

*Comunicación***Teledetección como herramientas de análisis y monitoreo de la vegetación nativa****Etcheverry, Guadalupe; Barretto, Silvia; Benet, María Paz**guadalupe.etccheverry@fadu.uba.ar; barretto@fadu.uba.ar;

Universidad de Buenos Aires. Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Instituto Superior de Urbanismo, Territorio y Ambiente. Red Textil Sostenible, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Línea temática 3. Escalas, realizaciones, productos y obras

Palabras clave

Teledetección, Especies nativas, Minería, Textiles, Plantas tintóreas

Resumen

Durante el proyecto de extensión UBANEX 11-2020 en el marco de la proliferación de plantas nativas productoras de tintes naturales prehispánicos, se encontraron ejemplares de especies que reflejan pérdida de vigor de las semillas debido a que deben germinar rápidamente y desarrollar una plántula en un ambiente que se encuentra deteriorado. Nos preguntamos si la actividad de la minería a cielo abierto de Bajo la Alumbra tenía influencia. La inserción de la minera Alumbra Ltda., empresa transnacional dirigida desde 1997 por Glencoe, que explota cobre, oro y molibdeno en el paisaje de las cumbres catamarqueñas, generó desde su apertura una modificación del terreno, del entorno y de los ciclos naturales de la zona.

En 2012 se llevó a cabo un análisis por teledetección del impacto de la minera sobre el territorio, siendo la vegetación el foco principal, donde se observó una disminución de la biomasa vegetal en relación con el tiempo de explotación de la mina, que podría haber sido desencadenado por la misma explotación, y que

abarca una extensa zona aledaña a ésta, de por los menos 40km de distancia desde el punto central.

La minera se encuentra ubicada a unos 52 km de la ciudad de Belén, por lo que ésta no entró dentro del análisis, lo que no significa que no haya sido afectada, ampliando la escala territorial de impacto. Una actualización del análisis por teledetección del estado de la zona de la ciudad podría brindar una explicación del porqué disminuyó la presencia o se modificó el nicho de algunas especies vegetales nativas que forman parte de las plantas prehispánicas tintóreas utilizadas para los textiles.

Considerando que en la actualidad la mina no se encuentra en funcionamiento como mina a cielo abierto, nos preguntamos ¿qué efecto tendrá el cese de actividad? ¿cómo cambia la cobertura vegetal del área entre la mina y la ciudad de Belén? ¿qué factores climáticos preexistentes condicionan el aumento o disminución de la cobertura vegetal de la zona?

Introducción

Belén es una ciudad de la provincia argentina de Catamarca, y capital del departamento homónimo. Se ubica al sudoeste del departamento entre los km 4089 y 4092 de la Ruta Nacional 40, en un valle semiárido surcado por el Río Belén y rodeado por las Quebradas de Belén salvo en su dirección Sur. Su clima al norte es Árido Andino Puneño y en el centro y sur es Árido de Sierras y Bolsones. Se accede a la ciudad desde San Fernando del Valle de Catamarca por las rutas N° 38, 60 y 40 y, desde el departamento de Santa María por la ruta N° 40.

La ciudad es conocida por sus diversos tejidos artesanales, realizados en telares, formando parte de la Ruta Turística “Ruta del Telar” la cual es una iniciativa que surge del espacio de trabajo CAVALAF, por la necesidad de optimizar la comercialización de los productos textiles en el territorio, apuntando a recrear un mercado textil a nivel local. Aparte del anascote, de la barchila, el barracán y el picote, se destacan los célebres ponchos belichos. En la actualidad, a partir de la explotación intensiva del Bajo de la Alumbraera, Belén es el centro que atrae mano de obra. (...) En el Belén actual, la porción de territorio que ocupa Minera Alumbraera es una localidad rural del capitalismo global. En forma paralela al enclave, la economía industrial textil tradicional basada en mano de obra femenina y estructurada en relaciones patrono-cliente continuaría siendo viable.” (Mastrángelo, 200, pp. 108 – 109)

Cronología de la Mina Bajo de la Alumbraera: Desde 1997 se lleva adelante la explotación minera a cielo abierto Bajo de la Alumbraera en el departamento de Belén, Catamarca por parte de la empresa transnacional Glencoe. Allí se extraen oro y cobre, alcanzando los 120 millones de toneladas métricas de producción minera anual. A lo largo de la explotación de Alumbraera se realizaron dos pozos de extracción de roca. El pozo principal tiene forma ovalada, un diámetro de 2 kilómetros en su parte más ancha y una profundidad de 850 metros. (<https://www.pagina12.com.ar/424253-cierre-de-alumbraera-impacto-ambiental-remediacion-y-apuesta->.) Cabe resaltar que “Bajo de la Alumbraera pertenece a una región semidesértica del país, con bajas precipitaciones anuales (160 mm) y una temperatura media anual de 17°C. Respecto a la vegetación, se identificó la presencia de bosques de monte, estepas arbustivas de monte (jarillales y estepas espinosas de pedemonte) y prados de monte (gramíneas perennes) vegetación dunícola, vegetación ribereña y arbustales riparios, comunidades halófilas y cardonales columnares” (Informe de Impacto Ambiental para el año 1998). Es por esto que es de interés remarcar, que la mina cuenta con un permiso de extracción de agua dulce de 1.200 litros/segundo, que implican un consumo de 100 millones de litros diarios. La provisión de agua se realiza desde el Campo del Arenal, un acuífero de agua fósil, donde la empresa ha adquirido 53.000 hectáreas y ha instalado trece pozos de extracción.

El proceso de extracción se inicia en la provincia de Catamarca. Las rocas se extraen de la cantera con tres palas eléctricas, se transportan hasta la Planta Concentradora mediante una flota de 38 equipos pesados de gran porte, cada uno con capacidad para cargar 220 toneladas. El concentrado obtenido –contiene cobre, oro y plata- se bombea con el agregado de agua por un mineraloducto de 317 km de longitud y 175 mm de diámetro. Este mineraloducto se extiende a través de los Nevados del Aconquija hasta la Planta de Filtros, ubicada en Tucumán. La energía eléctrica se provee desde la estación El Bracho, a través de una línea de alta tensión de 220 KW y 200 km de longitud, que se extiende hasta la mina, en Catamarca. En la provincia de Tucumán, en la planta de filtros, se le extrae el agua al concentrado hasta obtener un producto más seco, con 7% de humedad, y luego se lo transporta por el ferrocarril Nuevo Central Argentino en trenes de la empresa hasta sus instalaciones portuarias, ubicadas en la provincia de Santa Fe, donde el producto se carga en buques con rumbo a mercados internacionales. (Ejatlás, 2019)

La empresa en sus Informe de Sostenibilidad de Minera Alumbraera Ltd. 2008 declara el consumo de sus principales insumos y producción de desechos con valores anuales que dan una magnitud de la producción si consideramos que utilizan 24.608 toneladas de explosivos por año.

La secuencia de denuncias por la contaminación de cursos de agua derivada de su dique de colas y por el secado del Campo del Arenal. Según un trabajo

de la Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN) en base a los propios informes de Alumbraera, “La Secretaría de Agua y Ambiente de la provincia le ha concedido a Minera Alumbraera el permiso de extracción de 800 litros de agua por segundo, extrayéndose un 98% de lo permitido (Minera Alumbraera, 2017). Por tanto, Alumbraera puede llegar a consumir más de 65 millones de litros de agua fresca por día y 25 mil millones de litros anuales. Este es el consumo hídrico más alto de las operaciones de Glencore en América Latina y equivale al 34% de lo que consumen todos los habitantes de la provincia en el período de un año¹⁷.” (FARN, 2019, p.17). El actual Campo del Arenal era originalmente llamado El Campo de Los Pozuelos “porque, además de lagunas, tenía muchas vertientes que afloraban del acuífero. Ahora todo es arena. “Ni los pastos crecen, por eso empezaron a llamarle El Arenal”. ”¹

En 2004 el primer derrame reconocido públicamente por Minera Alumbraera ocurre, en la estación de bombeo II, ubicada en la localidad de Villa Vil (Belén), diseminándose material concentrado sobre el cauce del río e inmediaciones. En 2006 se producen nuevos derrames de concentrado mineralizado por rotura del mineraloducto, lo que vuelve a ocurrir en 2007. Casos no reconocidos y ocultados por la minera hay múltiples, principalmente se ocultan los derrames ocurridos por camiones que vuelcan en la ruta cuando transportan aceites o sustancias tóxicas.

En 2008, el vicepresidente de la compañía fue procesado por delito de contaminación, siendo el primer caso en Latinoamérica en el que un ejecutivo minero llega a esa instancia judicial. Las pruebas para este procesamiento no sólo fueron las muestras obtenidas por Gendarmería Nacional, sino los datos del propio informe ambiental de la empresa. En 2016, el ex-vicepresidente fue sobreesidido y se procesó al gerente general de la compañía, acusado por la contaminación de la cuenca de los ríos Salí-Dulce, con metales pesados.

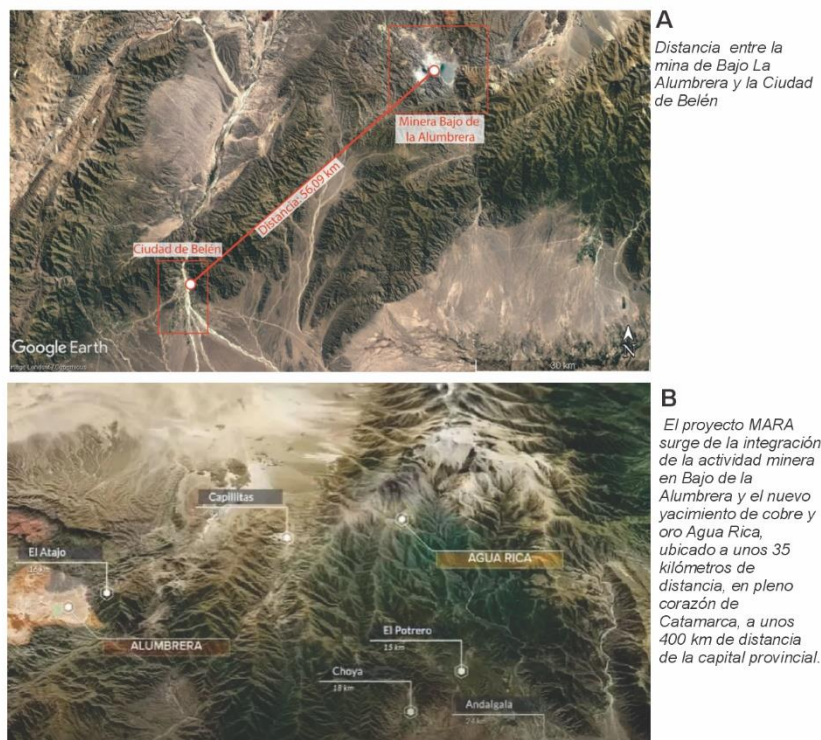
Desde el 2018 la actividad en la mina disminuyó, pero esta no se detuvo en su totalidad. Luego de la finalización de la explotación a cielo abierto en julio de 2018, Minera Alumbraera comenzó una nueva modalidad de producción al desarrollar la explotación subterránea de Bajo de la Alumbraera, lo cual extiende la vida del proyecto a 10 años. Esto no solo contradice con lo planteado en el Informe de Sostenibilidad de la minera de 2016, que estipulaba el cierre de operaciones en 2018, sino que pone al inicio del cierre total de la Mina en 2028 y no en 2020². Sumado a esto, se continúa con el bombeo de agua desde el Campo El Arenal para garantizar en funcionamiento el mineraloducto el cual va a asistir al nuevo proyecto minero Minera Agua Rica/Alumbraera (MARA). “Este proyecto integra el yacimiento

¹ “Megaminería en Catamarca: extraer la vida - Territorios y resistencias” (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2023, de <https://territoriosyresistencias.com/historias/catamarca.html>

² Cronograma de cierre de operaciones. Fuente: Informe de Sostenibilidad de Minera Alumbraera Ltd. 2016

Agua Rica -a 17 kilómetros de Andalgalá, al norte de la provincia- con la infraestructura ya existente”³ (Figura 1).

Figura 1- A Ubicación de la Ciudad de Belén en relación con la mina. -B Ubicación del nuevo proyecto minero Minera Agua Rica/Alumbrera



Fuente: A Elaboración propia con Google Earth. - B
<https://media.ambito.com/p/1a62e0319fc6f395b4c17809bfa8fef5/adjuntos/239/imagenes/039/760/0039760382/mara-mapajpg.jpg?2022-04-05-19-16-55>

Dentro de las actividades del cierre la mina se encuentra en proceso revegetación de la escombrera o botaderos, buscando que tomen la configuración aproximada a la que poseía antes de la intervención del proyecto.

Alumbrera cuenta con un banco de semillas colectadas de áreas internas y externas de Bajo de la Alumbrera, a fin de conservar la diversidad genética de la zona, especialmente de especies nativas. Actualmente contamos con aproximadamente 190 kilos de semillas de especies conservadas a bajas temperaturas. Se realizaron pruebas de siembra directa de semillas de especies nativas en el dique de colas y en las escombreras. En el diseño de las pruebas de revegetación se priorizaron las especies de mayor presencia naturalmente en los ambientes. No se busca recomponer la participación de cada una de las especies, sino la tendencia de participación relativa de los tipos

³ “Megaminería en Catamarca: extraer la vida - Territorios y resistencias” (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2023, de <https://territoriosyresistencias.com/historias/catamarca.html>

fisionómicos relevados en el terreno que no ha sido intervenida por la operación. (Informe de Sostenibilidad de Minera Alumbra Ltd. 2017)

Con los resultados de estudios en viveros y pruebas de campo llevadas a cabo por la mina se identificaron las especies con mayor potencial de supervivencia y adaptación para ser utilizadas durante la revegetación de los sitios de mina: *Atriplex*, *Senecio Subulatus*, *Senna rigida*, *Cercidium praecox*, *Zuccagnia punctata*, *Larrea divaricata*, *Pappophorum caespitosum*, *Flouencia*.

Pero, “si bien la empresa declara que su plan de gestión para el cierre de la mina fue presentado a la provincia, los departamentos no están al tanto de cómo se llevará a cabo. Los ediles de Andalgalá pidieron reiteradamente que se los incluyera en la planificación del cierre de mina ya que les corresponde según la Ley de Protección Ambiental N°24.585 para la actividad minera. (...) Si bien en los informes de sostenibilidad de Minera Alumbra se encuentran expuestas algunas medidas de mitigación ambiental luego del cierre, no se conoce si éstas han sido presentadas formalmente a las autoridades ambientales o a la población local de Catamarca. Esto impide la evaluación y concertación de los métodos y obras que planea la empresa para el cierre de la mina. Los impactos de la mina se han acumulado por veinte años, no existen estudios científicos claros que dimensionen la irreversibilidad de los daños ocasionados en acuíferos y suelos, y la información presentada por la empresa es contradictoria y confusa (Machado Aráoz et al, 2017).

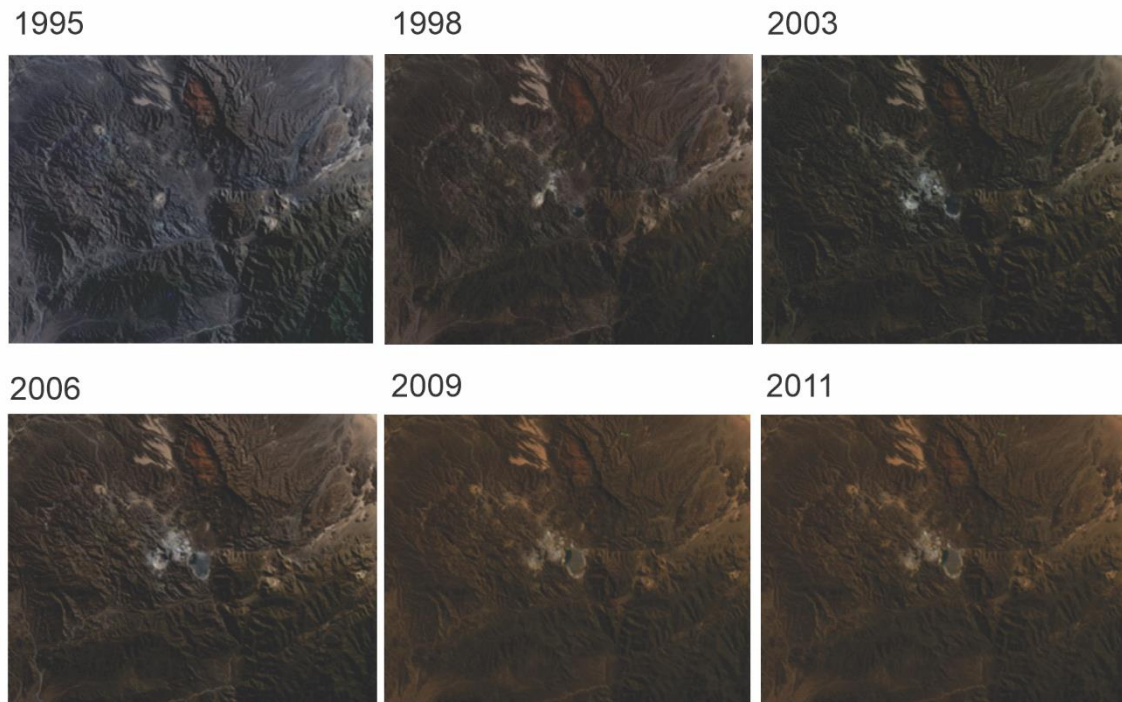
Considerando que en la actualidad la mina no se encuentra en funcionamiento como mina a cielo abierto, nos preguntamos ¿qué efecto tendrá el cese de actividad? ¿cuánto cambia la cobertura vegetal del área entre la mina y la ciudad de Belén? ¿qué factores climáticos preexistentes condicionan el aumento o disminución de la cobertura vegetal de la zona?

Antecedentes – El efecto de la Mina sobre el paisaje

La inserción de la minera en el paisaje de las cumbres catamarqueñas generó desde su apertura una modificación del terreno, del entorno y de los ciclos naturales de la zona, volviéndola objeto de gran controversia debido a su impacto en el ambiente. Su impacto va desde la modificación del territorio y por ende del nicho de un número de especies vegetales y animales, al consumo de agua exorbitante en una zona de clima desértico que produciría cambios en la red de drenaje y/o en el flujo del agua subterránea y superficial, junto a la creación de un embalse/dique que contiene los desechos del proceso de separación del mineral de la roca, los cuales infiltran en el suelo afectando posiblemente las napas y las aguas de los ríos. A su vez, los millones de toneladas de material extraídas de los pozos de perforación se fueron depositando en montículos de hasta 30 metros de alto que cubren una superficie total de casi 30 hectáreas en las sierras que anticipan el comienzo de la Cordillera.

La misión del satélite Landsat 5 TM (Thematic Mapper) capto imágenes de la zona de emplazamiento de la mina y la modificación del entorno desde el comienzo de su actividad hasta el 2011, y revelan el crecimiento de la fosa donde se extraen las rocas que luego son procesadas para separar el mineral. (Figura 2).

Figura 2 Imágenes Landsat 5 de la zona de emplazamiento de la mina



Imágenes Landsat 5 zona de emplazamiento de la mina

Fuente: Pagina Web <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/educacion-y-formacion-masiva/materiales-educativos/mina-bajo-de-la-alumbrera-catamarca-argentina-landsat-5-tm>. Imagen de acceso público.

En 2012 Ramos C.S., Marchetti C.F., Apellaniz M., y Graziano M. se llevaron a cabo un análisis por teledetección del impacto de la minera sobre el territorio, siendo la vegetación el foco principal, en un radio de 40 km. Se demarcaron 5 áreas de interés en forma de anillos concéntricos alrededor del área de explotación, a una distancia del punto central de la misma de entre 0 y 4km, 4 y 10km, 10 y 20km, 20 y 30km, 30 y 40km. Luego se llevó a cabo el análisis de los valores de NDVI o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, el cual es un indicador de la biomasa fotosintéticamente activa, y es usado para estimar la cantidad y el desarrollo de la vegetación. Este índice se basa en que la vegetación tiene una reflectividad muy alta en la banda 4 de Landsat y muy baja en la banda 3. Por lo tanto, cuanto mayor sea la diferencia entre ambas bandas mayor es el porcentaje de cobertura vegetal.

Luego del análisis de los resultados se observó "una disminución del NDVI a partir del comienzo de la explotación y una correlación negativa con el tiempo en todas las áreas analizadas alrededor del yacimiento, con un mayor efecto

en el anillo de 4-10km, sugiriendo un impacto sobre la vegetación más allá de la zona en explotación.” (Ramos et al, 2012)

Alcances de la teledetección como herramienta de estudio

La teledetección es una herramienta poderosa para el análisis y monitoreo de la vegetación nativa debido a su capacidad para adquirir datos a distancia sobre la superficie terrestre. Utilizando sensores montados en satélites o aviones, la teledetección recopila información sobre diferentes características del paisaje, incluida la vegetación. Es un conjunto de técnicas que nos ayudan a obtener información a distancia de un determinado objeto situado sobre la superficie terrestre. Esta información va más allá del alcance del ojo humano, y es obtenida mediante la interacción de los principales elementos: sensor, objeto de estudio y flujo energético, este último también denominado Espectro Electromagnético. (Veneros et al., 2020) A su vez, es considerada como el enfoque más apropiado para identificar tendencias sólidas en la dinámica de la vegetación, tanto espacial como temporalmente. Las imágenes de satélite ofrecen mayor resolución espectral y temporal que las imágenes aéreas, lo que permite una mejor diferenciación de los tipos de vegetación y los patrones fenológicos.

Para llevar a cabo el análisis se obtuvieron imágenes satelitales Sentinel 2 del área donde se encuentra la minera Bajo la Alumbra y la ciudad de Belén dentro del periodo 2017-2022. A su vez se buscó que todas las imágenes descargadas pertenezcan al periodo entre enero a abril, ya que esta es el período de NDVI alto. El recorte temporal comienza en 2017 debido a la falta de imágenes Sentinel 2 anteriores a ese año, además se buscó descargar imágenes de Landsat 8 OLI/TIRS dentro del periodo 2013-2023, pero no se obtuvo acceso a ellas.

Para la descarga de las imágenes Sentinel 2, que son de libre acceso, se utilizó Google Earth Engine. Se escribió un código en lenguaje JavaScript para descargar las imágenes desde “COPERNICUS”

(www.scihub.copernicus.eu) las imágenes Sentinel 2 a partir de la composición de imágenes. (Figura 3 A)

Además, se escribió un código para la descarga de las Banda 4 (infrarrojo) y otro para la Banda 8 (infrarrojo SWIR), también a partir de la composición de imágenes. Mientras que el infrarrojo muestra en tonos rojos las áreas cubiertas vegetación, las escenas compuestas en infrarrojo SWIR presentan esta característica en color verde brillante. Su superposición permite identificar la escasez de vegetación y su disminución o aumento en la zona con el paso del tiempo. (Figura 3 B)

En cada bajada se reemplazó 'AAAA-MM-DD' en fechaInicio y fechaFin con las fechas de inicio y fin del rango de tiempo para descargar las imágenes deseadas. Es necesario remarcar que la composición de imágenes se debe a que no hay imágenes Sentinel que contengan el área delimitada por si solas, por lo que se debe hacer una composición de 2 (dos). También se determinó la cobertura máxima de nubes con un valor del 10%, ya que valores

superiores impedirían el análisis y menores limitarían la cantidad de imágenes disponibles.

El resultado es un archivo ráster con valores que van del -1 al +1, lo que significa que los valores cercanos a +1 es en donde se encuentra la vegetación más vigorosa. Cabe aclarar que la vigorosidad y la asignación de colores depende del contexto, por lo que es importante analizar los valores que resultaron en dicha clasificación. Para el procesamiento de datos y la visualización del archivo se utilizó el programa QGIS 3.28.2.

La fórmula general del NDVI es:
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$
 Donde: NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada. NIR: Banda del infrarrojo. Red: Banda del rojo.

Para la obtención del NDVI en QGIS, primero hay que entender que la

fórmula de NDVI adaptada al programa se ve así:
$$NDVI = \frac{BANDA\ 8 - BANDA\ 4}{BANDA\ 8 + BANDA\ 4}$$

Por lo que, luego de importar las imágenes, debemos buscar en la Caja de Herramientas de Procesos la aplicación Raster Calculator (calculador de ráster). Nos saldrá una ventana en donde se podrá escribir (en expresión) la formula adaptada para el NDVI. (Figura 3 C). En layers de referencia seleccionamos la imagen Sentinel y luego ejecutamos (Figura 3 D)

La imagen resultante tiene asignada automáticamente como tipo de Rendizador "Gris monobanda" por lo que hay que cambiarlo a "Pseudocolor monobanda". (Figura 3 E)

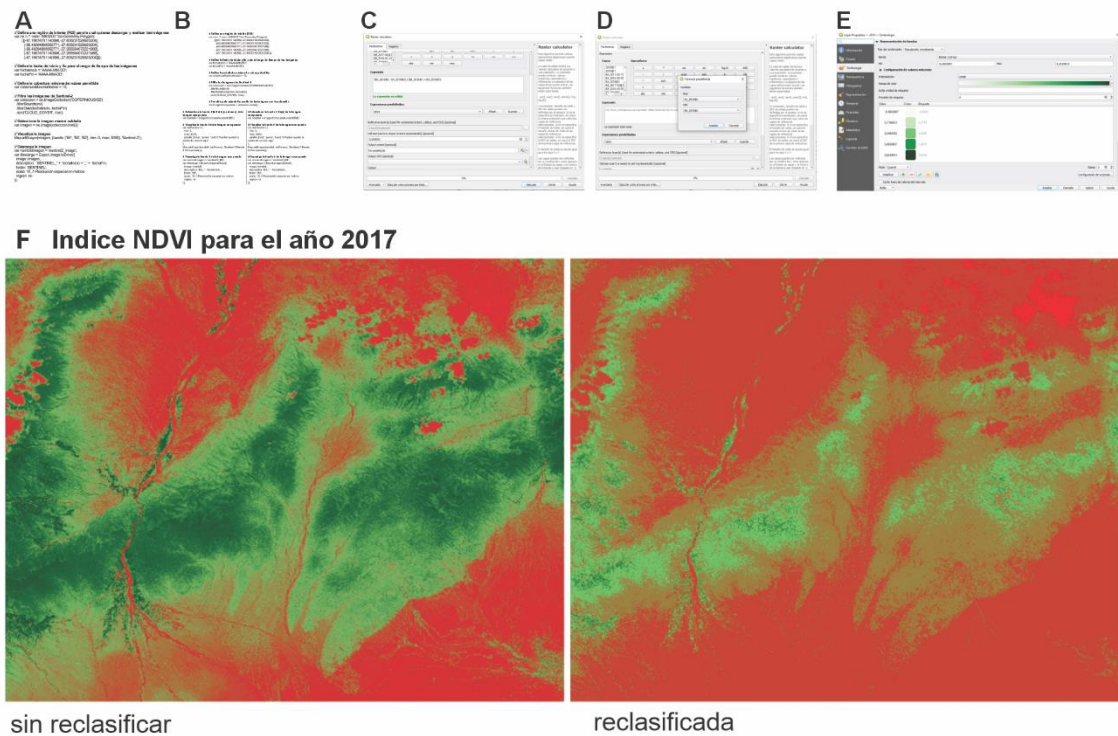
Luego, para llevar a cabo el análisis de NDVI para evaluar el impacto la mina y su cese de actividad en la vegetación circundante, se les asignó a los pixeles que componen la imagen un intervalo de clase para cobertura vegetal a partir de los criterios presentados por Aquino et al en su artículo "Use of Remote Sensing to Identify Areas at Risk of Degradation in the Semi-Arid Region" (2018). Los valores de clasificación son los siguientes:

- Los pixeles con valores entre -1 a 0 corresponden principalmente a áreas con agua o superficies inanimadas como rocas o suelo desnudo. La baja reflectancia en el rojo y el alto valor en el infrarrojo cercano generan un NDVI negativo.
- Los pixeles con valores entre 0 a 0.2 corresponden principalmente a áreas con poca o ninguna vegetación, como suelo desnudo, asfalto o áreas urbanas. La reflectancia en el rojo y el infrarrojo cercano es similar, lo que resulta en un NDVI cercano a cero.
- Los pixeles con valores entre 0.2 a 0.4 corresponden a áreas con vegetación escasa. La reflectancia en el rojo y el infrarrojo cercano sigue siendo similar pero la del infrarrojo cercano empieza a aumentar por encima del rojo.

- Los píxeles con valores entre 0.4 a 0.6 corresponden a áreas con vegetación moderada baja representando arbustos y prados. Hay una mayor reflectancia del infrarrojo cercano.
- Los píxeles con valores entre 0.6 y 0.8 representan áreas con vegetación moderada alta representando arbustos y prados. Hay una mayor reflectancia del infrarrojo cercano.
- Los píxeles con valores entre 0.8 a 1 representan áreas con vegetación densa y saludable. La alta reflectancia en el infrarrojo cercano y la baja reflectancia en el rojo generan un NDVI positivo cercano a 1.

A partir de esta reclasificación, las imágenes resultantes son drásticamente diferentes. A continuación, se mostrará la diferencia entre la imagen de 2017 sin reclasificar y reclasificada (Figura 3 F):

Figura 3. -A Define una región de interés (ROI) para la cual quieres descargar y analizar las imágenes. -B selección de las bandas. -C Cálculo de NDVI en QGIS, paso 1. -D Cálculo de NDVI en QGIS, paso 2 -E Cálculo de NDVI en QGIS, paso 3. -F Índice NDVI para el año 2017 sin reclasificar (derecha) y reclasificada (izquierda)



Fuente: Elaboración propia en QGIS. Imagen de acceso público.

La reclasificación es de vital importancia debido a las características particulares de este tipo de entorno. En las zonas áridas, la vegetación es escasa y está adaptada para sobrevivir en condiciones de escasez de agua y altas temperaturas. Por lo tanto, la interpretación directa de los valores de NDVI sin considerar estas particularidades puede llevar a conclusiones

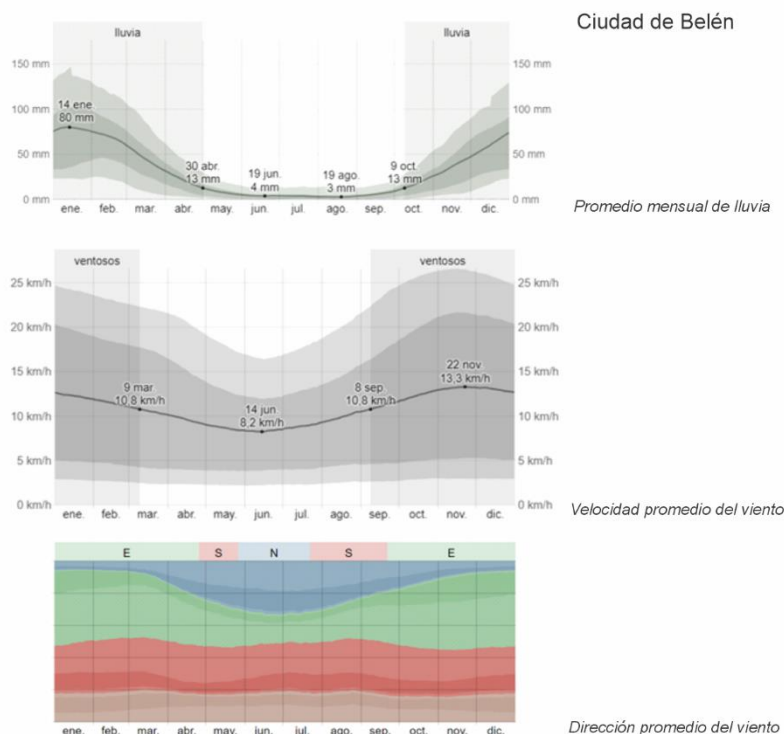
erróneas o incompletas sobre la salud y densidad de la vegetación en esta región.

Es importante tener en cuenta que el NDVI tiene sus limitaciones y no proporciona información detallada sobre la composición y diversidad de la vegetación. Además, debe utilizarse junto con otras técnicas y datos para obtener una comprensión completa del estado y dinámica de la vegetación en una determinada área

Análisis de los factores climáticos y su efecto a mayor escala

Como se dijo anteriormente, los análisis realizados sobre el efecto de la mina se realizaron en un radio máximo de 40km. La ciudad de Belén se encuentra ubicada a unos 52 km de la mina, por lo que no entró dentro del análisis, pero esto no significa que no esté ni haya sido afectada ampliando la escala territorial de impacto. Hay dos factores muy importantes, la precipitación y otro que no fue mencionado anteriormente y que en esta zona topográficamente compleja juega un rol importante, el viento. En cuanto a la precipitación, según el Servicio Meteorológico Nacional, la temporada de lluvia dura 7 meses, de octubre a abril, siendo enero el mes más lluvioso con un promedio de 80 milímetros de lluvia y por consiguiente el más activo fotosintéticamente hablando (Figura 4).

Figura 4 Promedio mensual de lluvias, Velocidad y Dirección promedio de vientos



Fuente: Weather Spark. Imagen de acceso público.

En relación al viento, la velocidad por hora promedio tiene variaciones estacionales considerables en el transcurso del año. La época más ventosa del año dura de septiembre a marzo (6 meses), con velocidades promedio de más de 10,8 kilómetros por hora, siendo noviembre el mes más ventoso del año, con vientos a una velocidad promedio de 13,2 kilómetros por hora. (Figura 4) Pero el dato del viento más importante es su dirección. La ciudad de Belén se encuentra en dirección Suroeste de la mina, y, coincidentemente, los vientos predominantes en esta zona provienen del este entre septiembre y abril (7 meses) lo que coincide con la época.

Catamarca es una zona que naturalmente sufre el efecto del viento y de las conocidas tormentas de polvo. Los suelos de la zona son generalmente de texturas arenosa a franco arenoso, pudiendo ser franco limoso, con bajo contenido de materia orgánica. La fragilidad de los suelos los hace susceptibles a procesos de erosión, tanto eólica como hídricas, siendo más relevante la ocasionada por la acción del viento, lo cual deteriora aún más su baja fertilidad. Pero en la actualidad, estas tormentas se ven potenciadas, y una de las razones es la disminución de la cubierta vegetal. Muchas de las plantas nativas de la zona son estabilizadoras de suelo, es decir que evitan la erosión de este por parte del viento, principalmente, y de la lluvia. Un ejemplo de esto es la comunidad arbustiva típica de la región, el jarillal conformado principalmente por *Larrea divaricata*, *Larrea cuneifolia* y *Larrea nítida*. Se destacan también la *Tessaria absinthioides*, la *Portulaca grandiflora*, la *Hieronymiellia clidanthoides*, la *Parkinsonia praecox* (que es utilizada como combustible por algunas panaderías por el aroma que le brinda al pan), la *Allenrolfea vaginata* (que también se utiliza como combustible) y la *Ximenia americana* (cuya raíz se utiliza como tinte natural). Pero, debido a la degradación del ambiente por la contaminación, extracción de especies estabilizadoras de suelo debido a la intensa actividad agraria de los emprendimientos olivícolas y citrícolas, sumado ahora la deforestación descontrolada genera que las tormentas de polvo dejen de suceder esporádicamente y se vuelvan más comunes degradando aún más el suelo.

Ahora, ¿Qué sucedería si a este fenómeno natural le sumamos el efecto de la mina? Al inicio se mencionó que millones de toneladas de material extraído de los pozos de perforación se depositaron en montículos de hasta 30 metros de alto que cubren una superficie de casi 30 hectáreas en las sierras que anticipan el comienzo de la Cordillera. A su vez, la excavación y consecuente suelo desnudo genera una producción de polvo de tal magnitud que no es natural en la zona. Las operaciones mineras liberan grandes cantidades de polvo y partículas finas al aire, especialmente durante las actividades de excavación, transporte y trituración del material. Además, los combustibles tóxicos utilizados en la maquinaria y vehículos mineros también pueden emitir contaminantes al aire. De acuerdo con el Informe Sombra de las Operaciones de Glencore en Latinoamérica, que detalla las acciones de esta multinacional en la región, durante sus años de extracción la minera detonaba 25 mil toneladas anuales de explosivos, cuyas ondas sonoras emitían altos niveles de gases nitrosos a la atmósfera que, en consecuencia, generaban lluvias ácidas con efecto sobre las personas, el agua, los suelos, la flora y la fauna.

Es sabido que el viento cargado de polvo y de combustibles tóxicos generado por la minería a cielo abierto puede generar diversos impactos sobre la vegetación aledaña:

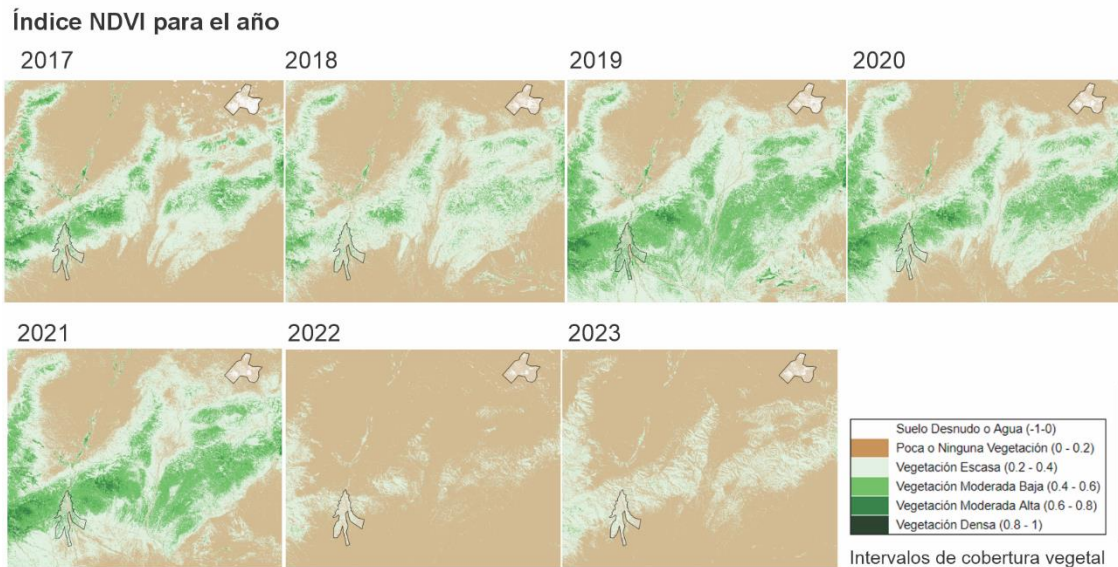
1. **Daño Físico a la Vegetación:** El polvo y las partículas finas transportadas por el viento pueden cubrir las hojas y superficies de las plantas, obstruyendo la fotosíntesis y dificultando la respiración. Esto puede causar daños físicos en la vegetación, reducir su salud y capacidad para crecer.
2. **Contaminación del Suelo:** Las partículas de polvo y los contaminantes tóxicos transportados por el viento pueden depositarse en el suelo cercano a la mina. La acumulación de estos contaminantes puede afectar la calidad del suelo, alterar su composición química y disminuir la disponibilidad de nutrientes para las plantas.
3. **Reducción de la Capacidad de Captura de Carbono:** La contaminación del aire puede disminuir la eficiencia de las plantas para realizar la fotosíntesis.
4. **Cambios en la Composición de la Vegetación:** La exposición prolongada a contaminantes atmosféricos puede alterar la composición de la vegetación aledaña. Algunas especies de plantas pueden ser más resistentes a los contaminantes, mientras que otras pueden verse afectadas negativamente o incluso desaparecer.

La operación de una mina a cielo abierto puede exponer grandes extensiones de suelo y roca desprotegidos, lo que facilita la erosión eólica. Los vientos transportan partículas finas de suelo desprovisto de vegetación, provocando la generación de tormentas de polvo que transportan las partículas a grandes distancias, lo que afecta la calidad del aire y la salud de las personas y la vida silvestre cercana. Esto conduce a una degradación ambiental que incluye la pérdida de hábitats, la disminución de la biodiversidad y la alteración de los procesos ecológicos. A su vez, la degradación ambiental y la disminución de la cobertura vegetal pueden crear una retroalimentación positiva. A medida que la vegetación se reduce, la retención de agua disminuye, lo que conduce a una menor capacidad del suelo para soportar el crecimiento de nuevas plantas, lo que a su vez acelera la degradación y la pérdida de cobertura vegetal.

En conclusión, si consideramos todos los factores antes mencionados, la ubicación de la ciudad de Belén, la temporada de lluvias, y la época de mayor actividad fotosintética, y su concordancia con la dirección de los vientos más predominante (Este), la degradación ambiental producida por el aumento de la erosión eólica e hídrica, los desechos producidos por la mina y el impacto sobre los recursos hídricos superficiales (contaminación) y subterráneos (agotamiento) debido a la actividad minera, se puede inferir que la presencia de una mina a cielo abierto puede tener una serie de efectos específicos en los factores ambientales, como los vientos, las lluvias, las tormentas de polvo, la degradación ambiental y la disminución de la cobertura vegetal aún más en un ambiente frágil ante las modificaciones.

Análisis del NDVI para el periodo 2017 – 2023

Como resultado, después del procesamiento de las imágenes, se obtuvieron las coberturas presentes en el área de estudio para los años del periodo 2017 – 2023 (Figura. 5).

Figura 5. Índice NDVI para el periodo de años 2017 a 2023

Fuente: Elaboración propia en QGIS. Imagen de acceso público

En el extremo superior derecho se delimitó el área ocupada por la mina Bajo de la Alumbrera y en el extremo inferior izquierdo el área ocupada por la ciudad de Belén para usarlos como puntos de referencia. Entre las imágenes de 2017 y 2018 se identifica una importante disminución de los píxeles con valor entre 0.4 a 1 del 2017 al 2018. A su vez, se identifica un leve aumento en el área ocupada por aquellos píxeles con valor entre 0.2 a 0.4, no solo ocupando el lugar antes ocupado por los píxeles con valor entre 0.4 a 1 sino también expandiéndose levemente en dirección SE y en las cercanías de la ciudad de Belén y al Oeste de la mina. No se detectan píxeles con valores entre 0.8 – 1.

El cambio de los valores del 2019 es drástico en relación los años anteriores. No solo se detecta un aumento de los píxeles con valor 0.4 a 0.6 y de 0.6 a 0.8 (no se registran de 0.8 a 1), sino que el área ocupada por píxeles de valor 0.2 a 0.4 y 0.4 a 0.6 aumentan drásticamente en comparación con los años anteriores en todas direcciones, pero principalmente en dirección Sur y en segunda medida al Oeste de la mina. Con relación a los valores entre 0.6 a 0.8, estos aumentan en concordancia con la ubicación de los píxeles con los mismos valores en 2017. No se detectan píxeles con valores entre 0.8 - 1.

En 2020 vemos un retroceso en comparación con 2019, asemejándose a los valores detectados en 2017, pero con una permanencia de avance de los píxeles con valor 0.2 a 0.4 en la zona Sur, principalmente en el área SO

contigua a la ciudad de Belén. El avance detectado en el área al Oeste de la mina retrocede también.

En cambio, en 2021 se vuelve a detectar un aumento del área con píxeles con valor 0.4 a 0.6 y de 0.6 a 0.8, pero no en nuevas áreas. Se detecta también un comportamiento de los píxeles de valor 0.2 a 0.4 que se asemejan a la situación detectada en 2019, pero siendo el área cubierta por dichos valores menor a la de 2019 salvo por el área al oeste de la mina. En este sector se detecta un aumento de píxeles con valor entre 0.2 a 0.4. No se detectan píxeles con valores entre 0.8 - 1.

Es en 2022 donde vemos una modificación drástica en la presencia de píxeles. Solo se detectan píxeles con valor 0.2 a 0.4, además de aquellos entre -1 a 0.2. Los pocos píxeles con valor entre 0.4 a 0.6 se encuentran en el área de la ciudad de Belén y al Oeste de esta, es el pueblo de Londres. En 2023 se mantiene esta tendencia, pero con un aumento del área de cobertura de los píxeles de valor entre 0.2 y 0.4

Resultados y Discusiones

Los cambios detectados de la cobertura vegetal a partir del NDVI se mantienen constantes en su mayor parte, teniendo un aumento máximo en 2019, seguido por el 2021 y un valor mínimo en 2022. Los valores del 2022 y 2023, si bien válidos, no deben tomarse como parámetro ya que en 2022 a la actualidad el país es afectado por una sequía. Sin embargo, se los puede tomar como muestra de la fragilidad que presenta el paisaje naturalmente a los cambios climáticos. En estos territorios semiáridos, la vegetación naturalmente experimenta cambios estacionales significativos debido a las variaciones en la disponibilidad de agua y la temperatura.

Desde un punto de vista metodológico, el NDVI presenta falencias. Si bien informa de la cubierta de vegetación y la biomasa, los cambios sutiles en la cobertura vegetal en territorios semiáridos pueden no ser fácilmente detectables por el NDVI, especialmente cuando la vegetación ya es escasa, dificultando la identificación de procesos de degradación o recuperación gradual de la vegetación. Además, el NDVI no informa sobre la diversidad y la composición de especies, por lo que no se sabe si el aumento de cobertura vegetal que se detectó era de especies estabilizadoras de suelo o no. A su vez, si bien las imágenes Sentinel 2 son muy utilizadas para calcular el NDVI, la corta historia de datos de Sentinel 2 limita la capacidad de detectar cambios a lo largo de varias décadas lo cual sería ideal para este análisis.

A pesar de estas falencias, el NDVI sigue siendo una herramienta valiosa para el análisis de la vegetación en territorios semiáridos, siempre y cuando se utilice con cautela y se complemente con otras fuentes de información y técnicas de análisis para obtener una visión más completa y precisa de la dinámica de la vegetación en estas áreas.

Bibliografía

Aquino, D.d.N.; Neto, O.C.d.R.; Moreira, M.A.; Teixeira, A.d.S.; de Andrade, E.M. (2018) *Use of Remote Sensing to Identify Areas at Risk of Degradation in the Semi-Arid Region*. Rev. Cienc. Agron. 49, 420–429.

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors*. Remote sensing of environment, 113(5), 893-903.

FARN. (2019) *Bajo La Alumbreira: analizando el “desarrollo” minero. “No todo lo que brilla es oro”*. Ed. Di Paola M.M. y Costantini P. Recuperado de https://farn.org.ar/wp-content/uploads/2019/02/DOC_BAJO-LA-ALUMBRERA_links.pdf

León Mata, G. D. de, A. Pinedo Álvarez y J. H. Martínez Guerrero (2014), “*Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México*”, Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 84, Instituto de Geografía, unam, México, pp. 42-53, dx.doi.org/10.14350/rig.36568.

Mastrángelo A. (2000). *Londres y Catamarca: la articulación rural / urbano en una localidad del no argentino a fines del S. XX*. Horizontes antropológicos. Vol. 6(13):89-112.

Ramos, C. S., Marchetti, C., Apellaniz, M. F. y Graziano, M. 2012. *La Alumbreira bajo teledetección: análisis temporal de la vegetación de una mina a cielo abierto en la provincia de Catamarca, Argentina*. Trabajo completo del Congreso Argentino de Teledetección, Córdoba, Argentina.

Veneros, J., García, L.M., Morales, E.D., Gómez, V., Torres, M.H., & López-Morales, F. (2020). *Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua*. Idesia (arica), 38, 99-107.

Artículo de revista:

Castellino Y. *Megaminería en Catamarca: Extraer la vida*. 1 de febrero de 2022 <https://territoriosyresistencias.com/historias/catamarca.html>

Cronología de un desastre – Minera Bajo La Alumbreira. 17 junio, 2006. Catamarca. No a la Mina Recuperado de <https://noalamina.org/argentina/catamarca/item/269-cronologia-de-un-desastre-minera-bajo-la-alumbreira-catamarca>

Cierra la mina Bajo de la Alumbreira: cómo es el plan de remediación ambiental y para qué se usará. Recuperado de <https://www.ambito.com/energia/mineria/cierra-la-mina-la-alumbreira-como-es-el-plan-remediacion-ambiental-y-que-se-usara-n5413995>

Material online:

El clima y el tiempo promedio en todo el año en Belén. Recuperado de <https://es.weatherspark.com/y/27506/Clima-promedio-en-Bel%C3%A9n-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Minera Alumbrera: Xstrata Copper. (2008) Minera Alumbrera. Informe de Sostenibilidad 2008. Recuperado de <http://www.alumbrera.com.ar/publicaciones/informes-de-sostenibilidad/>

Minera Alumbrera: Xstrata Copper. (2016) Minera Alumbrera. Informe de Sostenibilidad 2016. Recuperado de <http://www.alumbrera.com.ar/publicaciones/informes-de-sostenibilidad/>

Minera Alumbrera: Xstrata Copper. (2017) Minera Alumbrera. Informe de Sostenibilidad 2017. Recuperado de <http://www.alumbrera.com.ar/publicaciones/informes-de-sostenibilidad/>

Minera Alumbrera: Historia de bajo de la Alumbrera. Recuperado de <http://www.alumbrera.com.ar/quienes-somos/historia/>

Minera Alumbrera. Comunicado de prensa. Recuperado de http://www.alumbrera.com.ar/files/comunicados/Comunicado_Anuncio_UG.pdf

Mina Bajo de la Alumbrera - Catamarca, Argentina - Landsat 5 TM
<https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/educacion-y-formacion-masiva/materiales-educativos/mina-bajo-de-la-alumbrera-catamarca-argentina-landsat-5-tm>

Temper L., Del Bene D. and Martinez-Alier J. 2015. *Mapping the frontiers and front lines of global environmental justice: the EJAtlas.* *Journal of Political Ecology* 22 255-278. Conflict ID: 729. <https://ejatlas.org/conflict/bajo-la-alumbrera-mine-argentina> Available at http://jpe.library.arizona.edu/volume_22/Temper.pdf