

PROPUESTA DE MODELO DE DESARROLLO ECONÓMICO LOCAL CIRCULAR EN COMUNIDADES MINERAS EN LA SUB CUENCA POOPÓ DEL ALTIPLANO BOLIVIANO CON ESCASEZ HÍDRICA

¹ Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.

² M. Sc. Ing. Octavio Hinojosa C.

³ Dr.- Ing. Ruth Meza-Duman

⁴ M. Sc. Ing. Walter Blanco V.

1 Docente - Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro - 2 Director del Laboratorio de Concentración de Minerales - Universidad Técnica de Oruro - 3 Docente - Carrera de Metalurgia - Universidad Nacional de Puno

4 Candidato a Doctorado - Universidad Antofagasta de Chile

gerardozamoraechenique@yahoo.es

octaviolinojosacarrasco@hotmail.com

meza@unap.edu.pe

walterblancovino@gmail.com

RESUMEN

En la subcuenca del Lago Poopó en el altiplano boliviano, cuyas aguas tributan al dicho lago, se encuentran los municipios de Huanuni, Poopó, Pazña, Machacamarca y Antequera, en los que se tienen acumulaciones de desmontes y relaves de operaciones mineras pasadas, además de descargas de relaves de operaciones de la minería cooperativizada actual, que se caracterizan por ser altamente generadoras de drenajes ácidos de roca, que son la principal fuente de contaminación por metales pesados de las aguas superficiales y subterráneas de la subcuenca.

Por otra parte, y desde otro enfoque, las comunidades mineras de la sub cuenca Poopó, no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas y tampoco con rellenos sanitarios para la disposición de residuos sólidos urbanos, lo que hace que, tanto las aguas negras o servidas y la basura, finalmente vayan a parar a los ríos, magnificando los impactos a los ecosistemas acuáticos de la zona y el riesgo a la salud de sus pobladores.

Además, por efecto del cambio climático, las zonas mineras son cada vez más vulnerables en términos de la escasez de agua, lo que hace pensar que, habrá, si es que no se ha iniciado ya, una pugna entre si el agua deficitaria será para uso de las operaciones mineras cooperativizadas o para cubrir el abastecimiento a las poblaciones mineras y su producción agrícola. Adicionalmente, los índices productivos agrícolas son cada vez menores por la falta de agua (precipitaciones anuales promedio de 360 mm) y por la calidad de las aguas de riego, contaminadas con metales pesados tóxicos disueltos; en ese contexto, la falta de productos agrícolas incide fuertemente en la seguridad alimentaria, no sólo de las comunidades mineras, sino también de las ciudades.

En el contexto arriba descrito, es fácil establecer cuáles han sido los efectos significativos de impacto ambiental que ha causado la aplicación de una economía lineal en el desarrollo económico local de las comunidades mineras; por lo que, se hace imprescindible desarrollar una propuesta de un modelo de desarrollo económico local circular que genere las bases técnicas para implementar la circularidad en el desarrollo económico local de comunidades mineras en zonas de escasez hídrica del altiplano boliviano ubicadas en la sub cuenca Poopó, a objeto de contribuir a mejorar la calidad de vida de sus pobladores a partir del establecimiento de un propuesta enfocada en: El cierre ambiental a bajo costo de los pasivos ambientales mineros que están alterando la calidad de las aguas de riego; además, postular un manejo inteligente de los recursos hídricos, que involucra el diseño, dimensionamiento e implementación de plantas de tratamiento, tanto de las aguas ácidas en interior mina, como para las aguas residuales urbanas de la comunidad minera, para su uso tanto en el procesamiento mineral y riego; y también, el adecuado manejo de los residuos sólidos urbanos (basura), generados por la población minera, a objeto de producir compost, a partir tanto de la fracción orgánica de los mismos y de los lodos de tratamiento de aguas servidas de la comunidad, que serán usados tanto para la fertilización de suelos para mejorar la producción agrícola en carpas solares, como para la obtención de top soil artificial para para la rehabilitación mediante coberturas secas de los sitios de almacenamiento de residuos generadores de DAR, empleando a mujeres palliris (rescatadoras de minerales de desmontes).

La propuesta se basa en los resultados de varios trabajos de investigación que han sido desarrollados por separado y a lo largo de una década.

Palabras Clave: Economía Circular en Minería - Desarrollo local circular - Comunidades mineras - Sub cuenca Poopó

ABSTRACT

In the sub-basin of Lake Poopó in the Bolivian altiplano, whose waters flow into the lake, are the municipalities of Huanuni, Poopó, Pazña, Machacamarca and Antequera, where there are accumulations of waste and tailings from past mining operations, these are characterized by the high generation of acid rock drainage, which is the main source of heavy metal contamination of surface and groundwater in the sub-basin.

On the other hand, and from another perspective, the mining communities of the Poopó sub-basin do not have urban wastewater treatment plants or sanitary landfills for the disposal of solid urban waste, which means that both sewage and garbage eventually end up in the rivers, magnifying the impacts on the aquatic ecosystems of the area and the risk to the health of its inhabitants.

Furthermore, due to climate change, mining areas are increasingly vulnerable in terms of water scarcity, which suggests that there will be, if it has not already begun, a struggle between whether the water shortage will be for the use of cooperative mining operations or to cover the supply to the mining populations and their agricultural production. In addition, agricultural production rates are decreasing due to the lack of water (average annual rainfall of 360 mm) and the quality of irrigation water, contaminated with dissolved toxic heavy metals; in this context, the lack of agricultural products has a strong impact on food security, not only in mining communities, but also in the cities.

In the context described above, it is easy to establish which have been the significant effects of environmental impact caused by the application of a linear economy in the local economic development of mining communities; therefore, it is essential to develop a proposal for a circular local economic development model that generates the technical bases to implement circularity in the local economic development of mining communities in areas of water scarcity in the Bolivian highlands located in the Poopó sub-basin,

in order to contribute to improve the quality of life of its inhabitants from the establishment of a proposal focused on: The low-cost environmental closure of mining environmental liabilities that are altering the quality of irrigation water; in addition, postulate an intelligent management of water resources, involving the design, sizing and implementation of treatment plants, both for acidic water inside the mine, as for urban wastewater from the mining community, for use in both mineral processing and irrigation; and also, the proper management of urban solid waste (garbage), generated by the mining population, in order to produce compost, from both the organic fraction of the same and the sludge from wastewater treatment of the community, which will be used both for soil fertilization to improve agricultural production in solar tents, and for obtaining artificial top soil for the rehabilitation through dry covers of the storage sites of waste generating ARD, employing women palliris (rescuers of minerals from waste dumps).

The proposal is based on the results of several research papers that have been developed separately and over the course of a decade.

Key words: Circular Economy in Mining - Circular local development - Mining communities - Poopò sub-basin.

1. Introducción

El Lago Poopó es un cuerpo de agua salada, ubicado en el departamento de Oruro, en el Estado Plurinacional de Bolivia a 18° 46' 42" Sur y 67° 3' 2" Oeste. Es el segundo lago más grande de Bolivia –después del Titicaca- y ambos están conectados por el Río Desaguadero, que presentaba una superficie de espejo de agua de 2.337 kilómetros cuadrados, y hoy casi completamente seco, por varias razones complejas, que van desde los efectos climatológicos, los malos manejos de los recursos hídricos de la cuenca, y las actividades de riego agrícola no tecnificado. (Gitec Consult GmbH).

En la sub cuenca del Lago Poopó, cuyas aguas tributan al dicho lago, se encuentran los municipios de Huanuni, Poopó, Pazña, Machacamarca y Antequera, donde es posible encontrar sitios mineros abandonados (Pasivos Ambientales Mineros), que se constituyen en la fuente principal de contaminación de las aguas superficiales tributarias al lago Poopó, por metales pesados tóxicos disueltos, producto de la formación de drenajes ácidos de roca (DAR); además, en dicha zona minera, se encuentran operaciones de la pequeña minería cooperativizada, ubicadas también en los sitios de la minería pasada, que generan desmontes y descarga de relaves, altamente generadores de drenajes ácidos, que van siendo almacenados o descartados, sin medidas medioambientales, por lo que, están magnificando la afectación a la calidad de las aguas superficiales, subterráneas, suelos y ecosistemas de la sub cuenca. (Zamora et al., 2012)

Por otra parte, las operaciones actuales de la pequeña minería cooperativizada, que también se encuentran ubicadas en los sitios de la minería pasada, se desarrollan generando desmontes, altamente generadores de DAR, que van siendo almacenados y/o descartados sin medidas medioambientales, por lo que están afectando la calidad de las aguas superficiales, subterráneas, suelos y ecosistemas de la cuenca. Asimismo, la generación de colas o relaves que están siendo almacenados en diques construidos sin criterio técnico y que en muchos de los casos, ya han cumplido su vida útil; por lo que, gran parte de la descarga de las colas, está siendo directamente descargada a los ríos, sin ningún tipo de control. (Proyecto Piloto Oruro).

Además, el agua ácida procedente del desagüe de las explotaciones subterráneas de diversas cooperativas mineras, es también objeto de descarga a las cuencas hidrográficas sin tratamiento, generando así un incremento significativo de metales pesados de las aguas de riego que, finalmente, llegan a alterar la calidad de los suelos agrícolas y ponen en riesgo a la salud de las personas a través de la ingesta de los productos cultivados. (Zamora et al., 2017)

Asimismo, el procesamiento mineral en las Cooperativas Mineras se realiza aplicando tecnologías obsoletas, de altos consumos de energía y agua, que muestran bajas eficiencias en la recuperación de los concentrados de los elementos de interés económico. (Zamora E. et al., 2022)

Desde otro enfoque, las comunidades mineras, no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas y tampoco con rellenos sanitarios para la disposición de residuos sólidos urbanos, lo que hace que, tanto las aguas negras o servidas y la basura, finalmente llegan a parar a los ríos y alteren significativamente la calidad de las aguas y se magnifiquen los impactos a los factores ambientales de la zona y el riesgo a la salud de sus pobladores. (Zamora et al., 2010).

Además, por efecto del cambio climático, las zonas mineras son cada vez más vulnerables. La escasez de agua hace pensar que habrá, si es que no se ha iniciado ya, una pugna entre si el agua deficitaria será para uso de las operaciones mineras cooperativizadas o para cubrir el abastecimiento a las poblaciones mineras y su producción agrícola.

Adicionalmente, los índices de producción agrícola son cada vez menores por la falta de agua y por la calidad de la misma; así, la seguridad alimentaria, no sólo de las comunidades mineras, sino también de las ciudades, está cada vez más crítica.

En ese contexto, es fácil establecer los efectos significativos de impacto ambiental que ha causado la aplicación de una economía lineal en el desarrollo económico local de las comunidades mineras; por lo que, se hace imprescindible desarrollar una propuesta de un modelo de desarrollo económico local circular que genere las bases técnicas para:

- i. Remediar, mediante el uso de coberturas secas y de bajo costo, los sitios de disposición de residuos mineros altamente generadores de drenaje ácido de roca que están alterando la calidad de las aguas

superficiales y subterráneas con metales pesados y acidez, poniendo en riesgo la salud de las personas y los ecosistemas.

- ii. Mejorar la producción minero-metalúrgica del sector cooperativizado de manera que no sólo atenué los efectos de impacto negativo al medio ambiente; sino que también, inserte soluciones innovadoras que permitan disminuir los consumos de agua y energía; pero, además, trate de que los residuos generados puedan ser objeto de reprocesamiento o reutilización en el cierre de la ambiental de los sitios de disposición de residuos mineros peligrosos.
- iii. Diseñar y dimensionar e implementar plantas de tratamiento de aguas residuales de las comunidades mineras; de manera tal que, por una parte, los efluentes de descarga sean utilizados tanto para riego como para el mismo procesamiento mineral; y por otra, los lodos generados en dicho tratamiento, permitan la generación de compost para la elaboración de top soil artificial, con su mezcla con colas desulfuradas del procesamiento metalúrgico, requerido para la rehabilitación de los sitios de almacenamiento de residuos mineros generadores de DAR.
- iv. Diseñar, dimensionar e implementar plantas de compostaje en hileras a partir de un adecuado manejo de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en las comunidades mineras, y que permitirá el mejoramiento de los suelos para su uso agrícola.
- v. Diseñar, dimensionar e implementar carpas solares para la producción tanto de vegetales de alto valor comercial como de plantines arbustivos autóctonos, con la participación activa de mujeres (palliris) que actualmente se dedican a la recuperación de mineral de interés económico bajo condiciones precarias y con bajos rendimientos económicos, y así, por una parte, garantizar la seguridad alimentaria de sus familias y de las poblaciones mineras, y por otra, evitar la fuerte erosión de los suelos que repercute en las grandes cantidades de sedimento que está generando la colmatación del lago Poopó.

El propósito de la propuesta se circunscribe por tanto en implementar la economía circular en el desarrollo económico local de comunidades mineras en zonas de escasez hídrica del altiplano boliviano ubicadas en la cuenca Poopó, a objeto de contribuir a mejorar la calidad de vida de sus pobladores a partir del establecimiento de las bases técnicas para el cierre ambiental a bajo costo de los pasivos ambientales mineros que están alterando la calidad de las aguas de riego; además, postular un manejo inteligente de los recursos hídricos, que involucra el diseño, dimensionamiento e implementación de plantas de tratamiento, tanto de las aguas ácidas en interior mina

como de las aguas residuales urbanas de las comunidad minera, para su uso tanto en el procesamiento mineral, como para riego; y también, el adecuado manejo de los residuos sólidos urbanos (basura), generados por la población minera, a objeto de producir compost a partir de la fracción orgánica de los mismos, y de los lodos de tratamiento de aguas servidas de la comunidad, que serán usados tanto para la fertilización de suelos como para la producción agrícola y cultivo de especies arbóreas nativas por mujeres palliris en carpas solares, además, para la obtención de top soil artificial, necesario para la rehabilitación mediante coberturas secas de los sitios de almacenamiento de residuos generadores de DAR.

2. Fundamentos de la propuesta de modelo de desarrollo económico local circular de comunidades mineras del altiplano boliviano con escasez hídrica en la zona de la cuenca Poopó

a) Uso de coberturas secas para remediación de sitios de almacenamiento de desmontes y relaves abandonados.

Existen aproximadamente 97 sitios dispersos en la Cuenca Poopó, en los cuales están ubicados pasivos mineros. La tabla 1, presenta un inventario de los depósitos de residuos mineros en la Cuenca Poopó, denotando, los volúmenes, área y tonelaje de los mismos.

Área de colección	Mina/Ingenio o Depósito de colas	Área (miles de m ²)	Volumen (miles de m ³)	Tonelaje (miles de ton)	Área Cubierta (miles de m ²)
Río Pairumani	Japo	83,00	388	681	83
	Morococala	8,50	72	108	10
	Santa Fe	9,00	42	68	9
Río Huanuni	Porvenir	108,50	1.463	2.365	318
	Duncan	8,50	24	36	22
	Machacamarca	288,00	492	779	290
Río Poopó	Poopo	65,00	327	523	65
	Poopo A	119,00	62	74	200
	(B+C)	115,00	21	25	115
	D	83,00	52	92	83
	Kallipampa	95,00	167	250	100
Río Antequera	Bolivar	13,00	26	41	14
	Centenario	92,00	71	106	92
	Totoral	22,00	103	150	30
	Dique totoral	214,00	236	347	214
	Aricaya	16,00	163	262	40
Oruro	San Jose Itos(9)	132,00	1.030	1.850	700
	Itos 8+10+12	56,00	416	728	70
	Iroco	489,00	73	132	489
	Frankeita	12,00	26	47	23
Total		2.028,50	5.254	8.664	2.967

Fuente: PPO. 1996

Tabla 1.- inventario de los depósitos de residuos mineros en la Cuenca Poopó (Gitec Consult GmbH).

La mayor parte de los sitios de almacenamiento de residuos presentados en la tabla anterior, se caracterizan por ser sulfurosos, y por tanto no estables químicamente; es decir, generadores de drenaje ácido de roca (DAR). La tabla 2, a manera de ejemplo, muestra una caracterización de los residuos que se encuentran en la subcuenca Antequera, demostrando que todos son altamente generadores de DAR.

El balance másico de la carga de metales pesados y sólidos suspendidos que aportan los ríos tributarios al Lago Poopó, donde se encuentran emplazados los residuos mineros presentados en la tabla 1, es resumido en la Figura 1.

	Profundidad (m)	% S	pH pasta	AP	NP	NNP
Bolivar	(0-1) (1-3)	7.87 11.08		246	0	-246
Totoral	(0-1)	1.77	2.78	55	9	-46
	(1-3)	3.78	2.92	118	41	-77
	(3-5)	5.43	2.85	170	38	-132
	(base)	2.66	2.66	35	0	-35
Avicaya	(0-1)	2.4	2.50	75	0	-75
	(1-3)	3.61	2.40	113	0	-113
	(3-5)	4.40	2.49	137	0	-137
	(base)	1.64	2.40	51	0	-51

Tabla 2.- Caracterización de los depósitos de residuos mineros en la Subcuenca Antequera

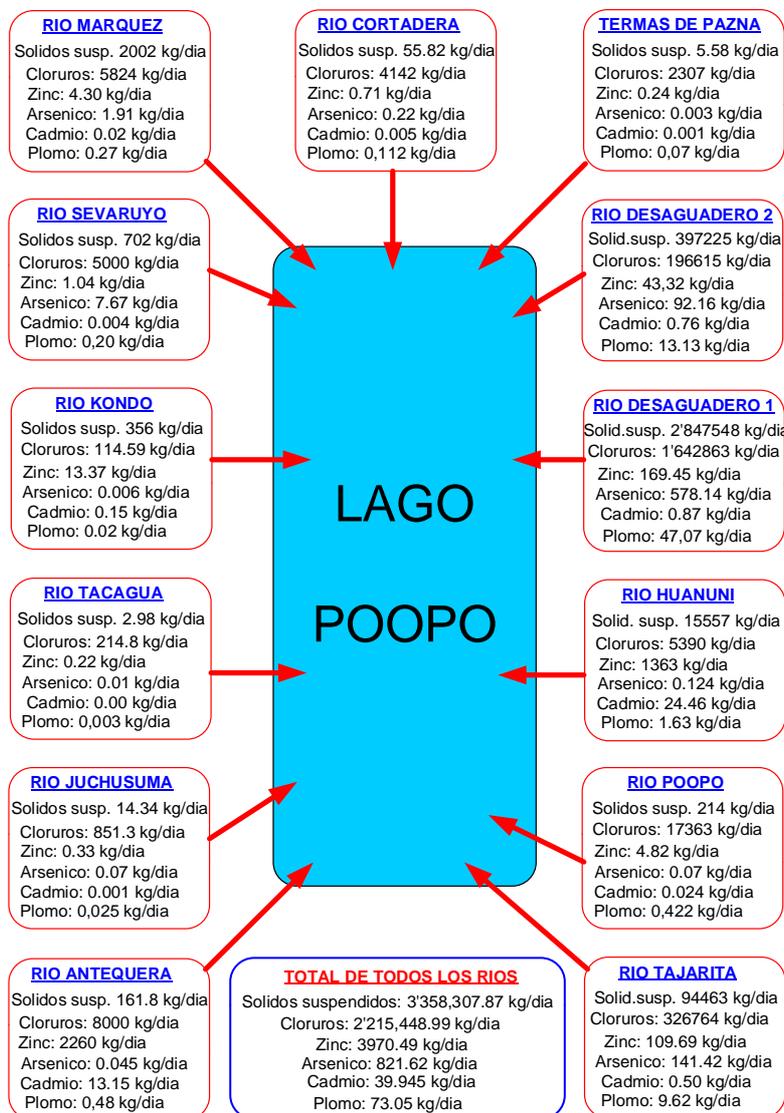


Figura 1.- El balance másico de la carga de metales pesados y sólidos suspendidos que aportan los ríos tributarios al Lago Poopo (Zamora et al., 2012)

De figura anterior, se deduce que: El río Desaguadero (Puente Karasilla) aporta con un 70% en As; 64 % en Pb y 4.27 % de Zn y 2.18 % de Cd; mientras que, el río Huanuni aporta con 61.23 % de Cd, 34.33 % de Zn y

2.23 % de Pb. El río Antequera, por su parte, aporta al lago Poopo con un 56.92 % de Zn, 32.92 % de Cd y 0.66 % de Pb. Finalmente, el río Desaguadero (Puente

Aroma) aporta con 17.7 % de As; 17.97 % Pb; 1.90 % de Cd y 1.09 % de Zn. (Zamora et al., 2012)

En el contexto arriba descrito, la remediación de los sitios de almacenamiento de desmontes y relaves que generan DAR mediante el uso de coberturas secas de bajo costo, es imperioso a objeto de evitar que se sigan alterando la calidad de las aguas superficiales y subterráneas con metales pesados y acidez que se usan para riego en la producción agrícola en la zona.

Son varios métodos empleados para estabilizar los sitios de almacenamiento de residuos mineros generadores de DAR; los más frecuentes, recurren al uso de geo membranas que son dispuestas por encima de los residuos inestables geoquímicamente; para luego

asentar el geo textil, y sobre éste, una capa de material cuaternario; para finalmente, colocar encima el suelo vegetal o top soil, y la cobertura vegetal autóctona. Los costos de la aplicación de este método de cierre para el caso de desmontes o escombreras pueden estar por el orden de 0.223 millones de dólares por hectárea; y para el caso de la rehabilitación de sitios de almacenamiento de colas o relaves, por el orden de 0.57 millones de dólares por hectárea; montos que posiblemente no son de disponibilidad para el caso de sitios abandonados.

En zonas semiáridas, la rehabilitación podría realizarse mediante el uso de coberturas secas que puede estar representada mediante el perfil esquemático presentado en la figura siguiente:

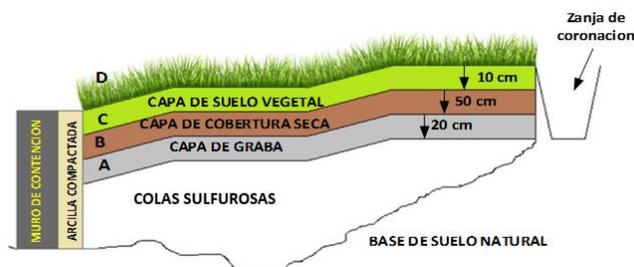


Figura 2.- Perfil transversal esquemático de coberturas secas para rehabilitación de sitios de almacenamiento de residuos mineros generadores de DAR (Zamora E. et al., 2022)

- La capa de grava (A) permite generar una diferencia de conductividad hidráulica respecto a la cobertura de suelo (B); y así, formar la conocida como barrera capilar.
- La capa de cobertura de suelo (B) permite almacenar el agua de lluvia.
- La capa de suelo vegetal (B) permite evitar la erosión de la cobertura de suelo.
- La cobertura vegetal cumple la función de evitar la erosión de la capa de suelo vegetal y generar la evapotranspiración.

Para validar técnicamente la propuesta, se presenta los resultados obtenidos de la caracterización geotécnica de una muestra de suelo de la micro cuenca de Japo. Los resultados tanto de la caracterización granulométrica como de las propiedades geotécnicas y de las curvas de succión-retención de agua, se presentan a continuación:

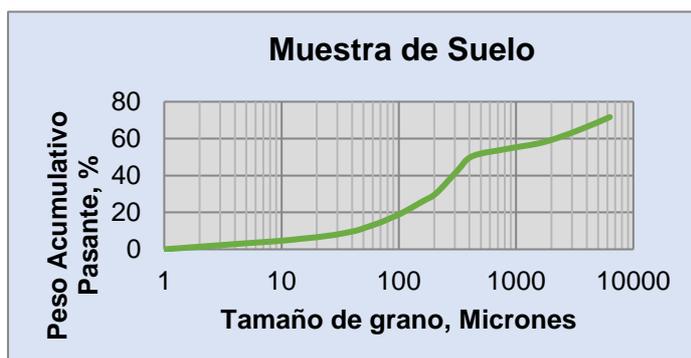


Figura 3.- Resultados del análisis granulométrico de la muestra de suelo (Zamora E. et al., 2022)

De la figura anterior se deduce que, d_{60} y el d_{10} son de 100 y 4 micrones, respectivamente. Por otra parte, los resultados de los parámetros geotécnicos de la muestra de suelo estudiada, son presentados en la tabla 3.

d_{10} (μ)	d_{60} (μ)	C_u	ρ_{ap} g/cm ³	ρ_{real} g/cm ³	ϵ	AEV cm	K_{sat} cm/s
4	100	25	1,617	1,418	0,242	1.000	$3,06 \times 10^{-7}$

Tabla 3.- Parámetros geotécnicos de la muestra de suelo estudiada (Zamora E. et al., 2022)

Con los datos arriba señalados, se construyó la curva de succión-retención de agua, aplicando el modelo MK, que se presenta a continuación:

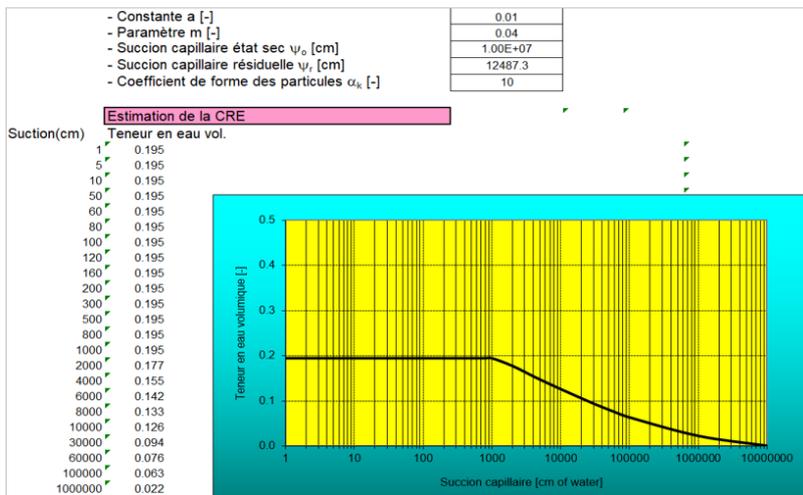


Figura 4.- Curva de succión-retención de agua mediante el modelo MK de la muestra de suelo estudiada (Zamora E. et al., 2022)

Con los valores arriba presentados, se concluye que el suelo “es apto para su uso en la cobertura como suelo”; puesto que, el valor del punto de entrada de aire AEV ocurre a una succión de apenas 1.000 cm de columna de agua.

b) Mejorar los procesos minero-metalúrgicos del sector cooperativizado

Las plantas de procesamiento mineral del sector cooperativizado que operan en la Cuenca Poopó,

producen por lo general, concentrados de Sn en pequeñas plantas que operan sin criterio técnico, altos consumos de agua y reactivos. En la figura siguiente, se muestra por ejemplo el flujograma del Ingenio Santa Teresa de la Cooperativa Minera Japo SR., que opera una pequeña planta de tratamiento de cerca de 20 tpd para recuperar Sn.

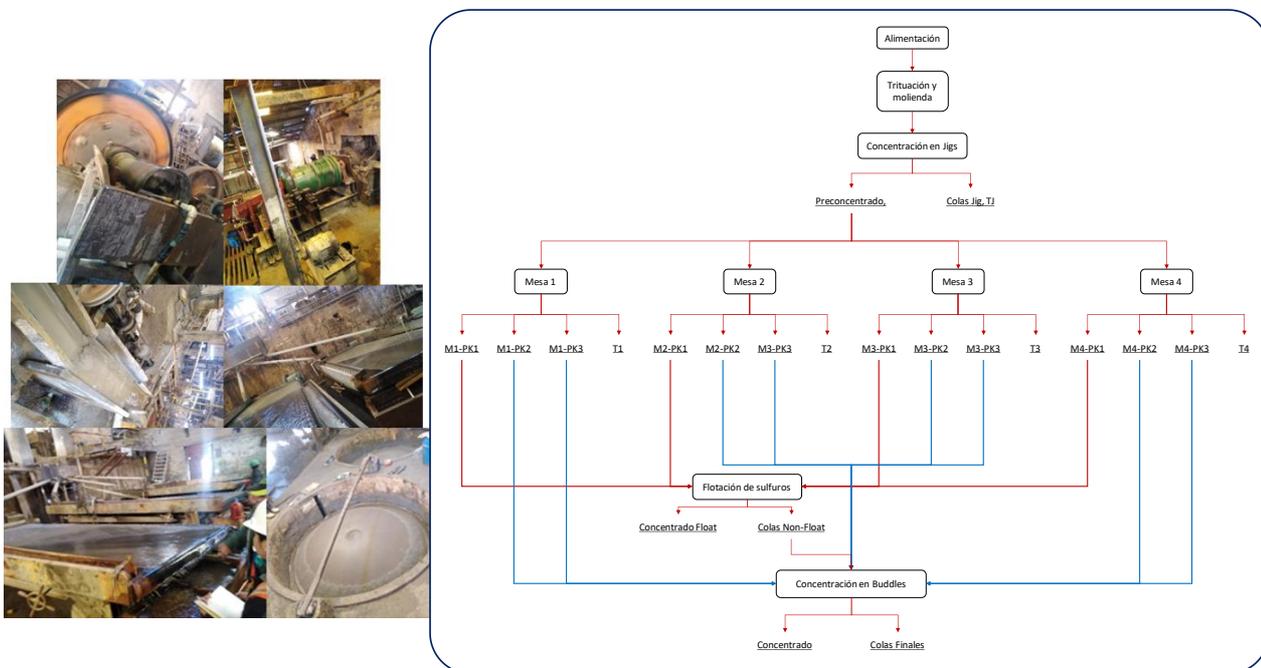


Figura 5.- Vista y flujograma de tratamiento del procesamiento metalúrgico en el Ingenio Santa Teresa de la Cooperativa Japo SR (Zamora E. et al., 2022)

En el marco de la propuesta, se ha diseñado el siguiente flujograma de procesamiento y el respectivo dimensionamiento de equipos que permitiría alcanzar mayores eficiencias en la recuperación de Sn:

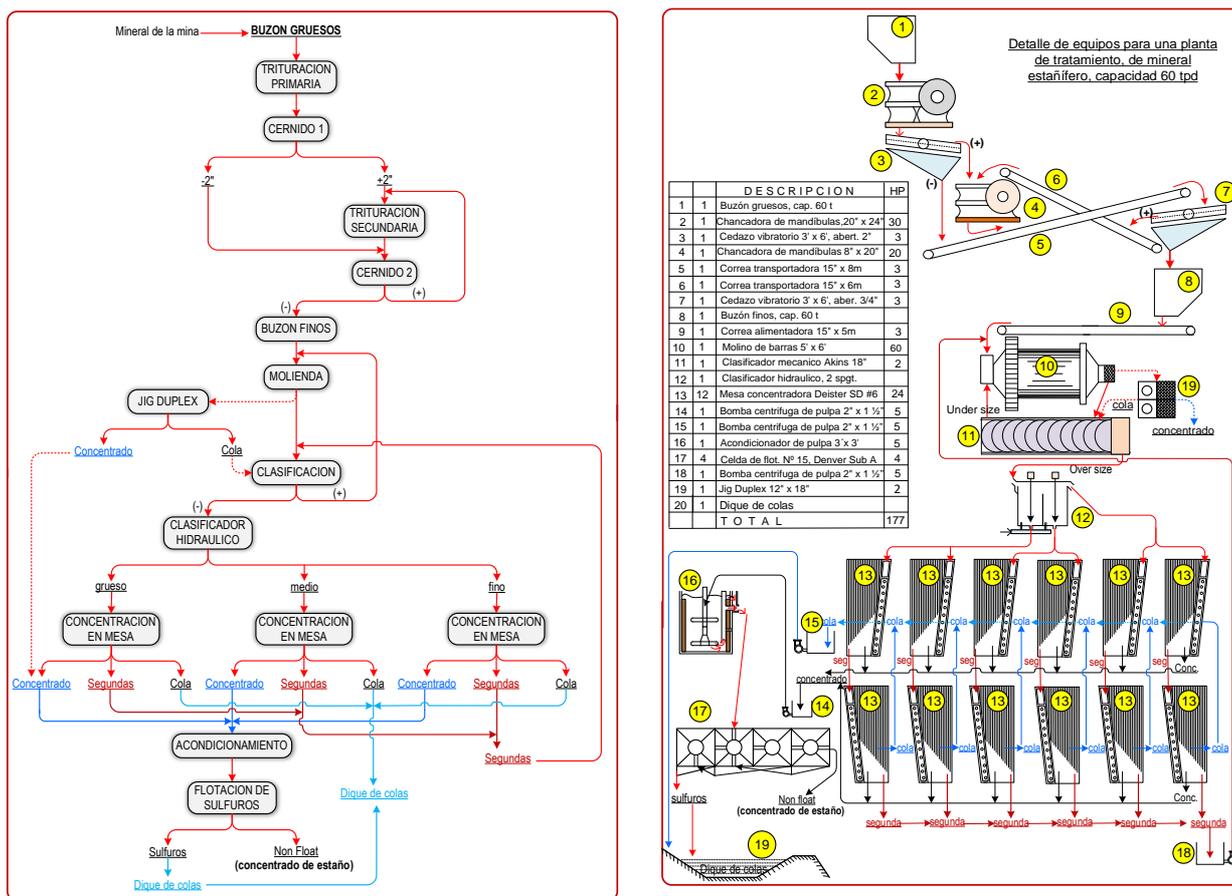


Figura 6.- Flujograma y rediseño y dimensionamiento del nuevo Ingenio (Zamora E. et al., 2022)

El balance metalúrgico final, después de haber realizado las pruebas a nivel laboratorio, permite obtener los resultados presentados en la tabla siguiente:

Productos	% Peso	Ley, % Sn	% Distrib. Sn
Concentrado final	1,46	58,33	55,01
Segundas de mesa	6,08	1,52	5,97
Sulfuros de flotación	0,98	1,92	1,21
Colas de mesa	91,48	0,64	37,81
Cabeza calculada	100,00	1,55	100,00
Cabeza ensayada		1,46	

Tabla 4.- Balance metalúrgico final (Zamora E. et al., 2022)

Es decir que, es posible obtener un concentrado comercializable de 58.53% y una recuperación total de 55.01%. La Inversión Total que se requiere para la reingeniería de la planta metalúrgica "Santa Teresita", de capacidad de 60 TMD, en la Cooperativa Minera el "Porvenir Japo RL", es de 292.200,00 \$us (Doscientos noventa y dos mil doscientos dólares americanos).

c) Diseño, dimensionamiento e implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales en las comunidades mineras para su uso en el procesamiento metalúrgico

Actualmente, en las comunidades mineras de la Sub Cuenca Poopó, no se cuenta con plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas; por lo que, las aguas negras de sus poblaciones son recolectadas y vertidas sin

tratamiento a los ríos, generando así un fuerte impacto en la calidad de los ecosistemas de los mismos y poniendo en riesgo la salud de comunidades situadas en las zonas bajas de la cuenca que usan estas aguas para riego.

A objeto de validar técnicamente la propuesta, se ha obtenido en principio una muestra del efluente de descarga de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Yunguyo (Cerca de la frontera entre Perú y Bolivia) y se ha realizado su caracterización respectiva, para luego con dicha muestra, efectuar pruebas en el procesamiento mineral de menas sulfurosas de Zn por flotación, toda vez que en las zonas de Antequera en la Cuenca Poopó, también se encuentran instaladas plantas de flotación del sector cooperativizada. Los resultados

obtenidos del análisis químico de la muestra son presentados en la siguiente tabla:

Parámetros	Resultados	Unidad
DBO5	5	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	32	mg/L

Tabla 5.- Análisis químico de agua tratada de la PTAR Yunguyo (Zamora & Tórrez, 2021)

Por otra parte, los resultados de las pruebas de flotación con una muestra del municipio de Poopó, con diferentes tipos de aguas y bajo las mismas condiciones de operación, grado de molienda y consumo de reactivos, es presentado en la tabla 6.

En el contexto arriba descrito, el trabajo de investigación arribo a la siguiente conclusión, que la implementación de una PTAR en el municipio de

Poopó, permitiría descargar aguas residuales tratadas que pueden ser adecuadas para el proceso de flotación de minerales de zinc en el ingenio minero de Poopó. Por ejemplo, el diseño y dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de Poopó, proyectada para una población al año 2035 es de 11668 habitantes y cuyas características permitirán una descarga de efluente con cerca de 5 ppm de DBO5 y 32 ppm de sólidos en suspensión, deberá tener como base de cálculo los datos siguientes: (Zamora & Tórrez, 2021)

- Caudal medio: $Q_m = 5.82$ [l/s]
- Caudal mínimo: $Q_{min} = 2.91$ [l/s]
- Caudal máximo diario: $Q_{m\acute{a}x-d} = 8.73$ [l/s]
- Caudal máximo horario: $Q_{m\acute{a}x-h} = 20.24$ [l/s]
- Caudal de diseño: $Q_{d\acute{a}o} = 80.96$ [l/s]

Flotación con agua potable			
PRODUCTO	%PESO	LEY %Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	20.40	44.46	85.65
CONCENTRADO	2.80	37.31	9.86
COLA	76.80	0.62	4.49
CAB. CALCULADA	100.00	10.59	100.00
Flotación con agua de recirculación			
PRODUCTO	%PESO	LEY %Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	21.25	44.41	93.94
CONCENTRADO	2.53	7.64	1.88
COLA	76.22	0.59	4.19
CAB. CALCULADA	100	10.59	100.00
Flotación con agua residual urbana tratada			
PRODUCTO	%PESO	LEY %Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	20.20	46.39	88.49
CONCENTRADO	2.40	27.44	6.22
COLA	77.40	0.72	5.29
CAB. CALCULADA	100.00	10.59	100.00

Tabla 6.- Comparación de resultados de las pruebas de flotación con diferentes tipos de aguas (Zamora & Tórrez, 2021)

Las dimensiones calculadas para la planta de tratamiento de las aguas residuales domésticas de la población serán:

- Canal de ingreso de 0.5 m de ancho y una altura de 0.89 m.
- Garganta del canal de Parshall de 6 pulgadas/pie
- El canal de desbaste de cuatro rejillas de acero inoxidable con un ángulo de 45° medirá 0.83m, por otra parte, la eficiencia de la rejilla es del 72.46%.
- El tanque desarenador permitirá tratar 1239.30 m³ (Altura 3.5 m, ancho 17.15 m y largo de 20.65 m)
- El reactor aireado es de 1239.30 m³, que producirá una cantidad de fango de 571.98 kg/día, considerando un tiempo retención hidráulica de 4.32 horas.
- La cantidad de aire necesario es de 75.14 m³ de aire/min.

- El tanque de sedimentación secundario, presenta un volumen de 1799.59 m³ (Altura, ancho de 9.65 m y largo 19.30 m).
- El proceso de desinfección con cloro, permitirá tratar 6965.70 m³/día de agua presenta un volumen de 1253.83 m³ (Altura, ancho 8.56 m y largo de 17.12 m).

d) Diseño, dimensionamiento e implementación de plantas de tratamiento de aguas ácidas de mina en las comunidades mineras para su uso en el procesamiento metalúrgico

Actualmente, en las comunidades mineras de la Sub Cuenca Poopó, no se cuenta con plantas de tratamiento de aguas ácidas de mina, las que, después de ser bombeadas en las operaciones subterráneas por el sector cooperativizado, son directamente descargadas, sin tratamiento previo de neutralización-precipitación con cal, al medio ambiente, generando así un fuerte impacto en la calidad de los ecosistemas de los mismos por la carga de metales pesados tóxicos disueltos y poniendo

en riesgo la salud de comunidades situadas en las zonas bajas de la cuenca que usan estas aguas para riego.

A objeto de validar técnicamente la propuesta, se generó una alternativa técnica, económica y ambiental innovadora para el tratamiento de las aguas ácidas de la Empresa Minera Huanuni, mediante el paso de las mismas por drenes anóxicos calizos instalados en interior mina.

Desde el punto de vista técnico, para la implementación de la propuesta, se calculó que para tratar 60 litros por segundo de aguas ácidas mediante Drenes Anóxicos Calizos en interior mina, considerando además un tiempo de residencia de 15 horas y 20 años de operación de los drenes, se requieren 17,077.29 toneladas de caliza. Los Drenes Anóxicos Calizos serán ubicados en interior mina, en la rampa de ingreso a los niveles inferiores, requiriendo una ampliación de las cámaras 4 y 5 ya existentes hasta alcanzar las dimensiones de 3.5 m de alto, 20 m de ancho y 100 m de largo; y de 3.5 m de alto; 17 m de ancho y 88 m de largo, respectivamente. El efluente de descarga de los Drenes Anóxicos Calizos será sometido a un proceso de precipitación de cal también en interior mina; para ello, se requerirá un reactor de preparación de lechada de cal de 2.5 m de alto y un diámetro de 1.0 m. La lechada de cal será enviada por bombeo a un sedimentador del tipo lamelas, implementado también en el interior de la mina y de dimensiones de 3.5 m de alto, 8 m de ancho y 7 m de largo, situado en una galería muerta ya existente que permitirá la separación del rebalse o agua clara ya tratada que será bombeada por el sistema actual de bombeo hacia la superficie; y por otra, se bombearán los lodos del proceso hacia los tajos libres para su almacenamiento sin problemas ambientales. Desde el punto de vista económico, la implementación de la propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni por Drenes Anóxicos Calizos y Precipitación con Cal, requiere de una inversión de 2.31 millones de dólares americanos. Comparativamente, con el proceso convencional de neutralización – precipitación con cal, el tratamiento de 60 litros por segundo de las aguas ácidas de la Empresa Minera Huanuni requiere de 30.69 toneladas de cal/día; y se formarían 311.66 toneladas de lodos/día; además, los lodos formados por este proceso, “no son estables químicamente” y su manejo provocará la “redisolución de metales pesados”. Además, este método de tratamiento implica un costo por el uso de cal de 6.2 millones de \$us/año. Es decir que, para 20 años de operación, se gastaran cerca de 124.44 millones de dólares. Mientras que, con el proceso de Drenes Anóxicos y Precipitación con cal en interior mina propuesto, se generarían solo 132.87 toneladas de lodos/día; los que 4 además son “estables químicamente”; puesto que, y no son hidróxidos, sino complejos hidroxilados, y serán dispuestos sin riesgos ambientales en 11 rajes vacíos por año en interior mina. Por tanto, el tratamiento de las aguas ácidas de la empresa minera Huanuni mediante Drenes Anóxicos y

Precipitación con cal en interior mina, es una alternativa técnicamente viable, económicamente más barata (permitiendo un ahorro de 121,91 millones de dólares en 20 años de operación) y ambientalmente más favorable y sin riesgo ambiental con respecto al tratamiento convencional por neutralización – precipitación con cal. (Zamora et al., 2018)

e) **Diseño y dimensionamiento de plantas de compostaje en hileras de la fracción orgánica de los residuos urbanos de las comunidades mineras**

Actualmente, en las comunidades mineras de la Cuenca Poopó, no se cuenta con vertederos ambientalmente manejados para la disposición de residuos sólidos urbanos; por lo que, la basura generada por los habitantes es vertida a los ríos, generando así otra fuente adicional de impacto a la calidad de los ecosistemas acuáticos y poniendo en riesgo la salud de comunidades situadas en las zonas bajas de la cuenca que usan estas aguas para riego.

A objeto de validar técnicamente la propuesta, se ha considerado la comunidad minera de Huanuni donde se ha desarrollado un estudio de caracterización de los residuos sólidos urbanos. La localidad de Huanuni, tiene una extensión aproximada de 26,052 Km² y una población aproximada de **24,677** habitantes, con una tasa de crecimiento poblacional aproximada a la nacional de 2,55% anual, tiene una tasa de generación de Residuos Sólidos Urbanos de 9,46 ton/día; cuyo principal problema es que no cuenta con ningún sistema de disposición de estos residuos; los mismos que van a parar a las riberas del río Huanuni, siendo arrastrados por la corriente, incrementando la colmatación del río junto con las descargas producidas por la Empresa Minera Huanuni.

Los efectos directos de este aspecto ambiental, varían desde el factor estético, aglomeración de vectores, generación de focos de infección, generación de enfermedades de la piel, malos olores, incremento de las riberas del río con lodo y materiales no biodegradables y el arrastre de sólidos hasta las aguas del río San Juan de Sora Sora, que finalmente desembocan en el Lago Poopó.

A objeto de validar técnicamente la propuesta, se determinó que la tasa de generación de RSU es de 0,355 kg/hab/día, como promedio en el sector concentrado de la población. Los componentes principales de los residuos obtenidos a partir de una muestra de 7 días de recolección de 365 familias, se presenta en la tabla 7.

Las propiedades físicas más relevantes a considerar en la muestra de los RSU generados, se presentan a continuación:

COMPONENTES	% en peso
ORGANICOS	
Residuos de Comida	47,9
Papel	9,3
Cartón	2,9
Plásticos	8,0
Textiles	0,8
Jebes	0,1
Cuero	0,0
Residuos de jardín	7,1
Madera	1,6
Orgánicos Misceláneos	7,6
INORGÁNICOS	
Vidrio	3,1
Latas de hojalata	1,4
Aluminio	0,4
Otros Metales	0,1
Suciedad, cenizas, etc	9,6
Total	100,0

Tabla 7.- Composición de los Residuos Sólidos Generados en la Localidad de Huanuni

- Contenido de Humedad , 49 % Peso específico, 198 Kg/m³
- Composición Química Total: **C₅₈₆ H₉₃₄ O₂₄₈ N₁₂ S**
- Composición Química de la fracción orgánica: **C₂₀ H₃₁ O₁₀ N**
- Contenido Energético Total: 2 746,97 Kcal/Kg
- Contenido Energético fracción orgánica: 2 696,26 Kcal/Kg

Las condiciones de compostaje en celdas aireadas fueron las siguientes:

- 25 a 27 cm de granulometría.
- 55 % de humedad.
- 34.5 la relación de C/N (Fue necesario enriquecer el material con nitrógeno mediante la adición de residuos de matadero).
- 55 a 65 °C de temperatura durante los primeros días de compostaje.
- 7.4 el valor del pH al finalizar el proceso de compostaje.
- 1.5 veces el estequiométrico de oxígeno requerido a partir de la fórmula química determinada, insuflado por aireación mediante un compresor.

La calidad del compost obtenido es presentada en la tabla siguiente:

pH	Calcio (ppm)	Fósforo (en forma de PO₄³⁻) (ppm)
7.45	3400	>580
Nitrato (ppm)	Nitrito (ppm)	Potasio (ppm)
370	< 1	380

Tabla 8.- Composición del compost obtenido a partir de la fracción orgánica de los Residuos Sólidos generados en la Localidad de Huanuni

Los contenidos de metales pesados no superan los rangos siguientes en unidades de ppm: Pb 20, Cr < 20. El compost obtenido, puede ser, por una parte, mezclado con suelo y utilizado como top soil artificial para las coberturas secas en la rehabilitación ambiental de sitios de almacenamiento de residuos mineros altamente generadores de DAR; y por otra, como fertilizante para mejorar la producción agrícola y aportar con la seguridad alimentaria de los pobladores de la cuenca Poopó.

f) Implementación de carpas solares para la producción especies arbóreas nativas y de vegetales

Para el caso de la implementación de carpas solares para la producción de especies arbóreas nativas, en la figura 1, se mostró que la cantidad de sólidos suspendidos que ingresan al Lago Poopó es de cerca 3.358 ton/día. Esta gran cantidad de material que ingresa al lago, está generando una rápida colmatación del mismo. Este fenómeno antrópico se debe a que en todas las zonas de la sub cuenca, se está eliminando la cobertura vegetal autógena presente en los cerros, debido a que es usada como material de combustión (leña) en las poblaciones mineras alejadas de los centros urbanos.

En la figura 7, se muestra el mapa de riesgos de erosión y degradación de suelos de la cuenca de Huanuni, que se encuentra en la sub cuenca Poopó.

Similares condiciones de erosión, se dan en los municipios de Poopó, Pazña, Machacamarca y Antequera. Para detener este fenómeno antrópico, se debe empezar a trabajar en el manejo y conservación de suelos en laderas por medios biológicos, para lo cual se tiene la propuesta de construcción de un “Vivero Forestal Andino Silvestre”, como componente fundamental para la forestación de sitios con riesgos altos y muy altos de erosión y degradación de suelos para multiplicar, producir y propagar especies principalmente forestales silvestres e introducidas y otras especies como las cactáceas de la zona, para poder restaurar el equilibrio ecológico en la sub cuenca de Huanuni, así evitar la degradación de los suelos. En especial la especie *Baccharis incarum* (chijua, tola, romero), que es un arbusto perenne 30-100 cm de altura, con numerosas ramitas delgadas, cubiertas de hojas en toda su extensión, dicha especie crece tanto en suelos compactos pedregosos como en suelos arenosos, siendo una especie dominante en arbustales puneños y acompañante en arbustales de Monte y transición Monte-Puna. La inversión total del proyecto es de 1 109 793,52 \$us americanos.

Por otra parte, para el caso de la implementación de carpas solares para la producción de vegetales, se tiene previsto el generar un vivero que permita la producción de las siguientes especies y sus respectivos rendimientos en número de plantines por metro cuadrado: Tomate 5, pimentón 5, col bruselas 9, lechuga 12 y pepino 6. Los vegetales producidos, serán destinados al autoconsumo familiar, mejorando la

calidad alimentaria y la salud; pero, además, permitirán mejorar los ingresos económicos de las mujeres palliris.

El costo de cada carpa solar de 26 m² es de aproximadamente 1000 dólares americanos.

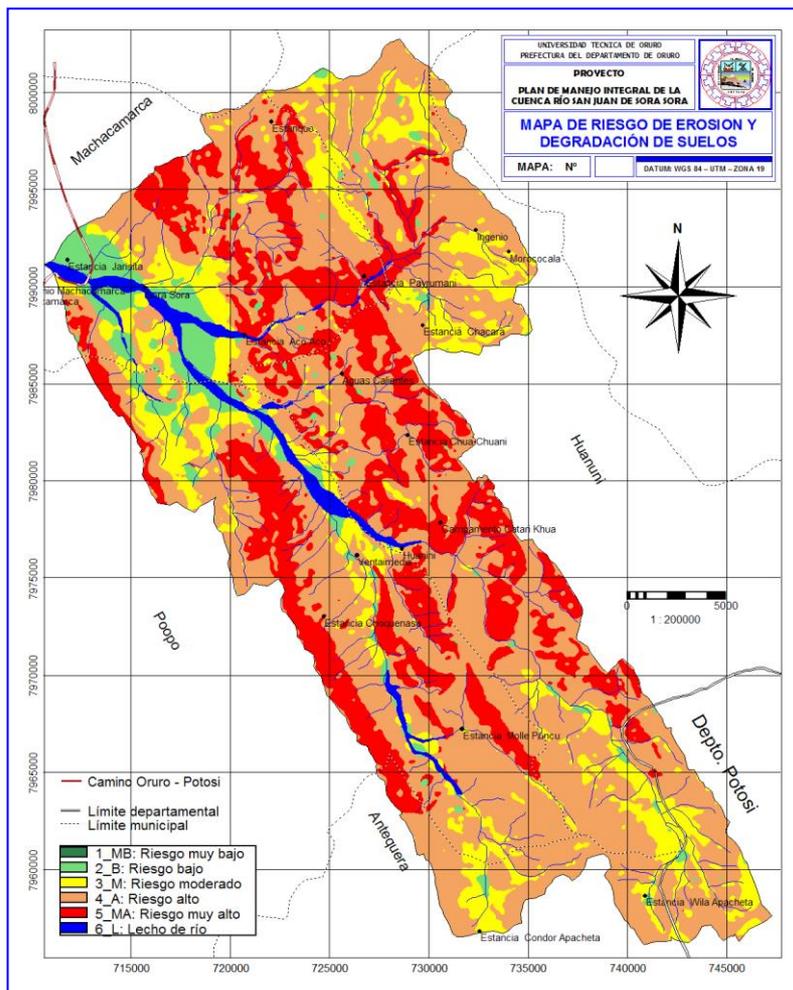


Figura 7.- Flujograma y rediseño y dimensionamiento del nuevo Ingenio (Vallejos et al., 2018)

3. Conclusiones

La aplicación de una economía lineal en el desarrollo económico local de las comunidades mineras ha generado impactos ambientales significativos a los diferentes factores ambientales de la sub cuenca Poopó; por lo que, se hace imprescindible desarrollar una propuesta de un modelo de desarrollo económico local circular que desde el punto de vista técnico se circunscribe a:

- i. La remediación de los sitios de disposición de residuos mineros altamente generadores de drenaje ácido de roca que están alterando la calidad de las aguas superficiales y subterráneas con metales pesados y acidez, poniendo en riesgo la salud de las personas y los ecosistemas. Para ello, se debe aplicar el uso de coberturas secas y de bajo costo.
- ii. La mejora de la producción minero-metalúrgica del sector cooperativizado de manera que no sólo atenué los efectos de impacto negativo al medio ambiente; sino que también, la inserción de soluciones innovadoras que permitan disminuir los consumos de agua y energía. Para ello se deben implementar

procesos minero-metalúrgicos con mejor criterio técnico.

- iii. El diseño, dimensionamiento e implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales de las comunidades mineras; de manera tal que, por una parte, los efluentes de descarga sean utilizados para riego y el procesamiento mineral; y por otra, los lodos generados en el tratamiento, permitan la generación de compost para la elaboración de top soil artificial, con su mezcla con colas desulfuradas del procesamiento metalúrgico, requerido para la rehabilitación de los sitios de almacenamiento de residuos mineros generadores de DAR.
- iv. El diseño, dimensionamiento e implementación de plantas de compostaje en hileras a partir de un adecuado manejo de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en las comunidades mineras, y que permitirá el mejoramiento de los suelos para su uso agrícola.

- v. El diseño, dimensionamiento e implementación de carpas solares para la producción tanto de vegetales de alto valor comercial como de plantines arbustivos autóctonos, con la participación activa de mujeres (palliris), que permitirá garantizar la seguridad alimentaria de

sus familias y de las poblaciones mineras, y por otra, evitar la fuerte erosión de los suelos que repercute en las grandes cantidades de sedimento que está generando la colmatación del Lago Poopó.

4. BIBLIOGRAFÍA

- GITEC Consult GmbH – COBODES Ltda. (2014). Plan director de la cuenca del Lago Poopó.
- Zamora, G. Salas, C. Hinojosa, O., Claire, G. Pérez, M. Beltrán, C., Vallejos, P., Covarrubias, H. (2010). “Remediación ambiental como alternativa de desarrollo local”. ISBN: 978-99954-32-98-8
- Zamora, G. (2022). “Formación, predicción e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en minería”. ISBN: 978-9917-614-12-8
- Zamora, G. Bases técnicas para la implementación de la economía circular en operaciones minero-metalúrgicas. ISBN: 978-99974-24-06-8
- Zamora E., G., Barco, B., Hinojosa, O., Blanco, W., & Trujillo, E. (2022). Propuesta de aplicación de economía circular en el procesamiento minero-metalúrgico en la pequeña minería – Cooperativa minera “Porvenir Japo”. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 7(2), 25–38.
- Zamora, G., & Meza, R. (2022). Formación, prevención e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en operaciones mineras. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 7(1), 3–21.
- Zamora, G., Octavio, H. C., & Antonio, S. C. (2001). *Estudio De Desulfurización De Relaves Generadores De Dar, Antes De Su Disposición Final, Como Alternativa De Manejo Y Mitigación De Impacto Ambiental*.
- Zamora, G., Mamani, M., & Trujillo, E. (2018). Propuesta técnica, económica y ambiental para el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Huanuni mediante drenes anóxicos calizos y precipitación con cal en interior mina. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, (4), 3-17.
- Zamora, G., Blanco, W., & Hinojosa, O. (2019). Economía circular en minería: Procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 3–15.
- Zamora, G., Hinojosa, O., Blanco, W. *Beneficios de la aplicación de la economía circular en la etapa de cierre ambiental de sitios de almacenamiento de residuos mineros en operaciones de cielo abierto*. 3–11.
- Zamora, G., & Calvo, J. (2021). Propuesta de rehabilitación ambiental del lago Uru Uru. *Revista*

de Medio Ambiente Minero y Minería, 6(1), 37–57.

Zamora, G., Lafuente, J., Hinojosa, O. (2020). Propuesta de rehabilitación ambiental del pasivo minero de Japo - Santa Fe. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 5(1), 3-18.

Artículo recibido en: 31.03.2023

Manejado por: Elvys Trujillo L.

Artículo aceptado: 28.04.2023