



MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

**Las presas de jales en la zona Noroeste del Estado de Sonora:
una aproximación geográfica mediante Percepción Remota.**

Tesina presentada por

Jaime Dávila Luna

Para obtener el grado de

Maestro en Gestión Integral del Agua

Director de tesis: Dr. Rolando Enrique Díaz Caravantes

Asesor: Dr. Luis Alan Navarro Navarro

Asesor externo: M.C. Romeo Méndez Estrella

Hermosillo, Sonora

Diciembre del 2017

*Para Nancy Estela, por su incommensurable amor e infinita paciencia
aún en los momentos más difíciles.*

*Para Jaime, Luis Santiago y Adrián Esteban, recuerden que el esfuerzo
y la perseverancia nos acerca cada día al éxito.*

Agradecimientos

A El Colegio de Sonora (COLSON), por brindar un programa de alta calidad y facilitar las gestiones ante otras Instituciones para el apoyo económico brindado, que hicieron posible concluir mis estudios de posgrado. Y especialmente al Ing. Cesar Alfonso Lagarda Lagarda, por su invaluable interés y apoyo en mi desarrollo y superación profesional, y en el de mis compañeros.

Un franco agradecimiento a mi maestro y asesor de tesina, Dr. Rolando Enrique Díaz Caravantes, por su apoyo como maestro, asesor y amigo, por la excelente guía que me brindó como director, la cual me permitió concretar de manera muy satisfactoria la presente investigación.

Gracias a mis lectores: Dr. Luis Alan Navarro Navarro y M.C. Romeo Méndez Estrella, por ser piezas fundamentales en la elaboración de un mejor trabajo, colaborando conmigo al proporcionar su tiempo y dedicación a través de sus consejos y observaciones, mismos que enriquecieron este documento.

A mis maestros de El COLSON: Dr. Nicolás Pineda Pablos, Dr. José Luis Moreno Vázquez, Dr. Alejandro Salazar Adams, Dr. Luis Alan Navarro Navarro, Dra. Cecilia Ramírez Figueroa, y en general a todos los maestros de esta Maestría, pues a través de sus lecciones y experiencia impartidas en el programa académico y consejos en el desarrollo de nuestra investigación, nos permitieron avanzar y concluir con los objetivos propuestos.

Un especial agradecimiento a la M.C. América Murrieta Saldívar, Asistente Académica de la Maestría en Gestión Integral del Agua, quien durante todo nuestro tiempo como estudiantes de El COLSON, se preocupó por asesorarnos y servir como enlace ante las autoridades académicas.

Por último, agradezco a mis amigos y compañeros de esta maestría por los innumerables ratos de estudio, distracción y amistad que forjamos en este proceso, los cuales nos permitieron compartir la experiencia y el orgullo de ser parte de la Primera Generación de la Maestría en Gestión Integral del Agua de El Colegio de Sonora.

¡Muchas Gracias!

Contenido

Resumen.....	5
Introducción.....	6
Antecedentes.....	8
Área de estudio.....	14
Materiales y métodos.....	17
Fotografías satelitales Google Earth.....	19
Servicio Geológico Mexicano.....	20
Registro Público de Derechos de Agua.....	20
Fotointerpretación de sitios.....	22
Fotografías satelitales SENTINEL-2.....	22
NDWI.....	24
Firmas espectrales minas, jales y repesos.....	25
Construcción del Índice J.....	26
Resultados.....	27
Mapeo de instalaciones: NDWI.....	27
Localización de instalaciones: Índice J.....	28
Conclusiones.....	33
Bibliografía y fuentes.....	34

Resumen

La minería es una de las actividades impulsoras de la economía que más contaminan el medio ambiente, los desastres ecológicos por derrames en presas de jales mineros en todo el mundo así lo indican.

En estas circunstancias, un reto en el futuro cercano es desarrollar esta actividad garantizando la sustentabilidad del medio ambiente, y para ello es necesario contar con un diagnóstico real del estado de conservación y funcionamiento de estas instalaciones. Esta tarea es difícil de lograr debido a la poca supervisión de las dependencias oficiales responsables de ello, a la falta de un catastro público confiable de estas instalaciones y a la dificultad para obtener datos del lugar por restricciones de las empresas privadas que las operan.

Con el fin de contribuir a la elaboración de un diagnóstico, en este trabajo exploratorio se propone la metodología del Índice J empleando la Percepción Remota para la localización preliminar de presas de jales. Su aplicación en la zona noreste del Estado de Sonora, tradicionalmente una importante área minera la que se encuentra la mina de cobre más grande de México, permitió identificar el 100% de las instalaciones mineras de cobre señaladas por el Servicio Geológico Mexicano.

La aplicación del Índice J en otras zonas mineras, permitiría localizar presas de jales de una manera confiable, relativamente rápida y a bajo costo. También permitiría la identificación de lugares adicionales con características espectrales similares; información útil para que las autoridades encargadas verifiquen en campo lo que ocurre en dichos lugares.

Introducción

La industria minera en México se desarrolló por más de 450 años sin una normatividad ambiental que regulara la gran contaminación ambiental vinculada a esta actividad. Esto generó una cantidad, no cuantificable hasta este momento, de lugares que representan peligros potenciales de contaminación, “[p]or ello resulta importante desarrollar estrategias para identificar sitios que representen un mayor peligro de dispersión de acidez y de elementos con potencial tóxico (EPT) hacia el ambiente, y poder concentrar los esfuerzos de evaluación de riesgo” (Ramos-Arroyo et al. 2006, 55-56).

La actividad minera en México se inició en la época de la colonia española, teniéndose los primeros registros mineros desde 1525 (Pérez Sáenz 2005, 59), y fue hasta septiembre de 2004 cuando se aprobó, por primera vez en México, una norma para la adecuada disposición de presas de jales por la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT). Se puede deducir, entonces, que existen un número importante de presas de jales en funcionamiento y fuera de operación, de las cuales no se conocen sus condiciones ni sus potenciales afectaciones al medio ambiente.

El grado de peligrosidad potencial de contaminación ocasionado por derrames de las presas de jales depende principalmente de tres factores: la toxicidad del residuo, el volumen almacenado y su ubicación geoespacial dentro de la cuenca, los cuales eventualmente podrían ocasionar daños a los ecosistemas en el corto, mediano o largo plazo. Lo anterior también se conoce como “geodisponibilidad” (Corrales et al. 2013, 428).

El empleo de la Percepción Remota (la caracterización de los materiales en la superficie terrestre empleando las firmas espectrales de los mismos obtenidas por medio de fotografías

satelitales) para localizar la ubicación geográfica de estas instalaciones mineras, además de presentar ventajas contra los métodos tradicionales, en algunos casos puede ser la única opción viable para ello.

El objetivo del presente trabajo es explorar una metodología para la localización preliminar de presas de jales e instalaciones mineras de cobre activas y fuera de operación, por medio de la cual, al aplicar las tecnologías de percepción remota, sea posible identificar estos lugares de forma fácil, rápida y económica. Asimismo, se pretende que su aplicación permita subsanar en alguna medida las limitantes de recursos, tiempo, espacio y difícil acceso a las áreas estudiadas que existen en la supervisión del funcionamiento de dichas instalaciones. Lo anterior podría contribuir a la creación de un catastro seguro y confiable, que pueda orientar la creación de un diagnóstico de la operación y funcionamiento de las instalaciones mineras en Sonora, y de los riesgos asociados y, eventualmente, siguiendo los pasos adecuados, poder garantizar la sustentabilidad el medio ambiente.

Por ser un estado eminentemente minero y contar con la mina de cobre más grande de México, en los antecedentes de este trabajo se describen las operaciones básicas de extracción y explotación de este mineral, y la función de las llamadas Presas de Jales y Tanques de Lixiviados dentro de sus instalaciones. Asimismo, se muestran los principales desastres medioambientales ocasionados recientemente por derrames mineros en varias partes del mundo y su repercusión en términos de remediación medioambiental. Se menciona también el desarrollo de la industria minera en el estado de Sonora y el estado que guarda la Normatividad Ambiental aplicable, así como los volúmenes de producción por tipo de mineral y los estudios recientes aplicados en la detección remota de minas de cobre.

En la siguiente sección se describe el área de estudio obtenida a partir de la cobertura de la fotografía satelital seleccionada para este trabajo, su estrecha relación con la ubicación de la mina de cobre más grande de México y con el reciente derrame de contaminantes mineros en una de las principales cuencas hidrológicas de Sonora; así como, las principales cuencas hidrológicas en la zona y las principales minas y sus características de producción.

Adicionalmente, se describen los recursos empleados para el análisis y desarrollo de la metodología, desde los sitios de información oficial sobre las empresas mineras, los sitios públicos de acceso a fotografías satelitales, las técnicas de interpretación y software utilizados, la características temporal y espacial de la fotografía satelital examinada, las características y análisis de las firmas espectrales analizadas, y los índices espectrales empleados y propuestos.

Por último, se analizan los resultados obtenidos en términos de la efectividad del método para localizar, en primer término, las minas de cobre y presas de jales ya identificadas oficialmente; y de manera adicional los lugares no identificados previamente que presentan características espectrales similares a éstas y que necesitan verificación en campo.

Antecedentes

La industria minera es, por una parte, una importante actividad generadora de empleos y desarrollo económico regional y, por otra parte, una actividad altamente nociva para el entorno ecológico que regularmente requiere de grandes obras de remediación ambiental.

La evolución de la economía a nivel mundial, con referencia a los precios de los metales y a las nuevas técnicas de explotación mineras desarrolladas en los últimos años, ha ocasionado que sea económicamente rentables la explotación de depósitos minerales de bajas concentraciones con la predominancia de la explotación a cielo abierto o a tajo abierto, aparejada con la disminución sensible de la explotación de minas subterráneas, con la consecuencia de un incremento en el volumen de desechos mineros para una misma cantidad de mineral final obtenido. Si consideramos una concentración económicamente rentable del 0.3%, se tendrían que manejar un volumen de explotación de 1,667 kilogramos (kg) para obtener un volumen de mineral refinado de 5 kg de cobre, y un residuo minero contaminante de 1,662 kg (Armendáris 2016, 1,5,6,8,10). Una concentración típica de mineral de cobre es del 0.5%, es decir, se obtendrán solamente 5 kg por cada 1,000 kg de material explotado, por lo que se tendrá un volumen de residuo minero de 995 kg (López 2013, 1).

Los métodos de concentración de minerales son variados, dependiendo del mineral explotado, y generalmente emplean grandes cantidades de agua, la cual, mezclada con las excavaciones ricas en minerales metálicos o no metálicos requieren de estructuras para su contención. Los métodos correspondientes a la minería metálica son frecuentemente los que generan una mayor cantidad de contaminantes, ya que requieren de altas concentraciones de agentes catalizadores diluidos en agua, generalmente muy dañinos para el medio ambiente y que son de uso común en los procesos de concentración de minerales (López 2013, 1).

Por lo anterior, en la minería a cielo abierto es común el empleo de grandes cantidades de agua durante los procesos de concentración de material, requiriéndose además varios tipos de instalaciones para su manejo y almacenamiento: entre estas se encuentran las de concentración, conocidas también como Terreros o Tanques de Lixiviados; éstas se construyen regularmente al

aire libre, con bordos de tierra sobre el terreno natural, donde ocurre el proceso de separación de minerales. Otras son instalaciones para depósitos de mezclas de contaminantes después de emplearse en el proceso de concentración, estas son conocidas como Presas de Jales, y por lo regular son instalaciones al aire libre con bordos de tierra sobre el terreno natural, donde se acumulan los residuos líquidos y sólidos de contaminantes que fueron desechados del proceso de concentración del mineral.

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2013 (DOF 2003, 4-7) establece los siguientes conceptos:

- Jales: Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.
- Lixiviado: líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción química, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.
- Presa de jales: obra de ingeniería para el almacenamiento y disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente.
- Vulnerabilidad del acuífero: conjunto de condiciones geológicas que definen la capacidad de defensa o del amortiguamiento del acuífero ante una situación de amenaza por el manejo de jales.

A pesar de que las grandes compañías mineras con operaciones internacionales regularmente se manejan con estrictos protocolos de seguridad, la alta peligrosidad de las sustancias empleadas en los procesos mineros de explotación y refinación hacen que una falla menor en el manejo de

estas sustancias ocasiona grandes contaminaciones ambientales, muchas veces difíciles de restituir en términos ecológicos en el corto y mediano plazo.

En todo el mundo se han documentado diversos y muy dañinos derrames en presas de jales; entre estos se pueden mencionar la falla en la presa de decantación de la mina de cobre, plomo y zinc Aznalcóllar en Sevilla, España, el 25 de abril de 1998, en la cual se derramó un volumen aproximado de 6 millones de metros cúbicos de lodos y aguas ácidas con altas concentraciones de metales en disolución al río Guadiamar. Este derrame afectó 4,630 hectáreas a lo largo de 62 kilómetros de ríos, ocasionando graves daños medioambientales y socioeconómicos (Arenas, Carrero, Galache, Mediavilla, Silgado, Vázquez 2001, 35-56).

También se presentó la falla en la presa de jales de la mina de cobre, plomo, plata y zinc Caudalosa Chica en Huancavelica, Perú, el 25 de junio del 2010, la cual derramó 57 mil metros cúbicos de líquidos contaminantes a lo largo de 7 ríos en 120 kilómetros, afectando al ecosistema de la región, así como a las actividades socioeconómicas de los pobladores directamente afectados (Pinto 2010, 321-338).

Más recientemente, el 5 de noviembre del 2015 el rompimiento de un depósito de una mina de hierro operada por la minera brasileña Samarco derramó 70 millones de metros cúbicos de residuos tóxicos contaminando 663 kilómetros a lo largo de los ríos Gualaxo do Norte, Carmo y Doce, hasta desembocar al mar, matando a 17 personas e inundando de lodo y desechos a varios pueblos localizados a lo largo de los ríos mencionados (Porto 2016, 1).

Además de los desastres ecológicos ocasionados por derrames en presas de jales, han ocurrido otros al interior de las instalaciones de las empresas mineras. El 6 de agosto del 2014 una falla en una de las piletas de lixiviados de la mina Cananea propiedad de la empresa Buenavista del Cobre en Cananea, Sonora, México, ocasionó un derrame de 40,000 metros cúbicos de

contaminantes mineros afectando al arroyo Tinajas (17.6 km), a los ríos Bacanuchi (64 km) y Sonora (190 km), y a la Presa El Molinito, la cual tenía en ese momento un almacenamiento de 15.4 millones de m³ y sirve como fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Hermosillo (Fideicomiso Río Sonora 2016, 2-19).

A la fecha, y después de más de tres años de este derrame, no se cuenta con información oficial sobre la magnitud de la afectación a los ecosistemas de la Cuenca del río Sonora ni con un reporte detallado sobre las acciones requeridas, sobre las realizadas hasta fecha, ni sobre las que aún faltan para garantizar la restauración ecológica del sistema, en caso de que así se determine. Actualmente, se encuentra en proceso de elaboración un estudio sobre Avances del Diagnóstico Ambiental, elaborado por el Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el que se afirma que existen fuertes y claras evidencias de afectaciones a los ecosistemas del río Bacanuchi y río Sonora (UNAM 2016, 4). Asimismo, algunos académicos han estudiado los resultados del monitoreo de calidad del agua del Fideicomiso y entre otras cosas, han detectado algunos sitios en donde se rebasan las regulaciones oficiales y guías mundiales de calidad del agua (Díaz et al., 2016, 91-96; Díaz-Caravantes et al., en revisión).

La minería en la cuenca del río Sonora es, en términos históricos, una de las actividades económicas y sociales más importantes a nivel estatal, ya que los primeros asentamientos humanos en la región durante la colonia española se ubicaron en esta zona, situación que fue favorecida por la disponibilidad del recurso agua (CONAGUA et al. 2013, 16, 80-83). Esta situación se mantiene en la actualidad, ya que la producción minera en el Estado de Sonora es muy importante a nivel nacional en minerales como: oro, cobre, molibdeno, grafito y wollastonita. Mención especial merece la explotación de minerales de cobre, ya que el Estado de Sonora ocupó durante el año 2014 el primer lugar a nivel nacional, con 403,860 toneladas /año, siendo la empresa Buenavista

del Cobre, filial de Grupo México, la empresa minera que reportó la mayor producción de este mineral (Servicio Geológico Mexicano 2015, 2-4, 8-9).

Hoy en día se tiene conocimiento de que el número y volumen de desechos almacenados en estas presas de jales va en aumento, y por lo tanto los riesgos potenciales de nuevos derrames. En un análisis multitemporal de las coberturas de suelo realizado en la cuenca del río Sonora en el periodo de 1974 a 2011, se obtuvo como resultado un incremento en las superficies totales destinadas a presas de jales, de 719 hectáreas en 1974 a 2,273 en 2011, aunque el estudio no especifica si dichas presas de jales se encuentran en operación o no (CONAGUA et al., 2013, 16, 80-83).

La empresa Buenavista del Cobre planea aumentar su producción con la construcción de un nuevo depósito de jales para almacenar “100,000 toneladas diarias de molienda de geomaterial natural”, misma que “ocupará una superficie aproximada de 4,000 hectáreas y tendrá una altura máxima de 200 metros, que se alcanzarán en 40 años” de operación, aproximadamente (Orozco et al. 2012, 1).

Ubicar, cuantificar, caracterizar y evaluar los peligros de los residuos de las operaciones mineras, y de los peligros potenciales de derrames accidentales de presas de jales y piletas de lixiviados en operación y abandonadas, puede ser una tarea muy compleja y costosa, debido a que la única información públicamente disponible del desarrollo de esta industria es la Manifestación de Impacto Ambiental de cada proyecto minero, por lo que hacer un condensado de la información para el Estado requeriría de mucho tiempo y trabajo. Otro problema en la recolección y verificación de datos de campo es el limitado o nulo acceso a las instalaciones mineras en desarrollo, generalmente por políticas de las empresas privadas que las operan.

Además de lo anterior, en México son poco conocidos los estudios destinados a evaluar estos peligros potenciales. Otras investigaciones ya fueron llevadas a cabo en algunas zonas mineras del país (Ramos-Arroyo et al. 2006, 55-56), pero éstos se orientaron a las características especiales de explotación de dicha zona, no necesariamente iguales a las características generales de la zona del río Sonora. En dichos trabajos, se emplearon imágenes de satélite y ortofotos, junto con cartas topográficas y geológicas, solamente para ubicar los sitios de las presas de jales y estimar la profundidad promedio para cálculo de volúmenes. El empleo de imágenes satelitales regularmente es aplicado a la exploración de yacimientos minerales (Mendívil-Quijada 2012, 9-20).

Recientemente, el empleo de la Percepción Remota en el modelado del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, conocido como NDVI por sus siglas en inglés, permitió localizar e identificar las presas de jales de minas de cobre en operación en el estado de Arizona, en los Estados Unidos de América (Shimmer 2008, 1-10).

El empleo de la Percepción Remota para la identificación de depósitos superficiales de líquidos presenta grandes ventajas con respecto a los métodos tradicionales, porque se tiene información confiable a bajo costo, que abarca grandes extensiones de terreno, con un registro de observaciones de varios años y con una alta tasa de repeticiones en las observaciones.

Área de estudio

El área de estudio se muestra en la Figura 1 y corresponde a la superficie del Estado de Sonora que cubre una fotografía del satélite SENTINEL-2¹. Esta fotografía satelital, en su formato original cubre la parte noroeste del Estado de Sonora (70% del área total de la imagen) y la parte sur del Estado de Arizona en los Estados Unidos de América (30% del área total de la imagen). Debido a que este estudio se enfoca en el estado de Sonora, se tomó en cuenta solamente el área que cubre el Estado de Sonora (8,470 Km² aproximadamente), colindando en su parte norte con la Línea Divisoria Internacional México-U.S.A.

Esta zona incluye total o parcialmente a los municipios de Santa Cruz, Cananea, Nogales, Naco, Ímuris, Cucurpe, Arizpe, Bacoachi y Fronteras; contempla la parte alta de la cuenca del río Sonora, que fue donde se originó el derrame de contaminantes mineros en agosto del 2014, así como porciones de las Cuencas río Yaqui, río Concepción-arroyo Cocóspera y Desierto de Altar-río Bámori.

¹ Identificación de la Fotografía satelital SENTINEL-2 según la Agencia Espacial Europea:
"S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160620T011107_R041_V20160619T181357_20160619T181357"

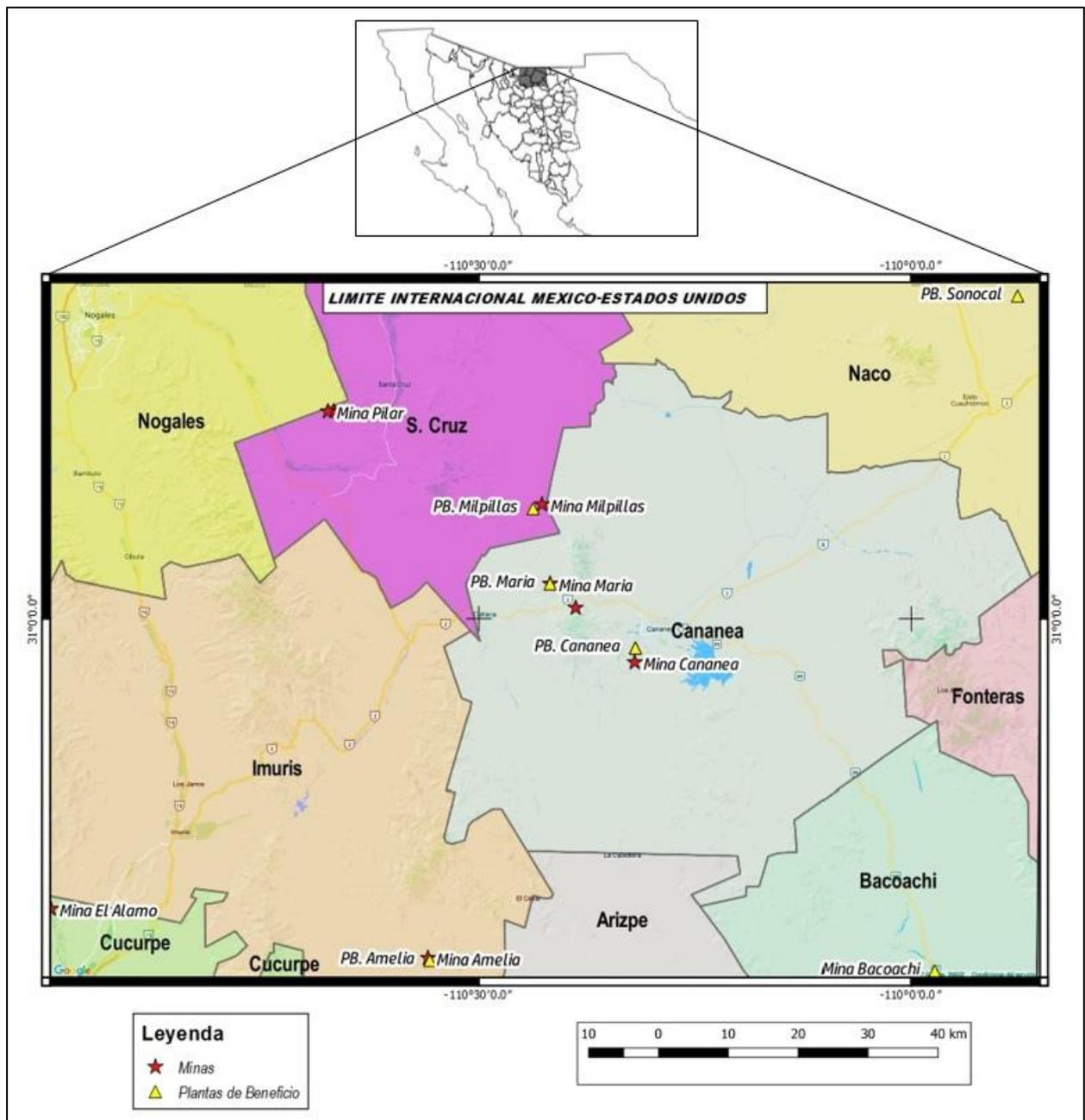


Figura 1.- Área de estudio (cuadrante el límite de la fotografía satelital)
 Fuente: Elaboración propia con información del Servicio Geológico Mexicano.

En esta área es en donde se localizan las principales minas de cobre activas en el Estado, entre las que se encuentra la mina de cobre más grande de México, la mina Cananea (empresa

Minera Buenavista del Cobre, filial del Grupo México), en la cual ocurrió el derrame anteriormente citado, razón por la cual se seleccionó la imagen de SENTINEL-2, considerando también la conveniencia metodológica de emplear una sola imagen satelital.

En esta área también se encuentran las minas de cobre Puertecitos (mina en exploración, empresa Paget Resources Corp.), María (empresa Minera María, S.A. de C.V. y Milpillas (mina subterránea, empresa Minera La Pareña, S.A.de C.V.).

Otras minas existentes en el área de estudio son: la mina de bórax El Álamo (exploración avanzada, empresa Materiales Primas Magdalena, S.A. de C.V.), la mina de cobre y oro, El Pilar (exploración avanzada, empresa Santa Fe Gold Corp.), la mina de oro Amelia (exploración avanzada, empresa Firts Silver Reserve, S.A. de C.V.), la mina de oro y plata Bacoachi (empresa Minera La Escuadra, S.A. de C.V.) y la mina de cal hidratada Sonocal (empresa Sonocal, S.A. de C.V.).

Materiales y métodos

Recientemente, la Agencia Espacial Europea (European Space Agency, ESA) comenzó la operación de varios satélites denominados SENTINEL, los cuales destacan por su alta resolución espacial, además de ser gratuitos para el público y tener cobertura mundial, (European Space Agency-España, 2017, 1).

El manejo de fotografías satelitales con el empleo de programas especializados, gratuitos y comerciales, conocidos como Sistemas de Percepción Remota, permite obtener diversos índices

o indicadores que representan condiciones específicas de la superficie terrestre, y que nos ayudan a resaltar algunas características de interés.

Un indicador que se ha empleado satisfactoriamente en diferentes países para el mapeo de depósitos superficiales de líquidos es el Índice de Agua de Diferencia Normalizado (Normalized Difference Water Index, NDWI), el cual se calcula con la combinación de varias bandas espectrales: Verde, Cercano a Infrarrojo, e infrarrojo de onda corta (Wenbo, Zhiqiang, Feng, Dongbo, Hailei, Yuanmiao, Bingyu, Xiaoming 2013, 5530-5533).

La aplicación de estas técnicas de investigación en el modelado de la fotografía satelital aplicadas a la Cuenca del río Sonora, junto con otras fuentes de información como el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) elaborado y administrado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el listado de las principales minas en explotación y exploración elaborado por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), permitieron conocer más detalladamente las condiciones actuales de las instalaciones mineras en la región.

En la Figura 2 se ilustra la secuencia del análisis realizado con el software especializado de análisis de Sistemas de Información Geográfica de acceso libre a todo público denominado Quantum GIS (Qgis Development team 2009. QGIS Geographic information System. Open Source Geospatial Foundation). Las etapas de este análisis se describen a continuación.

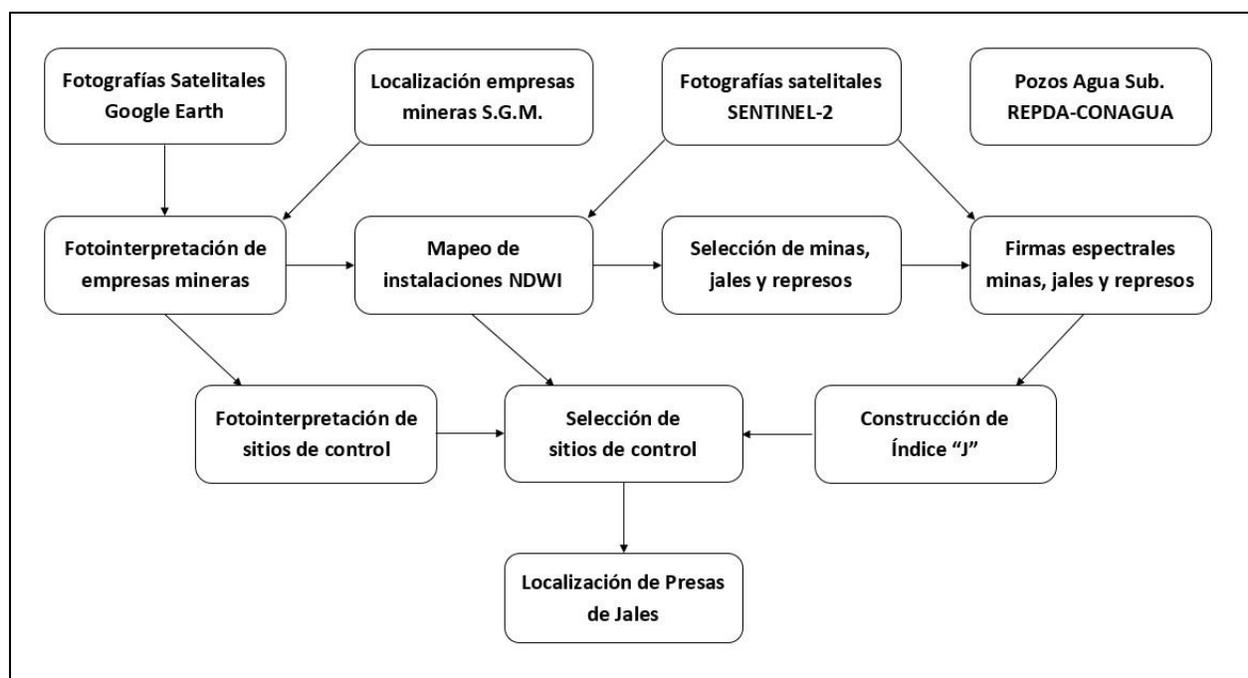


Figura 2.- Esquema del diagrama de flujo de las etapas de análisis.

Fotografías satelitales Google Earth

La principal fuente de información para el acceso a las fotografías satelitales es Google Earth, que es un programa informático completamente gratuito, desarrollado inicialmente por la compañía Keyhole, Inc. con financiamiento de la Agencia Central de Inteligencia de los Estados Unidos (Central Intelligence Agency, C.I.A.), comprado en el año 2004 por la compañía GOOGLE.

Google Earth muestra fotografías satelitales de todo el mundo en muy alta resolución, y nos permite, además de conocer virtualmente lugares y países, poder analizar sitios de interés empleando la fotointerpretación, que consiste en un conjunto de criterios y técnicas que contribuye a identificar lugares considerando sus las características como son el color, forma, *tamaño*, patrones, sombras y asociaciones.

En este estudio, las imágenes de Google Earth permitieron aplicar la técnica de la fotointerpretación tanto en las instalaciones mineras conocidas, como en todos los sitios de interés: las principales localidades urbanas y rurales, diferentes tipos de caminos y vías de comunicación, depósitos de líquidos conformados naturalmente en el terreno o contruidos específicamente como almacenamiento, instalaciones agrícolas, entre otros.

Servicio Geológico Mexicano

La información obtenida del Servicio Geológico Mexicano a través de la Plataforma Nacional de Transparencia (INAI) en enero del 2017, acerca de la localización y características de las minas en el Estado de Sonora, arrojó que las principales minas de explotación activas se encuentran en la zona noroeste del Estado de Sonora con intersección al área de estudio, teniéndose registradas 9 minas activas y en exploración como se muestra en la Figura 1.

Es importante mencionar que, de acuerdo con la información recibida, las únicas presas de jales en la zona corresponden a minas de explotación de cobre, y que no se incluye en dicha información un listado de la localización de las presas de jales de minas fuera de operación.

Registro Público de Derechos de Agua

De noviembre del 2016 a febrero del 2017 se obtuvieron, desde la página de internet de la CONAGUA (<http://app.conagua.gob.mx/Repda.aspx>), los listados de los aprovechamientos subterráneos en la zona centro y noreste el Estado de Sonora, con el fin de verificar la cantidad, volumen de extracción y concesionarios de los pozos subterráneos clasificados como industriales, entre los que se encuentran los correspondientes a la extracción de minerales. Con esta información se trató de deducir la localización y tamaño de las principales empresas mineras en el Estado.

De los resultados obtenidos se observó una falta de correspondencia espacial entre los concesionarios de pozos subterráneos y las empresas mineras indicadas por el Servicio Geológico Mexicano, por lo que se decidió no emplear esta información en el presente estudio. La mina Cananea, de la empresa Buenavista del Cobre, tiene registrados pozos de explotación de agua subterránea como de Uso Industrial y Diferentes Usos, por lo que se duda si el volumen importante de explotación registrado como de Diferentes Usos se emplea total o parcialmente en actividades de minería; además, es una práctica usual que adicionalmente a los pozos en explotación adscritos a las empresas mineras, éstas tienen acceso a otros pozos de ejidos cercanos mediante acuerdos privados vigentes, lo cual no queda registrado en el REPDA.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los aprovechamientos subterráneos de acuerdo con la CONAGUA, observando que la mina Puertecitos en exploración (Pagenet Resources Corp) y la mina Milpillas de explotación subterránea (Compañía Minera La Pareña, S.A. de C.V.) no cuentan con pozos subterráneos concesionados; presumiblemente por no requerirse volúmenes importantes de agua en etapa de exploración (mina Puertecitos), y por aprovechar el fácil acceso a los volúmenes de los mantos freáticos como abastecimiento de agua en la mina de explotación subterránea (mina Milpillas).

MINA	EMPRESA	USO	Acuífero Homologado	Volumen (m3/año)
CANANEA	BUENAVISTA DEL COBRE S.A. DE C.V.	DIFERENTES USOS	2616 - RIO SAN PEDRO	2,681,250.00
CANANEA	BUENAVISTA DEL COBRE, S.A. DE C.V.	INDUSTRIAL	2627 - RIO BACOACHI	6,960,713.00
CANANEA	BUENAVISTA DEL COBRE, S.A. DE C.V.	INDUSTRIAL	2628 - RIO BACANUCHI	6,544,519.80
CANANEA	BUENAVISTA DEL COBRE, S.A. DE C.V.	INDUSTRIAL	2660 - CUITACA	1,373,336.00
			suma=	17,559,818.80
MINA	TITULAR	USO	Acuífero Homologado	Volumen (m3/año)
MARIA	MINERA MARIA S.A DE C.V.	INDUSTRIAL	2616 - RIO SAN PEDRO	126,144.00
MARIA	MINERA MARIA, S. A. DE C. V.	INDUSTRIAL	2660 - CUITACA	680,000.00
MARIA	MINERA MARIA, S.A. DE C.V.	INDUSTRIAL	2614 - COCOSPORA	820,000.00
			suma=	1,626,144.00
MINA	TITULAR	USO	Acuífero Homologado	Volumen (m3/año)
PUERTECITOS	PAGET RESOURCES CORP.			0.00
			suma=	0.00
MINA	TITULAR	USO	Acuífero Homologado	Volumen (m3/año)
MILPILLAS	CIA. MINERA LA PAREÑA, S.A. DE C.V.			0
			suma=	0

Tabla 1.- Concentrado de Aprovechamientos subterráneos de las principales empresas mineras en la parte alta de la cuenca del río Sonora.

Fuente: Elaboración propia con datos del REPDA - CONAGUA.

Fotointerpretación de sitios

En cada sitio identificado como de actividades mineras por el Servicio Geológico Mexicano, se empleó la fotointerpretación de las imágenes satelitales de GOOGLE, verificando las características de las excavaciones mineras a cielo abierto, de las excavaciones subterráneas y de las presas de jales, en conjunto con el entorno físico de dichas instalaciones y la cercanía a localidades rurales y urbanas.

Fotografías satelitales SENTINEL-2

Para el análisis de las firmas espectrales de las instalaciones mineras, tanto de las excavaciones a cielo abierto como el de las presas de jales en el área de estudio, se empleó la fotografía del satélite SENTINEL-2 de fecha 19 de junio del 2016, con una nubosidad del 0.01 por ciento, a Nivel-1C (Ortho rectificada, valores de reflectancia y a nivel de la capa superior de la atmosfera) en

proyección UTM/WGS84 (Universal Transversal de Mercator). Esta fotografía fue corregida atmosféricamente por el método de Sustracción de Píxeles Oscuros (DOS-1) también conocido como Método de Chavez (Chavez 1996, 1025-1036).

Se eligió la fecha del 19 de junio del 2016 de la fotografía satelital de SENTINEL-2, antes del periodo de lluvias en la región. En la Figura 3 se indica el régimen de lluvias registrado en la estación pluviométrica Cananea administrada por CONAGUA.

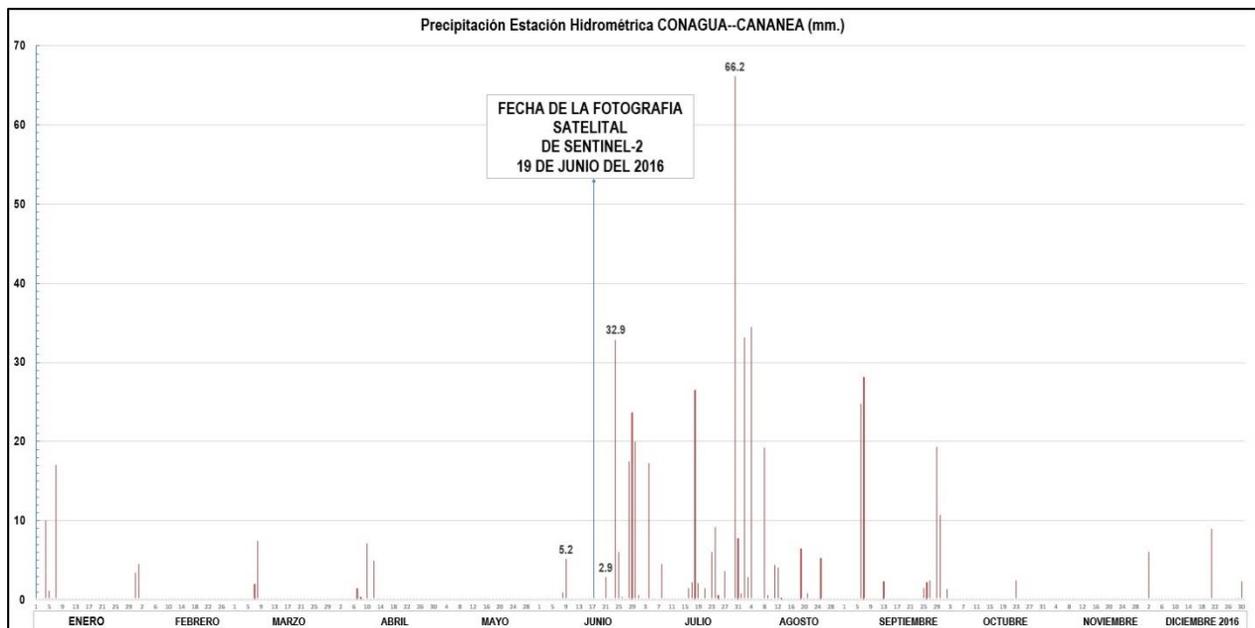


Figura 3.- Periodo de lluvias en el año del 2016 registradas en la estación pluviométrica Cananea.

Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA.

De las 13 bandas con que cuenta el satélite SENTINEL-2 y cuyas características se indican en la Tabla 2, se tomaron para el análisis de las firmas espectrales todas las correspondientes a una resolución espacial de 10 metros (Bandas 2, 3, 4 y 8).

Bandas	Resolución Espacial (m)	Resolución Espectral (nm)
Banda 1 (Aerosol)	60	443
Banda 2 (Azul)	10	490
Banda 3 (Verde)	10	560
Banda 4 (Rojo)	10	665
Banda 5 (Infrarrojo cercano - NIR)	20	705
Banda 6 (Infrarrojo cercano - NIR)	20	740
Banda 7 (Infrarrojo cercano - NIR)	20	783
Banda 8 (Infrarrojo cercano - NIR)	10	842
Banda 8a (Infrarrojo cercano - NIR)	20	865
Banda 9 (Vapor de Agua)	60	9945
Banda 10 (Cirrus)	60	1375
Banda 11 (Infrarrojo Lejano - SWIR)	20	1610
Banda 12 (Infrarrojo Lejano - SWIR)	20	2190

Tabla 2.- Resolución espacial y espectral de cada una de las 13 bandas del satélite SENTINEL-2. Fuente: Descripción, descarga y productos SENTINEL-2, Geog. Andrés León, Lima Perú, 2015, 1-21.

NWDI

Una vez definidas las bandas para el análisis, se verificó la información obtenida por el Servicio Geológico Mexicano, con el empleo del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el cual nos permite mapear la localización de las instalaciones mineras, ya que este Índice en sus valores negativos y cero identifican superficies de suelos desnudos, áreas rocosas sin vegetación y cuerpos de agua.

El cálculo del Índice anterior se realiza utilizando las bandas del Satélite SENTINEL-2, en el que la banda 3 corresponde a la banda verde del espectro visible y la banda 8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano,

$$NDWI = \frac{(\text{banda 3} - \text{banda 8})}{(\text{banda 3} + \text{Banda 8})}$$

Firmas espectrales minas, jales y repesos

Adicionalmente, se seleccionaron 11 diferentes áreas clasificadas en tres grupos: 1) excavaciones de minas de cobre, 2) presas de jales de minas de cobre, y 3) repesos o embalses naturales; estas áreas fueron definidas previamente mediante fotografías satelitales e información de localización de minas del Servicio Geológico Mexicano.

Para cada área se seleccionaron 5 puntos distribuidos dentro del polígono circunscrito en el área analizada. Los resultados del análisis promedio de cada grupo mencionado se indican en la Figura 4, pudiéndose observar para el grupo presas de jales, una diferencia significativa en los valores de la banda 1 (banda 2 de SENTINEL-2) y 3 (banda 4 de SENTINEL-2). El grupo minas sigue un comportamiento similar al anterior, separándose ambos grupos mencionados con el comportamiento del grupo repesos.

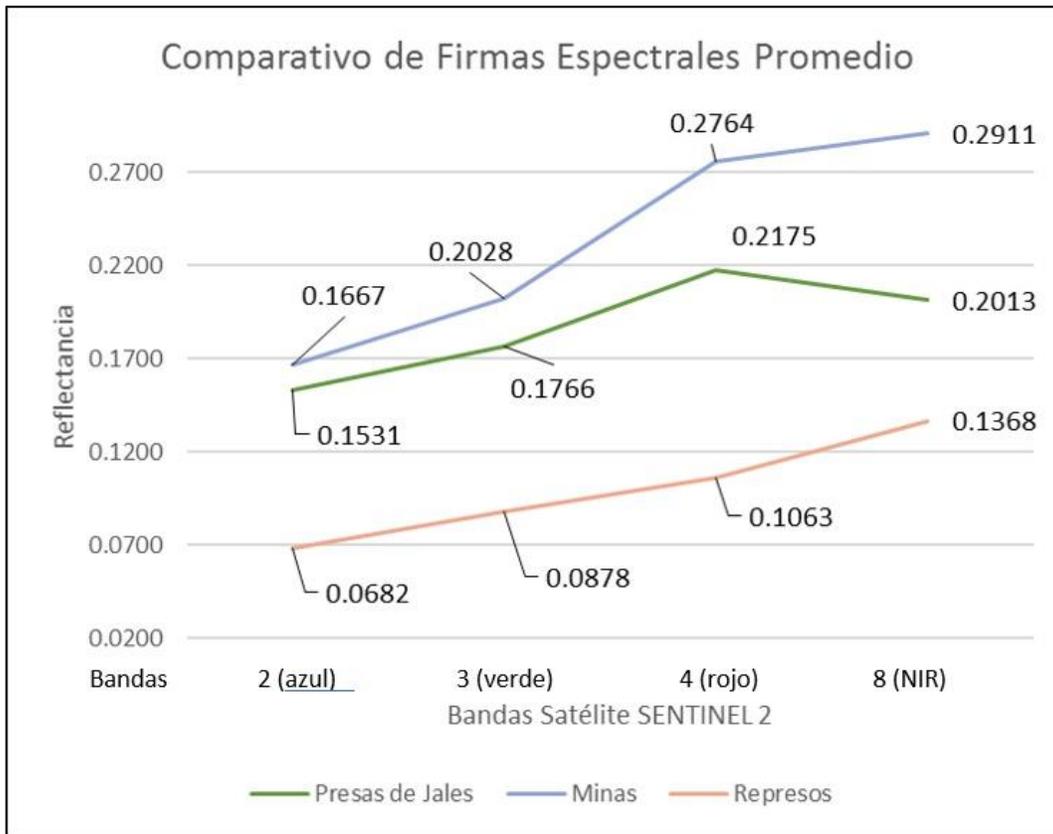


Figura 4.- Curvas promedio de Firmas Espectrales, bandas 2 (azul), banda 3 (verde), banda 4 (rojo) y banda 8 (visible y cercano a infrarrojo - VNIR) de SENTINEL-2. Fuente: Elaboración propia, imágenes Satélite SENTINEL-2.

Construcción del Índice J

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de firmas espectrales, se propone un índice de localización de excavaciones mineras y presas de jales al que denominaremos Índice J el cual contempla las diferencias en las reflectancias observadas de las bandas 4 y 2 de SENTINEL-2 de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{Índice } J = \frac{(\text{banda } 4 - \text{banda } 2)}{(\text{banda } 4 + \text{banda } 2)} + \text{banda } 2$$

Para complementar la fórmula se decidió agregar la banda 2 a la diferencia normalizada, como una forma de garantizar una mejor distinción entre las clases de banda, pues como se aprecia en la Figura 4, las presas de jales y minas tienen un valor mayor que los repesos en dicha banda.

Resultados

Mapeo de instalaciones: NDWI

En la Figura 5 se muestra el resultado del mapeo de las instalaciones mineras en la zona para valores de NDWI mayores a -0.2. La selección del límite inferior de -0.2 se basó en la geovisualización de este límite, en el cual se pueden identificar, con una buena definición, las principales instalaciones mineras de la zona.

En la Figura 5 se puede observar cuatro instalaciones mineras delimitadas por el NDWI mayor a -0.2: Minera María, la actual presa de jales de Buenavista del Cobre y la zona de excavación de esta misma minera, la cual aunque no es un cuerpo de agua, tiene un componente de humedad provocado por lluvias y escurrimientos que se acumulan en el fondo de las excavaciones, y también porque en esta área se encuentran instalaciones de refinamiento del mineral que contienen material de excavación con alto contenido de humedad como son los tanques de lixiviados y espesadores de lodos, entre otros. Además, el empleo de este índice hizo posible la localización de la nueva presa de jales de la empresa Buenavista del Cobre, la cual no se incluye en los registros oficiales públicos.

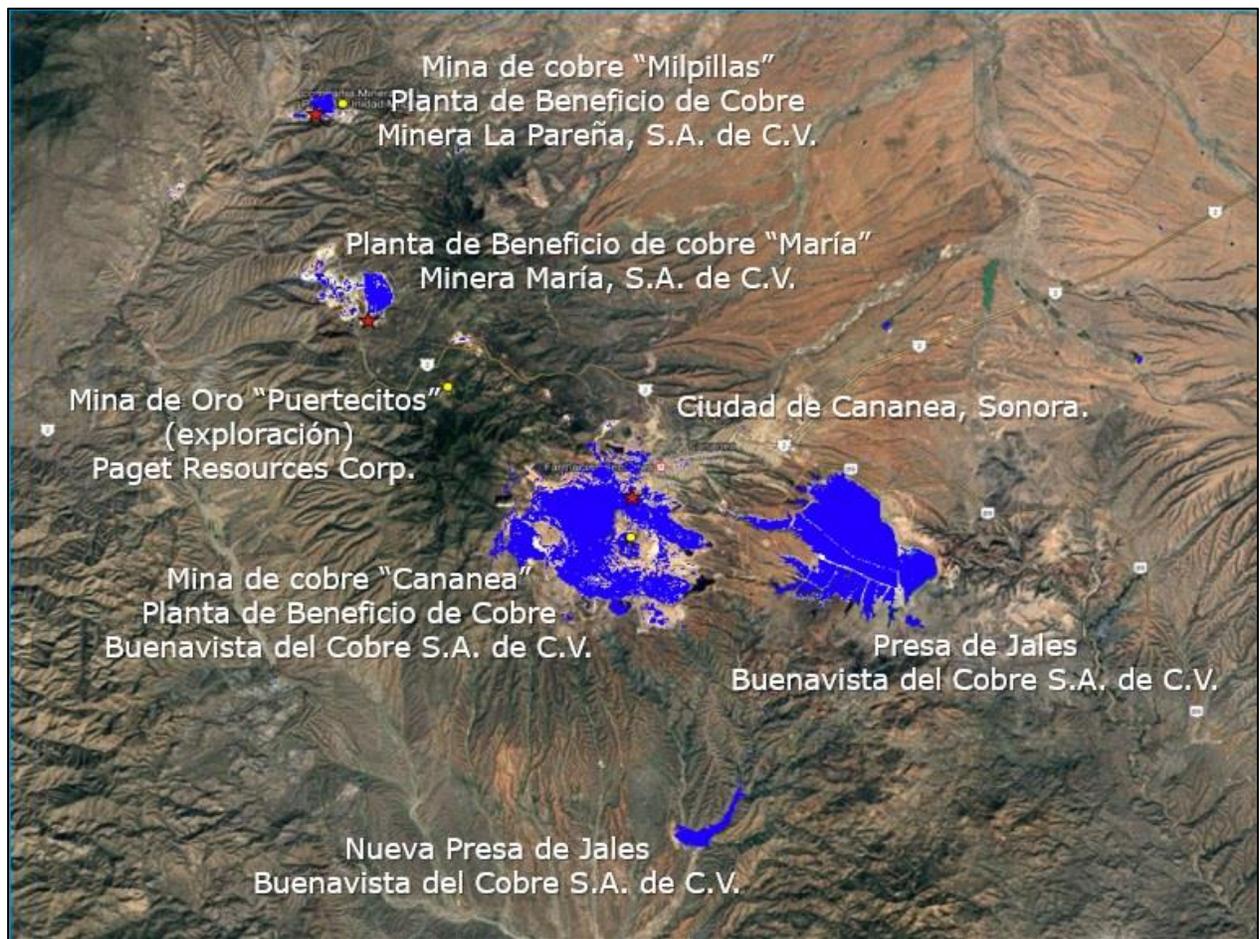


Figura 5.- Fotointerpretación y mapeo de los sitios mineros en la región de Cananea, empleando el Índice del Agua de Diferencias Normalizado
 Fuente: Elaboración propia, NDWI, imágenes Satélite SENTINEL-2.

Aunque el NDWI proporciona un buen acercamiento para delimitar las minas y presas de jales, éste no discrimina otros cuerpos de agua, como pueden ser los embalses naturales o repesos de la región. Para realizar este filtro se utilizó el Índice J.

Localización de instalaciones: Índice J

Se analizó el Índice J en todo el rango de variación considerado factible de aplicar, el cual incluye valores de -0.50 a 0.35 para el caso de la imagen estudiada, determinándose que en el rango de

0.21 a 0.22 se logró detectar las áreas de minas y presas de jales ya conocidas. De tal forma que se dejaron como posibles áreas mineras y presas de jales aquellos cuerpos de agua con un NDWI=>-0.2 y aquellos en donde también existiera una presencia de polígonos obtenidos con el Índice J (0.21-0.22) con al menos dos píxeles continuos.

Para evaluar los resultados se seleccionaron 35 áreas detectadas con el NDWI que tuvieran características identificadas por fotointerpretación, mismas que se enlistan en la Tabla 3 y cuya localización se indica en la Figura 6.

Como se observa en la Tabla 3, 17 de los 35 lugares seleccionados tienen presencia de polígonos en el rango del índice J (valores entre 0.21 y 0.22), es decir, son lugares con características espectrales similares a las correspondientes a excavaciones mineras y/o presas de jales. Estos resultados nos indican una alta tasa de aciertos, ya que el 100% de las presas de jales y excavaciones de las minas de cobre señaladas por el Servicio Geológico Mexicano en la zona, que son siete, fueron identificadas con el método propuesto (No. 10, 11,12,13, 18, 19 y 20 de la Tabla 3).

No.	Nombre	Descripción	Detectado Índice J	Coordenadas Geográficas	
				Longitud	Latitud
1	Alberca Nogales Mx	Alberca en la Unidad Deportiva de Nogales, Sonora		-110.9529	31.2962
2	Represo Nogales Mx	Represo COLOSIO en Nogales, Sonora	*	-110.9738	31.2789
3	Represo CIBUTA	Represo de aguas pluviales cercano a Cibuta		-110.9094	31.0457
4	Mina Magdalena	Mina de bórax Magdalena (exp. avanzada)		-110.9952	30.7130
5	Mina Pilar	Mina de oro Pilar (exploración)		-110.6748	31.2053
6	Mina El Pilar	Mina de cobre El Pilar (exp. avanzada)		-110.6679	31.2057
7	Misión Sra. del Pilar	excavaciones aleatorias y depositos vertido libre		-110.6151	30.9267
8	Laguna Sra. del Pilar	Laguna aguas abajo de excavaciones Sra. del Pilar	*	-110.7051	30.8143
9	Mina Amelia	Mina Oro(exploración) -Planta de Beneficio (inactiva)		-110.5588	30.6629
10	Jale Mina Milpillás	Presa de Jales de Mina de cobre Milpillás	*	-110.4324	31.1125
11	Mina Milpillás	Mina subterránea de cobre Milpillás	*	-110.4251	31.1092
12	Mina María	Mina de cobre María	*	-110.4277	31.0442
13	Jale Mina María	Jale Mina María	*	-110.4136	31.0470
14	represo no identificado	represo cercano a poblado José Ma. Morelos	*	-110.2781	31.2019
15	Represo Mina BVC	Represo pluvial aguas arriba de Mina BVC		-110.3225	31.0048
16	Represo Patos	Represo Patos cercano a Cananea		-110.1866	31.0505
17	Laguna Cd. Cananea	Laguna Pluvial adyacente a Cd Cananea		-110.2502	30.9786
18	Tajo mina BVC	Excavaciones en Tajo mina Buenavista del Cobre	*	-110.3215	30.9553
19	Jale mina BVC	Presa de Jales mina Buenavista del Cobre	*	-110.2332	30.9583
20	New Jale BVC	Nueva Presa de Jales de mina Buenavista del Cobre	*	-110.2927	30.8484
21	Abajo New Jale	Abajo de la cortina de Nueva Presa de Jale BVC		-110.2984	30.8394
22	Represo Border	Represo cercano a Línea Internacional		-110.0880	31.3260
23	SonoCal Naco	Planta de Beneficio de cal SonoCal Naco		-109.8803	31.3216
24	Espuela Naco	Espuela de Ferrocarril Naco		-109.9718	31.1741
25	Represo Espuela	Represo aguas abajo de Espuela FF.CC. Naco		-109.9959	31.1445
26	Represo no identificado	Represo no identificado cercano a pob. I. Zaragoza	*	-110.0548	31.0664
27	Represo no identificado	Represo no identificado cercano a pob. E. Zapata	*	-110.1295	31.0209
28	Mina Bacoachi	Planta de Beneficio oro y plata Bacoachi		-109.9732	30.6510
29	Laguna no identificada	Laguna no identificada		-110.3376	30.7029
30	Laguna no identificada	Laguna no identificada		-110.3022	30.6946
31	Ley Nogales	Super Mayoreo LEY en Nogales, Sonora	*	-110.9386	31.2917
32	represo no identificado	Represo cercano a Línea Internacional	*	-110.3948	31.2769
33	represo no identificado	Represo sin instalaciones cercanas conocidas	*	-110.4109	31.2161
34	Área Agrícola	Área agrícola en Rancho San Rafael	*	-110.6067	30.9326
35	Área Agrícola	Invernaderos agrícolas al sur de la cd. de Magdalena	*	-110.9269	30.6780

Tabla 3.- Listado de los 35 sitios de control para la evaluación del Índice J.
Fuente: Elaboración propia.

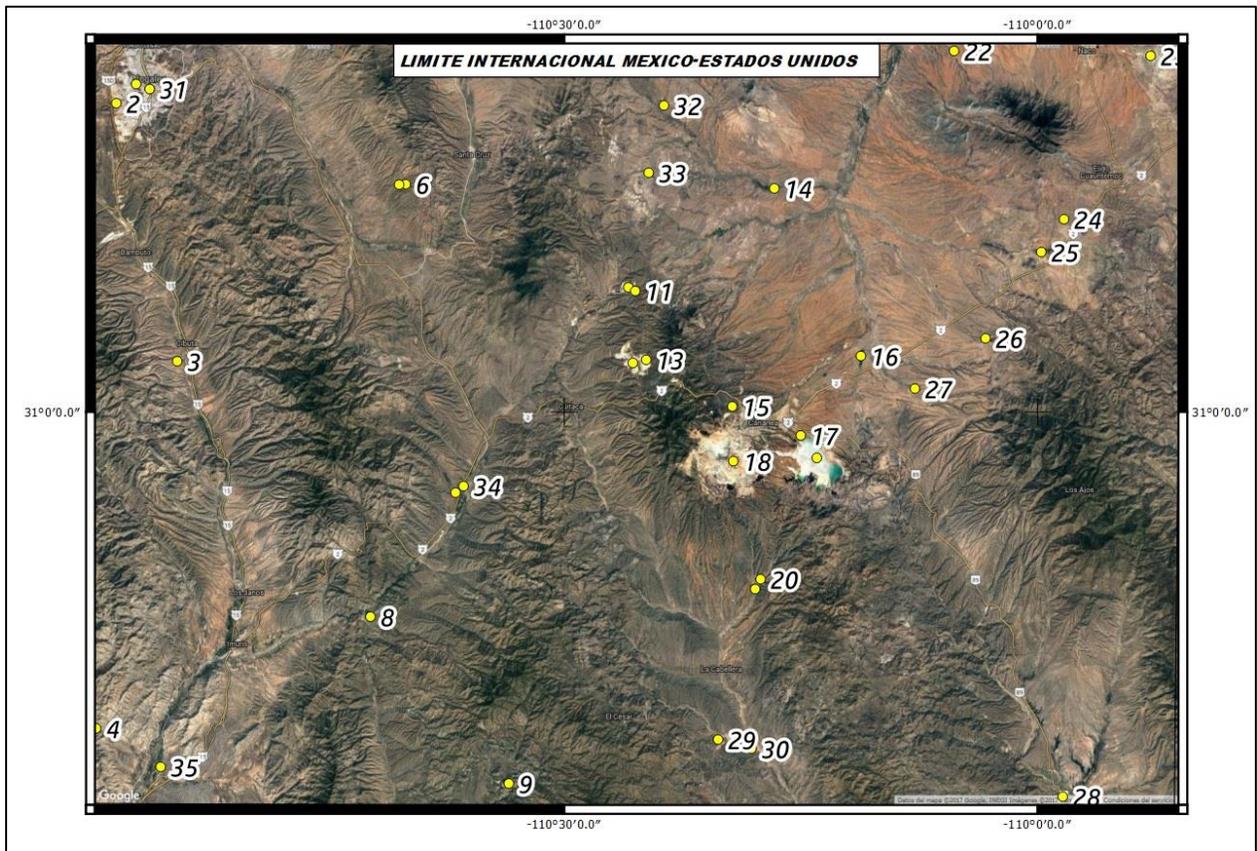


Figura 6.- Localización de los 35 sitios de control para la evaluación del Índice J.
 Fuente: Elaboración propia, empleando fotointerpretación de imágenes de Satélite de Google Earth.

Por otra parte, el Índice J también identificó cuerpos de agua determinados anteriormente como lagunas naturales o repesos no conocidos, con características espectrales similares a presas de jales y/o excavaciones mineras (números 8, 26, 27, 32 y 33 de la Tabla 3), en estos lugares se requiere realizar los estudios de campo necesarios para la evaluación de las condiciones particulares de estos cuerpos de agua y de las áreas circundantes (en especial del influente asociado al depósito de agua), con el fin de verificar la ausencia de sustancias similares a las de las presas de jales y/o excavaciones mineras.

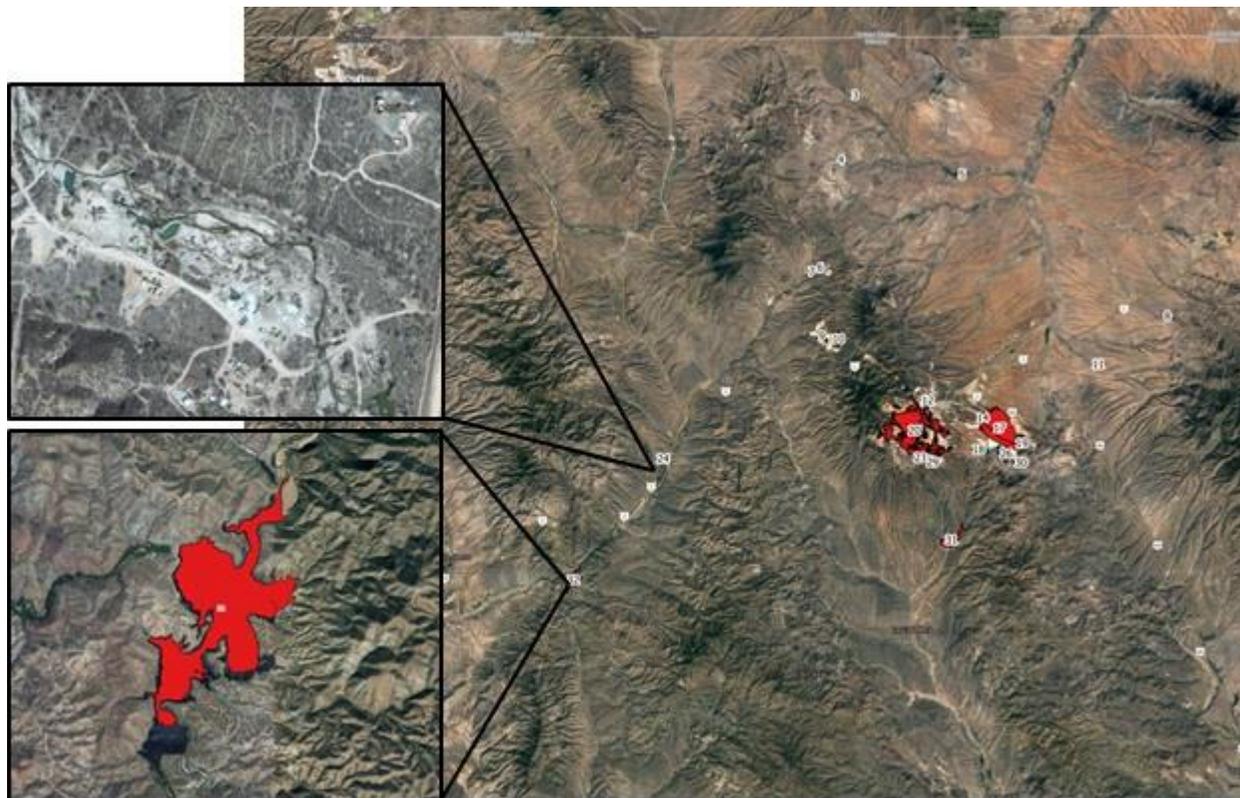


Figura 7.- Localización de depósitos naturales con características espectrales similares a las Presas de Jales combinando los índices NDWI y el Índice J.
Fuente: Elaboración propia, imágenes satelitales Google Earth, análisis Qgis.

Una de las áreas mencionadas anteriormente es la denominada Laguna de la Sra. del Pilar (no. 8 en la Tabla 3), en la cual se identificó, a través de la fotointerpretación de las fotografías satelitales, que posiblemente sea alimentada por derrames pluviales y/o mineros de una excavación tipo artesanal localizada en un lugar identificado como Misión de Nuestra Señora del Pilar, ubicada a aproximadamente a 15 kilómetros aguas arriba de la citada laguna.

También este índice señaló cuatro lugares que, con los resultados de fotointerpretación, se determinó que no corresponden a instalaciones mineras, estos están identificados con los números 2 y 31 de la Tabla 3 y son instalaciones dentro de la mancha urbana de la ciudad de Nogales, mientras los números 34 y 35 de la Tabla 3 corresponden a instalaciones agrícolas. En estos sitios

sería importante revisar las características fisicoquímicas del agua que puedan causar una señal espectral similar a las instalaciones mineras.

En resumen, la aplicación del Índice J permite: a) corroborar sitios ya señalados como excavaciones de minas de cobre y presas de jales de minas de cobre (7 áreas); b) guiar visitas de campo para investigar lo que ocurre con la calidad del agua en áreas que se supone son embalses naturales o repesos (6 áreas); y c) sugerir estudios de calidad del agua en áreas cuya localización corresponde a zonas dentro de la mancha urbana de localidades y a zonas agrícolas (4 áreas).

Como era de esperar, ya que el índice J fue formulado para detectar instalaciones mineras de cobre, éste no identificó las plantas de beneficio de minerales metálicos de oro y plata de la mina Bacoachi (Mina activa, producción 2 ton/día) ni la planta de beneficio de minerales no metálicos Sonocal (Mina activa, producción 700 ton/año), posiblemente por las características de refinamiento del mineral y/o por el volumen reducido de producción.

De igual manera, según lo esperado, el Índice J tampoco identificó las minas que actualmente se encuentran en etapa de exploración como la mina Amelia (Mina de Oro), la mina El Álamo (Mina de Bórax) y la mina El Pilar (Mina de Cobre y Oro).

Conclusiones

El derrame de contaminantes ocurrido el 6 de agosto de 2014 por la empresa minera Buenavista del Cobre afectó al arroyo Tinajas, y a los ríos Bacanuchi y Sonora; por lo que ha sido considerado como el peor desastre ambiental ocurrido en la industria minera del país, de acuerdo con el secretario de SEMARNAT (Díaz-Caravantes et al., 2016). Este acontecimiento ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad que se tiene ante estas situaciones, y lo poco preparados que estamos

autoridades y población en general para prevenir, contener y remediar los efectos nocivos para nuestro ecosistema.

Este trabajo muestra una metodología para la ubicación espacial de presas de jales en las regiones mineras, contribuyendo a reducir los vacíos de investigación en la región del río Sonora y en general en todo el Estado de Sonora. La aplicación de este tipo de herramientas permitirá: 1) conocer como está evolucionando la industria minera en esta parte del país, 2) conocer el número de presas de jales y de las instalaciones para la concentración de minerales, y 3) apoyar en la evaluación de su funcionamiento, tratando de identificar cuáles de ellas pudieran estar sujetas a peligros potenciales de derrames no controlados.

La metodología propuesta en este estudio demuestra la validez del empleo de la Percepción Remota, NDWI y el Índice J, para la localización preliminar de las zonas cuyas firmas espectrales presenten características similares a las de las presas de jales; replicar esta metodología en todo el territorio del Estado de Sonora permitiría la identificación de posibles instalaciones mineras fuera de operación y activas que puedan presentar peligros potenciales de fallas y de afectaciones al ecosistema.

El presente estudio exploratorio apunta a orientar, de una manera más precisa, evaluaciones adicionales por parte de las autoridades responsables y de las mismas empresas mineras, para conocer con el detalle requerido las condiciones de operación y mantenimiento de las instalaciones mineras, y las probables acciones de prevención y corrección en su caso, para garantizar su correcto funcionamiento.

Bibliografía y fuentes

- Arenas, J. M.^a, Carrero, G., Galache, J., Mediavilla, C., Silgado, A. y Vázquez, E. M. (2001). *Actuaciones realizadas tras el accidente de Aznalcóllar*. Boletín Geológico y Minero. Vol. Especial. http://www.igme.es/boletin/2001/112_esp_2-2001/2-ACONTECIMIENTO.pdf (27 de noviembre del 2016).
- Armendáris Villegas Elisa Jeanneht, 2016, *Áreas naturales protegidas y minería en México: Perspectivas y recomendaciones*, Tesis de Doctorado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/497/armendariz_e.pdf?sequence=1&isAllowed=y (27 de noviembre del 2016).
- Chavez, Jr. Pat S., Image-Based Atmospheric Correction-Revisited and Improved, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Volumen 62, Núm. 9, September 1996, http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/891472/15133582/1321370214637/Chavez_P.S._1996.pdf?token=EYT7dHC1hgpoIwA6nJLjNlsKLM0%3D (18 de noviembre del 2017).
- Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. 2013, *Programa Detallado de Acciones de Gestión Integral para la Restauración Ecológica del Río Sonora*. http://www.ciad.mx/archivos/Programa_Detallado_Acciones_Rio_Sonora.pdf (27 de noviembre del 2016).
- Corrales Pérez Daniel, Romero Francisco Martin, *Evaluación de la peligrosidad de jales en zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 65, Núm. 3. <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v65n3/v65n3a1.pdf> (27 de noviembre del 2016).

Díaz Caravantes, Rolando Enrique, Héctor Duarte Tagles, y Francisco Martín Durazo Gálvez. 2016. *Amenazas para la salud en el Río Sonora: análisis exploratorio de la calidad del agua reportada en la base de datos oficial de México*. Revista Salud UIS 48 (1).

Díaz-Caravantes, Rolando Enrique, Héctor Duarte Tagles, Maribel Pallanez Murrieta, José Luis Moreno Vázquez, Javier Alberto Mejía Santellanes, y Francisco Martín Durazo Gálvez. En revisión. *Análisis de los criterios para proteger la vida acuática: El río Sonora después del derrame minero de 2014*. Enviado a Aqua-LAC.

European Space Agency-España, 2017, *El Programa Copérnico*. http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico (25 de octubre del 2017).

Fideicomiso Río Sonora, 2016, *Derrame de sulfato de cobre en el Río Bacanuchi, (Afluente del Río Sonora), Agosto 2014*. <http://www.fideicomisoriosonora.gob.mx> (8 de septiembre del 2016).

León Taquia Andrés Alejandro, 2015, *Descripción, Descarga y Manipulación de Productos Sentinel-2*, <https://es.slideshare.net/AlejandroLeon31/guia-sentinel2-espaol> (09 de octubre del 2017).

López Sanchez Linda Rocío, 2013, *Residuos mineros y la generación de drenaje ácido: Pruebas de laboratorio y su aplicación en el diseño, construcción y operación de depósitos*, Tesis Profesional de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2556/TESIS.pdf?sequence=1> (27 de noviembre del 2016).

Mendíagenciavil-Quijada Hector 2012, *Uso de imágenes satelitales aplicadas a la exploración por yacimientos minerales, GEOMIMET,*

http://www.academia.edu/19380864/Uso_de_im%C3%A1genes_satelitales_aplicadas_a_la_exploraci%C3%B3n_por_yacimientos_minerales (27 de noviembre del 2016).

NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Diario Oficial de la Federación Lunes 13 de septiembre del 2004.

<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/NOM-141-SEMARNAT-2003.pdf> (27 de noviembre del 2016).

Orozco R., Muhech, Vidal 2012, *Anteproyecto del nuevo depósito pasa jales “ Buenavista del Cobre” en Cananea, Sonora*. XXVI Reunión nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. http://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion_Cancun/2_XXVI_Reunion_Nacional/15_Geotecnia_ambiental_y_depositos_mineros/I14ORSR_1.pdf (27 de noviembre del 2016).

Pérez Sáenz de Urturi Juan-Eusebio 2005, *La Minería Colonial Americana bajo la Dominación Española*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Universitaria. Memoria Digital de Canarias. <http://mdc.ulpgc.es/cgi-bin/showfile.exe?CISOROOT=/bolmc&CISOPTR=130&filename=131.pdf> (20 de noviembre del 2017).

Pinto Herrera Honorio 2010, *Desastre ecológico y ambiental en Huancavelica*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Investigaciones Sociales, Vol. 14 No. 25, Lima, Perú. http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/inv_sociales/N25_2010/pdf/a15.pdf (29 de noviembre del 2017).

Porto de Souza Marcelo Firpo 2016, *The tragedy of mining and development in Brasil: public health challenges*. PERSPECTIVES escola National de Saúde Pública Sergio Arouca,

Fundacao Oswaldo Cruz, Río de Janeiro, Brasil.
http://www.scielo.br/pdf/csp/v32n2/en_0102-311X-csp-32-2-0102-311X00211015.pdf (20 de agosto del 2017).

Ramos-Arroyo, Christina Desireé Siebe-Grabach, 2006, *Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v23, núm. 1.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57221207> (27 de noviembre del 2016).

Servicio Geológico Mexicano, Secretaria de Economía, *Panorama Minero del Estado de Sonora*, 2015. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/SONORA.pdf> (27 de noviembre del 2016).

Shimmer Rusell, *A Remote sensing and GIS method for detecting land Surface áreas covered by copper mil tailings*, 2008.
<https://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pecora17/0030.pdf> (20 de marzo del 2017).

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología, 2016, *Evidencias de las afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas del Río Bacanuchi y el Río Sonora por el derrame de la mina Buena Vista del Cobre: avances del diagnóstico ambiental*, <https://es.scribd.com/document/318098560/DPAvances-Diagnostico-Ambiental-Rio-Sonora> (27 de noviembre del 2016).

Wenbo Li, Zhiqiang Du, Feng Ling, Dongbo Zhou, Hailei Wang, Yuanmiao Gui, Bingyu Sun, Xiaoming Zhang, 2013, *A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI*, Remote Sensing.
<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/11/5530> (27 de noviembre del 2016).