería Mecánica*, 14(1), 13–21.
- Guzmán, R. E., Albornoz Vintimilla, E., Santiago, E., & Palacios, M. (2014). Atlas Bioenergético del Ecuador.
- Herrera, J., & Castilla, J. (2012). LA ACTIVIDAD MINERA ACTUAL Y SUS VECTORES DE DESARROLLO. DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS MINERAS.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2014). Uso y Acceso a las Energías Renovables en Territorios Rurales.
- López Fernández, A. (n.d.). Metales Preciosos: El Oro.
- Milena, S., Zuluaga, M., Rafael, I., & Lara, O. (2017). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO DE 10KW CON CONEXIÓN A LA RED DE POTENCIA EN LA PLANTA DE TRITURACIÓN Y MOLIENDA SERMITOL (SERVICIOS MINEROS DEL TOLIMA).

- Minerales y Desarrollo Económico. (n.d.).
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2013). Atlas Eólico del Ecuador.  
[www.awstruepower.com](http://www.awstruepower.com)
- Ministerio de Minas y Energía República de Colombia. (2015). Glosario Técnico Minero.
- Palacios, J. L., Abadias, A., Valero, A., Valero, A., & Reuter, M. A. (2019). Producing metals from common rocks: The case of gold. *Resources, Conservation and Recycling*, 148, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.026>
- Sandoval Moreano, F., Albán Gómez, J., Carvajal Aguirre, M., Chamorro Arturo, C., & Pazmiño Vinueza, D. (n.d.). Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable en Ecuador.
- Schallenberg Rodríguez, J. C. (2008a). Energías renovables y eficiencia energética. Instituto Tecnológico de Canarias.
- Schallenberg Rodríguez, J. C. (2008b). Energías renovables y eficiencia energética. Instituto Tecnológico de Canarias.
- Secretaría de Energía - Buenos Aires. (2003). Conceptos sobre Energía.
- Selectra. (2021, 30 marzo). Elementos de una instalación de placas solares [Gráfico]. Componentes de una instalación de placas solares. [https://tarifasgasluz.com/sites/tarifasgasluz.com/files/styles/\\_default/public/images/elementos-instalacion-solar-750px.png?itok=3bLu1ldO](https://tarifasgasluz.com/sites/tarifasgasluz.com/files/styles/_default/public/images/elementos-instalacion-solar-750px.png?itok=3bLu1ldO)
- Short, M., Eng, C., Maynard, A. J., Phillip, M., & Jones, A. (n.d.-a). Preliminary Economic Assessment of the Santa Barbara Gold and Copper Project in Zamora, Ecuador Ecuador Gold and Copper Corp.
- Vaca Diego, & Ordoñez Freddy. (2019). Atlas Solar del Ecuador.
- Viana Ríos, R. (2018). Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>
- Villanueva Rodríguez, T. (2008). Los Metales en Castilla y León.

## 6 ANEXOS

## **ANEXO I. Reporte de la Modelación en SAM para 70 MW**

# System Advisor Model Report

Detailed Photovoltaic  
None

90.0 DC MW Nameplate

-4.11, -78.62  
UTC -5

## Performance Model

Modules	
Apollo Solar Energy ASEC-180G6S	
Cell material	Mono-c-Si
Module area	1.3 m <sup>2</sup>
Module capacity	180.56 DC Watts
Quantity	498,456
Total capacity	90 DC MW
Total area	649,986 m <sup>2</sup>

Inverters	
Sungrow Power Supply Co - Ltd : SG250HX-US	
Unit capacity	226.997 AC kW
Input voltage	860 - 1300 VDC DC V
Quantity	330
Total capacity	74.91 AC MW
DC to AC Capacity Ratio	1.20
AC losses (%)	1.00

Array	
Strings	11,592
Modules per string	43
String Voc (DC V)	1278.39
Tilt (deg from horizontal)	11.00
Azimuth (deg E of N)	180
Tracking	no
Backtracking	-
Self shading	no
Rotation limit (deg)	-
Shading	no
Snow	no
Soiling	yes
DC losses (%)	4.44

Performance Adjustments	
Availability/Curtailment	none
Degradation	none
Hourly or custom losses	none

Annual Results (in Year 1)	
GHI kWh/m <sup>2</sup> /day	4.00
POA kWh/m <sup>2</sup> /day	3.00
Net to inverter	103,026,000 DC kWh
Net to grid	100,380,000 AC kWh
Capacity factor	12.7
Performance ratio	0.78

**No Financial model.**

Detailed Photovoltaic  
None

90.0 DC MW Nameplate

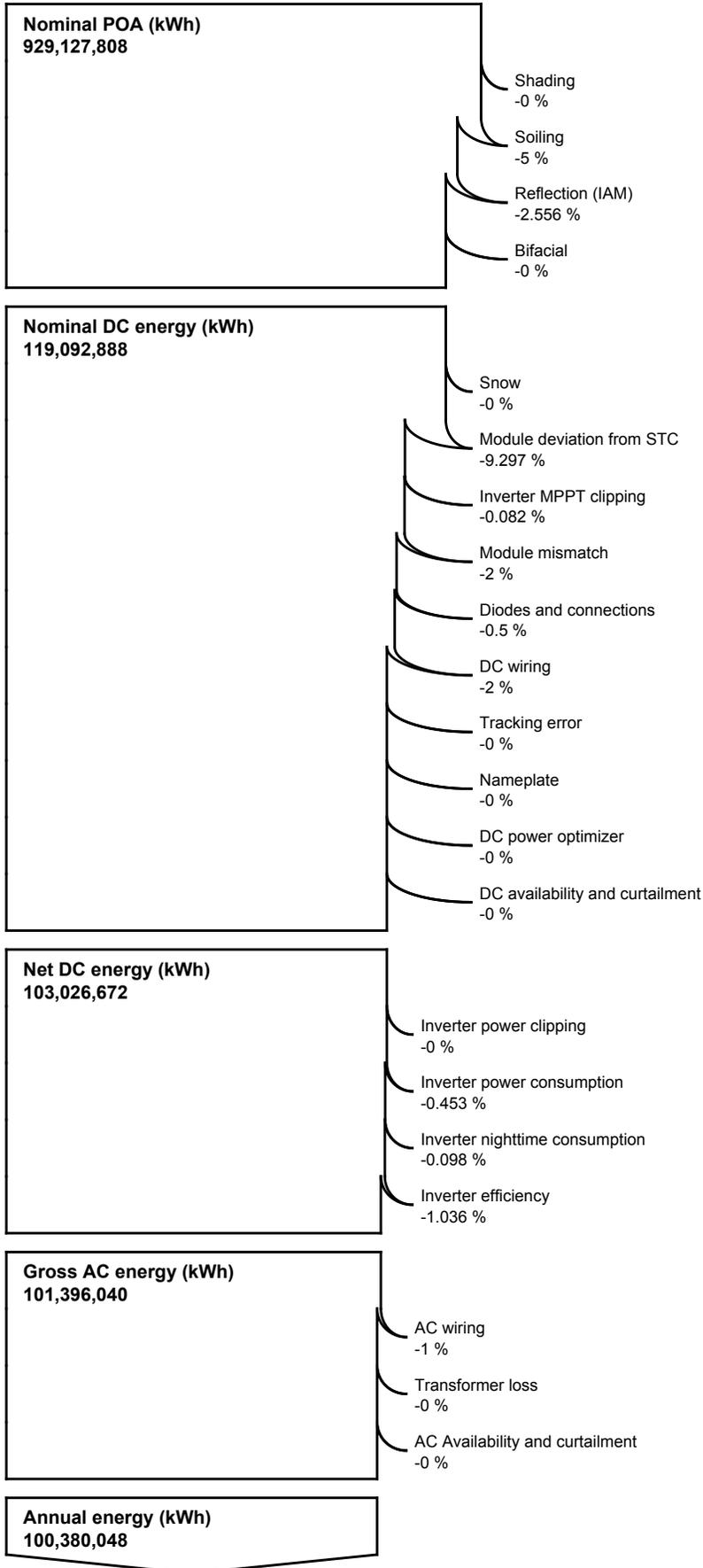
-4.11, -78.62  
UTC -5

**No Financial model.**

Detailed Photovoltaic  
None

90.0 DC MW Nameplate

-4.11, -78.62  
UTC -5



## **ANEXO II. Reporte de la Modelación en SAM para 16 MW**

# System Advisor Model Report

Detailed Photovoltaic  
None

20.0 DC MW Nameplate

-4.11, -78.62  
UTC -5

## Performance Model

Modules	
Apollo Solar Energy ASEC-180G6S	
Cell material	Mono-c-Si
Module area	1.3 m <sup>2</sup>
Module capacity	180.56 DC Watts
Quantity	110,768
Total capacity	20 DC MW
Total area	144,441 m <sup>2</sup>

Inverters	
Sungrow Power Supply Co - Ltd : SG250HX-US	
Unit capacity	226.997 AC kW
Input voltage	860 - 1300 VDC DC V
Quantity	73
Total capacity	16.57 AC MW
DC to AC Capacity Ratio	1.21
AC losses (%)	1.00

Array	
Strings	2,576
Modules per string	43
String Voc (DC V)	1278.39
Tilt (deg from horizontal)	11.00
Azimuth (deg E of N)	180
Tracking	no
Backtracking	-
Self shading	no
Rotation limit (deg)	-
Shading	no
Snow	no
Soiling	yes
DC losses (%)	4.44

Performance Adjustments	
Availability/Curtailment	none
Degradation	none
Hourly or custom losses	none

Annual Results (in Year 1)	
GHI kWh/m <sup>2</sup> /day	4.00
POA kWh/m <sup>2</sup> /day	3.00
Net to inverter	22,891,000 DC kWh
Net to grid	22,304,000 AC kWh
Capacity factor	12.7
Performance ratio	0.78

**No Financial model.**

Detailed Photovoltaic  
None

20.0 DC MW Nameplate

-4.11, -78.62  
UTC -5

**No Financial model.**

Detailed Photovoltaic  
None

20.0 DC MW Nameplate

-4.11, -78.62  
UTC -5

