

Universidad de Buenos Aires
ARGENTINA



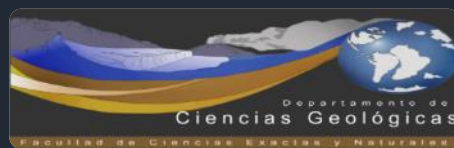
TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Título: Caracterización de los depósitos de azufre de la mina “La Casualidad” en la provincia de Salta: aspectos geológicos, económicos, industriales y sociales.

Autora: Geol. Leonardo Exequiel Escalante,

Directora: Dra. Liliana N. Castro

2024



RESUMEN

El azufre es un elemento no metálico presente en la naturaleza como nativo, como sulfatos o sulfuros. A nivel global, es un recurso crítico para la fabricación de fertilizantes, para la industria química y minera, para la desulfuración de combustibles, entre otros. China, Estados Unidos, Canadá y Rusia son los principales productores. La demanda mundial de azufre sigue creciendo debido al aumento en la producción de alimentos y la necesidad de energías más limpias. La explotación de azufre volcánico se desarrolló intensamente en la década de 1940 en las provincias de Catamarca, Jujuy y Salta. La cadena volcánica de Corrida de Cori ha sido una fuente significativa de origen volcánico-fumarólico, donde el cerro Estrella y la Mina Julia, con reservas de 3,5 millones de toneladas y un contenido de 22,5% de S, en Salta se convirtieron en los principales productores de azufre del país, satisfaciendo casi un tercio del consumo interno hasta 1979, momento del cese de las operaciones. No solo la reactivación de las actividades minera de estos depósitos, sino también la explotación de los depósitos de origen biogénico de la Cuenca Neuquina pueden jugar un papel crucial en la industria y economía argentina. Se suma que las condiciones mineras de la provincia de Salta, actualmente son alentadoras para la exploración y explotación minera, principalmente de litio y metalíferos (Cu, Au y Ag). Es importante, plantear la reactivación de la Mina Julia (La Casualidad) como materia prima fundamental en este escenario global de transición energética y seguridad alimentaria.

PALABRAS CLAVES: Mina Julia (La Casualidad)- Azufre volcánico- Puna- Transición energética - Seguridad alimentaria.

ABSTRACT

Sulfur is a non-metallic element found in nature in its native form, as well as in sulfates or sulfides. Globally, it is a critical resource for fertilizers production, for chemical and mining industry, for desulfurization of fuels, among others. China, the United States, Canada and Russia are the main producers. The sulfur global demand for sulfur and its derivatives continue to grow due to the increase in food production and the requirement for cleaner energy. The exploitation of volcanic sulfur developed intensively in the 1940s in the provinces of Catamarca, Jujuy and Salta. The Corrida de Cori volcanic chain is a significant source of volcanic-fumarolic deposits, where the Estrella hill and the Julia Mine (reserves of 3.5 million tons and 22.5% S content) in Salta became the main producers of sulfur in Argentina, satisfying almost a third of domestic consumption until 1979, when operations ceased. Not only the reactivation of the mining activity of these deposits is important, but also the exploitation of biogenic deposits in the Neuquén Basin could play a crucial role in the Argentine industry and economy. In addition, the mining conditions in the province of Salta are currently encouraging for exploration and mining, mainly of lithium and metals (Cu, Au and Ag). It would be important to consider the re-evaluation of the Julia Mine deposit as fundamental raw material in this global scenario of energy transition and food security.

KEY WORDS: Julia Mine (La Casualidad) - Volcanic sulfur- Puna- Energy transition - Food security.

ÍNDICE

CAPÍTULO INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Consideraciones generales.....	5
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS	6
2.1. Objetivo general	6
2.2 Objetivos específicos.....	6
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
CAPÍTULO 4: FUENTES DE AZUFRE	8
4.1. Depósitos biogénicos: a) Bioepigenéticos: 1) Cap Rock y 2) Estratoligados b) Biosingenéticos.....	8
4.2. Depósitos volcánicos.....	10
4.3. Evaporitas	11
4.4. Azufre nativo separado en plantas químicas y refinerías a partir de combustibles fósiles, portadores de azufre.	11
4.5. Por tostación de pirita, pirrotina, o sulfuros polimetálicos nativo.	12
CAPÍTULO 5: PROYECTO “LA CASUALIDAD”	13
5.1. Introducción.....	13
5.1.1. Ubicación.....	14
5.1.2. Antecedentes y situación socioeconómica de las comunidades locales. El pueblo “La Casualidad”	15
5.1.3. Marco Legal.....	15
5.2. Línea de base ambiental.....	16
5.2.1. Línea de base ambiental del medio físico.....	16
5.2.1.1. Marco Geológico regional.....	16
5.2.1.1.1. Lineamientos.....	17
5.2.1.1.2. Estructura.....	18
5.2.1.2. Geología del área de estudio.....	20
5.2.1.2.1 Geomorfología.....	21
5.2.1.2.2. Alteración fumarólica y depósitos de azufre nativo.....	23
5.2.1.3. Clima.....	24
5.2.1.4. Recursos hídricos.....	27
5.2.1.5. Suelos.....	28
5.2.2. Línea base ambiental del medio biótico.....	30
5.2.2.1. Flora y Fauna.....	30
5.2.2.2. Áreas protegidas.....	31
5.2.3. Línea de base ambiental del medio humano.....	32
5.2.3.1. Aspectos Sociales.....	32
5.2.3.2. Recursos económicos.....	32
5.2.3.3. Sitios de interés geológico y arqueológico.....	33
CAPÍTULO 6: MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN Y TRATAMIENTO.....	34
6.1. Un poco de historia.....	34
6.2. Método de explotación	34
6.3. Tratamiento Mineral.....	35
-El método Frasch.....	35
-Recuperación de azufre de la producción de petróleo y gas.....	36
-El azufre obtenido por tostación de pirita, pirrotina, o sulfuros polimetálicos	37

CAPÍTULO 7: IMPACTO EN EL AMBIENTE, EN LA SOCIEDAD, EN LA ECONOMÍA y EN LA SALUD.....	38
7.1. Características del ciclo del azufre.....	38
7.2. Aspectos ambientales vinculados al uso del azufre	39
7.3. Geología médica vinculada al azufre y sus derivados.....	39
CAPÍTULO 8: PANORAMA DEL MERCADO DEL AZUFRE.....	42
8.1. Panorama mundial.....	42
8.1.1 Mercado Global - Consumo Mundial.....	45
8.1.2. El papel del azufre en los materiales modernos ...	45
8.1.2.1. Vulcanización moderna	46
8.1.2.2 Azufre en baterías recargables.....	46
8.1.2.3. Nanocompuestos.....	47
8.2. Mercado nacional	47
8.2.1 Comercio exterior.....	47
8.3. Ámbito provincial.....	48
CAPÍTULO 9: PROPUESTA DE REACTIVACIÓN DE LA MINA JULIA	51
9.1. Etapas de la propuesta.....	51
9.1.1. Investigación preliminar y recopilación de datos.....	51
9.1.2.Reconocimiento de campo.....	51
9.1.3. Prospección geofísica y prospección geoquímica.....	52
9.1.3.1. Estudios geofísicos.....	52
9.1.3.2. Estudios geoquímicos	52
9.1.4. Evaluación y modelado del depósito.....	52
9.1.5. Método de explotación y tratamiento.....	53
9.2. Impactos.....	53
9.2.1. Impactos ambientales.....	53
9.2.1.1. Análisis de la presencia de drenaje ácido en la Mina Julia: Evaluación actual Y consideraciones futuras.....	55
9.2.2. Impacto socioeconómico en las comunidades locales. El pueblo “La Casualidad”	57
9.3. Expectativas del proyecto La Casualidad.....	58
CAPÍTULO 10: REFLEXIONES Y CONCLUSIONES.....	60
CAPÍTULO 11 AGRADECIMIENTOS.....	61
CAPÍTULO 12: BIBLIOGRAFÍA.....	62

FIGURAS

Figura 1. Esquema de los tipos clásicos de depósitos de azufre Tipo <i>Caprock</i> y estratificado.....	9
Figura 2. Ejemplo de depósito de azufre en Indonesia.....	10
Figura 3. Afloramientos en Mina Julia.....	10
Figura 4. Depósitos de azufre en el Salar de Uyuni.....	11
Figura 5. Establecimiento Azufrero de Salta, La Casualidad.....	13
Figura 6. Mapa de ubicación de Mina Julia y La Casualidad.....	14
Figura 7. Mapa geológico regional que muestra la ubicación de fallas y lineamientos a escala regional	18
Figura 8. Mapa del NOA con los principales lineamientos estructurales.....	19
Figura 9. Volcán Lastarria.....	20
Figura 10. Cerro Estrella	22
Figura 11. Mapa geomorfológico.....	23
Figura 12. Mapa geológico.....	24

Caracterización de los depósitos de azufre de la mina “La Casualidad” en la provincia de Salta: aspectos geológicos, económicos, industriales y sociales.

Geól. Leonardo E. Escalante

Figura 13. Temperaturas medias y precipitaciones.....	25
Figura 14. Diagrama de temperaturas máximas.....	25
Figura 15. Precipitaciones anuales en el área del proyecto.....	26
Figura 16. Calidad del aire.....	26
Figura 17. Diagrama de velocidad de los vientos en la Puna.....	27
Figura 18. Mapa hidrológico de la Subcuenca Arizaro.....	28
Figura 19. Mapa de suelos del área de La Casualidad.....	29
Figura 20. Ecorregiones del noroeste argentino.....	30
Figura 21. Áreas protegidas de la provincia de Salta.....	31
Figura 22. Los niños de Llulliallaco.....	33
Figura 23. Método Frasch.....	35
Figura 24. a. Azufre agrícola b. Azufre industrial	36
Figura 25. Pilas de azufre de una refinería de petróleo.....	37
Figura 26. Distribución de una planta productora de ácido sulfúrico por el proceso de doble absorción	37
Figura 27. Ciclo del azufre (modificado de Evans y Perlman, USGS).....	38
Figura 28. Termas El Azufre en Malargüe, Argentina.....	40
Figura 29. Métodos no sustentables de extracción de azufre.....	41
Figura 30. Estructura de la demanda.....	42
Figura 31. Producción mundial de azufre.....	42
Figura 32. Mercado del azufre.....	44
Figura 33. Mercado de azufre: Tasa de crecimiento por región.....	46
Figura 34. Balanza comercial.....	47
Figura 35. Importaciones de azufre.....	48
Figura 36. Exportaciones de azufre.....	48
Figura 37. Planta de tratamiento denominada La Casualidad a una altura de 4.200 m.s.n.m.....	49
Figura 38. Principales proyectos mineros en la provincia de Salta.....	50
Figura 39. Servidumbre de Agua- Expte. 2.333. La Casualidad.....	57
Figura 40. Índice de atractivo para la inversión.....	58
Cuadros	
Cuadro 1: Etapas del trabajo.....	7
Cuadro 2: Datos de precipitaciones en el periodo 1963-1972.....	28
Cuadro 3. Reservas y leyes de Mina Julia, provincia de Salta	49
Cuadro 4. Componentes de PGA para el cuidado del medioambiente.....	53
Cuadro 5. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de muestras de aguas superficiales de La Casualidad.	58

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1. CONSIDERACIONES GENERALES

El azufre (S) es un elemento no metálico, su número atómico es 16. Las ocurrencias de S se dan principalmente en cuatro estados de oxidación en el ambiente geológico: S^{-2} (sulfuros y sulfosales), S^0 (azufre elemental), S^{+4} (SO_2 en gas volcánico), y S^{+6} (SO_3 en gas volcánico). Puede explotarse o recuperarse a partir de una amplia variedad de yacimientos. Se encuentra ampliamente distribuido tanto en estado libre como combinado con otros elementos, como los sulfuros en menas metálicas, sulfatos principalmente en depósitos evaporíticos, como ácido sulfhídrico en depósitos de gas y como complejos orgánicos sulfurados en el petróleo crudo y en el carbón (Ruckmick *et al.*, 1979). Los recursos totales se estiman alrededor de 5 mil millones de toneladas ([Mineral Commodity Summaries 2024 \(usgs.gov\)](https://www.usgs.gov/minerals/commodity/sulfur)).

La movilidad del S en general es alta en todo el rango de pH y con respecto al potencial redox, su movilidad es mayor en condiciones oxidantes.

Los sulfuros son compuestos binarios entre los que se encuentran como minerales más abundantes pirita (FeS), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (FeCuS₂), cinabrio (HgS), antimonita (Sb₂S₃). También aparecen como sulfosales como por ejemplo la enargita (Cu₃AsS₄), la tennantita (Cu₁₂As₄S₁₃), la jamessonita (Pb₄FeSb₆S₁₄), entre otras. Entre los sulfatos minerales, los más importantes son el yeso (CaSO₄·2H₂O), la celestina, (SrSO₄) y la baritina (BaSO₄). El azufre se encuentra en forma nativa en regiones volcánicas o como azufre biogénico asociado a hidrocarburos. Las concentraciones más altas de S se encuentran en lutitas, especialmente en lutitas negras. El S también está presente en compuestos organosulfurados en el carbón y el petróleo (Enghag 2008).

Tanto el azufre como sus compuestos ocupan un lugar preeminente como materia prima fundamental para la industria química, tanto inorgánica como orgánica. El uso más importante es, en la fabricación de H₂SO₄ (cerca del 80%). El 50% del H₂SO₄ se usa para la producción de fertilizantes, el 18 % en química como sulfitos, sulfatos y dióxido de azufre y el resto en petróleo, fibras (rayos, aceria, pigmentos y explosivos), en medicina (sulfamidas, pomadas tópicas) para fabricar fósforos, caucho vulcanizado, tintes y pólvora ([Sulfur - Element information, properties and uses | Periodic Table \(rsc.org\)](https://www.rsc.org/periodic-table/element/16/sulfur)). La industria de fertilizantes utiliza ácido sulfúrico para fabricar principalmente ácido fosfórico y sus derivados, y también fertilizantes nitrogenados, potásicos y sulfatados. El azufre también se utiliza en muchas otras industrias, como pigmentos, fibras, ácido fluorhídrico, disulfuro de carbono, productos farmacéuticos, pesticidas agrícolas, productos de cuidado personal, cosméticos, tratamiento de agua y decapado de acero ([Introduction to Sulphur - The Sulphur Institute](https://www.sulphur-institute.com/)).

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

-Integrar los conocimientos adquiridos en la carrera de Especialización en Geología Minera, profundizando en la importancia del azufre en Argentina, planteando una propuesta de reactivación de la Mina Julia.

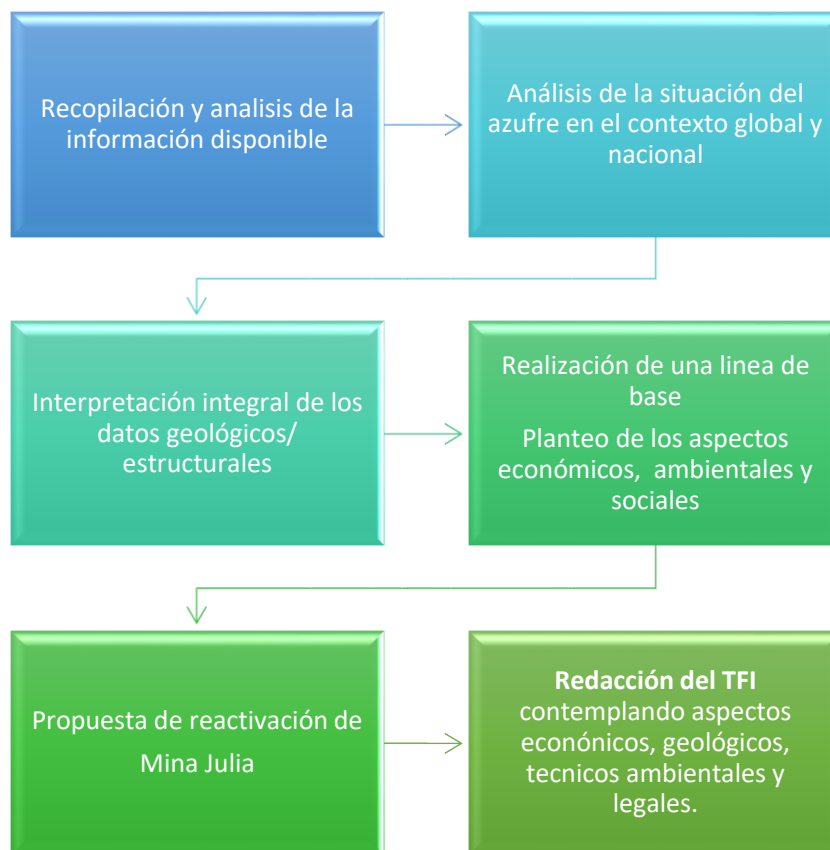
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la génesis, y los ambientes de formación del azufre.
- Efectuar una revisión de las actividades mineras del azufre en la Argentina y en particular en la provincia de Salta.
- Ubicar dentro del marco legal el elemento analizado.
- Definir las características geológicas del cerro Estrella- cerro Lindo, Mina Julia.
- Realizar una línea de base del medio físico, biótico y humano.
- Evaluar las formas más adecuadas de prospección, explotación y tratamiento.
- Analizar los aspectos ambientales y los vinculados a la salud del azufre.
- Evaluar el potencial de abastecimiento de azufre para la República Argentina y América latina, aprovechando la calidad y volúmenes que se disponen en el país.
- Describir el panorama de mercado global y local de este elemento, incluyendo la estructura de la demanda.
- Identificar los mercados en desarrollo, los cuales requieren de azufre como materia para su proceso productivo, como los son principalmente las operaciones mineras metalíferas.
- Realizar un análisis socioeconómico del impacto que generó la mina en el área, y el impacto que tendría su reactivación en la situación actual minera en el NOA.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

- ⊕ Recopilación bibliográfica. Se utilizarán imágenes satelitales, hojas geológicas y geoquímicas (repositorio SEGEMAR), informes internos de empresas, publicaciones periódicas de revistas especializadas, estadísticas, información de mercado, y material académico.
- ⊕ Análisis de la situación del azufre en el contexto global y nacional.
- ⊕ Interpretación de la geología regional y local en base a la información previamente recopilada. Con la evaluación de la potencialidad del área con presencia de azufre.
 - Revisión de las distintas tipologías de yacimientos de azufre.
- ⊕ Control de las unidades identificadas en base a las descripciones disponibles.
 - Interpretación y actualización de la geología del área en base a los resultados disponibles en bibliografía reciente.
 - Análisis del marco legal y ambiental en el área del proyecto en el marco del código minero.
 - Análisis de la situación socioeconómica de las áreas de influencia y de los efectos que generaría el “proyecto minero” en el marco actual de la minería en el NOA.

Cuadro 1: Etapas del trabajo



CAPÍTULO 4: FUENTES DE AZUFRE

4.1. INTRODUCCIÓN

El azufre elemental se encuentra ampliamente distribuido principalmente en dos ambientes geológicos: cuencas que contienen hidrocarburos y zonas de volcanismo cenozoico.

De acuerdo a Ruckmick *et al.* (1979), las fuentes de azufre se clasifican en:

- ⊕ Depósitos biogénicos: a) Bioepigenéticos: 1) Cap Rock y 2) Estratoligados; b) Biosingenéticos.
- ⊕ Depósitos volcánicos.
- ⊕ Evaporitas.
- ⊕ Azufre nativo separado en plantas químicas y refinerías a partir de combustibles fósiles, portadores de azufre.
- ⊕ Por tostación de piritita, pirrotina, o sulfuros polimetálicos obteniéndose SO_2 que es luego convertido en H_2SO_4 o en ocasiones en azufre nativo.

4.1.1. Depósitos biogénicos

En cuencas marinas marginales, los depósitos biogénicos son formados por la reducción anaeróbica bacteriana de yeso o anhidrita (de SO_4^{2-} a H_2S) y la oxidación de hidrocarburos (de H_2S a S^0).

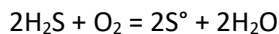
Los biosingenéticos son depósitos sedimentarios asociados a ambientes de lagoon u otros ambientes euxínicos marinos restringidos o lacustres (Peroni *et al.* 2006).

Dentro de los bioepigenéticos se encuentran en dos estilos geológicos: en rocas de cubierta sobre diapiros de sal (Tipo Cap rock) y en depósitos estratoligados. Sin embargo, todos estos depósitos parecen compartir orígenes y características notablemente similares. Se forman en cuencas evaporíticas donde las capas de hidrocarburos subyacen a las de anhidrita o yeso y además, donde las diaclasas o fallas permiten que el agua, los hidrocarburos y las bacterias asciendan hacia las evaporitas. Las bacterias oxidan los hidrocarburos a CO_2 , reducen los iones de sulfato a H_2S y transforman el yeso en calcita. Las evidencias indican que el H_2S se convierte en polisulfuros y estos se oxidan a azufre elemental por el CO_2 en ambientes anaeróbicos (Ruckmick *et al.* 1979).

Para la obtención de una tonelada de azufre, se necesitan grandes cantidades de hidrocarburos (equivalente a entre dos y cuatro barriles de petróleo). Estas cantidades se obtienen mediante la extracción artesiana sostenida en el tiempo con aguas subterráneas de estratos petrolíferos de gran extensión. Una combinación de estructuras únicas forma los conductos necesarios para concentrar el flujo artesiano en las evaporitas y, de este modo, localizar los depósitos de azufre (Ruckmick *et al.* 1979).

Todos los depósitos de azufre en ambiente sedimentario, económicamente importantes, se explotan actualmente asociados a reemplazos bioepigenéticos.

A continuación se indica la reacción donde el producto residual del metabolismo bacteriano, H₂S que reaccionará con el oxígeno para formar azufre elemental:



Labrado *et al.* (2019) muestra en las figuras 1 A y B una modificación a los modelos de Ruckmick *et al.* (1979). En sus modelos indica que en el caso de los de Tipo Cap rock, el oxígeno entra al sistema por infiltración de agua meteórica, atravesando capas de hidrocarburos. La solubilidad del O₂ puede disminuir con la profundidad debido al aumento de la salinidad. Para mantener el flujo de aguas meteóricas, se debe eliminar la salmuera (Ruckmick *et al.* 1979). Para el modelo estratificado el oxígeno entra al sistema hasta donde forma el azufre nativo por infiltración de agua meteórica, atravesando los niveles de hidrocarburos.

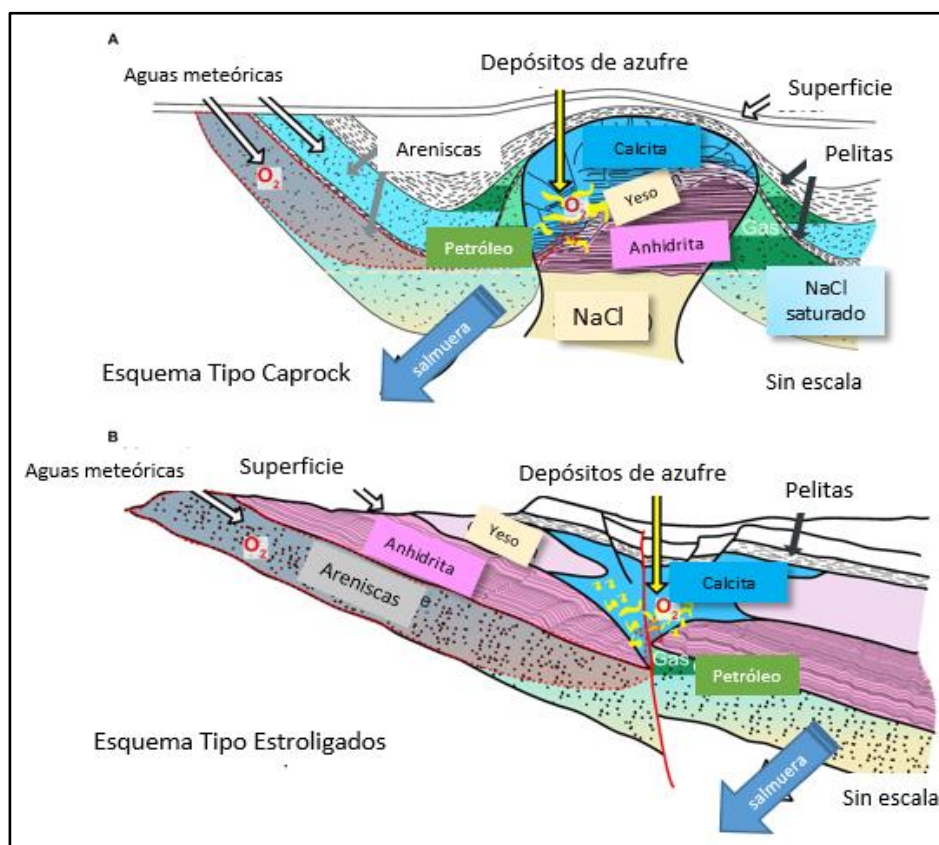


Figura 1. Esquema de los tipos clásicos de depósitos de azufre Tipo Caprock y estratificado según Labrado *et al.* (2019).

La mineralización de azufre en la Cuenca Neuquina se asocia a depósitos biogénicos tipo Caprock. Se ubica a una profundidad mayor a 400 m. El Proyecto Los Petisos constituye el primer hallazgo de azufre biogénico en América del Sur. Presenta dos horizontes mineralizados que corresponden a los Miembros yesíferos de la Fm. Huitrín (Carotti 1993).

4.1.2. Depósitos volcánicos

Los sulfuros de origen volcánico son probablemente los depósitos más distribuidos en el planeta. Son conocidos en la mayoría de las regiones volcánicas, pero principalmente en los cordones montañosos del océano Pacífico, particularmente en América Central y del Sur, Japón, Taiwán y Nueva Zelanda. Las emanaciones volcánicas con S° , SO_2 , SH_2 y la posterior condensación de estos vapores forman pequeños depósitos que se utilizan para consumo local. Gozalvez *et al.* (2004) los incluye en el modelo azufre fumarólico y los describe alojados en venillas, *stockworks* y en zonas de impregnación en niveles de tobas y coladas andesíticas en estratovolcanes. El control de la mineralización está dado por la zona de brecha y fracturas vinculadas a los centros eruptivos. La figura 2 muestra un ejemplo en Indonesia [Sulphur mining in an active volcano - BBC News](#).



Figura 2. Ejemplo de depósito de azufre en Indonesia (Tomado de [Sulphur mining in an active volcano - BBC News](#)).

Los depósitos de azufre de origen volcánico en la República Argentina fueron explotados en la década de 1940. Los yacimientos en la región del NOA se presentan en las provincias de Catamarca, Jujuy y Salta emplazados principalmente en la zona limítrofe con la República de Chile. De acuerdo con Gozalvez *et al.* (2004) la Mina Julia, en Salta (3,5 Mt y 22,5%S) constituyó el máximo exponente de la actividad minera para la época (Fig. 3), junto al volcán Overo en la provincia de Mendoza (1,2Mt y 40%S).



Figura 3. Afloramientos en la Mina Julia.

4.1.3. Evaporitas

Los depósitos de azufre evaporítico se forman en ambientes áridos o semiáridos donde las aguas superficiales, ricas en sulfatos, quedan atrapadas en cuencas cerradas. A medida que el agua se evapora, los minerales disueltos se concentran y eventualmente precipitan, formando capas de sulfato de calcio (yeso), sulfato de sodio (thenardita), y sulfato de potasio (silvinita), entre otros. El azufre elemental se puede formar a través de la reducción bacteriana de sulfatos (bacterias sulforreductoras) que transforman el sulfato en sulfuro, que se reduce a su vez para dar azufre nativo, o por procesos volcánicos en ambientes hidrotermales. Se forman así concentraciones masivas de azufre sedimentario, junto con las de origen volcánico (Fig 4).

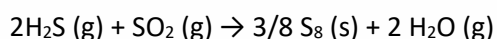
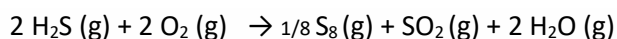
No se pueden considerar, por tanto, yacimientos químicos en sentido estricto, sino bioquímico, aunque aparecen asociados a los yacimientos químicos de evaporitas.



Figura 4. Depósitos de azufre en el Salar de Uyuni [tackphoto.com/es/foto/manantial-de-azufre-único-en-el-desierto-salar-de-uyuni-lago-salado-altiplano-meseta-gm1300934335-393104155](https://stockphoto.com/es/foto/manantial-de-azufre-único-en-el-desierto-salar-de-uyuni-lago-salado-altiplano-meseta-gm1300934335-393104155)

4.1.4. Azufre nativo separado en plantas químicas y refinerías a partir de combustibles fósiles.

El H₂S se encuentra a menudo como impureza en el petróleo o el gas natural. A partir de estos, se extrae el azufre separando el H₂S, para lo cual se aprovechan las propiedades ácidas que tiene dicho compuesto. El gas, en este proceso, se pasa a través de una solución acuosa de base orgánica, donde el único gas que se retendrá será el H₂S. Una vez eliminado el combustible, el H₂S, se reduce, pasando a azufre elemental, a través de un proceso que consta de dos etapas:



Si el reactor es múltiple, puede llegarse a la conversión de un total del 95 o 96%. Las cadenas de reacciones, son bastante similares en la producción de azufre a partir del petróleo, excepto por la parte de la eliminación de los compuestos organosulfurados, que se realiza a través de procesos de hidrogenación. [Extracción del azufre | La Guía de Química \(laguia2000.com\)](https://www.laguia2000.com/quimica/extraccion-del-azufre).

En las refinerías de petróleo, se obtiene azufre a partir de los gases residuales ricos en ácido sulfhídrico. Estos gases se producen durante el proceso de hidrofinación del diésel y la nafta. El azufre se separa de los gases residuales mediante condensación.

4.1.5. Por tostación de pirita, pirrotina, o sulfuros polimetálicos obteniéndose SO_2 que es luego convertido en H_2SO_4 o en ocasiones en azufre nativo.

Los depósitos de donde se obtienen estos sulfuros son los sulfuros masivos (VMS), depósito tipo sedimentario exhalativo (SEDEX), los cobres porfíricos y los depósitos epitermales de alta sulfuración.

Todos los sulfuros, excepto el de hierro, son materia prima para la obtención del metal. El SO_2 es un producto secundario que se debe transformar para evitar la contaminación ambiental. La pirita contiene teóricamente 46,6% de hierro y 53,1% de azufre, pero, las piritas naturales generalmente sólo contienen 42 - 47% de azufre. Pueden contener otros elementos, como cobre, cinc, plomo, arsénico, níquel, cobalto. Además, en las piritas se hallan presentes pequeñas cantidades de bismuto, antimonio, telurio, talio, cadmio, selenio, indio, plata y oro. La cantidad de azufre que queda retenida en las cenizas contenidas en las piritas depende de las impurezas que contiene. Los metales alcalinos, el magnesio y los metales alcalinotérreos fijan el azufre como sulfatos, los que resisten la descomposición incluso a las temperaturas más elevadas de tostación (unos 800 - 900 °C). El cinc forma también $ZnSO_4$, pero se disocia a temperatura elevada con formación de sulfato de hierro. ([Materiales y materias primas: azufre. Capítulo 4. Guía didáctica \(me.gov.ar\)](#)).

CAPÍTULO 5: PROYECTO LA CASUALIDAD

5.1. INTRODUCCIÓN

En la nota de Alonso (eltribuno.com/nota/2011-5-22-19-25-0-historia-del-azufre-en-salta) relata la cronología de las menciones de azufre en el Noroeste argentino, indicando que el licenciado Juan de Matienzo, Oidor de Charcas, en una carta al rey en 1566, informa de la gran abundancia de algunos minerales que pudieran llevarse a España. Posteriormente en 1826, el inglés Joseph Andrews menciona azufre en su paso por Salta en 1826 y el alemán Federico Stuart, en su memoria de 1871, relata que “Siendo gran parte de la provincia de origen volcánico se encuentra el azufre”. En 1905, Héctor Dupuy y Eugenio Dupuy solicitaron la mina de azufre Esperanza (Nº 147) en el cerro Azufre, al norte del salar de Pastos Grandes. Ese mismo año (1905) en el diario La Idea de Salta, refleja la visita a la provincia del doctor Federico Reichert para estudiar los yacimientos de boratos y los de azufre, estos últimos para la fabricación de ácido sulfúrico, indispensable para la elaboración del ácido bórico. En su informe del año 1907 reporta que al azufre en la cordillera volcánica como límite con Chile. También en ese año, Gonzalo M. Clivio denuncia las minas de azufre Argentina I y Argentina IV para el Distrito de Lullaillaco. En 1940, se fundó en Salta la Compañía Azufrera Argentina S. A., integrada para llevar a cabo la explotación de los yacimientos de azufre en la cordillera salteña limítrofe con Chile.

En 1942, la Compañía Azufrera Argentina S. A., integró una empresa mixta con el Estado por intermedio de la Dirección General de Fabricaciones Militares, bajo la denominación de Industrias Químicas Nacionales S. M. En 1952, Fabricaciones Militares compró todo el paquete accionario y el yacimiento pasó a conocerse como EAS (Establecimiento Azufrero Salta, Fig. 5).

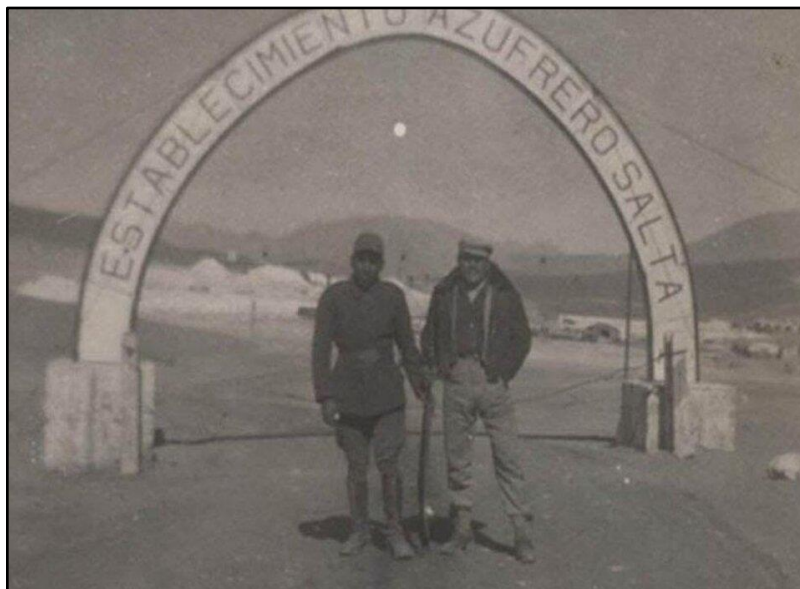


Figura 5. Establecimiento Azufrero de Salta, La Casualidad.

En 1947, visitó la Puna el médico Santiago D. Bazán, director provincial de Higiene y Asistencia Social del gobierno del Dr. Lucio Alfredo Cornejo, y realiza el trayecto entre San Antonio de los Cobres

hasta mina La Casualidad, que estaba en pleno funcionamiento, tanto la explotación de las distintas concesiones mineras (Julia, San Roque y otras) como la planta de refinación del azufre. (eltribuno.com/nota/2011-5-22-19-25-0- historia-del-azufre-en-salta).

5.1.1. Ubicación

La Mina Julia se ubica en el Dpto. de Los Andes, Municipio del Tolar (25°4'0" S, 68°14'0" O) a una altura media de 5505 m.s.n.m. (Fig. 5). Para llegar desde la ciudad de Salta (km 0), se debe tomar la ruta nacional N° 51 cruzando por San Antonio de los Cobres (km 170), luego Olacapato – Cauchari - Estación Salar de Pocitos (km 204) y Tolar Grande (km 365) hasta llegar a Estación Caipe (km 430). Desde allí se utiliza el tramo pavimentado de la ruta provincial N° 27 hasta llegar al Campamento Minero de La Casualidad (km 520), finalmente por un camino consolidado de detritos finos se accede en unos 26 Km a la mina de referencia luego del cruce al Salar de Lullailaco y Socompa. La ruta nacional N° 51 se encuentra en buen estado de mantenimiento, mientras que la ruta provincial N° 27 si bien está asfaltada desde la estación Caipe hasta el Campamento Minero de la Casualidad, presenta el pavimento parcialmente deteriorado en algunos sectores a causa de la falta de mantenimiento (Fig.6).

El camino que conduce a la mina, desde el campamento La Casualidad, se presenta en regulares condiciones por falta de uso y principalmente, por la acumulación de detritos gruesos arrastrados por los mantos de nieve que en la época invernal caen al camino. Este tramo es el que se debe reparar en forma anual.

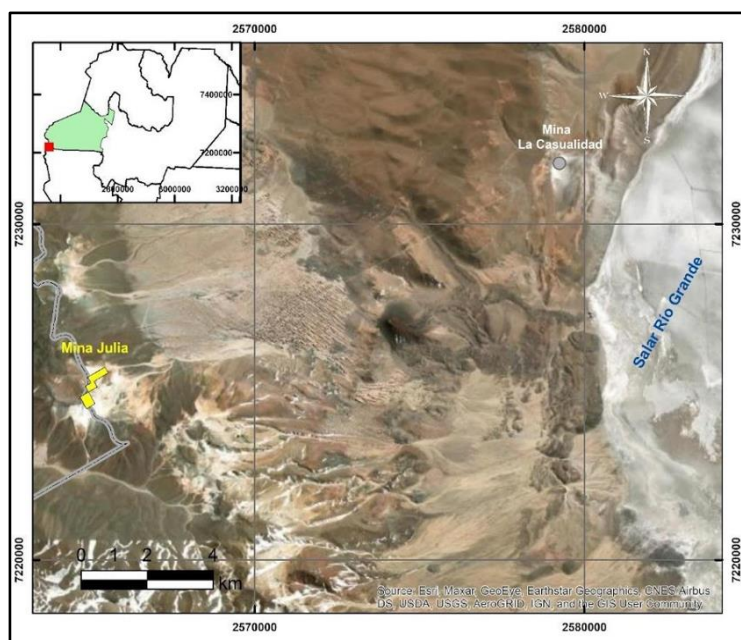


Figura 6. Mapa de ubicación de Mina Julia y La Casualidad.

5.1.2. Antecedentes y situación socioeconómica de las comunidades locales. El pueblo “La Casualidad”

Como se mencionó, en el año 1942 se creó la Compañía Azufrera Argentina S.A y en 1947 la empresa fue adquirida en un 50% por la Dirección General de Fabricaciones Militares completando el 100% del paquete accionario en el año 1952 cuando la empresa pasó a llamarse Establecimiento Azufrero Salta.

Desde la década de 1940 hasta el cierre del establecimiento en 1979, el azufre fue intensamente explotado, convirtiendo al cerro Estrella, Mina Julia y su población en La Casualidad en el principal productor de Argentina que abasteció aproximadamente un tercio del consumo interno. La planta de La Casualidad, ubicada a 4.200 m.s.n.m., produjo 10.000 toneladas por año, durante las décadas de 1940 y 1950, hasta llegar a principios de la década de 1970 a 30.000 toneladas, pico máximo de producción registrado, con un azufre refinado al 99,7% de pureza. En los primeros años de explotación, el mineral era muy rico y estaba formado por cristales puros de azufre. Salta tenía el yacimiento de azufre más importante del país y todavía posee reservas importantes de este mineral estratégico.

5.1.3. Marco Legal

En Argentina los derechos, obligaciones y procedimientos relacionados a la adquisición, explotación y aprovechamiento de las sustancias minerales se encuentran regidas por el Código de Minería de la Nación. Este Código clasifica a las sustancias en tres categorías, cada una de ellas con sus particularidades en cuanto a la naturaleza e importancia económica de las sustancias minerales, condiciones de presentación de los yacimientos, dominio o propietario y al régimen jurídico para su aprovechamiento, entre otras ([InfoLeg - Información Legislativa](#)).

El artículo 3 del Código de Minería indica que:

Corresponden a *la primera categoría*: Aquellas minas en las que el suelo es un accesorio, que pertenecen exclusivamente al Estado y que sólo pueden explotarse en virtud de concesión legal otorgada por autoridad competente. El Estado, reconoce en virtud de una disposición imperativa de la ley un derecho de explotación sobre una zona de su patrimonio minero a favor de los particulares mediante el cumplimiento por parte de éstos de las condiciones que le son inherentes.

El **azufre** se incluye por la ley 25.225 en esta categoría (artículo sustituido por art. 1° de la Ley N° 25.225B.O. 29/12/1999.)

La reforma constitucional de 1994 estableció que corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos minerales, mientras que la Ley de Inversiones Mineras N° 24.196 de 1993 estableció un nuevo marco para la actividad. Además, el art. 41 CN (Cláusula ambiental) reconoce el derecho al ambiente sano y equilibrado y al desarrollo sustentable y asigna el uso racional de los recursos naturales como obligación de todos los habitantes, siendo las autoridades las encargadas de velar por tal consigna.

En la provincia de Salta, el Código de Minería provincial indica que el procedimiento de las actividades regidas por el Código de Minería y demás leyes de la materia se registrará por las disposiciones del Código de Fondo y de este Código. El Código de Procedimientos en lo Civil y Comercial de la Provincia, será de aplicación supletoria en toda cuestión no regulada especialmente en el presente. [1-LEY-7141-SALTA-LEY-DE-PROCEDIMIENTOS-MINEROS.pdf \(economiasalta.gob.ar\)](#).

5.2. LÍNEA DE BASE AMBIENTAL

La línea de base refiere al estado previo del área donde se planea desarrollar un proyecto. Describe el área de influencia del mismo para posteriormente, evaluar los impactos que pudieran generarse sobre los componentes del medio físico, biológico y social. Es decir que se trata de una “fotografía” de las condiciones previas a la modificación del área, que brinda todas las evidencias y apreciaciones para dar comienzo al desarrollo del proyecto y comparar con los cambios logrados posteriormente (Dellavedova 2010).

5.2.1. Línea de base ambiental del medio físico

Incluye la caracterización y análisis del clima, la calidad del aire, la geología, la geomorfología, la hidrogeología, la hidrología y la edafología.

5.2.1.1. Marco Geológico regional

La zona de estudio está situada hacia el suroeste de la Puna, que junto con el Altiplano de Perú y Bolivia constituye la segunda cordillera de mayor altitud después del Tíbet. El levantamiento y vulcanismo en la Puna comenzó en el Mioceno temprano (aprox. 20-15Ma) en respuesta al engrosamiento y acortamiento horizontal de la corteza, a su vez una respuesta al aumento de la tasa de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana, y la disminución del ángulo de subducción (Coira *et al.*, 1982; Pilger 1984, Isacks 1988, Jordan y Gardeweg 1989, Allmendinger *et al.* 1997 y Gregory-Wodzicki 2000). La deformación de la corteza superior (cabalgamiento y plegamiento) se concentra principalmente en las cordilleras que limitan el este de la Puna (las Sierras Pampeanas y el Sistema de Santa Bárbara; Jordan y Allmendinger 1986, Allmendinger *et al.* 1997), lo que sugiere que el levantamiento se mantiene isostáticamente (James y Sack 1999) o por compresión de campo lejano (Allmendinger *et al.* 1997). El interior del altiplano de la Puna se caracteriza por grandes cuencas delimitadas por fallas con drenaje interno (salares) que se formaron desde mediados del Mioceno (6-15 Ma; Vandervoort 1997), sugiere un colapso gravitacional extensional a pesar de las evidencias de un sentido inverso del movimiento en algunas fallas en los bordes (Jordan y Alonso 1987).

Una característica importante de la evolución de la Puna es la presencia de ignimbritas que acompañó al vulcanismo central andesítico a dacítico en el Mioceno tardío - Plioceno. Las composiciones geoquímicas e isotópicas de estas ignimbritas dacíticas a riolíticas indican una derivación en parte por anatexis de la corteza, presumiblemente alimentada por el voluminoso emplazamiento de magmas más

máficos, derivados del arco, en la parte baja y media de la corteza (Francis *et al.* 1980, 1989, de Silva 1989b, Sparks *et al.* 1989, Coira y Kay 1990, Ort *et al.* 1996; Allmendinger *et al.* 1997).

Posteriormente al evento de deformación Diaguita del Plioceno (2-3 Ma; Coira *et al.* 1993), la Puna fue sometida a deslizamientos y fallas extensionales relacionadas con el acortamiento NE-SO y la extensión NO-SE, que localizaron la erupción de pequeños volúmenes de lava basáltica andesítica a shoshonítica (Deruelle 1991, Schreiber y Schwab 1991, Marrett y Emerman 1992, Marrett *et al.* 1994; Allmendinger *et al.* 1997). El vulcanismo de arco moderno se restringe principalmente al borde occidental del altiplano, donde grandes estratovolcanes cuaternarios como Lascar y Lullillaco han estado activos históricamente.

5.2.1.1.1. Lineamientos

El área se caracteriza por el control estructural que ejercen los lineamientos a escala regional sobre la actividad volcánica, la alteración hidrotermal y la mineralización asociada en los Andes chilenos y argentinos. Los lineamientos presentan varias orientaciones, pero las principales tienen una dirección NE y SO, como los de Archibarca y Calama - El Toro (Allmendinger *et al.* 1983). Salfity (1985) mostró estos lineamientos en diagonal a través de la Cordillera desde el este de la Puna hasta la costa chilena (Fig. 7), y Richards (2000) y Richards *et al.* (2001) han discutido los controles estructurales sobre la localización de gigantescos depósitos de pórfidos de cobre del Eoceno tardío-Oligoceno temprano en el norte de Chile.

En Argentina, estos lineamientos controlan más claramente los centros eruptivos hacia el sureste, alejándose del eje principal del arco volcánico. Por ejemplo, a lo largo del lineamiento Archibarca, la actividad volcánica del Cenozoico Tardío se extiende más de 200 km más allá del arco principal y termina en la gran caldera Cerro Galán del Mioceno medio-Plioceno. La naturaleza de estos lineamientos representa anisotropías estructurales o composicionales en algunos casos pre-Cenozoicas, que se han reactivado repetidamente como planos de debilidad a lo largo de su historia (Allmendinger *et al.* 1983, Jordan *et al.* 1983, Salfity 1985, Matteini *et al.* 1997, Coutand *et al.* 2001). Estos lineamientos han sido conductos permeables que permitieron el ascenso localizado y periódico de magmas profundamente diferenciados (Salfity 1985, Schreiber y Schwab, 1991, Matteini *et al.* 1997, Riller *et al.* 2001). Los productos volcánicos encontrados en el área de Corrida de Cori van desde lavas basálticas andesíticas del Mioceno temprano-medio e ignimbritas dacíticas, pasando por andesitas y dacitas del Mioceno tardío-Pleistoceno, hasta conos de ceniza basálticos andesíticos del Cuaternario tardío.

El lineamiento Archibarca es uno de varios lineamientos transversales con rumbo NO-SE que atraviesan los Andes centrales de Argentina y Chile. El vulcanismo está relacionado con la subducción de los Andes centrales, del Mioceno tardío al Cuaternario. Limita principalmente a un arco de unos 50 km de ancho que forma el eje N-S de la Cordillera, pero que se extiende a lo largo de los lineamientos transversales hasta 200 km hacia el SE. Se interpreta que los lineamientos son estructuras de basamento o anisotropías profundas de larga duración, que pueden controlar la localización del magmatismo y, en algunos casos, depósitos de mena magmático-hidrotermal (por ejemplo, el depósito de Cu porfídico Escondida, Chile). Se han cartografiado y muestreado estructuras volcánicas a lo largo de una transecta

de 50 km desde el Cerro Lullaillaco, un gran estratovolcán cuaternario K dacítico, hasta la Corrida de Cori, una cadena de conductos K andesíticos del Plioceno-Pleistoceno. Hacia el sudeste el contenido de K y el predominio de lavas dacíticas en el Cerro Lullaillaco aumenta mientras que la afinidad geoquímica de las rocas volcánicas del Cenozoico tardío varía poco en el tiempo o el espacio (Richards y Villeneuve 2002). Esta uniformidad se extiende más al SE hasta el Cerro Galán. La cordillera volcánica de Corrida de Cori ha experimentado una intensa alteración fumarólica con deposición de abundante sulfato y azufre nativo (previamente extraído en la Mina Julia).

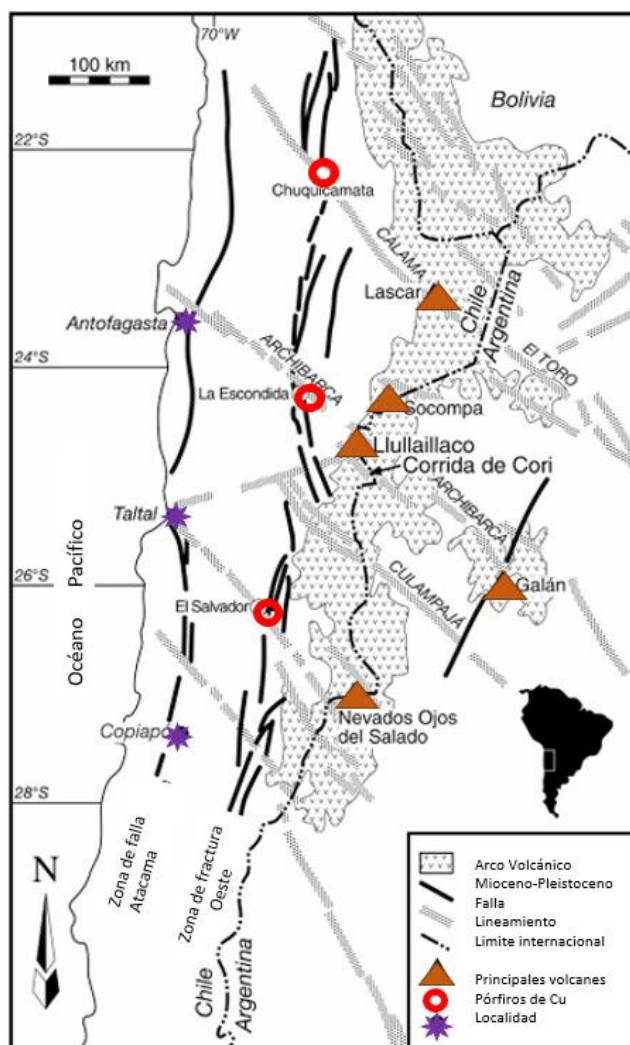


Figura 7. Mapa geológico regional que muestra la ubicación de fallas y lineamientos a escala regional (modificado de Salfity 1985, Salfity y Gorustovich 1998), y la extensión del volcanismo del Mioceno- Pleistoceno de los Andes Centrales. Se localizan los principales centros volcánicos y depósitos de pórfidos de Cu en relación con algunos de estos lineamientos.

5.2.1.1.2. Estructura

El estilo estructural dominante de la Puna es de bloques de orientación submeridiana, elevados y hundidos, inclinados, con fracturas inversas en los flancos. El fracturamiento submeridiano está

intersectado por estructuras de rumbo ONO-ESE como las fracturas Calama – Olacapato - Toro y Cerro Rincón - Cerro Azufre (Fig.8).

Las fracturas de rumbo andino controlan la inclinación de los bloques hacia el este u oeste, mientras que las fracturas de rumbo a ONO-ESE, controlarían la inclinación hacia el norte o hacia el sur. Ambos fracturamientos han segmentado el basamento puneño en bloques que tuvieron gran influencia en el control de las cuencas terciarias y cuaternarias. Entre las fracturas de rumbo ONO-ESE la más importante es la de Olacapato o transpuneña, con un recorrido de unos 700 km, atravesando varias provincias morfoestructurales del orógeno. Varios autores han analizado el papel del fracturamiento transversal de la Puna. Whiting (1959) y Baldi (1980) lo relacionaron con las principales mineralizaciones del noroeste argentino mientras que Salfity *et al.* (1984) lo consideraron en función del control de la sedimentación y efusividad de las cuencas cenozoicas. Viramonte *et al.* (1984) lo asociaron con el desarrollo del vulcanismo y su quimismo. Por su parte, Sureda *et al.* (1986) lo vinculó con los fenómenos metalogenéticos y Salfity (1985) con el control paleogeográfico que los lineamientos tienen sobre las cuencas.

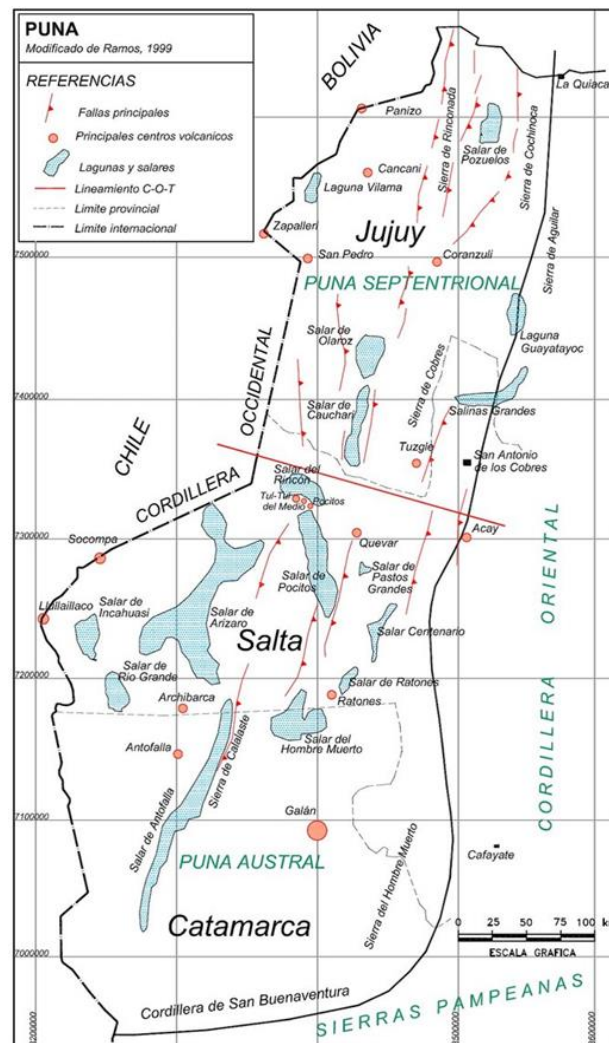


Figura 8. Mapa del NOA con los principales lineamientos estructurales (Tomado de Arredes 2022).

5.2.1.2. Geología del área de estudio

El área abarca una cadena de volcanes de edad Cenozoica tardía, conocidas como Corrida de Cori, e incluye los picos Cerro Negro (5579 m), el volcán Lastarría o Azufre (5706 m), el Cerro Escorial (5451 m) y el Cerro Estrella (aprox. 5400 m), que se extienden a lo largo de la frontera entre Chile y Argentina. La mayoría de estos picos volcánicos muestran evidencias de una intensa alteración fumarólica. Como se mencionó, el azufre nativo fue extraído hasta 1979 en la Mina Julia, situada entre el Cerro Escorial y el Cerro Corrida de Cori.

En el volcán Lastarría o Azufre se producen fumarolas activas y flujos de azufre fundido (Fig.9) y en el Cerro Escorial hay fuentes termales (congeladas en la superficie), fumarolas de lodo y agujas de fumarola bien conservadas que atestiguan una actividad reciente (Naranjo y Cornejo 1992).



Figura 9. Volcán Lastarría (Tomado de [maxresdefault.jpg \(1280x720\) \(yting.com\)](#)).

Las rocas del basamento no se encuentran visibles en el área de estudio, están cubiertas por depósitos volcánicos y sedimentarios del Cenozoico Superior. Sin embargo, las evidencias de afloramientos dispersos al este, sugieren que el basamento consiste en granitos paleozoicos (Ordovícico) y rocas sedimentarias y volcánicas. Los granitos del Permo-carbonífero y las rocas volcánicas félsicas de la Formación La Tabla afloran al oeste en Chile (Gardeweg *et al.* 1984, 1993, Zappettini *et al.* 1997, Zappettini y Blasco 1998). Los clastos de granito y de arenisca encontrados en una ignimbrita en la zona del mapa apoyan esta interpretación, que también es coherente con los modelos de basamento de Damm *et al.* (1994) y Lucassen *et al.* (1999).

La disminución del ángulo de subducción en el Mioceno temprano-medio trajo una amplia actividad volcánica hacia el este de la Puna que se localizó a lo largo del borde occidental del plateau. Rupturas localizadas controladas por lineamientos se extendieron hacia el sureste. Los afloramientos expuestos al noreste a lo largo de la carretera cerca de la planta de procesamiento de Mina Julia revelan secuencias de hasta 2 km de espesor de los depósitos volcanoclásticos y de las lavas intercaladas cartografiadas como parte del complejo volcano-sedimentario de la Quebrada del Agua (Zappettini y Blasco 1998). En la parte este-central de la Corrida del Cori, se observan algunos de los afloramientos

de lava y de ignimbrita dacítica soldada de alto grado. Las ignimbritas tienen una edad $40\text{Ar}/36\text{Ar}$ de $16,78 \pm 0,18$ Ma, confirmando la edad Mioceno temprano-medio para esta secuencia.

En el área noroeste (Lullaillaco), predominan las lavas de composición dacítica mientras que las de composición andesítica son más abundantes en Corrida de Cori. La mayoría de las coladas se presentan como láminas coherentes, ligeramente buzantes, en los flancos de conos débilmente erosionados y como mantos horizontales, lo que sugiere una mínima perturbación tectónica desde la erupción.

Una característica prominente del área de la Corrida de Cori es una gran capa de ignimbrita que cubre las laderas inferiores de la cordillera volcánica. La ignimbrita se extiende hasta 10 km de la presunta fuente de erupción en el Cerro Escorial, cubriendo un área de aproximadamente 105 km^2 , con un espesor máximo de aproximado 6 m, y un volumen máximo cercano a los $0,6 \text{ km}^3$. La ausencia de depósitos proximales de ignimbrita en las laderas empinadas de los edificios es una característica común de los flujos piroclásticos derivados del colapso de columnas eruptivas, acumulando los depósitos sólo cuando la velocidad se reduce en la ruptura de la pendiente. Naranjo y Cornejo (1992) otorgan una edad cuaternaria de K-Ar en biotita de $1,3 \pm 0,6$ Ma para la ignimbrita del lado chileno de la frontera, mientras que Richard (2002) mediante análisis de biotita $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ sugiere una edad cuaternaria más joven de $0,457 \pm 0,013$ Ma del lado argentino.

El último evento volcánico en la Corrida de Cori fue la extrusión post-ignimbítica de coladas andesíticas desde los cráteres prominentes en el Cerro Escorial, y pequeños flujos provenientes del Cerro Corrida de Cori. Los flujos del Cerro Escorial arrojan edad en biotita $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ de aprox. $0,342 \pm 0,025$ Ma. La mayor parte de la lava del Escorial descendió hacia el suroeste, en el lado chileno de la frontera, pero algunos pequeños lóbulos fluyeron hacia el noreste. La extrusión de lavas tras el vulcanismo explosivo es característica de la evolución de los volcanes compuestos, y probablemente refleja la desgasificación progresiva del cuerpo magmático fuente (Stix *et al.* 1993).

5.2.1.2.1 Geomorfología

El paisaje en el entorno de La Casualidad- Mina Julia presenta una morfología vinculada con lavas, tobas e ignimbritas producto de la actividad volcánica del Cenozoico Superior y un clima desértico de alta montaña (Fig.10). Se destacan las altas cumbres del arco volcánico andino integrado por imponentes conos volcánicos que sobrepasan los 6.000m de altura y campos lávicos e ignimbriticos. Desde las laderas de estos relieves positivos evolucionan extensos piedemontes que conectan en transición con una amplia planicie salina en el sector oriental, donde se desarrolla el salar de Río Grande. Distinguiéndose así tres zonas geomorfológicas principales (Fig. 10).

Paisajes volcánicos

El vulcanismo cenozoico está muy bien representado por numerosos complejos volcánicos donde se destaca la cadena montañosa Corrida de Cori y su continuación austral Corrida de Río Grande. Los diversos aparatos volcánicos conforman la morfología típica de los estratovolcanes andesítico-dacítico de la Puna.

Seggiaro *et al.* (2007) reconocieron por lo menos tres volcanes cuyos cráteres y chimeneas se encuentran cubiertos y que con sus eyectos conformaron el cerro Estrella, donde han reconocido secuencias de lavas y tobas con decenas de metros de potencia cada unidad. Las tobas, bien estratificadas y laminadas se destacan en el terreno.

A este complejo volcánico se superpone un proceso de alteración y transformación post-volcánico, producto de la actividad fumarólica en solfataras y en cercanías a cráteres. El azufre elemental se forma en estos yacimientos exhalativos post-volcánico depositándose esencialmente en sectores con lavas y tobas fuertemente alteradas y permeabilizadas, rellenando poros, diaclasas y fisuras, e impregnándolas en mayor o menor grado. Se generan así rocas con tonos entre blanco y grisáceo, porosas y deleznales, según el grado de alteración que presentan. En la zona se destacan también coladas basálticas principalmente al oeste del salar de Río Grande.



Figura 10. Cerro Estrella

Acumulaciones detríticas modernas

Son depósitos coluviales y aluviales que evolucionan desde las laderas de los relieves positivos, cubriendo a los afloramientos o formando extensos depósitos de piedemonte, algunos de los cuales conectan en transición con una amplia planicie salina en el sector oriental, donde se desarrolla el salar Río Grande. Se incluyen también depósitos resultantes de movimientos de remoción en masa, depósitos glaciares y depósitos de arcillas de ambientes *playa lakes*.

Paisaje de playas salinas

Los bajos salinos como el salar de Río Grande son otras de las particularidades más notables de esta región, con una superficie de 220 km², se encuentra a una altura cercana a los 3650 m.s.n.m., tiene forma ovalada, con un eje principal ubicado en sentido norte-sur. Corresponde a una cuenca endorreica controlada por edificios volcánicos. Presenta gradación en el relleno, caracterizado por bordes en los que predominan los depósitos aluviales, y zonas centrales con depósitos evaporíticos. La superficie muestra costras salinas características, con desarrollo de polígonos de hasta 2-3 m de diámetro y hasta 0,5m de espesor. Los depósitos evaporíticos salinos alojados en estas cuencas contienen básicamente sulfatos y halita.

La figura 11 muestra el mapa geomorfológico tomado de la Hoja Geológica 2569 IV- Antofalla.

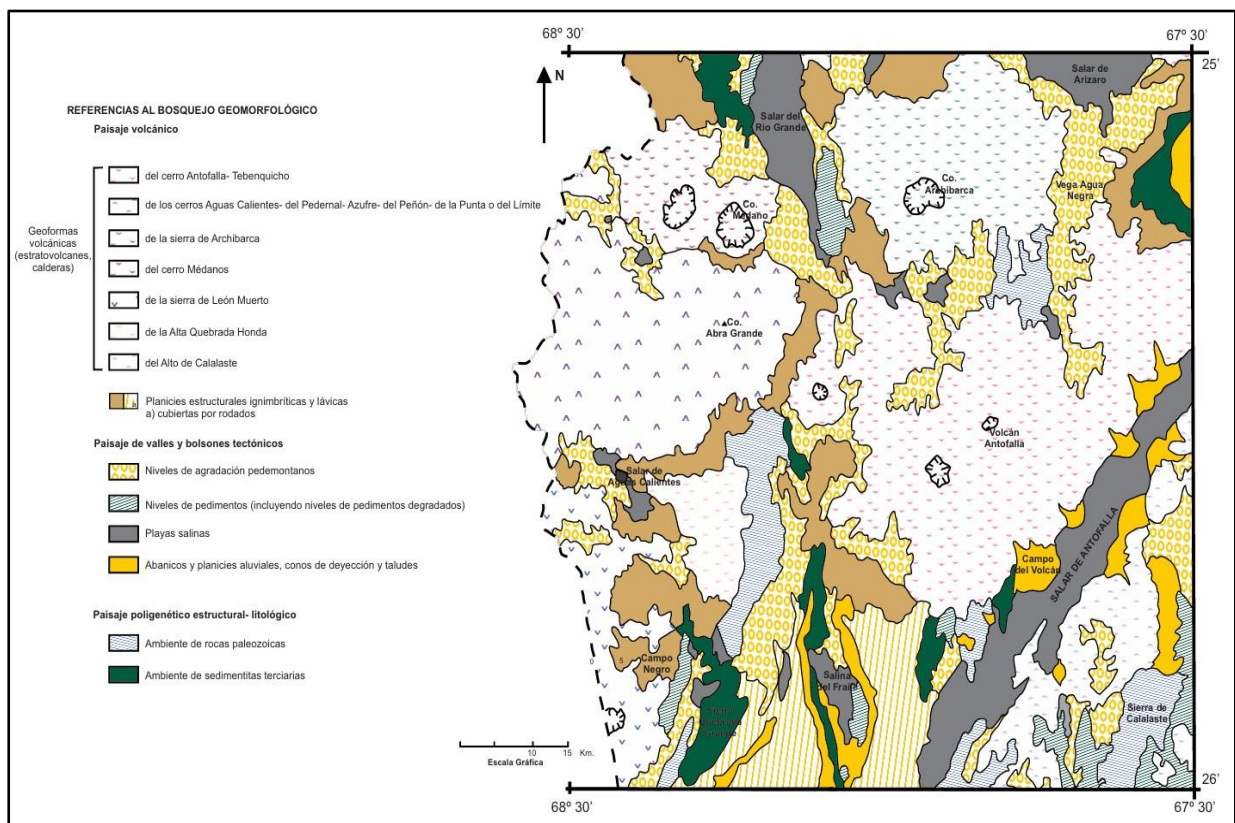


Figura 11. Mapa geomorfológico. Tomado de la Hoja Geológica 2569 IV- Antofalla, Seggiaro et al. 2007.

5.2.1.2.2. Alteración fumarólica y depósitos de azufre nativo

El Distrito Cerro Estrella se ubica en la vertiente oriental del cerro homónimo, que marca el límite sur de la Corrida del Cori, a 5500 msnm, provincia de Salta. En el área aparecen por lo menos tres volcanes que con sus eyectos conformaron el Cerro Estrella, en el que se distinguen cinco secuencias de lavas y sus correspondientes tobas con marcadas diferencias petrológicas, y cuya edad es pliocena inferior.

Las zonas de alteración hidrotermal muestran en superficie forma de óvalos alineados o fajas, los que morfológicamente representan cuerpos tabulares a modo de “copa invertida trapezoidal” (Lurgo Mayón *et al.* 1999).

La alteración es silicificación en el interior de las áreas, con alunita, yeso, thenardita y mirabilita en los bordes de estos cuerpos. Son comunes jarosita y otros minerales epigenéticos. El azufre se ha depositado esencialmente en sectores fuertemente alterados y permeabilizados, como fases de reemplazo y sustitución masiva o invasión en lavas porosas. Las diferencias composicionales que presentan las tobas y lavas por efecto de la actividad fumarólica y de los fluidos hidrotermales, unido al efecto de los fluidos solfatáricos, generaron una gran variedad de menas, que se depositaron en los poros y espacios vacíos de las rocas. Se emplazan importantes depósitos de azufre que constituyen los yacimientos conocidos como Nº 3 y Nº 4 (o Mina Julia) (Seggiaro *et al.* 2007)

Los volcanes del Mioceno tardío-Plioceno de la Corrida de Cori, y en menor medida los de la zona de Llullaillaco, presentan una intensa alteración fumarólica. Desde la distancia, los picos de la Corrida de Cori parecen estar permanentemente cubiertos de nieve, pero el color se debe a la intensa alteración de las rocas volcánicas. Las secuencias piroclásticas poco consolidadas y ricas en vidrio volcánico que forman estos edificios fueron muy susceptibles a la alteración hidrolítica por los vapores volcánicos ácidos, y se han reducido a diversos polimorfos de sílice (cuarzo, tridimita, cristobalita), sulfatos (yeso, jarosita) y azufre nativo (Fig.12).

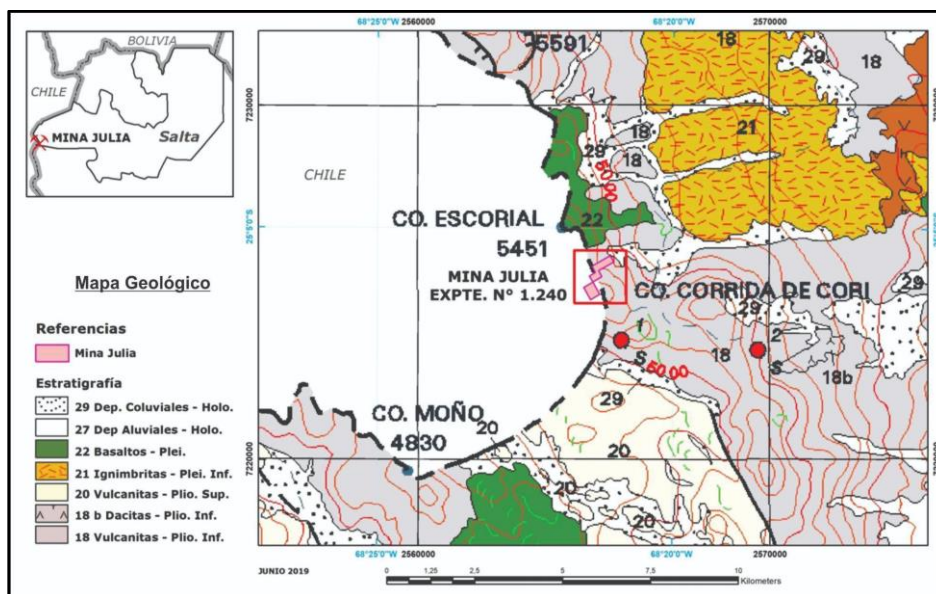


Figura 12. Mapa geológico. Modificado de la Hoja Antofalla 2569-IV.

5.2.1.3. Clima

El clima de la Puna es extremo, frecuentemente ventoso y seco, teniendo presente las características geográficas y los registros de temperatura y precipitaciones. Pontussi (1995) describe al clima de la Puna como Subtropical Árido Puneño caracterizado por escasas precipitaciones, alta heliofanía y marcado contraste entre sus amplitudes térmicas diarias, donde el relieve ejerce una gran

influencia. Las nieves permanentes se observan en las cimas de las montañas por encima de los 5.800 m.s.n.m, como sucede en el cerro Lullaillaco. La radiación solar es intensa, especialmente de octubre a marzo.

El verano es cálido durante el día, con temperaturas que pueden superar los 30º y por las noches la temperatura es cercana a 0º. El invierno es riguroso, con temperaturas extremas de hasta 30º bajo cero. Las amplitudes térmicas, tanto en invierno como en verano, son marcadas. La presión atmosférica está influenciada por la altura; la presión media es de 410 mm de mercurio.

La máxima diaria media (línea roja continua) muestra la media de la temperatura máxima de un día por cada mes de Puna. Del mismo modo, el mínimo diario medio (línea azul continua) muestra la media de la temperatura mínima. Los días calurosos y noches frías (líneas azules y rojas discontinuas) muestran la media del día más caliente y noche más fría de cada mes en los últimos 30 años (Fig.13).

[Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puna - meteoblue](#)

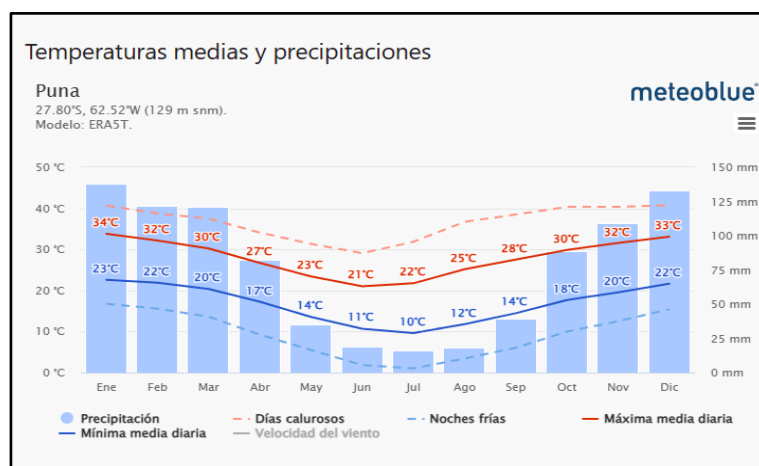


Figura 13. Temperaturas medias y precipitaciones [Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puna - meteoblue](#)

La figura 14 muestra las temperaturas máximas en la Puna ([Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puna - meteoblue](#)).

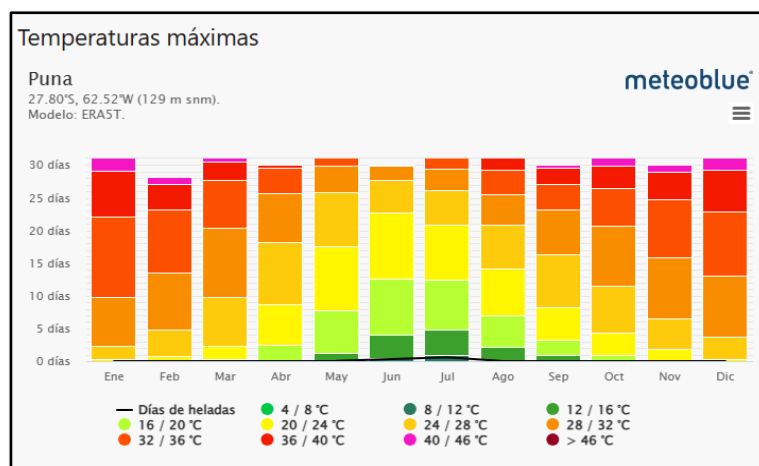


Figura 14. Diagrama de temperaturas máximas

El diagrama de precipitación para la Puna muestra su variación mensual (Fig.15). ([Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puna - meteoblue](#))

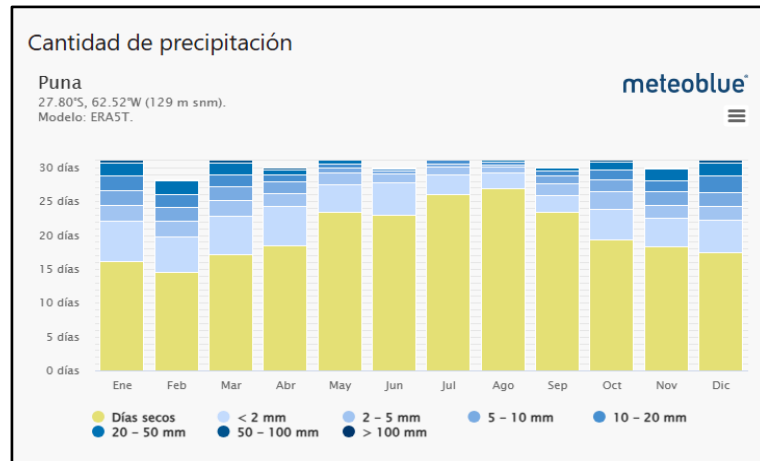


Figura 15. Precipitaciones anuales en el área del proyecto

Las precipitaciones medias anuales son de 50 mm, las lluvias en general torrenciales y casi siempre van acompañadas con granizo o fuertes nevadas, pudiendo provocar derrumbes ocasionales con cortes de rutas. Las tormentas eléctricas son frecuentes.

El aire normalmente es puro y seco (Fig.16). Cuando se producen vientos fuertes se forman tormentas de polvo que tornan dificultosa la respiración.

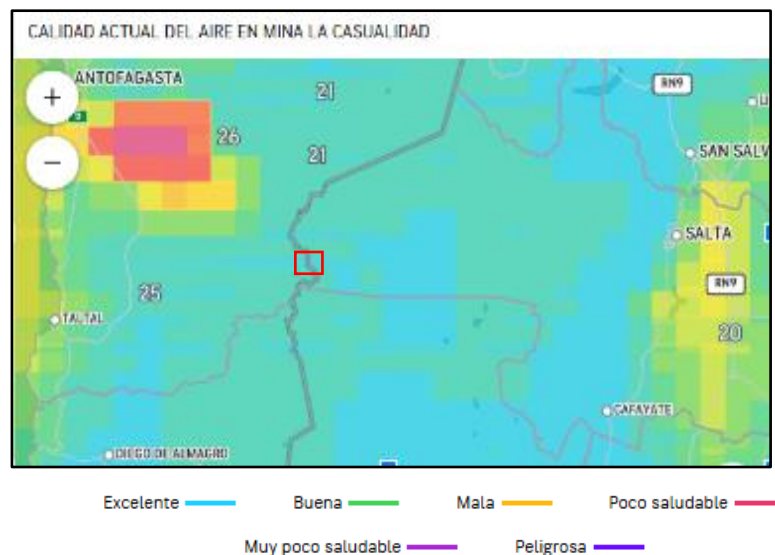


Figura 16. Calidad del aire [Índice de calidad del aire de Mina La Casualidad, Salta, Argentina | AccuWeather](#)

El diagrama de Puna muestra los días por mes, durante los cuales el viento alcanza una cierta velocidad ([Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puna - meteoblue](#)) (Fig.17).

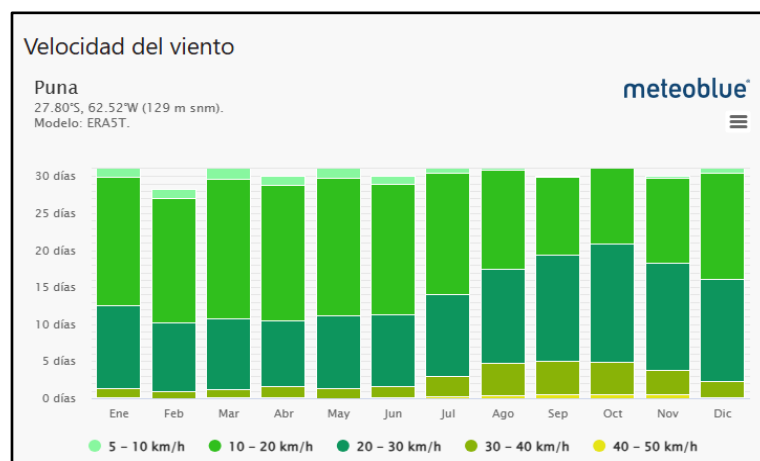


Figura 17. Diagrama de velocidad de los vientos en la Puna

A unos 14 km al noreste del proyecto se encontraba la estación climatológica La Casualidad, a una altura de 4180 m.s.n.m., lo que implica una presión atmosférica de 470 mm de mercurio, contra los 760 mm al nivel del mar. Si bien en la actualidad está abandonada quedan registros que muestran los principales parámetros meteorológicos de la región. Así tenemos por ejemplo algunos datos para el período 1963-1972 (Cuadro 2).

Cuadro 2: Datos de precipitaciones en el periodo 1963-1972

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación media (mm)	6	4	0	1	5	2	4	4	6	0	1	4	37
Presión Atmosférica (mb)	629,3	628,9	629,2	629,6	629,7	629,7	630,7	629,9	630	629,7	629,7	629,9	629,7
Temperatura media (°C)	8	8,4	6,8	4,3	2	1,1	-2,6	-0,1	2,2	4,3	6,5	7,6	3,9
Veloc media viento (km/h)	16	17	18	19	17	22	24	23	20	20	18	16	19

5.2.1.4. Recursos hídricos

La Mina Julia ubicada en la Corrida del Cori, cuya vertiente oriental desagua en la cuenca endorreica del salar Río Grande. Los cauces temporarios que desaguan en la misma permanecen secos la mayor parte del año y solo se activan en verano. El escurrimiento temporario está concentrado en el alto relieve desarrollado en el marco rocoso de dicha cadena volcánica definiendo el límite occidental de esta cuenca. Aquí el comportamiento mecánico de las rocas y las pendientes naturales que tienen, reducen la pérdida por infiltración. Cuando los cursos ingresan a los conos aluviales se infiltran rápidamente. Es así como el carácter de cursos concentrados temporarios es válido para el tramo montañoso, mientras que a partir de la descarga en los ápices de los planos aluviales predomina la componente subterránea alimentando en este caso, a la depresión del salar Río Grande (Fig. 18).

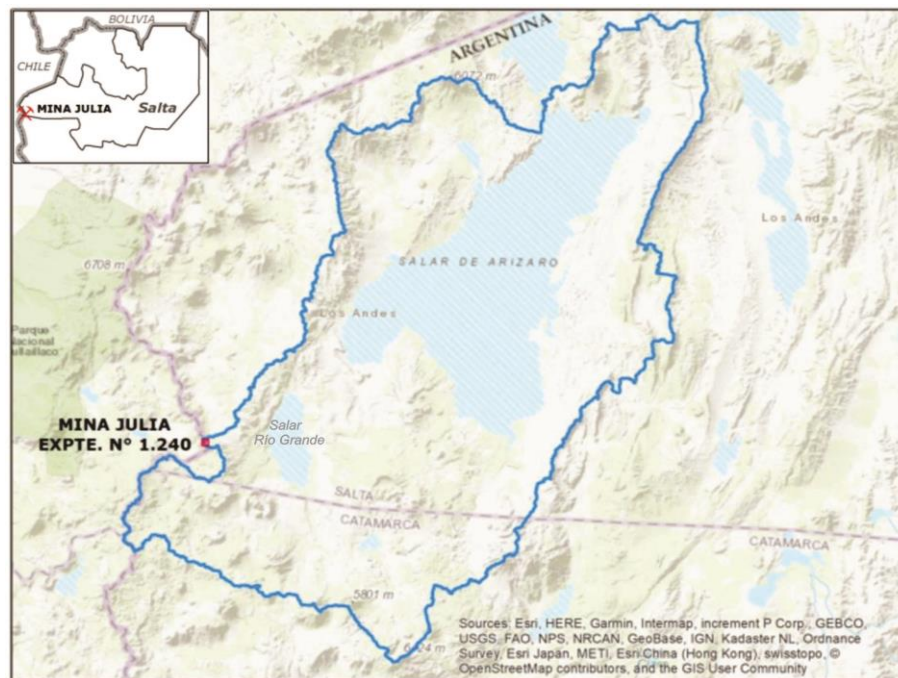


Figura 18. Mapa hidrológico de la Subcuenca Arizaro.

5.2.1.5. Suelos

En la Puna el color de los suelos transportados se corresponde con la litología de las entidades geológicas que los originaron. Se distribuyen en forma longitudinal. De acuerdo con la clasificación taxonómica de la F.A.O. (1976), en el área de estudio se distinguen los siguientes tipos de suelos: Litosoles, Fluvisoles, y Solonchaks (Fig.19).

Los **Litosoles** son los suelos que corresponden a las estructuras geológicas que sobresalen en la región, entre las cuales se destacan la Corrida de Cori.

Poseen incipiente o nula formación de horizontes, con abundante presencia de clastos de diversos tamaños y formas. La secuencia de horizontes es: (A)-C-R y en la mayoría de los casos se observa directamente el material original sobre la roca.

La roca madre son las vulcanitas del entorno. El relieve es de colinas, con fuertes pendientes, con drenaje y escurrimiento rápido, erosión severa, eólica e hídrica y rápida infiltración. Esta unidad está asociada a los afloramientos rocosos en distintos porcentajes según las condiciones del relieve.

Se ha reconocido en el área las siguientes asociaciones:

Asociación Afloramiento + Abra de Chorrillo (Af+Acr), se forman por la meteorización de afloramientos y depósitos coluviales provenientes de rocas andesíticas, ubicados en el área noroeste de la Corrida de Cori.

Asociación Afloramiento + Coranzulí (Af+Cz), afloramiento y depósitos coluviales provenientes de rocas piroclásticas como tobas e ignimbritas y volcanitas: dacitas y andesitas. Ubicados en el área sureste de la Corrida de Cori y sector de la mina.

Los **Fluvisoles** ocupan las áreas bajas de las cuencas endorreicas: Arizaro, Taca Taca, Río Grande, entre otras. Son suelos de incipiente desarrollo con perfiles de tipo A-C, de textura gruesa y medianamente gruesa. Se distribuyen en los glacés y conos aluviales que bordean la cuenca interna de la mayoría de los salares. Se ubican en las superficies planas con pendientes de hasta 4%.

La asociación reconocida es:

Asociación Olacapato (Af+Op), depósitos aluviales y coluviales provenientes de rocas volcánicas, dacitas y andesitas. Son comunes en los faldeos de la zona este de la Corrida de Cori.

Los **Solonchaks** se ubican en áreas periféricas a los cuerpos salinos y en los sectores terminales de conos aluviales. Son suelos de nulo o incipiente desarrollo con perfiles de tipo A-C, de textura medianamente gruesas a gruesas, y en ocasiones finas. Moderadamente alcalinos, salinos en profundidad.

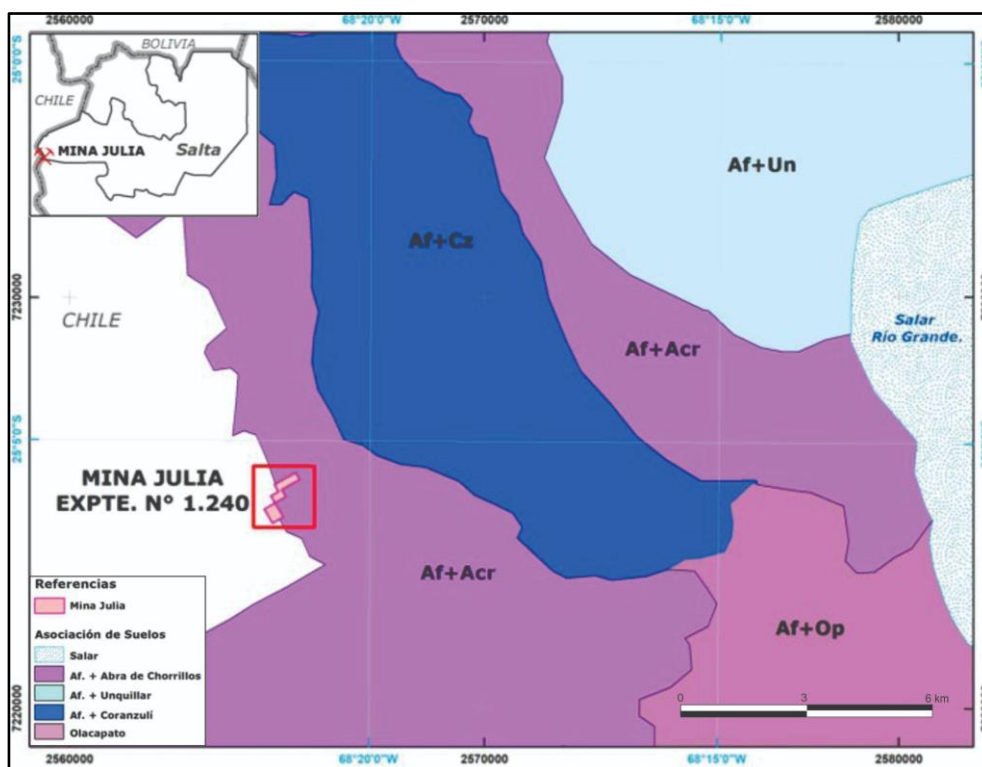


Figura 19. Mapa de suelos del área de La Casualidad. Asociación afloramiento + Abra de Chorrillo (Af+Acr), Asociación Olacapato (Af+Op); Asociación afloramiento + Coranzulí (Af+Cz), Asociación Afloramiento + Urundel (Af+Un). Modificado de Nadir y Chafatinos (1990).

5.2.2. Línea base ambiental del medio biótico

En este apartado se incluye la descripción y análisis de la biota, enfatizando en aquellas especies que se encuentren en alguna categoría de conservación.

5.2.2.1. Flora y Fauna

En la fauna del dominio andino (por encima de las 3500 m.s.n.m), la diversidad de las especies es muy baja, debido a las condiciones extremas. Fitogeográficamente, pertenece a la Provincia Puneña (Cabrera y Willink 1973). Se extiende por las altas montañas y mesetas del noroeste de la Argentina, desde Jujuy a La Rioja, entre los 3.400 y los 4.500 metros de altura sobre el nivel del mar. Limita interiormente con la Provincia Prepuneña y superiormente con la provincia Altoandina (Fig.20).

Las especies presentes en la zona de estudio son capaces de soportar temperaturas extremas (amplitud térmica) y fuertes ráfagas. Los mamíferos de la Puna argentina se encuentran representados por 54 especies, 33 géneros pertenecientes a 15 familias y 6 órdenes. Rodentia y Carnívora son los órdenes más ricos en especies comprendiendo el 69 y 15%, respectivamente, seguidos de Chiroptera con el 9%. Los individuos tienden a protegerse de diferentes maneras como en montañas, bajo rocas, grietas, pozos subterráneos, otras se entierran.

Las descripciones fisiográficas y florísticas en este sector de la Puna pertenecen a zonas secas, con excepciones puntuales con zona húmeda.

Se reconocieron diferentes especies dominantes en base a su fisiografía, sector dentro de la cuenca, altura del relieve, textura de los suelos y salinidad. La aridez del lugar produce una vegetación con poca diversidad predominando especies xerófitas y halófitas, las cuales se caracterizan por presentar ausencias de hoja, debido a su adaptación morfológica, con presencia de espinas y particularmente raíces profundas o superficiales expandidas.

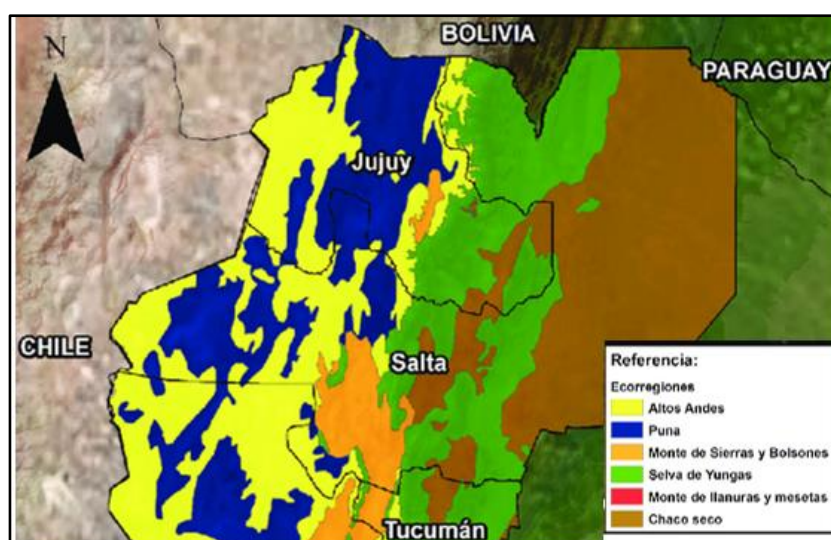


Figura 20. Ecorregiones del noroeste argentino, tomando como base Brown y Pacheco (2005).

Las comunidades vegetales serían las mismas en la Puna Seca y Desértica, aunque notoriamente empobrecidas en esta última. La zona del proyecto se encuentra dentro de la Puna Seca. La Puna seca es principalmente una estepa arbustiva, con *Baccharis*, *Fabiana* y *Adesmia* como géneros dominantes. *Parastrephia lucida* domina las comunidades edáficas en las cuencas con la napa freática cercana a la superficie. Otras comunidades edáficas están dominadas por Pennisetum chilense en suelos húmedos de baja salinidad y *Frankenia triandra*, *Lycium humile* y *Sporobolus* rigen en suelos de alta salinidad. También están los cactus columnares, *Thichocereus* y *Oreocereus*. Las plantas en cojín son otros elementos importantes, algunas veces alcanzando grandes tamaños, con *Azorella compacta* y varias especies *Adesmia* como las más comunes (Carilla *et al.* 2018).

5.2.2.2. Áreas protegidas

El área donde se ubica La Casualidad queda al sur de la Reserva Natural de Fauna Silvestre “Los Andes”. La reserva, creada a través del decreto N° 308/80, se ubica al oeste del territorio provincial y ocupa todo el tramo norte del departamento Los Andes; el límite norte lo constituye el límite interprovincial con Jujuy, el límite este el departamento de La Poma, y el oeste la República de Chile, el límite sur está dado por el paralelo 24°15' (Fig. 21). Posee una superficie aproximada de 14.400 Km² y se identifica como fracción del Lote Fiscal N° 3 del Departamento Los Andes.

En el área de estudio está presente la Reserva Natural de Fauna Silvestre de Los Andes y cerca del Refugio Provincial de Vida Silvestre “Ojos de Mar de Tolar Grande”. Asimismo, el Departamento Los Andes cuenta además con el Refugio Provincial de Vida Silvestre Laguna Socompa, la Zona de Reserva de la Vicuña y el Área de Importancia de Conservación de Aves (AICA) Socompa-Llullallaico (SA 26). Otra reserva es AICA cercana abarca los Departamentos de Cachi, Molinos, San Carlos y Cafayate y es el Área de Importancia de Conservación de Aves Luracatao y Valles Calchaquíes (Di Giacomo 2005).

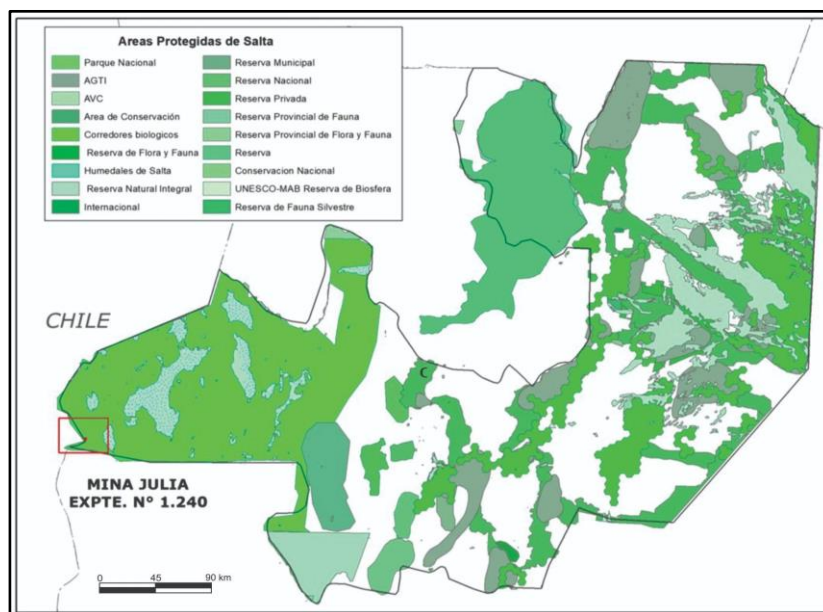


Figura 21. Áreas protegidas de la provincia de Salta. Tomado de Sistema Provincial de Áreas Protegidas (SiPAP).

5.2.3. Línea de base ambiental del medio humano

Incluye la información y el análisis de la dimensión socioeconómica, del bienestar social y otros similares que aporten información relevante sobre la calidad de vida de las comunidades afectadas.

5.2.3.1. Aspectos Sociales

El Departamento de Los Andes es el segundo departamento más extenso de la provincia de Salta, y a la vez, el menos densamente poblado, con una densidad de menos de 1 habitante por km².

En 1977 con el cierre de la mina Julia por decreto de Martínez de Hoz, el poblado minero de aproximadamente 2.000 personas de La Casualidad se difuminó, muchos de sus habitantes migraron a la ciudad y a pueblos aledaños. La mina quedó abandonada (eltribuno.com/historia-del-azufre-salta-n27464).

5.2.3.2. Recursos económicos

La estructura económica en la Puna es homogénea y se repite en la mayoría de las localidades de Los Andes, estando estrechamente ligada, casi exclusivamente, a las actividades mineras. Las duras condiciones climáticas, junto con la baja fertilidad de sus suelos, impiden el desarrollo de la actividad agro-ganadera, con algunas excepciones en pequeños enclaves dedicados a cultivos de altura o a la cría de ganado caprino y ovino para la autosubsistencia.

La economía del departamento de los Andes en la provincia de Salta, está caracterizada por una sociedad cuya base productiva es la unidad doméstica, dedicada a los únicos cultivos posibles adaptados a la altura y a la actividad ganadera que en conjunto conforman una economía de subsistencia. Esta sociedad ha desarrollado un complejo adaptativo en el que el traslado de las poblaciones en forma cíclica es una manera de resolver la escasez estacional de los recursos naturales, lo que resulta en un patrón de poblamiento disperso con ausencia de centros densamente poblados y la estacionalidad en la ocupación de poblados y puestos de montaña.

La agricultura es casi inexistente, mientras que la ganadería está representada por la cría de rebaños de ovejas, cabras y manadas de llamas que permiten la obtención de lanas y carne. La comercialización de los excedentes de la producción registra índices muy bajos, ya que la mayor parte de lo producido se destina al autoconsumo.

Con una alta concentración de población y un desarrollo comercial relativamente diversificado, San Antonio se comporta como redistribuidor de bienes y servicios en el Altiplano salteño. Muchos de sus habitantes se aprovisionan de mercaderías en Salta capital o Bolivia (según las circunstancias del tipo de cambio), ya sea para consumo propio o para revender en el pueblo. Pastores o puesteros que viven en parajes circundantes, así como mineros y habitantes de poblaciones vecinas como Tolar Grande, “bajan” al pueblo a abastecerse de bienes.

Con respecto al turismo, el Departamento Los Andes tiene la mayor parte de su territorio como correspondiente a la Reserva Provincial Los Andes. Se trata de un territorio especial para el turismo extremo y el turismo de aventura así como para las prácticas de supervivencia y montañismo

5.2.3.3. Sitios de interés geológico y arqueológico

Dentro de los sitios de interés geológico seleccionados por el SEGEMAR está el volcán Lulliaillaco de edad cenozoica con evidencias de actividad histórica y es el segundo volcán activo más alto del mundo (6.739 m.s.n.m.). La construcción del aparato volcánico se produjo mediante el apilamiento de los materiales que fueron eyectados. Parte de su estructura suroriental sufrió durante el Pleistoceno superior sucesivos colapsos, que originaron grandes avalanchas de detritos volcánicos. La primera de estas avalanchas cubrió 165 kilómetros cuadrados y es la de mayor tamaño. Se estima que el volumen de material movilizado alcanzó los 2 kilómetros cúbicos y que su velocidad mínima fue superior a los 160 kilómetros por hora. Entre las avalanchas de detritos volcánicos conocidas en Argentina, las que aquí se describen constituyen las de mayor volumen y sólo son superadas por las del volcán Socompa, cuyos flujos se movilizaron en territorio chileno (Zappettini 2008).

Otro sitio de Interés geológico, mencionado por Seggiaro *et al.* (2007) es el de la litología de la Formación Sijes en salar del Río Grande. La Formación Sijes presenta, a lo largo del salar del Río Grande, facies granocrecientes con intercalaciones de depósitos piroclásticos. Las secciones más representativas de esta unidad se hallan a lo largo del río Grande a 20 km al sur del campamento de la mina La Casualidad. Están constituidas por facies gruesas y por depósitos piroclásticos proximales, que la diferencian de la litología descrita en la localidad tipo.

También Seggiaro *et al.* (2007) incluyen el Complejo volcánico Cori situado entre los salares de Arizaro y del Río Grande, y que está compuesto por tobas, aglomerados, ignimbritas, pórfiros dacíticos y lavas dacíticas y andesíticas. Los depósitos piroclásticos integrados por ignimbritas, brechas ignimbríticas y flujos de bloques y cenizas muestran una sucesión de facies típica y muy completa.

Por otro lado, la cumbre del Volcán Lulliaillaco es considerada el sitio arqueológico más alto del mundo, donde se hallaron tres cuerpos de niños momificados, de la cultura Inca, ricamente ataviados con textiles y numerosos objetos que formaban parte del ajuar, o que habían sido enterrados como ofrendas en las tumbas (Fig.22).



Figura 22. Los niños de Lulliaillaco (Tomado de [Los niños de Lulliaillaco necesitan volver a sus orígenes – ANRed](#))

CAPÍTULO 6: MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN Y TRATAMIENTO

6.1. UN POCO DE HISTORIA

Plinio “El Viejo” (23 a.C.- 79 d.C.) incluye en el Libro XXXV, dedicado a las Artes pictóricas y constructivas, un enorme apartado dedicado al azufre: “En cuanto a las otros tipos de tierras, la más destacadas de entre ellas es quizá el azufre, que tiene la propiedad de actuar poderosamente sobre un gran número de sustancias. Se encuentra en estado nativo en las islas volcánicas entre Sicilia e Italia. Allí se extrae en galerías y se purifica mediante el fuego. Hay cuatro tipos de azufre: el azufre vivo, que los griegos llaman *apyron*, se encuentra en estado nativo en forma sólida; el segundo tipo es llamado *glæba* (azufre en bloques); no se encuentra normalmente salvo en los talleres de los bataneros. De igual forma el tercer tipo llama a este tipo *egula*, no posee más que un uso: purificar la lana por fumigación, pues este proceso le aporta blancura y suavidad. El cuarto, llamado *caute* sirve sobre todo para fabricar mechas de lámparas. El azufre tiene también su lugar en las ceremonias religiosas: sirve para purificar las casas (moradas) por fumigación. Su virtud es igualmente perceptible en las fuentes calientes. Ninguna sustancia se ilumina tan fácilmente, lo que demuestra que contiene un fuego muy activo. El rayo y los relámpagos tienen también el olor del azufre y la luz misma que propagan es sulfurosa” (Plinio “El Viejo”, XXXV, L, 174- 177 en [1 \(umh.es\)](http://1.umh.es)). Como consecuencia de su abundancia, así como de sus propiedades únicas, el azufre ha sido un recurso de importancia crítica para una serie de productos que van desde el bronce antiguo hasta la pólvora del siglo XVIII y el ácido sulfúrico contemporáneo.

Durante la primera mitad del siglo XX, muchos esfuerzos de investigación se centraron en comprender las fases del azufre. El azufre existe como un sólido cristalino ortorrómbico amarillo a temperaturas inferiores a aproximadamente 96°C. A temperaturas entre 96°C y 119°C, existe una forma sólida cristalina monoclinica de azufre. Cuando se calienta a aproximadamente 120°, el azufre comienza a fundirse en un líquido amarillo. En lugar de evaporarse como hacen muchos otros elementos con el aumento de temperatura, el azufre viscoso se polimeriza a unos 200 °C en un material sólido (Boyd 2016).

6.2 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

En la minería del azufre, existen tres metodologías diferentes para su extracción: los métodos convencionales subterráneos, los métodos a cielo abierto y el proceso Frasch.

Para menas de azufre superficiales o cercanas a la superficie, los métodos de extracción a cielo abierto predominan. Los métodos de explotación subterráneos son raramente utilizados debido a los altos costos que implican y a problemas técnicos relacionados con la frecuente abundancia de agua subsuperficial y de gases tóxicos (SH₂). El proceso Frasch es específico para el tratamiento del azufre debido a la baja temperatura a la cual funde (Carr 1994).

6.3. TRATAMIENTO MINERAL

-El método Frasch

La mayor cantidad del azufre elemental del mundo se ha obtenido por el proceso de Frasch que consiste en fundir el azufre en profundidad, y luego bombearlo hasta la superficie. Se utilizan equipos clásicos en petróleo convencional hasta alcanzar los estratos niveles de azufre, a una profundidad entre 150 y 750 m. Se introduce un juego de tres tubos concéntricos, uno de 10 cm en el interior de uno de 20 cm, de modo que quede un espacio anular entre los dos, y se le apoya en un collar que sella el espacio anular entre los tubos. Un tubo para aire, de 3 cm de diámetro, dentro de los otros, llega hasta una profundidad ligeramente por encima del collar mencionado. El tubo de 20 cm se perfora en dos niveles diferentes, uno encima y otro debajo del collar anular. El conjunto superior de perforaciones permite que escape el agua caliente, y el azufre fundido entra al sistema a través de las perforaciones inferiores (Fig.23).

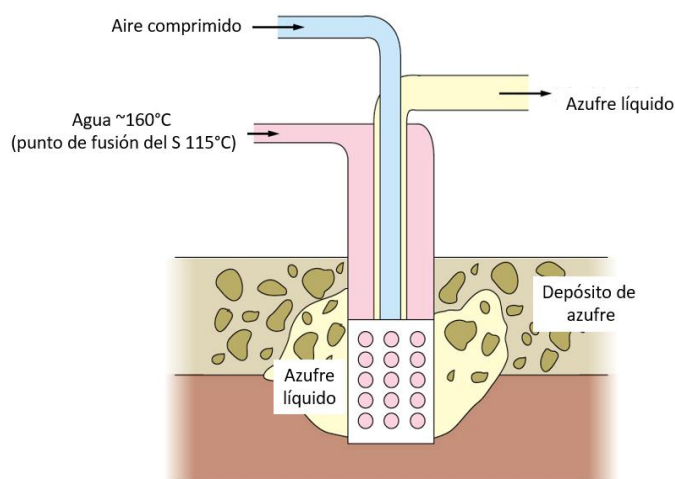


Figura 23. Método Frasch

El azufre obtenido puede llegar a ser muy puro (99,7 - 99,8%S). En esta forma, es de color amarillo claro. Si está contaminado con compuestos orgánicos, puede ser de color oscuro; una purificación posterior no es económica y, por lo general, no es necesaria. <http://www.sulphurinstitute.org/learnmore/sulphur101.cfm>

El proceso Frasch se ha utilizado como método para extraer azufre de los depósitos subterráneos, cuando desplazó a la minería tradicional principalmente desde principios hasta fines del siglo XX. A partir de allí, la recuperación de azufre de fuentes de petróleo y gas (azufre recuperado) se hizo más común. Los únicos yacimientos que utilizaban el método Frasch se encontraban en Polonia que finalizó en 2011 y hasta el 2010, en México. La última mina en funcionamiento en Estados Unidos cerró en 2000, mientras que en Irak cerró en 2003 ([Introduction to Sulphur - The Sulphur Institute](#)).

-Recuperación de azufre de la producción de petróleo y gas

El azufre que se extrae o se recupera de la producción de petróleo y gas se conoce como azufre o azufre elemental. El azufre producido como subproducto de la fundición de metales ferrosos y no ferrosos se produce en forma de ácido sulfúrico.

Un menor volumen de azufre se emite en forma de dióxido de azufre, principalmente como resultado del uso de productos derivados del petróleo en vehículos y algunas plantas de energía. El azufre elemental se produce a nivel mundial, con las mayores cantidades provenientes de regiones donde se procesan y refinan gas y petróleo con alto contenido de azufre, como Estados Unidos, Canadá, la ex Unión Soviética y Asia occidental. El método más comúnmente utilizado para la recuperación de azufre (SRU, por sus siglas en inglés) es el Proceso Claus, que se desarrolla en dos etapas. La primera ocurre en un horno de combustión, donde se quema el gas ácido, y la segunda en un reactor catalítico de menor temperatura, lo que favorece la conversión del azufre a rendimientos superiores al 95%. Luego, el azufre se separa de los gases residuales por condensación. Este proceso convierte el azufre gaseoso, como el H₂S, en azufre elemental, transformando desechos en productos útiles y protegiendo al medio ambiente.

Hoy en día, el azufre elemental se recupera principalmente como un subproducto importante de los procesos de refinación de petróleo y purificación de gas natural. Se estima que se producen más de 60 millones de toneladas de azufre cada año. Como consecuencia de esto, y como resultado de las propiedades únicas del azufre, ha existido durante mucho tiempo un deseo de aprovechar el azufre de formas energéticamente eficientes y respetuosas con el medio ambiente. Por lo tanto, el azufre se ha convertido en un activo importante en la química de polímeros y la ciencia de los materiales modernos, al mismo tiempo que se ha convertido en un punto focal en la investigación sobre fuentes de energía alternativas (Boyle 2016),

En Argentina, YPF produce azufre a partir de gases de recuperación en las refinerías. Las unidades de producción disponibles permiten obtenerlo con alta pureza y bajo nivel de contaminantes. Entre sus principales aplicaciones se lo destina como materia prima para la obtención de sulfitos, sulfatos y agentes sulfonables, principalmente para la elaboración de ácido sulfúrico. [Azufre \(ypf.com\)](http://Azufre(ypf.com)) Para el almacenamiento y transporte se solidifica en dos formatos, galleta (láminas finas de 4 ó 5 cm) o *prill* (en forma de pequeñas perlas de azufre, Fig.24).



Figura 24. a. Azufre agrícola b. Azufre industrial. (repsol.com/es/productos-y-servicios)

-El azufre obtenido por tostación de pirita, pirrotina, o sulfuros polimetálicos

El azufre obtenido a partir de la tostación de pirita, pirrotina o sulfuros polimetálicos se produce inicialmente como dióxido de azufre (SO_2), que luego se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4) o, en algunos casos, en azufre elemental. Para la tostación de piritas han utilizado hornos rotatorios y todavía están en funcionamiento hornos mecánicos de pisos. Las plantas más modernas efectúan la tostación de piritas la cual se realiza en hornos de flash y hornos de fluidización (Fig. 25). Estos últimos se consideran superiores a otros tipos de equipos en la tecnología de procesos, las tasas de rendimiento y la economía. En la tostación de piritas se obtiene óxido de hierro y energía. Alrededor de media tonelada de pirita permite producir una tonelada de ácido sulfúrico [Materiales y materias primas : azufre. Capítulo 4. Guía didáctica \(me.gov.ar\)](#)

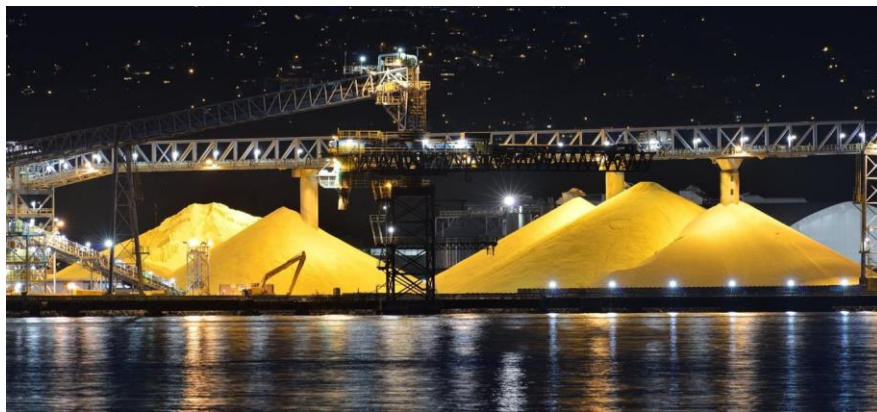


Figura 25. Pilas de azufre de una refinera de petróleo [Azufre \(S\). Propiedades químicas del Azufre de la tabla periódica \(nationalgeographic.com.es\)](#)

Rosa *et al.* (2007) presentan un estudio técnico-económico para la obtención de ácido sulfúrico por medio del proceso de contacto doble. Con base en las características de los gases residuales generados por la tostación de piritas se selecciona la tecnología de limpieza del efluente y el proceso de producción de ácido sulfúrico. En la figura 26 se muestra la distribución del proceso de doble absorción para producir ácido sulfúrico a partir de gases metalúrgicos (Campbell *et al.* 1993 tomado de Rosa *et al.* 2007).

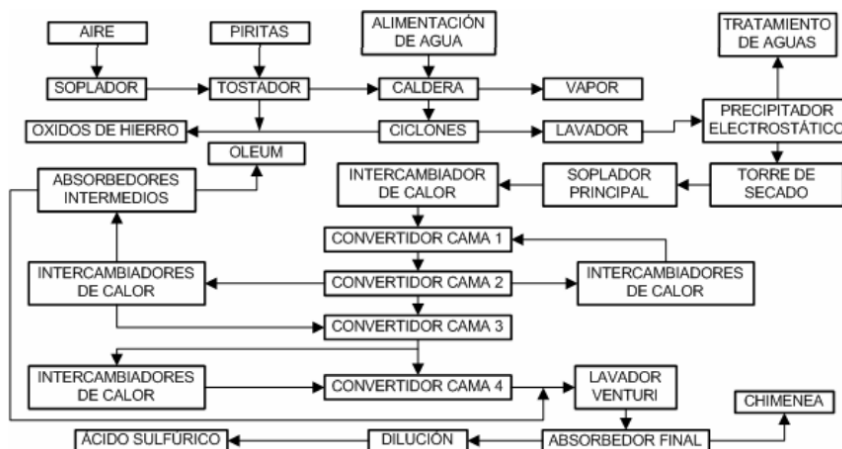


Figura 26. Distribución de una planta productora de ácido sulfúrico por el proceso de doble absorción (Campbell *et al.*, 1993 tomado de Rosa *et al.* 2007).

CAPÍTULO 7: USOS E IMPACTO EN EL AMBIENTE, EN LA SOCIEDAD, Y EN LA SALUD

7.1. CARACTERÍSTICAS DEL CICLO DEL AZUFRE

El azufre es uno de los componentes más importantes para la síntesis de proteínas. De hecho, los aminoácidos contienen átomos de azufre, vitales para el funcionamiento de la vida. De igual modo, es un químico presente en las vitaminas.

Posee una fase sólida donde el azufre se encuentra en depósitos orgánicos e inorgánicos y una fase gaseosa que circula a escala global. Entra a la atmósfera por liberación de gases de combustión, asociado a erupciones volcánicas, dentro de la interfase océano/tierra (DMS), como gases de descomposición (H_2S).

El ciclo biogeoquímico del azufre desempeña un papel activo en la biosfera, la hidrosfera, la atmósfera y la litosfera. Esto se debe principalmente a la gran abundancia y las propiedades del azufre para alcanzar un amplio rango de etapas de oxidación (+VI a -II) y estar presente en formas iónicas (por ejemplo, como sulfato), elementales y gaseosas (por ejemplo, como SO_2 y H_2S). La reducción del sulfato en ambientes subóxidos/anóxicos es el proceso más dominante en el ciclo del azufre. Los procesos en el ciclo del azufre tienen un fuerte impacto en el ambiente, desde pequeña escala (por ejemplo, la degradación de la materia orgánica en un acuífero contaminado) hasta a gran escala (por ejemplo, la influencia del ciclo del azufre en el contenido de oxígeno atmosférico en escalas de tiempo geológico). El ciclo global del azufre depende de las actividades de microorganismos, los cuales mayormente residen en el océano (Fig. 27).

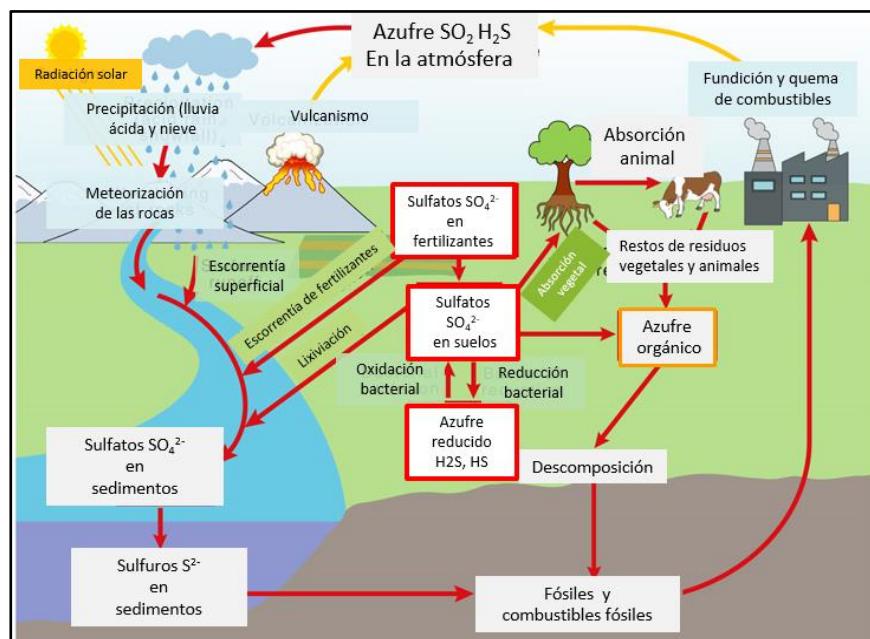


Figura 27. Ciclo del azufre (modificado de Evans y Perlman, USGS).

7.2. ASPECTOS AMBIENTALES VINCULADOS AL USO DEL AZUFRE

El azufre se encuentra en el medio natural formando diversos compuestos. Uno de los más perjudiciales es el dióxido de azufre (SO_2), un gas emitido tanto de la combustión del carbón como de algunos derivados del petróleo y la actividad volcánica, que puede permanecer en la atmósfera durante varios días y viajar grandes distancias. El dióxido de azufre es considerado uno de los principales responsables del fenómeno de la lluvia ácida al convertirse en contacto con el agua de la atmósfera en ácido sulfúrico (H_2SO_4). El dióxido de azufre puede, del mismo modo, originar partículas ácidas que afectan a la vida vegetal y el suelo y en los ecosistemas acuáticos puede ocasionar daños a la vegetación, degradación de la clorofila y reducción de la actividad fotosintética ([Azufre \(S\). Propiedades químicas del Azufre de la tabla periódica \(nationalgeographic.com.es\)](#))

Históricamente, el azufre era extraído principalmente de yacimientos. Sin embargo, en la economía y la legislación ambiental actuales, el azufre recuperado de refinerías de petróleo y plantas de procesamiento de gas constituye la mayor fuente. Es la materia prima para el ácido sulfúrico utilizado para varias industrias, principalmente la industria de fertilizantes y química. A principios de la década de 1990, la producción y el consumo de azufre disminuyeron de manera constante tras una recesión económica mundial, la desintegración de la ex Unión Soviética y el bloque oriental, y el aumento de las presiones ambientales, particularmente en los países industrializados (Ceccotti 1998). En la actualidad, algunos de estos factores se han revertido en cierta medida y la industria del azufre ha comenzado a recuperarse.

Más del 50% del azufre producido cada año se consume en la fabricación de fertilizantes fosfatados, por lo tanto, la situación de la industria del azufre se asemeja mucho a la de la industria de fertilizantes fosfatados, un negocio fuertemente cíclico. Sin embargo, los últimos avances han creado una nueva oportunidad de mercado en el uso del azufre como nutriente para las plantas. En los últimos años, la industria de fertilizantes ha buscado cada vez más este mercado, ya que los agricultores de todo el mundo demandan fertilizantes que contengan azufre para mejorar la rentabilidad de sus cultivos (Ceccotti 1998). El azufre no solo es un nutriente vital para los cultivos sino también para los animales y las personas.

Al igual que el nitrógeno, el fósforo y el potasio, el azufre es uno de los nutrientes esenciales de las plantas. Contribuye a aumentar el rendimiento de los cultivos de tres maneras diferentes: 1) proporciona un valor nutritivo directo, 2) proporciona un valor nutritivo indirecto como enmienda del suelo, especialmente para suelos alcalinos calcáreos y salinos, y 3) mejora la eficiencia de uso de otros nutrientes esenciales para las plantas, en particular el nitrógeno y el fósforo. En general, el azufre tiene funciones similares en el crecimiento y la nutrición de las plantas al nitrógeno. [Introduction to Sulphur - The Sulphur Institute.](#)

7.3. GEOLOGÍA MÉDICA VINCULADA AL AZUFRE Y SUS DERIVADOS.

El azufre es un elemento químico esencial para la vida, ya que es uno de los constituyentes básicos de los aminoácidos cisteína y metionina necesarios para la síntesis de proteínas presentes en todos los

organismos vivos. Participa en numerosas reacciones metabólicas y forma parte de la composición de diversas vitaminas y hormonas. Ingenbleek y Kimura (2013) indican que el azufre es el séptimo elemento más abundante y medible en el cuerpo humano (150 a 300 gramos) y se obtiene principalmente de la ingesta de metionina (Met), un aminoácido indispensable que se encuentra en las proteínas vegetales y animales. También conforma enzimas digestivas y vitaminas que estimula la insulina y posee propiedades antibióticas. Se encuentra en las queratinas del cabello, las uñas, la piel, las articulaciones y los músculos.

El azufre es necesario para la síntesis del colágeno y la condroitina, un componente del tejido conjuntivo que está en las articulaciones, los músculos, y los cartílagos.

Su ausencia de las dietas habituales provoca la mayor reducción de la masa corporal. El azufre actúa como cofactor de varias enzimas que participan de manera crítica en la regulación de los procesos oxidativos. Una combinación de desnutrición y privación nutricional de azufre maximiza el riesgo de trastornos cardiovasculares y accidentes cerebrovasculares.

El azufre se encuentra en la proteína animal como carnes rojas, pescados y mariscos, además en los vegetales como la cebolla, ajo, brócoli, berenjena y pimientos, entre otros.

Además de su función como nutriente, el azufre antiguamente forma parte de diversas modalidades terapéuticas, tales como los balnearios o piletas naturales de aguas termales ricas en azufre para tratar patologías y dolencias del aparato locomotor y problemas de la piel (Fig.28).



Figura 28. Termas El Azufre en Malargüe, Argentina. ([Terma Malargüe: El sosneado](#))

Las altas concentraciones y la naturaleza tóxica de algunos de los compuestos, puede resultar perjudicial para la salud. Entre algunos de los perjuicios provocados por los compuestos de azufre destacan: daños cardíacos y respiratorios, entre los que se encuentran la asfixia y la embolia pulmonar, anomalías en la visión y la audición, alteraciones del metabolismo hormonal, el sistema inmunológico y la circulación sanguínea, desórdenes gastrointestinales y daños orgánicos al hígado y los riñones, efectos neurológicos y de comportamiento. Algunas sustancias sulfurosas como el ácido sulfhídrico (H_2S) y algunos de sus derivados, los mercaptanos o tioles, son muy tóxicos, y pueden llegar a provocar la

Caracterización de los depósitos de azufre de la mina “La Casualidad” en la provincia de Salta: aspectos geológicos, económicos, industriales y sociales.

Geól. Leonardo E. Escalante

muerte a concentraciones muy reducidas ([Azufre \(S\). Propiedades químicas del Azufre de la tabla periódica \(nationalgeographic.com.es\)](#)). La figura 29 a y b muestran prácticas no sustentables.



Figura 29 a y b. Métodos no sustentables de extracción de azufre (Tomado de [Sulphur mining in an active volcano - BBC News](#))

CAPÍTULO 8: PANORAMA DEL MERCADO DEL AZUFRE

8.1. Panorama mundial

8.1.1. Mercado Global - Consumo Mundial

El mercado de azufre está segmentado por estado (sólido y líquido), por tecnología (gránulos, pastillas y granulado), por industria (fertilizantes, procesamiento químico, fabricación de metales, procesamiento de caucho y otras industrias de usuarios finales) y por geografía (Asia-Pacífico, América del Norte, Europa, América del Sur y Oriente Medio y África). La figura 30 muestra la estructura de la demanda actual. (<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/sulfur-market>).

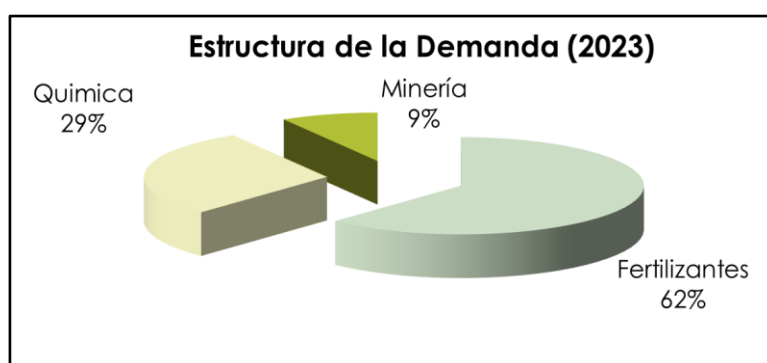


Figura 30. Estructura de la demanda.

China es el principal productor mundial (más del 50 %), la mayor parte de las cuales se utiliza para fabricar ácido sulfúrico (Fig.31). (<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/sulfur-market>).

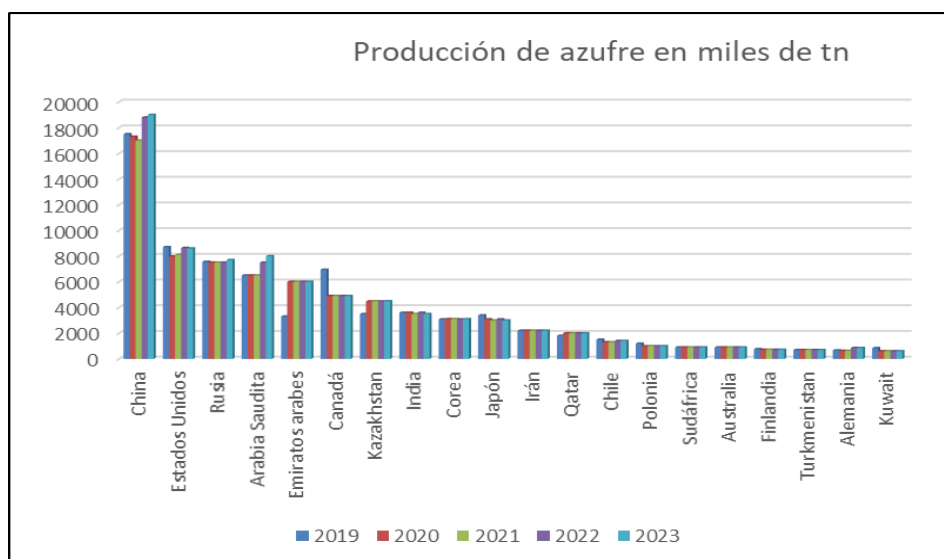


Figura 31. Producción mundial de Azufre. [Mineral commodity summaries 2024 | U.S. Geological Survey \(usgs.gov\)](https://www.usgs.gov/minerals-commodities/publications/mineral-commodity-summaries-2024)

Más de la mitad de la producción de azufre elemental se comercializa a nivel internacional. China es el mayor importador del mundo, seguida de Marruecos y Estados Unidos. Canadá es el mayor exportador, seguido de Rusia y Arabia Saudita. [Introduction to Sulphur - The Sulphur Institute](#)

Asia oriental, China principalmente, es el mayor productor de ácido en general, debido en gran medida a su rápido crecimiento, seguido por América del Norte, África y América Latina. Prácticamente todo el ácido comercializado proviene de fundiciones. [Introduction to Sulphur - The Sulphur Institute](#)

Se espera que el mercado del azufre crezca de 77,30 millones de toneladas métricas en 2023 a 97,41 millones de toneladas métricas en 2028, es decir un 4,73% durante el período de pronóstico (Fig. 32).

Debido a la COVID-19, se ha producido una interrupción en el suministro de azufre y una disminución de la demanda de múltiples industrias de usuarios finales, como la fabricación de metales y el procesamiento químico. Además, el COVID-19 interrumpió las cadenas de fabricación y suministro de fertilizantes. Sin embargo, se espera que la situación se recupere, lo que restablecerá la trayectoria de crecimiento del mercado estudiado durante la segunda mitad del período de pronóstico. A corto plazo, los principales factores que impulsan el crecimiento del mercado del azufre son la creciente demanda del sector de fabricación de fertilizantes y el uso cada vez mayor de azufre para la vulcanización del caucho.

Por otro lado, se espera que las estrictas regulaciones ambientales con respecto a las emisiones obstaculicen el crecimiento del mercado. Se espera que el uso de azufre como aditivo en el asfalto actúe como una oportunidad en el futuro. La región del sudeste asiático domina el mercado mundial, con el mayor consumo en términos de volumen y valor (Fig. 33).

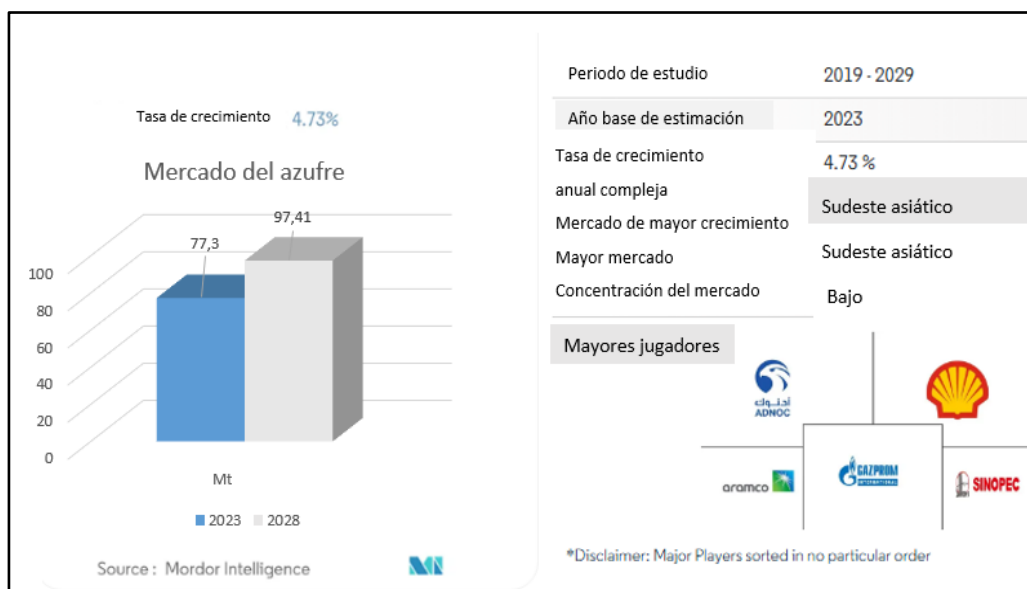


Figura 32. Mercado del azufre. (Mordor Inteligence)



Figura 33. Mercado de azufre: Tasa de crecimiento por región. [Sulfur Market - Price Forecast & Industry Demand \(mordorintelligence.com\)](https://www.mordorintelligence.com)

Una escasez proyectada de ácido sulfúrico, podría entorpecer el avance de la tecnología verde y amenazar la seguridad alimentaria mundial ([Sulfur shortage: a potential resource crisis looming as the world decarbonises | UCL News - UCL – University College London](#)). Se destaca que la demanda mundial de ácido sulfúrico aumentará significativamente de 246 a 400 millones de toneladas para 2040, como resultado de una agricultura más intensiva y del abandono mundial de los combustibles fósiles. Los investigadores estiman que esto resultará en un déficit en el suministro anual de entre 100 y 320 millones de toneladas -entre el 40% y el 130% del suministro actual- dependiendo de la rapidez con que se produzca la descarbonización.

El ácido sulfúrico, un componente vital de la industria moderna, necesario para la producción de fertilizantes de fósforo que ayudan a alimentar al mundo y para extraer metales raros de minerales esenciales para la transición a una economía verde que se requiere como el cobalto y el níquel que se utilizan en las baterías de iones de litio de alto rendimiento.

En la actualidad, más del 80% del suministro mundial de azufre se produce en forma de residuos de azufre procedentes de la desulfuración del petróleo crudo y del gas natural, que reducen las emisiones de dióxido de azufre que provocan la lluvia ácida.

La demanda de azufre como parte de la transición a economías poscombustibles fósiles, puede incluir el reciclaje de fósforo en aguas residuales de la industria de fertilizantes, el aumento del reciclaje de baterías de litio o utilizando baterías con una relación capacidad/peso de energía más baja, ya que estas requieren menos azufre para su producción. [Sulfur shortage: a potential resource crisis looming as the world decarbonises | UCL News - UCL – University College London](#)

El azufre se consume ampliamente en la producción de fertilizantes como el sulfato de calcio, que es un fertilizante conocido por prevenir la escorrentía de nutrientes y la erosión del suelo. Se utiliza como pesticida y fertilizante en los Estados Unidos desde la década de 1920.

Los fertilizantes de azufre son ingredientes orgánicos o sintéticos que se introducen en el suelo o las plantas y que estimulan el crecimiento y la producción al aportar nutrientes esenciales a las plantas.

También se utiliza para aumentar la producción agrícola, proporcionando nutrientes adicionales a las plantas y estimulando su desarrollo al mejorar la fertilidad del suelo o reemplazar los componentes químicos eliminados del suelo por cultivos intensivos. Es un cuarto macronutriente junto con el fósforo, el nitrógeno y el potasio en la industria agrícola. Además, tiene varias funciones en las plantas. Algunas de estas funciones importantes son la síntesis de proteínas y la formación de clorofila. Según la Asociación Internacional de Fertilizantes, después de una disminución del 2 % en el año fiscal 2021 y del 5 % en el año fiscal 2022, se prevé una recuperación del 3 % en el consumo mundial de fertilizantes en el año fiscal 2023 hasta alcanzar los 194 Mt de nutrientes (+5,9 Mt), lo que haría que el consumo volviera a situarse justo por encima del nivel del año fiscal 2019.

Las políticas medioambientales relacionadas con el uso de fertilizantes, las ampliaciones de capacidad, las condiciones meteorológicas extremas y las tensiones geopolíticas han afectado gravemente a los precios de los fertilizantes en todo el mundo. Sin embargo, se espera que la producción de fertilizantes en Oriente Medio alcance los 50 millones de toneladas en 2035. Varias iniciativas gubernamentales para aumentar la producción de fertilizantes en Asia-Pacífico están impulsando la demanda de azufre. Considerando las tendencias de crecimiento y la producción de fertilizantes en diferentes regiones del mundo, es probable que la industria de fertilizantes domine el mercado.

Asia-Pacífico dominó el mercado debido a la creciente demanda de azufre en fertilizantes y procesamiento de caucho de países como China e India. La producción de fertilizantes consume alrededor de dos tercios del ácido sulfúrico utilizado en China. Los fertilizantes secundarios incluyen calcio, magnesio y azufre. Yara China Limited y Nutrien Ltd. son algunas de las empresas que ofrecen productos relacionados con fertilizantes secundarios. Según la Oficina Nacional de Estadísticas de China, la producción de ácido sulfúrico alcanzó máximos históricos en 2022 (aumentando consecutivamente por tercer año) con 95,05 millones de toneladas métricas, registrando un crecimiento del 1,3% con respecto a la producción lograda en 2021.

La India es uno de los mayores productores y consumidores de caucho después de China en la región del sudeste asiático. A pesar de ser uno de los mayores productores de caucho, el país importa una parte considerable del caucho de varios países para satisfacer la demanda local.

8.1.2. El papel del azufre en los materiales modernos

8.1.2.1 Vulcanización moderna

La vulcanización es el proceso irreversible (generalmente) por el cual el caucho se convierte en materiales duraderos para su uso en una amplia variedad de aplicaciones a través de la reticulación del azufre y otros aditivos. El caucho vulcanizado, en diversas formas, se utiliza en numerosos materiales para fines prácticos cotidianos, incluidos neumáticos, cintas transportadoras, suelas de zapatos, entre otros. Además las nuevas investigaciones apuntan al reciclado del caucho mediante innovaciones de los métodos de vulcanización tradicionales (vulcanización inversa, Boyd 2016). La creciente lista de materiales formados mediante vulcanización inversa incluye lentes ópticas transmisoras de IR, células solares sensibilizadas con colorante y cátodos para baterías de litio-azufre.

8.1.2.2 Azufre en baterías recargables

Cuando el azufre se combina con litio, en un rango de voltaje operativo de 2,1 voltios (V) y una capacidad teórica de 1675 miliamperios hora por gramo (mA h/g1), aumenta la seguridad y disminuye el costo comparado con otros materiales usados en el cátodo de batería en aplicaciones comerciales. Esto, junto con su carácter semiconductor y su abundancia, han promovido la investigación para mejorar las baterías. Las baterías de litio-azufre (Li-S), que se conocen desde la década de 1960, tienen el potencial de reemplazar las baterías de iones de litio (Li+) predominantes que se utilizan hoy en día en numerosos dispositivos, incluidas computadoras portátiles, teléfonos celulares y otros dispositivos electrónicos portátiles con pantalla.

Aunque no es tan popular como tema de investigación actual, existe interés en utilizar Na-S como material de cátodo para baterías en ciertas aplicaciones porque el Na-S proporciona algunas ventajas. Por ejemplo, mientras que las baterías de Li-S tienen que permanecer cargadas al menos en un 30 % en todo momento, las baterías de Na-S no tienen que mantener la carga. Otras ventajas incluyen la vida útil prolongada y la alta densidad energética. Como resultado, las baterías de Na-S se utilizan actualmente en varios países para el almacenamiento de energía eléctrica que se produce por energía eólica, dispositivos fotovoltaicos, así como para plantas eléctricas convencionales. (Arslan *et al.* 2016). Por último, se considera que las baterías de Na-S son ambientalmente sustentables, ya que no producen emisiones durante su uso y casi todos los materiales de la batería se pueden reciclar. Este proceso de reciclaje es un ejemplo claro de los principios de la economía circular, que busca maximizar la reutilización de los recursos, reducir el desperdicio y minimizar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del producto. Al permitir la recuperación de materiales, estas baterías contribuyen a cerrar el ciclo de uso de recursos, impulsando un modelo de producción más eficiente y sostenible.

Ambos tipos de baterías tienen sus ventajas como alternativas energéticas más eficientes y ambientalmente sustentables.

8.1.2.3. Nanocompuestos

El desarrollo de nanocompuestos multifuncionales con propiedades mecánicas y ópticas otorga beneficios mediante reacciones de acoplamiento de tiol (compuesto que formado por un átomo de azufre y un átomo de hidrógeno (-SH)). Un grupo del Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos (NRL) desarrolló un método para incorporar nanopartículas de oro y plata en matrices de polímeros de tiol-eno y tiol-ino mediante polimerización.

Como el azufre permite la transmisión en la región infrarroja del espectro de luz, esto aumenta el índice de refracción de los materiales y por esa razón se emplea a menudo para desarrollar materiales con fines ópticos (Boyd 2016).

Dado que el azufre es un ligante común para la unión de superficies, las reacciones de acoplamiento de tiol se utilizan con frecuencia para modificar las superficies de los materiales a fin de impartir propiedades y/o características específicas a las mismas.

Abraham *et al.* (2016) han delineado un método para modificar la superficie del grafeno y los derivados del grafeno a través de reacciones de tiol-eno y tiol-ino.

En síntesis, el azufre es un elemento clave en las nuevas tecnologías como los procesos de vulcanización, baterías recargables mejoradas (azufre combinado con litio o sodio) y usos emergentes para reacciones de acoplamiento de tiol.

8.2. Mercado nacional

Argentina presenta una situación particular en cuanto a la explotación y producción de azufre. La producción local de azufre ha disminuido considerablemente desde los tiempos de intensa actividad minera en las décadas de 1940 a 1970. Hoy en día, el país depende en gran medida de las importaciones para satisfacer su demanda interna de azufre, necesario para diversas aplicaciones industriales, como la fabricación de ácido sulfúrico, fertilizantes y productos químicos.

Aunque Argentina posee recursos de azufre proveniente de fuentes volcánicas, especialmente en las provincias del noroeste argentino como Catamarca, Jujuy y Salta, la explotación de estos depósitos ha sido limitada en las últimas décadas. Factores como la lejanía de los yacimientos, las condiciones geográficas adversas y la competencia con productores internacionales han influido en la reducción de la actividad minera de azufre en el país.

Actualmente, gran parte del azufre utilizado en el país proviene de importaciones. El azufre importado se utiliza principalmente en la industria de fertilizantes y en la producción de ácido sulfúrico, que a su vez es un componente esencial para la industria minera y otras aplicaciones industriales.

8.2.1 Comercio exterior

En los últimos años la balanza comercial de azufre sublimado o precipitado; azufre coloidal (Clasificación arancelaria: 280200) ha sido negativa (Fig. 34).

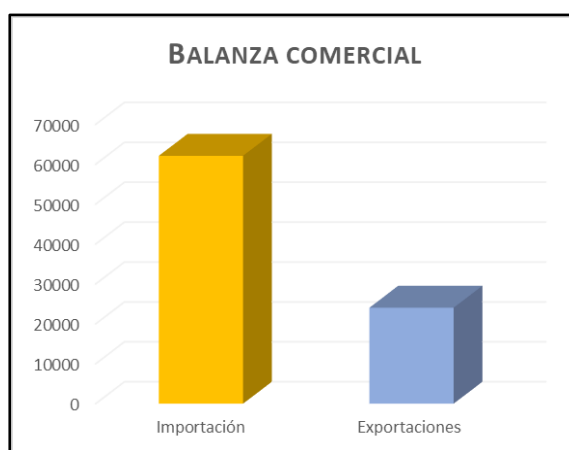


Figura 34- Balanza Comercial

Los mercados de importación de más rápido crecimiento en azufre sublimado o precipitado y azufre coloidal para Argentina en los últimos cinco años fueron China, India y Alemania (Fig.35). El valor CIF (*cost, insurance and freight*/costo, seguro y flete) estuvo en crecimiento en los últimos cinco años,

pasando de US\$ 9168,8 en el 2020 a US\$ 20817 en el año 2023, sumando un total de US\$ 62120 en ese periodo.

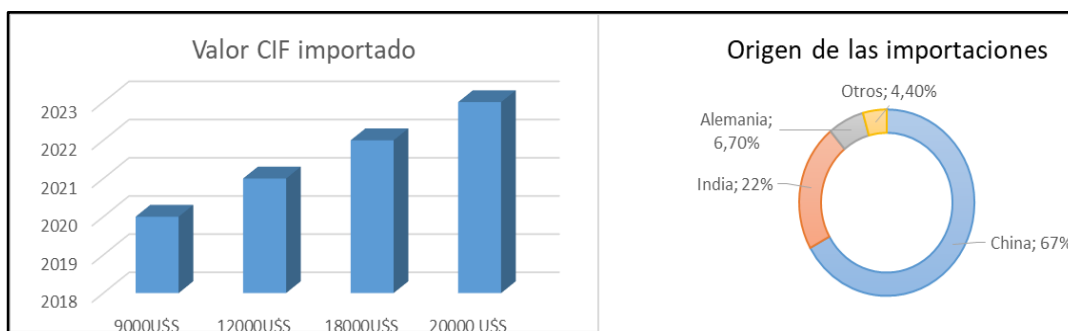


Figura 35. Importaciones de azufre [Veritrade | Importaciones y Exportaciones de AZUFRE SUBLIMADO O PRECITIPADO; AZUFRE COLOIDAL \(veritradecorp.com\)](#)

La exportación del azufre corresponde principalmente al azufre recuperado de refinerías de petróleo y plantas de procesamiento de gas. En los últimos años presentó fluctuaciones mostrándose con un valor FOB de US\$ 3177,2 en el 2020 mostrando un notable crecimiento hasta el 2022, con un valor FOB de US\$ 9961,3, volviendo a un valor FOB similar al del año 2021 (Fig. 36). La fluctuación puede haber estado sujeta a regulaciones políticas del país, o bien sujeta a la producción/refinación de hidrocarburos. Los países principales de exportación en los últimos años corresponden a Paraguay, Sudáfrica, y Ecuador.

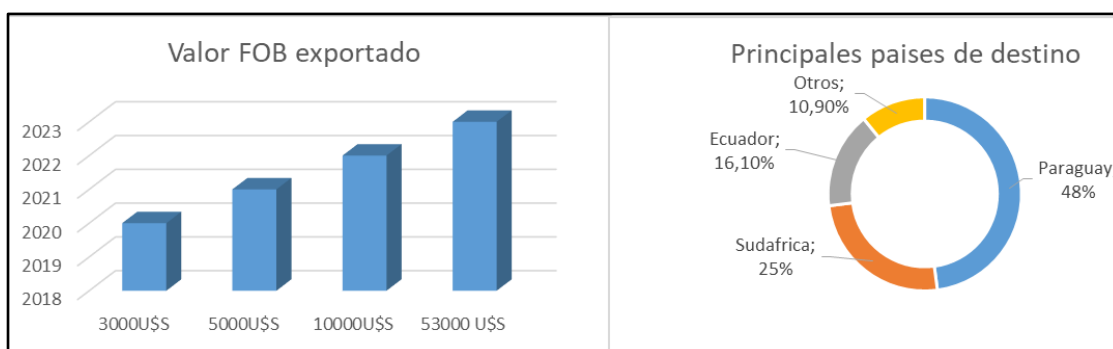


Figura 36. Exportaciones de azufre [Veritrade | Importaciones y Exportaciones de AZUFRE SUBLIMADO O PRECITIPADO; AZUFRE COLOIDAL \(veritradecorp.com\)](#)

8.3. Ámbito provincial

Actualmente, la provincia de Salta no contempla la exploración o explotación del azufre como mineral. Este mineral dejó de explotarse con el cierre de “La Casualidad” en 1978 como se mencionó. La provincia de Salta cuenta con azufre de origen fumarólico (Mina Julia- La Casualidad), siendo la Corrida del Cori un ejemplo de yacimiento para este mineral.

Antiguamente se accedía a esta mina por vía ferroviaria (ramal C 14 FCGB), o bien, por un camino paralelo a la vía ferroviaria hasta la estación Caipe y de allí, por ruta nacional N°59 aproximadamente unos 25 km hasta arribar a la mina. La mina contaba con una planta de tratamiento denominada La

Casualidad a una altura de 4.200 m.s.n.m., a unos 25 km de la mina. El proceso minero se iniciaba en la etapa de extracción del mineral, en Mina Julia, luego era trasladado mediante cablecarril hasta la planta de flotación donde se trataba el mineral y el "ripio", desecho de azufre de explotaciones anteriores, mediante un proceso que elevaba el porcentaje de azufre desde un 21% hasta un 84%. La siguiente etapa se realizaba en la planta de refinación, donde el material era procesado hasta obtener azufre prácticamente puro (99,98 %). Esta mina produjo cerca de 1.150.000 t con un promedio de 21-23 % de azufre entre 1963 a 1972 (Fig. 37, Cuadro 3).



Figura 37. Planta de tratamiento denominada La Casualidad a una altura de 4.200 m.s.n.m.

Cuadro 3. Reservas y leyes de Mina Julia, provincia de Salta (Gozalvez *et al.* 2004).

Sector		Reserva (t)	Leyes (% S)	Referencias
Mina Julia		650.000 medidas	23	Cuomo (1949)
Mina Julia		3.550.000 (positivas y probables)	22,5	Bermudéz (1963)
Mina Julia	Total	2.250.000 (probadas y posibles)	15-24	G.A.M.A (1972)
	Sector este	600.000	15	
	Sector sur	350.000	15	
	Sector oeste	225.000	17	
Corrida Río Grande		692.000	26,3	

Caracterización de los depósitos de azufre de la mina “La Casualidad” en la provincia de Salta: aspectos geológicos, económicos, industriales y sociales.

Geól. Leonardo E. Escalante

La propiedad minera “Mina Julia, Expediente n° 1240”, pertenece a la empresa Recursos Energéticos y Mineros de Salta (REMSa S.A.), una sociedad anónima con participación estatal mayoritaria, responsable de administrar los recursos energéticos y mineros de la provincia de Salta, dentro del marco de su objeto social. La propiedad minera, cuenta con servidumbre de agua (bajo la supervisión de la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Salta), fuente de aguas con la que se proveía el campamento de La Casualidad. Estas además de ser una de las pocas fuentes de agua dulce de la zona, indispensable para la fauna local, son altamente demandadas por empresas radicadas en el área para la exploración-explotación de litio en el salar Río Grande y Minerales Metalíferos (Au- Cu) a lo largo de la Corrida del Cori (Fig. 38).

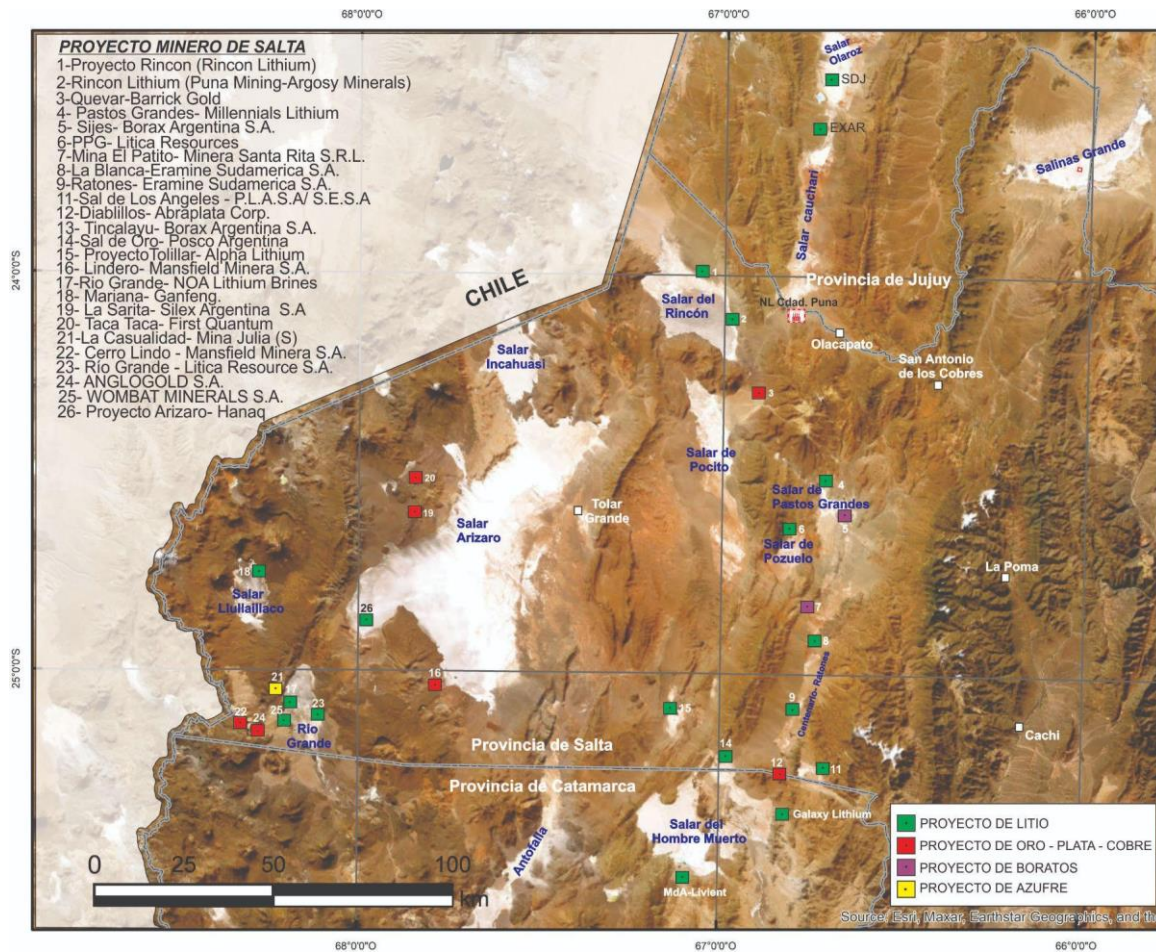


Figura 38. Principales Proyectos Mineros en la Provincia de Salta.

CAPÍTULO 9: PROPUESTA DE REACTIVACIÓN DE LA MINA JULIA

9.1. ETAPAS DE LA PROPUESTA

La exploración y prospección de azufre en yacimientos volcánicos es un proceso complejo que abarca diversas etapas, desde la identificación inicial de áreas prospectivas hasta la delimitación detallada del depósito, su posterior evaluación y producción.

En el caso particular de la Mina Julia - La Casualidad, aunque existió una mina productiva con reservas y recursos calculados, resulta imperativo actualizar la información y los estudios en la zona. Para ello, se proponen las siguientes fases:

9.1.1. Investigación preliminar y recopilación de datos

En esta fase, se busca identificar áreas prospectivas basadas en estudios previos y en la recopilación de datos existentes. Dado que esta mina ha estado inactiva durante más de 40 años, se requiere una actualización exhaustiva de la información disponible. Es importante destacar que la Corrida de Cori incluye cráteres volcánicos donde la actividad volcánica y termal ha continuado en los bordes, extendiéndose varios kilómetros en dirección norte-sur. Esta extensa zona de alteración argílica avanzada alberga varias minas de azufre, incluida la Mina Julia.

El área ha sido objeto de exploración por parte de empresas extranjeras interesadas en minerales metálicos, lo que constituye un punto de partida favorable para la compilación de mapas geológicos, geofísicos, geoquímicos y estructurales. Sin embargo, en muchos casos, esta información es de carácter privado y confidencial.

Con el avance de la tecnología, se han logrado importantes progresos en el desarrollo de estudios mediante imágenes satelitales. En este contexto, se propone la revisión de imágenes espectrales combinadas en diferentes bandas con el fin de identificar áreas volcánicas con alteración y anomalías, así como evaluar la presencia de manifestaciones superficiales de azufre, como fumarolas o depósitos superficiales.

9.1.2. Reconocimiento de campo

El reconocimiento de campo, aunque riguroso debido a la altitud y las condiciones climáticas, es fundamental para el acceso a los puntos de afloramiento de azufre, especialmente la Mina Julia, que cuenta con un camino claramente definido y accesible para vehículos adecuados al terreno.

Las actividades de campo permitirán verificar y complementar los datos existentes, o bien corregirlos en caso necesario. El objetivo de esta labor es recolectar la mayor cantidad de información posible en el terreno, incluyendo muestras de roca-mineral, gases, y la toma de datos estructurales (principalmente fallas, diaclasas, clivajes y deformaciones). Toda esta información será esencial para la elaboración de las distintas temáticas cartográficas requeridas en el estudio.

9.1.3. Prospección geofísica y prospección geoquímica

9.1.3.1. Estudios geofísicos

La exploración y prospección del azufre en la Mina Julia-La Casualidad, requiere la aplicación de estudios geofísicos específicos para identificar y caracterizar los depósitos de azufre de origen volcánico. Dada la geología particular de la región y la naturaleza de los depósitos, se sugieren dos estudios geofísicos iniciales.

En primera instancia un estudio pertinente corresponde a la *Gravimetría*, con el fin de lograr detectar las variaciones en la densidad, y así lograr inferir e identificar la presencia del cuerpo de azufre. Dado que en este caso el azufre se asocia con zonas de alteración hidrotermal que genera variaciones en la densidad, un levantamiento gravimétrico detallado podría ayudar a delinear las zonas de mineralización. Con lo cual si se aplica en varios perfiles gravimétricos se lograría identificar anomalías de baja densidad, que podrían corresponder a cuerpos de azufre.

Un segundo estudio a aplicar podría ser la *Magnetometría*, con el objetivo de lograr identificar variaciones en el campo magnético que puedan estar relacionadas con la alteración hidrotermal y la presencia de azufre. Es muy típico que en zonas de alteración hidrotermal volcánica, la alteración hidrotermal puede causar la desmagnetización de las rocas. Este estudio permitiría identificar zonas de baja magnetización, que podrían estar asociadas con depósitos de azufre.

9.1.3.2. Estudios geoquímicos

Los análisis geoquímicos son fundamentales para determinar tanto la calidad como la cuantificación del mineral en un yacimiento. Estos análisis permiten evaluar la concentración de elementos valiosos, como el azufre, y otros minerales asociados, así como determinar la viabilidad económica de la explotación del depósito.

A continuación, se describe un análisis geoquímico utilizado para evaluar la calidad y cuantificación de minerales en un depósito de azufre, como el de la Mina Julia-La Casualidad.

Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF): Mide la concentración de azufre y otros elementos de interés en las muestras. Es rápido y no destructivo.

Este análisis es esenciales para tomar decisiones sobre la explotación del yacimiento, asegurando que el proceso sea eficiente y rentable.

9.1.4. Evaluación y modelado del depósito

La evaluación y modelado del depósito de azufre es esencial para comprender la extensión y características del yacimiento. Este proceso permite determinar la cantidad de azufre disponible, su distribución espacial, y las posibles variaciones en la calidad del recurso. Esta fase involucra la integración de todos los datos geológicos, geofísicos, geoquímicos, y de perforación para construir un modelo tridimensional (3D) del depósito, permitiendo la estimación de recursos y la evaluación de su viabilidad económica.

Los informes del SEGEMAR (Gozalvez *et al.* 2004, Tabla 2) muestra reservas calculadas durante el periodo de actividad de la mina, con lo cual es imperativo actualizar los datos necesarios para determinar las reservas y recursos existentes para la Mina Julia y sectores aledaños.

9.1.5. Método de explotación y tratamiento

La metodología más conveniente de explotación para la reactivación de la Mina Julia correspondería a la denominada “explotación a cielo abierto”, desarrollando una serie de bancos o terrazas escalonadas que permitan el acceso a los niveles de minerales de azufre.

Es importante replantear la metodología del transporte de material hasta La Casualidad, ideando un circuito de caminos y huellas vehiculares más efectivo al anteriormente usado (carriles aéreo).

En La Casualidad la labor de infraestructura es un tema desafiante, tanto el pueblo como la planta de tratamiento están absolutamente destruidos, la inversión de capitales para poner en pie este pueblo sería elevada. Las casas se encuentran derrumbadas, quedando solo en pie los cimientos y algunas paredes. Los servicios de agua y energía, sería un tema pendiente ya que el agua potable es poca y restringida en el área.

Otro tema pendiente sería la construcción de una planta de procesamiento que conste de una trituradora y tamizado, que permita separar el azufre del material estéril. Para el procesamiento del azufre se debería optar por algún sistema de horno para la fusión y refinación del mineral. En cuanto al producto final a obtener, pueden pensarse en moldes de solidificación según demande la industria, para luego ser transportados (retomar red ferroviaria Ramal C14) y comercializados.

9.2. IMPACTOS

9.2.1. Impactos ambientales

La reactivación de la Mina Julia – La Casualidad requiere una cuidadosa evaluación de varios aspectos ambientales, que van a depender exclusivamente del modo de explotación y tratamiento del mineral.

Para el desarrollo de esta reactivación es necesario un Plan de Gestión Ambiental, que garantice mediante la implementación de las medidas de prevención, control y mitigación, y la minimización de los riesgos ambientales asociadas al desarrollo del proyecto (Cuadro 4). Este constituye una herramienta dinámica que permite la revisión y actualización en las distintas etapas del Proyecto Minero.

El primer paso a realizar es el Estudio de Impacto Ambiental y Social (EIAyS), con una Evaluación de Impacto Ambiental exhaustiva antes de reactivar la mina. Este estudio debe considerar todos los aspectos del proyecto, incluyendo el uso de recursos naturales, las emisiones, y los posibles impactos sobre la flora, fauna y calidad del agua y del aire.

La gestión de residuos es una problemática en la actualidad en la mina por todo el material libre en el predio, abandonado por el pueblo de La Casualidad. El deterioro y las condiciones climáticas desmantelaron y corroyeron las construcciones. Se han registrado reclamos en la Secretaría de Minería

de la provincia de Salta por parte de empresas en el salar de Río Grande por el peligro de chatarra que con el viento se transportan desde La Casualidad al Salar.

Cuadro 4. Componentes de PGA para el cuidado del medioambiente.

PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL (PGA)	Programa de Protección Ambiental (PPA)	Medidas de Protección Ambiental (MPA)
		Manejo de Residuos (MR) - Lodos y Recortes de Perforación (LRP)
	Programa de Vigilancia Ambiental (PVA)	Monitoreo de Ruido Ambiental (MRA)
		Monitoreo de Efluentes (MEF)
		Monitoreo de Emisiones Atmosféricas (MEA)
		Monitoreo de los Recursos Biológicos (MRB)
		Monitoreo de Actividades (MAS)
	Plan de Contingencia Ambiental (PCA)	
	Matriz Legal Ambiental (MLA)	

Un plan de control y monitoreo de emisiones y calidad del aire en cada una de las etapas a realizar, con el fin de registrar las contaminantes atmosféricos, debería constar con instalaciones de equipos para monitorear continuamente las emisiones de gases y partículas, incluyendo dióxido de azufre (SO₂) y polvo, que pueden ser liberados durante la extracción y procesamiento del azufre. Este es un contaminante atmosférico negativo en la salud, flora y fauna.

La protección de los recursos hídricos, especialmente del agua aflorante en el campamento, es fundamental. Se podría considerar la readecuación de la servidumbre de agua – Expte. N° 2.333, con el objetivo de optimizar el uso del agua subterránea, una de las pocas fuentes de agua dulce en la zona. Es crucial implementar un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua en ríos, arroyos y acuíferos cercanos, para detectar cualquier indicio de contaminación de manera temprana.

La conservación de la biodiversidad es un tema sensible ya que, la reactivación de la mina afectaría directamente el ecosistema de las faunas locales, teniendo en cuenta que la fuente de agua dulce está ubicada en el campamento de La Casualidad, como dos lagunas superficiales, también, las construcciones de viviendas fueron usadas por animales como nichos y/o refugios en esta media década, con lo cual, esta diversa población de fauna se vería directamente afectada.

Finalmente, sería imperativos que desde el inicio de la operación, se desarrolle un plan detallado para el cierre de la mina, que incluya la restauración del terreno, el desmantelamiento de las instalaciones, y la recuperación del ecosistema. Para ellos se debería disponer de un *fondo de garantía ambiental*, que permita tener garantía y asegurar que los recursos estén disponibles para llevar a cabo la restauración ambiental, incluso si la empresa enfrenta dificultades financieras.

9.2.1.1. Análisis de la presencia de drenaje ácido en la Mina Julia: evaluación actual y Consideraciones Futuras

Los estudios geológicos y ambientales detallados del área han permitido establecer un perfil claro sobre su estado actual en relación con el drenaje ácido de minas (DAM). Los registros históricos y los análisis recientes confirman que en esta mina no existe evidencia de drenaje ácido, ni de la presencia de minerales sulfurados que puedan inducir la generación de ácido (Cuadro 5, Secretaria de Recursos Hídricos de la Provincia de Salta).

Los resultados obtenidos de los muestreos químicos de agua superficial en la zona circundante a la mina han sido concluyentes en este sentido, por ejemplo la Servidumbre de Agua- Expte. 2.333 (Fig. 39, Cuadro 5). Las muestras de agua analizadas no han mostrado signos de acidificación ni la presencia de metales disueltos en concentraciones que podrían indicar un proceso de drenaje ácido. Estos resultados son consistentes con la ausencia de minerales sulfurados, como pirita, que son los principales precursores del DAM en muchas operaciones mineras. Es crucial destacar que, aunque estos hallazgos son alentadores y reflejan una situación ambientalmente estable, no se puede descartar la posibilidad de que el DAM se convierta en un problema en el futuro. La ausencia de evidencias actuales no garantiza que, bajo condiciones geológicas o de explotación distintas, este riesgo no pueda manifestarse. Por ejemplo, nuevas exploraciones o explotaciones en áreas no evaluadas previamente podrían exponer materiales que contengan sulfuros, desencadenando potencialmente procesos de generación de ácido.

Por lo tanto, es recomendable mantener un enfoque de monitoreo continuo y preventivo. Esto incluiría la implementación de un programa de vigilancia hidroquímica que permita detectar cualquier cambio en la calidad del agua superficial y subterránea a lo largo del tiempo. Asimismo, es importante considerar la posibilidad de aplicar medidas de mitigación tempranas en caso de que se identifiquen zonas con potencial de generación de DAM durante futuras actividades de exploración o explotación.



Figura 39. Servidumbre de Agua- Expte. 2.333. La Casualidad.

Cuadro 5. Parámetros Fisicoquímicos y Bacteriológicos de muestras de aguas superficiales de La Casualidad (Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Salta).

Fisicoquímico		
Parámetros	Valores Obtenidos	Referencias
pH	9,43	(6,5-8,5)
Color	17 Pt-Co	"máx 5 escala Pt-Co"
Conductividad	521 μ S/cm	
turbidez	2,26 UTN	3 UTN
Sodio	151,3 mg/L	
Potasio	19,91 mg/L	
Amoniaco	0,07 mg/L	0,20 mg/L
Calcio	37,4 mg/L	
Magnesio	14,09 mg/L	
Cloruros	181,2 mg/L	350 mg/L
Boro	2,484 mg/L	0,5 mg/L
Arsénico	0,0204 mg/L	0,01 mg/L
Nitrito	0,02 mg/L	0,10 mg/L
Nitrato	0,4 mg/L	45 mg/L
Sulfatos	151,26 mg/L	400 mg/L
Fluoruro	0,70 mg/L	
Bacteriológico		
Parámetros	Valor Obtenido	Referencia
Recuento de Bacterias Aerobianas Mesófilas	166 UFC/mL	< 500 UFC/mL
Recuento de Bacterias Coliformes Totales	9 NMP/100 mL	< 3NMP/100 mL
Escherichia Coli	Ausencia	Ausencia/ 100 mL
Pseudomonas Aeruginosa	Ausencia	Ausencia/ 100 mL

9.2.2. Impacto socioeconómico en las comunidades locales. El pueblo “La Casualidad”

La reactivación de la Mina Julia en La Casualidad, provincia de Salta, Argentina, plantea una oportunidad significativa para analizar y mejorar la situación socioeconómica de las comunidades presentes en la región, tal como está desarrollando la actividad minera en el departamento de Los Andes.

El poner en marcha la Mina Julia podría catalizar un aumento en la generación de empleo tanto directo como indirecto. Este efecto es crucial en una comunidad históricamente dependiente de la industria del azufre, cuya declinación ha resultado en altos niveles de desempleo y migración. La creación de nuevos puestos de trabajo no solo podría atraer a antiguos residentes que emigraron en busca de oportunidades, sino también a nuevos trabajadores, ayudando así a revitalizar la economía local. Además, se espera que la demanda de servicios y bienes locales impulse la actividad comercial y estimule inversiones en infraestructura básica como transporte y comunicaciones.

La mejora en las infraestructuras locales es una necesidad urgente, ya que el antiguo pueblo está en ruinas y abandonado. La inversión en infraestructuras viales, como el acceso a agua potable, electricidad y telecomunicaciones no sólo facilitaría el establecimiento en el lugar, sino que también

mejoraría significativamente la calidad de vida de los residentes locales. Este desarrollo en infraestructura es fundamental para apoyar el crecimiento económico sostenible de la comunidad.

Tener un plan de programas de capacitaciones dirigido a la población local es esencial para prepararla adecuadamente para los trabajos mineros y mejorar su empleabilidad, acción que tanto la minería y la provincia buscan en la región. La revitalización económica esperada también puede impulsar la mejora de establecimientos educativos y programas formativos, ofreciendo mejores oportunidades técnicas y profesionales para los jóvenes de la comunidad. La llegada de nuevos residentes y trabajadores debido a la reactivación de la mina podría justificar la mejora de los servicios de salud locales, incluyendo la expansión de salitas y hospitales, que incidirá principalmente en la comunidad más vulnerable de la región.

Desde una perspectiva social y cultural, la reactivación de la Mina Julia podría influir positivamente en la cohesión comunitaria y el sentido de identidad local. El retorno de residentes y la promoción del patrimonio minero local podrían fortalecer el tejido social, además de potenciar iniciativas de turismo cultural que preserven y promuevan la historia minera regional.

Es crucial que la reactivación de la Mina Julia se realice con un enfoque sostenible, minimizando el impacto ambiental mediante prácticas mineras responsables y el cumplimiento estricto de regulaciones ambientales. Además, es fundamental contar con una **licencia social**, lo que implica la aceptación y apoyo de las comunidades locales y otros grupos de interés. La supervisión constante y la adopción de tecnologías limpias no solo son esenciales para mitigar cualquier impacto negativo en el medio ambiente, sino también para mantener la confianza de las comunidades. Garantizar una relación transparente y participativa con las partes interesadas ayudará a asegurar un desarrollo equilibrado y duradero, alineado con los principios de responsabilidad social y ambiental.

9.3. EXPECTATIVAS DEL PROYECTO LA CASUALIDAD

La industria del azufre en Argentina enfrenta varios desafíos, entre ellos, la necesidad de inversiones significativas para reactivar y modernizar las operaciones mineras existentes, la adaptación a las normativas ambientales cada vez más estrictas y la más inevitable, competencia con proveedores extranjeros. Sin embargo, también existen oportunidades, especialmente en la exploración y desarrollo de nuevos yacimientos, así como en la implementación de tecnologías más eficientes y sostenibles para la explotación del recurso.

El gobierno argentino en los últimos años ha manifestado interés en diversificar y fortalecer su sector minero, incluyendo la explotación de recursos no tradicionales como el azufre. Iniciativas de inversión y políticas favorables (Régimen de Incentivos a las Grandes Inversiones) podrían estimular el resurgimiento de la minería de azufre en el país, aprovechando sus reservas naturales y reduciendo la dependencia de las importaciones.

A pesar que la producción de azufre en Argentina ha disminuido y el país depende actualmente de importaciones, existen oportunidades para revitalizar este sector a través de inversiones, exploración y el desarrollo de tecnologías sostenibles. La situación actual plantea desafíos, pero también abre la puerta a un potencial crecimiento futuro en la explotación de azufre en Argentina.

Las condiciones mineras de la provincia de Salta hoy en día son alentadoras en el rubro de la exploración y explotación de litio y metalíferos (Cu, Au y Ag), con lo cual, rever la situación de yacimientos como es el de la Mina Julia (La Casualidad) es materia fundamental en este escenario global de la transición energética y economía local.

El Instituto canadiense Fraser presentó los resultados de la encuesta anual 2023 efectuada a las principales empresas mineras del mundo y grupos de inversiones, sobre los lugares atractivos para el desarrollo de proyectos de explotación de minerales. Salta fue elegida en el lugar 14 como atractiva para la inversión minera, siendo la primera del país y Sudamérica superando a países como Chile, Perú, Rusia, entre otros que tienen un gran potencial minero (Fig. 39). Los casi 300 que respondieron el cuestionario enviado a 2.000 profesionales de la minería mundial, eligieron entre los distritos argentinos a Salta, desplazando de ese sitio a San Juan. ([Annual Survey of Mining Companies, 2023 | Fraser Institute](#)).

Los resultados del Informe Fraser han proporcionado un panorama interesante, con Argentina emergiendo como la cuarta región más atractiva del mundo para la inversión en minería, con una puntuación media de atractivo de inversión de 74,13 comparativamente superior que los años anteriores, con un aumento notable en la puntuación del Índice de Política de Inversión (IPI) del país, que ha pasado de 49,54 en 2022 a 64,40 en 2023.

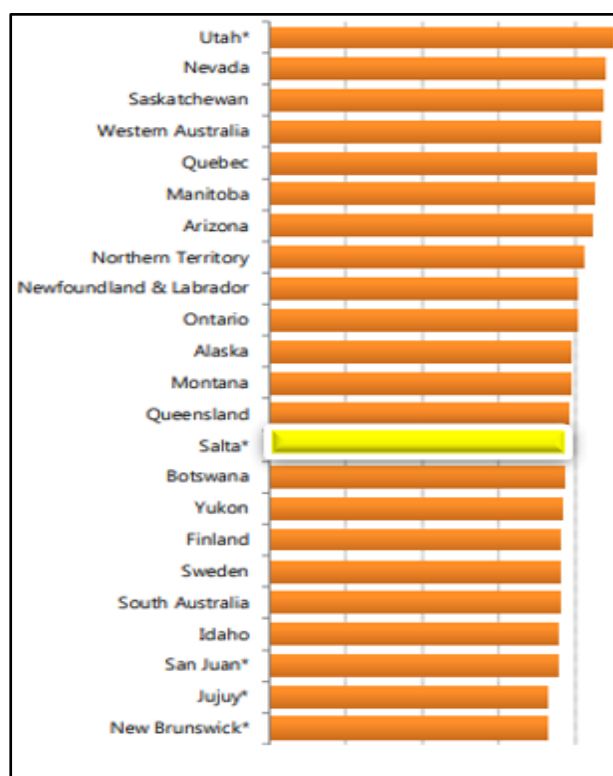


Figura 40. Índice de atractivo para la inversión. Salta está ocupando el lugar 14. [Annual Survey of Mining Companies, 2023 | Fraser Institute](#)

CAPÍTULO 10 REFLEXIONES Y CONCLUSIONES

El proyecto de reactivación de la Mina Julia en la provincia de Salta representa una oportunidad significativa para el desarrollo económico regional y la revalorización de los recursos minerales de Argentina. Los datos disponibles de reservas y recursos subrayan el potencial de esta mina para contribuir a la industria del azufre en el país. Es crucial destacar que la reactivación de la mina debe llevarse a cabo con un fuerte compromiso hacia la sostenibilidad ambiental. La adopción de controles ambientales estrictos, que se alineen con las normativas actuales, asegurará que la explotación del azufre de origen volcánico en la región se realice de manera responsable, minimizando el impacto en el entorno natural y en las comunidades cercanas.

En conclusión, la reactivación de la Mina Julia no solo es viable desde un punto de vista técnico y económico, sino que también puede ser un ejemplo de minería responsable y sostenible en Argentina. La colaboración entre el sector privado, el gobierno y las comunidades locales será esencial para el éxito de este proyecto, asegurando que los beneficios se compartan equitativamente y que el legado de la mina sea positivo para las generaciones futuras.

Se suma que las condiciones mineras de la provincia de Salta, actualmente son alentadoras para la exploración y explotación minera, principalmente de litio y metalíferos (Cu, Au y Ag). Es importante, plantear la reactivación de la Mina Julia (La Casualidad) como materia prima fundamental en este escenario global de transición energética y seguridad alimentaria.

CAPÍTULO 11: AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Universidad de Buenos Aires por brindar todas las herramientas necesarias que permitieron llevar a cabo y completar con éxito el posgrado de la Especialización en Geología Minera.

En primer lugar, deseo agradecer a la Dra. Liliana Castro por su invaluable dedicación, tiempo, acompañamiento y motivación durante la elaboración de este Trabajo Final Integrador. Sus recomendaciones y su apoyo constante fueron fundamentales para mejorar significativamente este trabajo.

También quiero agradecer a todos los profesores de la Carrera de Especialización en Geología Minera de la Universidad de Buenos Aires, cuyo acompañamiento y enseñanza enriquecieron mi formación académica y profesional.

Por último, extiendo mi agradecimiento a los jurados Dra. Teresita Montenegro y MSc Victoria Ferreiro por dedicar su tiempo a la evaluación de este Trabajo Final Integrador, y por sus comentarios y sugerencias, que contribuyeron de manera significativa a la calidad de este manuscrito.

CAPÍTULO 12: BIBLIOGRAFÍA

Abraham, J., Arif, M., y Thomas, S. 2016. A comprehensive study of surface modified graphene based polymer nanocomposites for multifunctional electronic applications. 2016 Young Researchers in Vacuum Micro/Nano Electronics (VMNE-YR), 1-13.

Allmendinger, R.W., Ramos, V.A., Jordan, T.E., Palma, M., Isacks, B.L. 1983. Paleogeography and Andean structural geometry, northwest Argentina. *Tectonics* 2, 1-16.

Alonso, R.N. La historia del Azufre en Salta. Disponible en eltribuno.com/historia-del-azufre-salta-n27464.

Allmendinger, R.W., Jordan, T.E., Kay, S.M. y Isacks, B.L. 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 25, 139-174.

Argentina. SEGEMAR - UNSAM, 2010. Azufre. Seminario de Estudios sobre el Ciclo Minerales - Materiales. Publicación Técnica SEGEMAR - UNSAM 16, 45 p. Buenos Aires, SEGEMAR – UNSAM.

Arredes E. 2022. Revisión de la Metalogénesis y Geología de la Puna. Universidad Nacional de Salta. Tesis Profesional Inédita.

Arslan, M., Kiskan, B., y Yagci, Y. 2016. Combining elemental sulfur with polybenzoxazines via inverse vulcanization. *Macromolecules*, 49(3), 767-773.

Baldis, B. 1980. Control megaestructural de los distritos metalíferos en el noroeste argentino. Simposio de Metalogénesis en Latinoamérica, IUGS, 5: 165-174.

Bermudez, S.L. 1963. Exploración de Mina Julia 4 en el Cerro Estrella, cumbre austral del Cordon de Cori, departamento Los Andes, Provincia de Salta. Dirección General de Fabricaciones Militares, 50p. Buenos Aires.

Boyd, D. A. 2016. Sulfur and its role in modern materials science. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(50), 15486-15502.

Brown, A. D., y Pacheco, S. 2005. Propuesta de actualización del mapa ecorregional de la Argentina. *La situación ambiental argentina*, 28-31.

Cabrera, A. L., y Willink, A. 1973. Biogeografía de América latina (Vol. 13, p. 120). Washington DC: Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.

Carilla, J., Grau, A. y Cuello, A. S. 2018. Vegetación de la Puna Argentina. *Fundación Miguel Lillo*. 24: 143-156,

Carr, D.D. 1994. Sulfur. *Industrial Minerals and Rock*. 6° Ed. 1017-1027.

Carotti, 1993. Azufre biogénico en la Formación Huitrin (Cretácico inferior), Cuenca Neuquina, Dpto. Malargüe, Mendoza – Argentina. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburo, 5: 182-186.

Campbell, F.T., Pfefferkorn R. y Rounsaville, J.F. 1993. Sulfuric Acid and Sulfur *Trioxide*, Ullmans Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5Ed, 635 – 699. Weinheim-VCH, Deerfield Beach, Florida, USA.

Ceccotti, S.P., Morris, R.J. y Messick, D.L. 1998. A Global Overview of the Sulphur Situation: Industry'S Background, Market Trends, and Commercial Aspects of Sulphur Fertilizers. En: Schnug, E. (eds) Sulphur in Agroecosystems. Nutrients in Ecosystems, Vol 2. Springer, Dordrecht.

Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C. y Ramos, V. 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. Earth-Sci. 18: 303-332.

Coira, B. y Kay, S.M. 1990. Volcanismo ignimbrítico cenozoico y su vinculación con el ascenso de la Puna (Argentina) a la luz de su caracterización geoquímica [Translated: Cenozoic ignimbritic volcanism and its relation to uplift of the Puna in light of its geochemical composition]. Décimo Primer Congreso Geológico Argentino, San Juan, Argentina, Sept. 17-21, 1990, Actas del Congreso Geológico Argentino, 11, vol. 1, pp. 36-38.

Coira, B., Kay, S.M. y Viramonte, J. 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna - a model for changing subduction geometry. Int. Geol. Rev. 35, 677-720.

Coutand, I., Cobbold, P.R., de Urreiztieta, M., Gautier, P., Chauvin, A., Gapais, D., Rossello, E.A. y Lopez-Gamundi, O. 2001. Style and history of Andean deformation, Puna plateau, northwestern Argentina. Tectonics 20, 210-234.

Cuomo, J.R. 1949. Exploración Mina Julia (2° Campaña). Industrias Químicas Nacionales S.M., departamento Los Andes, provincia de Salta. 42 pag. Salta.

Damm, K.-W., Harmon, R.S. y Kelley, S. 1994. Some isotopic and geochemical constraints on the origin and evolution of the Central Andean basement (19°-24°S). In: Reutter, K.J., Scheuber, E., Wigger, P.J. (Eds.), Tectonics of the Southern Central Andes; Structure and Evolution of an Active Continental Margin. Springer-Verlag, Berlin. 263-276.

Dellavedova, M.G. 2010. Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental. Disponible en <https://blogs.ead.unlp.edu.ar/planeamientofau/files/2013/05/Ficha-Nº-17-Guía-metodológica-para-la-elaboración-de-una-EIA.pdf>.

Deruelle, B. 1991. Petrology of Quaternary shoshonitic lavas of northwestern Argentina. In: Harmon, R.S., Rapela, C.W. (Eds.), Andean Magmatism and its Tectonic Setting. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 265, 201-216.

de Silva, S.L. 1989b. Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21°30'S to 23°30'S portion of the Central Andes of northern Chile. J. Volcano. Geotherm. Res. 37, 93-131.

Di Giacomo, A.S. 2005. Áreas Importantes para la conservación de las aves en Argentina: sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad. Temas de Naturaleza y Conservación 5: 1-514. Aves Argentinas/AOP. Buenos Aires.

Enghag, P. 2008. Encyclopedia of the elements: technical data-history-processing-applications. John Wiley & Sons.

FAO 1976). A framework for land evaluation. Soils bulletin 32, FAO, Rome.

Francis, P.W., Thorpe, R.S., Moorbath, S. y Kretzschmar, G.A. Hammill, M. 1980. Strontium isotope evidence for crustal contamination of calc-alkaline volcanic rocks from Cerro Galan, northwest Argentina. *Earth Planet. Sci. Lett.* 48, 257-267.

Francis, P.W., Sparks, R.S.J., Hawkesworth, C.J., Thorpe, R.S., Pyle, D.M., Tait, S.R., Mantovani, M.S. y McDermott, F. 1989. Petrology and geochemistry of volcanic rocks of the Cerro Galan caldera, northwest Argentina. *Geol. Mag.* 126, 515-547.

G.A.M.A. (Grupo Asesor Minero Alemán) 1972. Establecimiento azufrero de Salta. Argentina. Dirección General de Fabricaciones Militares. Tomo 1 a Tomo 10. Buenos Aires.

Gardeweg, M., Cornejo, P. y Davidson, J. 1984. Geología del volcán Lullailaco, Altiplano de Antofagasta, Chile (Andes Centrales). *Rev. Geol. Chile* 23, 21-37.

Gozalvez, M.R., Herrmann, C.J. y Zappettini, E.O. 2004. Minerales industriales de la República Argentina. Secretaría de Minería de la Nación, IGRM, SEGEMAR. 39: 6. Buenos Aires.

Gregory-Wodzicki, K.M. 2000. Uplift history of the Central and Northern Andes: A review. *Geol. Soc. Am. Bull.* 112, 1091-1105.

Ingenbleek, Y. y Kimura, H. 2013. Nutritional essentiality of sulfur in health and disease. *Nutrition Reviews*, 71(7), 413-432.

Isacks, B.L. 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *J. Geophys. Res.* 93, 3211-3231.

James, D.E. y Sack, I.S. 1999. Cenozoic formation of the Central Andes: A geophysical perspective. In: Skinner, B.J. (Ed.), *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Soc. Econ. Geol. Spec. Publ. 7, 1-25.

Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A. y Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geol. Soc. Am. Bull.* 94, 341-361.

Jordan, T.E. y Alonso, R.N. 1987. Cenozoic stratigraphy and basin tectonics of the Andes mountains, 20°-28° south latitude. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 71, 49-64.

Jordan, T.E. y Gardeweg, M. 1989. Tectonic evolution of the Late Cenozoic central Andes (20°-33°S). En: Ben-Avraham, Z. (Ed.), *Oxford Monographs on Geology and Geophysics 8: The Evolution of the Pacific Ocean Margins*. Clarendon Press, Oxford, pp. 193-207.

Katz, M. 2011. *Materiales y Materias Primas*. Argentina. Recuperado el 6 de enero de 2017, de <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/aire.pdf>.

Labrado, A. L., Brunner, B., Bernasconi, S. M. y Peckmann, J. 2019. Formation of large native sulfur deposits does not require molecular oxygen. *Frontiers in microbiology*, 10, 24. Formation of large native sulfur deposits does not require molecular oxygen.

Lucassen, F., Franz, G., Thirlwall, M.F. y Mezger, K. 1999. Crustal recycling of metamorphic basement: Late Paleozoic granitoids of northern Chile (V22†). Implications for the composition of the Andean crust. *J. Petrol.* 40, 1527-1551.

Lurgo Mayon, C.S., Segal, J.S. y Zappettini, E.O. 1999. El yacimiento de sulfuros masivos La Colorada, Salta. En, Zappettini, E.O. (Eds.), Recursos Minerales de la República Argentina, vol. 35. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales, pp. 487–492.

Marrett, R.A. y Emerman, S.H. 1992. The relations between faulting and mafic magmatism in the Altiplano-Puna plateau (central Andes). *Earth Planet. Sci. Lett.* 112, 53-59.

Marrett, R.A., Allmendinger, R.W., Alonso, R.N. y Drake, R.E. 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *J. South Am. Earth Sci.* 7, 179-207.

Matteini, M., Mazzuoli, R. y Omarini, R. 1997. The volcanism along the Calama-Olapato-El Toro transversal fault system in the Central Andes: The Tultul, del Medio and Pocitos volcanoes (Puna, Argentina). Universidad Católica del Norte, VIII Congreso Geológico Chileno, 159-163.

Naranjo, J.A. y Cornejo, P. 1992. Hoja Salar de la Isla, Carta Geológica de Chile, 1: 250,000, No. 72. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

Ort, M.H., Coira, B.L. y Mazzoni, M.M. 1996. Generation of a crust-mantle magma mixture: magma sources and contamination at Cerro Panizos, central Andes. *Contrib. Mineral. Petrol.* 123, 308-322.

Peroni, J., Castro, L. y Melgar, R. 2006. Otros minerales Azufre, Capítulo Introductorio. Minerales para la Agricultura en Latinoamérica Eds. Nielson y Sarudiansky Coordinadores Generales: Liliana Castro y Ricardo Melgar VII: 519-526 CYTED y CEPS.

Pilger, R.H. 1983. Kinematics of the South American subduction zone from global plate reconstructions. In: Cabreñ, R. (Ed.), *Geodynamics of the Eastern Pacific Region, Caribbean and Scotia Arcs.* Geodynamics Series vol. 9. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 113-125.

Pilger, R.H. 1984. Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *J. Geol. Soc. London* 141, 793-802.

Pontussi E.P. 1995. Geografía del Noroeste Argentino. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Powell, E. H y Eyring, J. 1955 *Am. Chem. Soc.* 1943, 65, 648 – 654; b) F. Fairbrother, G. Gee, G. T. Merrall, J. *Polym. Sci.*, 16, 459 – 469.

Richards, J.P. 2000. Lineaments revisited. *Soc. Econ. Geol. Newsl.* 42, 14-20.

Richards, J.P., Villeneuve, M. 2001. The Lullailaco volcano, northwest Argentina: Construction by Pleistocene volcanism and destruction by sector collapse. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 105, 77-105.

Richards J. P. y Villeneuve M. 2002. Characteristics of late Cenozoic volcanism along the Archibarca lineament from Cerro Lullailaco to Corrida de Cori, northwest Argentina. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 116: 161-200.

Riller, U., Petrinovic, I., Ramelow, J., Strecker, M. y Oncken, O. 2001. Late Cenozoic tectonism, collapse caldera and plateau formation in the central Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 188, 299-311.

Rosas, S., Luna, C., Sánchez, O. y Ortiz, E. 2007. Producción de ácido sulfúrico por medio del tratamiento de gases residuales generados en la tostación de piritas. *Información tecnológica*, 18(4), 35-40.

Ruckmick, J. C., Wimberly, B. H., y Edwards, A. F. 1979. Classification and genesis of biogenic sulfur deposits. *Econ. Geol.* 74, 469–474. doi: 10.2113/gsecongeo.74.2.469.

Salfity, J.A. 1985. Lineamientos transversales al rumbo andino en el noroeste Argentino. IV Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, Parte 2, 119-137.

Salfity, J.A., Gurustovich, S., Moya, C. y Amengual, R. 1984. Marco tectónico de la sedimentación y la efusividad cenozoicas en la Puna argentina. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 539-554, Buenos Aires.

Seggiaro, R., Becchio, R., Pereyra, F. y Martínez, L. 2007. Hoja Geológica 2569-IV, Antofalla, provincias de Catamarca y Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 343, 62 pp. Buenos Aires.

Schreiber, U. y Schwab, K., 1991. Geochemistry of quaternary shoshonitic lavas related to the Calama-Olapato-El Toro Lineament, NW Argentina. *J. South Am. Earth Sci.* 4, 73-85.

Sparks, R.S.J., Francis, P.W., Hamer, R.D., Pankhurst, R.J., O'Callaghan, L.O., Thorpe, R.S. y Page, R. 1989. Ignimbrites of the Cerro Galaxn caldera, NW Argentina. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 24, 205-248.

Stix, J., Zapata, G.J.A., Calvache, V.M., Cortes, J.G.P., Fischer, T.P., Gomez, M.D., Narvaez, M.L., Ordonez, V.M., Ortega, E.A., Torres, C.R. y Williams, S.N. 1993. A model of degassing at Galeras volcano, Colombia, 1988-1993. *Geology* 21, 963-967.

Sureda, R.J., Galliski, M.A, Argañaraz, P. y Daroca, J. 1986. Aspectos Metalogenéticos del Noroeste Argentino (Provincias de Salta y Jujuy). *Revista Capricornio* 1 (1): 39-95.

Vandervoort, D. S. 1997. Stratigraphic response to saline lake-level fluctuations and the origin of cyclic nonmarine evaporite deposits: The Pleistocene Blanca Lila Formation, northwest Argentina. *Geological Society of America Bulletin*, 109(2), 210-224.

Viramonte, J.G., Galliski, M., Araña, V., Aparicio, A., García Cacho, L. y Martín Escorza, E. 1984. El finivulcanismo básico de la depresión de Arizaro, Provincia de Salta, República Argentina. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 234-253, Buenos Aires.

Whiting, F.S. 1959. Structural belts and mineral deposits of northwestern Argentina. *Economic Geology* 54: 903-912.

Zappettini, E., Blasco, G. y Godeas, M., 1997. El volcanismo Paleógeno de la Puna occidental, República Argentina. VIII Congreso Geológico Chileno. Universidad Católica del Norte, pp. 291-295.

Zappettini, E. y Blasco, G., 1998. Hoja Geológica 2569-II Socompa, provincia de Salta, Republica Argentina. *Inst. Geol. Recurs. Miner. SEGEMAR, Argentina, Bol.* 260, 83 pp.

Zappettini, E., 2008. Las Avalanchas de Detritos del Volcán Lullailaco. El colapso de un gigante. Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. CSIGA (Ed.) Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 46, I, 446 págs., Buenos Aires.

⊕ Páginas consultadas

- [Annual Survey of Mining Companies, 2023 | Fraser Institute](#)
- [Azufre \(S\). Propiedades químicas del Azufre de la tabla periódica \(nationalgeographic.com.es\)](#)
- [1-LEY-7141-SALTA-LEY-DE-PROCEDIMIENTOS-MINEROS.pdf](#)
- [\(economiasalta.gob.ar\)](#)
- [eltribuno.com/nota/2011-5-22-19-25-0-historia-del-azufre-en-salta](#)
- [-Extracción del azufre | La](#)
- [Guía de Química \(laguia2000.com\)](#)
- [-http://www.sulphurinstitute.org/learnmore/sulphur101.cfm](#)
- [-https://www.mordorintelligence.ar/industry-reports/sulfur-market\).](#)
- [-InfoLeg - Información Legislativa.](#)
- [-Introduction to Sulphur - The Sulphur Institute](#)
- [-Materiales y materias primas : azufre. Capítulo 4. Guía](#)
- [didáctica \(me.gov.ar\)](#)
- [maxresdefault.jpg \(1280×720\) \(yting.com\)](#)
- [-Mineral Commodity Summaries 2024 \(usgs.gov\)](#)
- [-Sulfur - Element information, properties and uses | Periodic Table \(rsc.org\)](#)
- [-Sulfur Market - Price Forecast & Industry Demand](#)
- [\(mordorintelligence.com\)](#)
- [- Sulphur mining in an active volcano - BBC News](#)
- [-tockphoto.com/es/foto/manantial-de-azufre-único-en-el-desierto-salar-de-uyuni-lago-salado-altiplano-meseta-gm1300934335-393104155](#)