



DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE ÁREAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES EN LA COMUNA DE ANDACOLLO – REGIÓN DE COQUIMBO - CHILE

Keyla Manuela Alencar da Silva Alves

Académica del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica
keyla.dasilva@utem.cl

María Carolina Parodi Dávila

Académica del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica
cparodi@utem.cl

Erik Zimmermann

Académico del Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario
erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN – La comuna de Andacollo se encuentra ubicada en la pampa ondulada de los valles transversales de la cuenca hidrográfica del Arrayan, región de Coquimbo, al norte de Chile. Es una zona reconocida por la intensa actividad minera de extracción de cobre y oro, y por los inúmeros depósitos de relaves abandonados e inactivos en los alrededores de la zona urbana de la comuna. Es un área susceptible a inundaciones, destacando las ocurridas en 1997, 2015, 2017 y 2020. La dinámica hídrica en zonas de alto número de depósitos de relaves abandonados e inactivos puede representar un agravamiento potencial del riesgo, considerando el arrastre de metales pesados y la contaminación del agua y suelo. Como resultado, por medio de modelación matemática en SIG se identificó que, de los 108 depósitos de relaves instalados en la zona urbana de la comuna, 54 se encuentran instalados en zonas inundables.

Palabras-chave: Andacollo; inundación; depósitos de relaves; SIG.

DIAGNOSTICO E ZONIFICAÇÃO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE ANDACOLLO – REGIÃO DE COQUIMBO – CHILE

RESUMO – O município de Andacollo está localizada nas planícies de altura dos vales transversais da bacia hidrográfica de Arrayan, região de Coquimbo, norte do Chile. É uma área conhecida pela sua intensa atividade de mineração de cobre e ouro, e pelos inúmeros depósitos de rejeitos abandonados e inativos ao redor da área urbana do município. É uma área suscetível a inundações, com destaque para os eventos ocorridos em 1997, 2015, 2017 e 2020. A dinâmica hidrológica em áreas com elevado número de depósitos de rejeitos abandonados e inativos pode representar um potencial agravamento do risco, considerando o transporte de metais e a contaminação da água e do solo. Como resultado, através da modelação matemática em SIG, foi identificado que, dos 108 depósitos de rejeitos instalados na área urbana do município, 54 estão instalados em áreas de inundação.

Keywords: Andacollo; inundação; depósitos de rejeitos, SIG.

INTRODUCCIÓN

La comuna de Andacollo posee una superficie urbanizada de 310 km² y una población de 11.044 habitantes, donde la actividad minera corresponde al pilar fundamental de la economía comunal, lo que desencadena una serie de problemas relacionados directamente con la contaminación ambiental y/o enfermedades relacionadas al contacto directo con metales pesados (CORRAL et al., 2013).

De acuerdo con el Catastro Nacional de Relaves presentado en 2020 por el Servicio Nacional de Geología y Minería, existen en Chile un total de 743 depósitos, de los cuales en Andacollo se encuentran 105 de estos depósitos de relaves, donde 18 se encuentran abandonados, 5 activos, 80 no activos y los demás sin identificar (SERNAGEMIN, 2020a).

El área urbana de la comuna de Andacollo se encuentra rodeada de relaves mineros, los cuales según el Ministerio de Minería los definen como un residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que quedan como resultado de la extracción de minerales sulfurados en el proceso de flotación. En estos relaves se encuentran grandes concentraciones de mercurio, arsénico, plomo, cianuro, cobre, cinc y cromo (BASTÍAS et al., 2013)

Las sustancias, elementos o compuestos químicos presentes en los depósitos de relave, se encuentran expuestas a su propagación al medio ambiente a través de diversos factores como: aluviones, escorrentías, crecidas/inundaciones, filtraciones, licuefacción provocados por movimientos sísmicos o movimientos en masa. Estos eventos naturales mencionados son condicionantes para el colapso de los mismos depósitos de relave, así como también contribuyen en el transporte de material particulado por medio de la erosión eólica e hídrica.

Las dinámicas de eventos naturales en zonas de alta concentración de depósitos de relaves abandonados deben ser analizadas bajo la mirada sistémica. Pues las dinámicas naturales de las variables ambientales influyen en la inestabilidad de los depósitos, y consecuentemente en la dispersión de sedimentos tóxicos. De esta forma potencializando los impactos asociados a los eventos naturales, dando un aspecto más socionatural a los posibles desastres. Se estima que la dinámica hídrica contribuya con los impactos ambientales en la contaminación de las aguas y la contaminación de los suelos, en la flora y fauna de la zona, además de comprometer la salud de la población de la comuna de Andacollo (PACHECO et al., 2020).

Considerando los históricos de ocurrencia de inundaciones en el área de estudio (MIRALLES, 2013; ROJAS et al., 2014; MARDONES, 2019), se propuso como objetivo de este estudio realizar un modelamiento matemático en SIG buscando identificar y zonificar en un resultado gráfico y georreferenciado las zonas susceptibles a inundaciones. El modelamiento fue realizando utilizando como referencia espacial la cuenca hidrográfica del Arrayan, con análisis de los resultados enfocados en la zona urbana de la comuna de Andacollo (área urbanizada de la cuenca). Este resultado permitió identificar los depósitos de relaves que se encuentran ubicados en el área de riesgo de inundación.

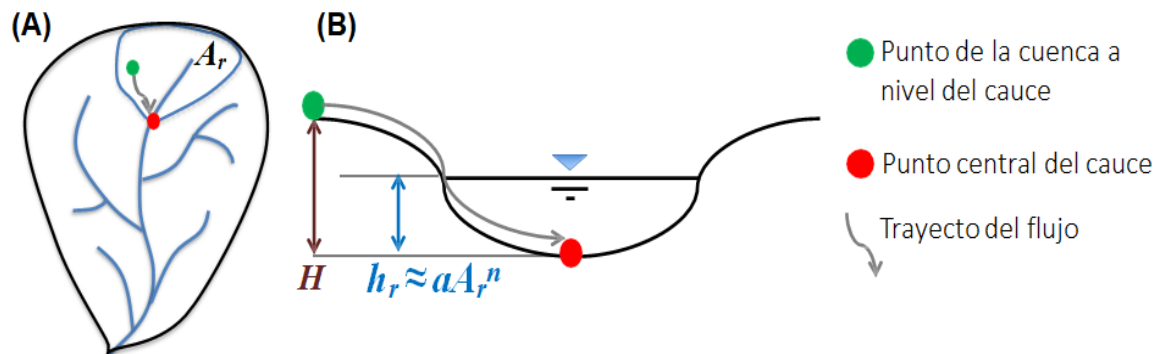
MÉTODOS Y TÉCNICAS

La herramienta Geomorphic Flood Area permite derivar el mapa de susceptibilidad de inundación de una cuenca combinando información geomorfológica extraída del DEM, junto con información de riesgo de inundación derivada de mapas de inundación preexistentes, generalmente disponibles para porciones limitadas de una cuenca en los planes reguladores comunales. Este método permite clasificar los puntos dentro de una cuenca en dos grupos: áreas propensas a inundaciones y áreas no propensas a inundaciones, utilizando un referente binario lineal clasificador basado en el índice de inundación geomórfica (GFI) (SAMELA et al., 2017; FARIDANI et al., 2020). El índice mencionado ha sido definido como:

$$\ln \frac{h_r}{H}$$

Compara en cada punto de la cuenca el nivel del agua h_r en el elemento más cercano de la red fluvial identificada siguiendo los caminos hidrológicos ("r" significa "río"), con la diferencia de elevación (H) entre estos dos puntos. h_r se estima como una función del área contribuyente utilizando la relación de escala hidráulica propuesta por Leopold y Maddock (1953) y más recientemente investigados y adaptados por Nardi et al. (2006), como se observa en la Figura 1.

Figura 1. (A) representación de cuenca fluvial; (B) vista en sección transversal del canal y la llanura de inundación



Fuente: Adaptado de Samela et al. (2017).

donde h_r es la profundidad del agua [m], A_r [km²] es el área contribuyente calculada en el punto más cercano del río conectada al punto más bajo del cauce, y n es el exponente (sin dimensiones).

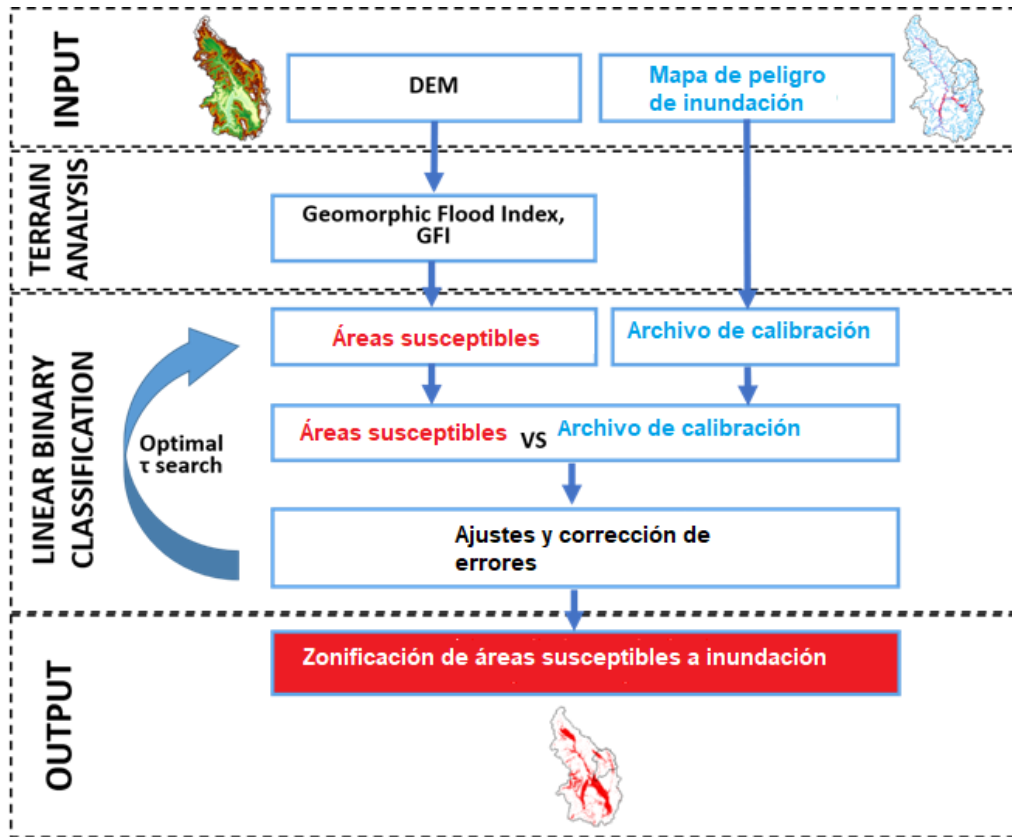
La relación entre el GFI y el mapa de inundación estándar es, por lo tanto, el límite lineal de decisión entre las dos clases: primero se calibra dentro de un área ya determinada y luego se aplica para mapear la inundación en áreas susceptibles aun no identificadas a escala de cuenca. Este límite se expresa mediante un valor de un umbral. De acuerdo con los análisis de Samela et al. (2017), el mapa de calibración debe tener al menos 2% de cobertura de la cuenca de interés para una calibración óptimo.

Este modelo requiere dos conjuntos principales de datos de entrada (Figura 2):

I. Un Modelo de Elevación Digital (DEM) para calcular el índice de inundación geomórfica;

II. Un mapa preexistente de peligro de inundación generalmente derivado de modelos hidráulicos para calibrar la modelación, o en caso de que no exista tal dato para el área de estudio, el modelo permite realizar la calibración del umbral hídrico de forma manual. Para el estudio en cuestión, por realizar la calibración manual con los valores de umbral establecidos por el modelo.

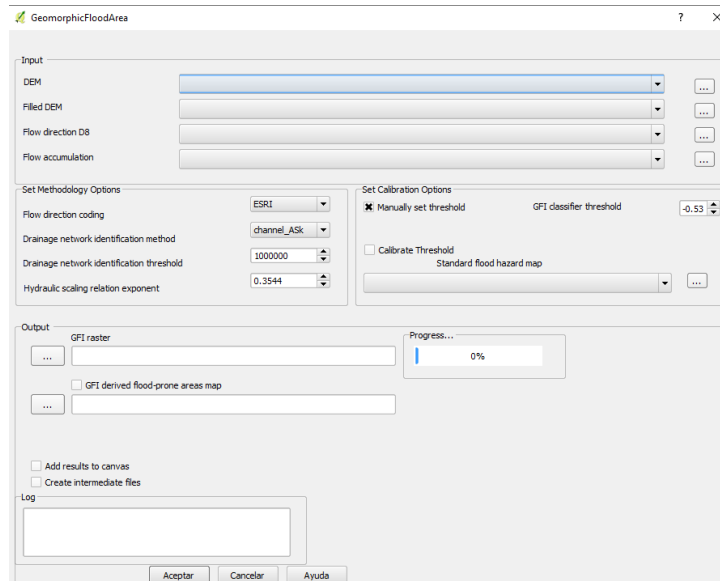
Figura 2. Diagrama de las etapas del modelamiento del GFI en Qgis



Fuente: Adaptado de Samela et al. (2017).

Una vez teniendo los parámetros de entrada del modelo, este fue ejecutado en el software Qgis:

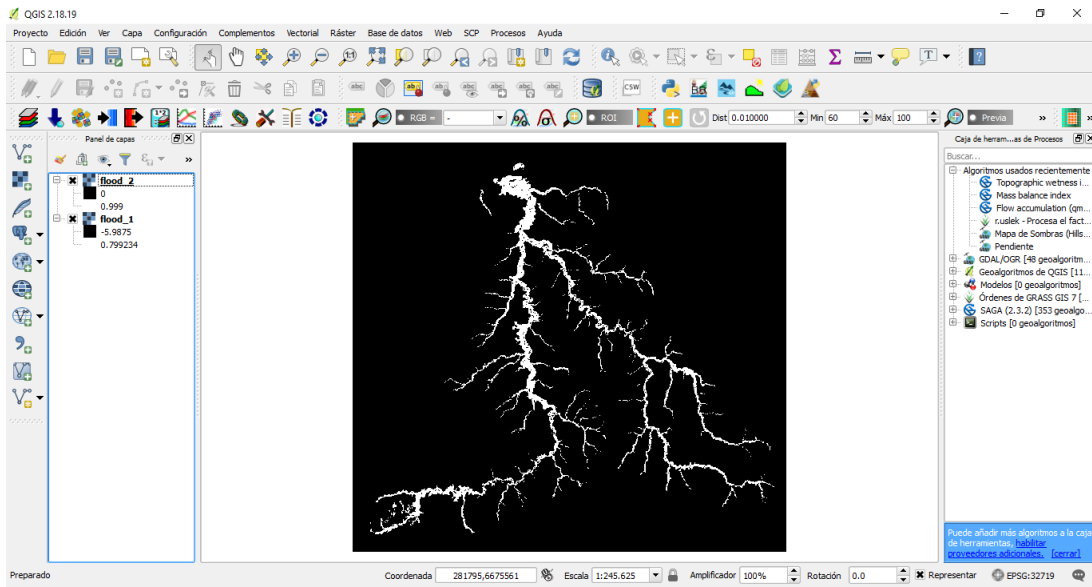
Figura 3. Módulo para ejecución del modelamiento del GFI en Qgis



Fuente: elaboración propia.

Para determinar cuáles son las áreas inundables de la zona urbana de Andacollo, se aplicó el modelo para toda el área de la cuenca hidrográfica del Arrayan, en el cual esta insertada la comuna de Andacollo, y la abastece hídricamente. Así se pudo obtener un resultado ajustado a la realidad considerando el volumen total de agua que podría acumularse en la zona urbana de la comuna, según las características topográficas. Los resultados del modelo fueron:

Figura 4. Resultados preliminares del modelamiento en GFI para la cuenca del Arrayan



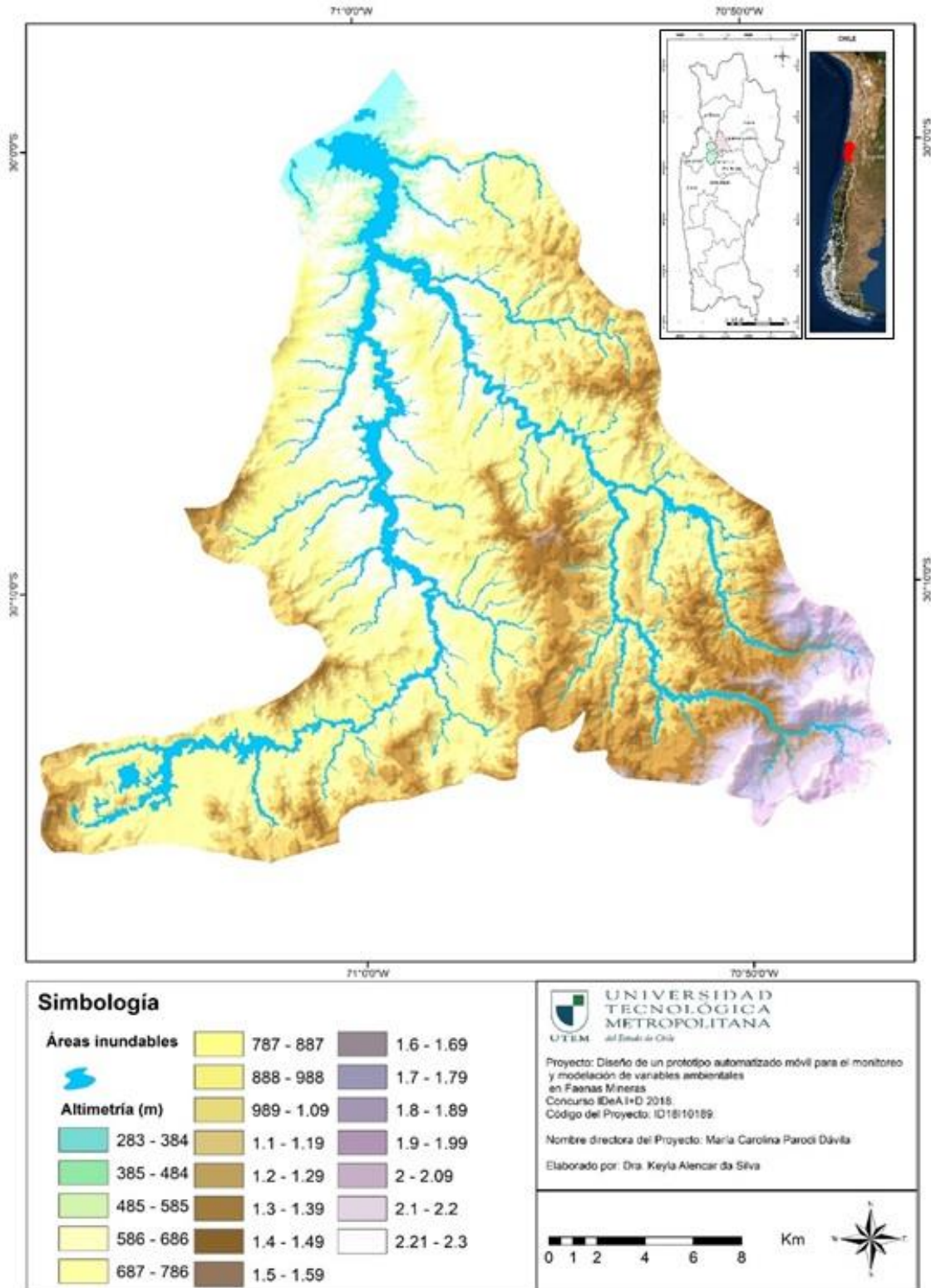
Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados del modelo se generó la cartografía de las áreas inundables de la cuenca del Arrayan y comuna de Andacollo.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Dada la configuración topográfica, la comuna de Andacollo se encuentra en la zona de depresión de la cuenca del Arrayan, donde se deposita el material arrastrado y se acumula el agua. Además, durante las visitas a terreno, se realizó visitas de reconocimiento en algunos de los depósitos que se encuentran instalados en la zona inundable. Estos depósitos también fueron seleccionados por presentaren niveles de arsénico y plomo sobre la norma EPA AP-42, según los datos presentados en el catastro geoquímico de depósitos de relaves de SERNAGEOMIN (2020b). Durante las inspecciones se pudo identificar otros procesos erosivos hídricos en estos depósitos de relave seleccionados, tales como cárcavas y socavones, que reafirma la susceptibilidad del terreno donde están instalados los depósitos de relave a erosiones de origen hidrológica. En base al levantamiento topográfico aplicado a la modelación matemática GFI se definió la zonificación de las áreas susceptibles a inundaciones. La modelación fue ejecutada utilizando como recorte geográfico toda la cuenca hidrográfica del Arrayan con el objetivo de identificar el máximo de área inundable, considerando todo el aporte hídrico que podría acumularse en la zona urbana de Andacollo (Figura 5).

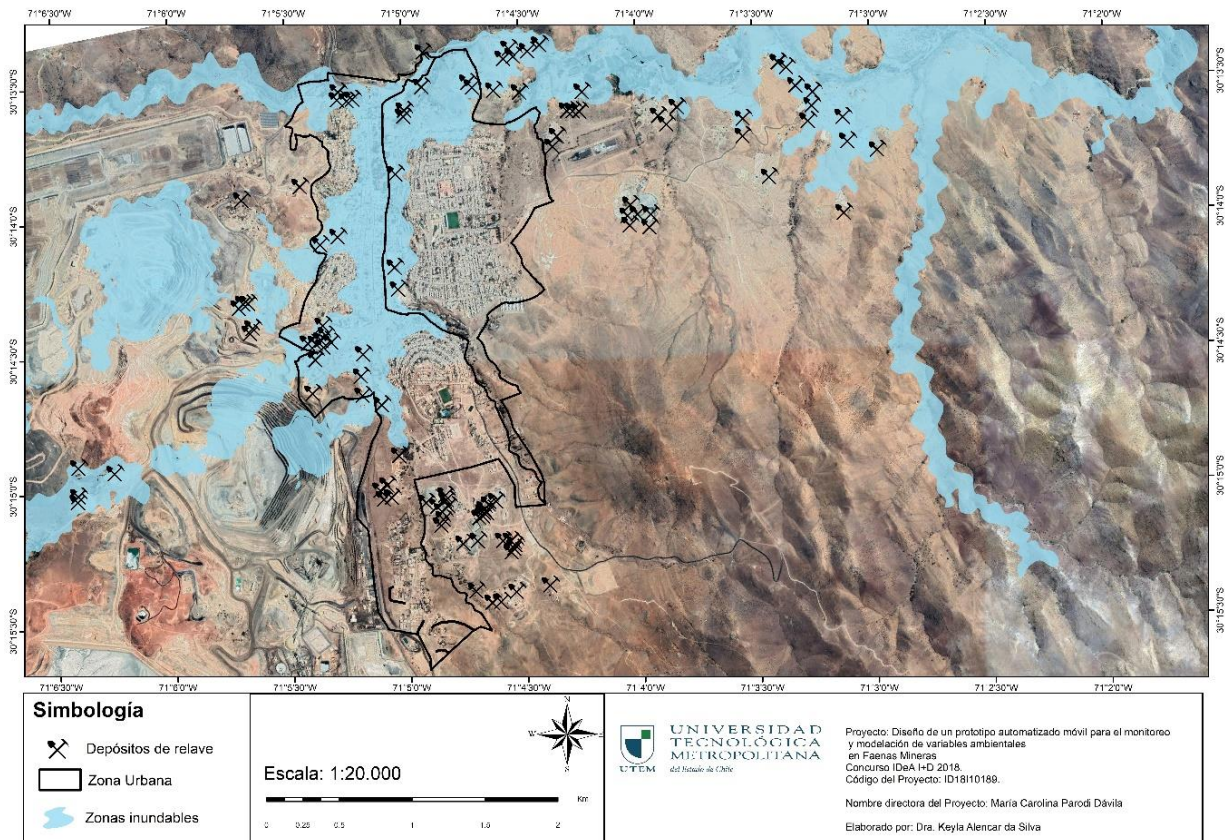
Figura 5. Cartografía de las zonas susceptibles a inundación en la cuenca hidrográfica del Arrayán



Fuente: elaboración propia.

Considerando la importancia de identificar las zonas inundables en la zona urbana de la comuna de Andacollo, donde también se concentran la mayor parte de los depósitos de relaves abandonados, se hizo un recorte sobre el área de interés. En la figura 6, se observa el resultado de la modelación, en la cual indica las zonas susceptibles a inundación y la ubicación de los relaves en el área urbana de la cuenca. Fue posible identificar que, de los 108 depósitos de relave instalados en la zona urbana de la comuna, 54 están ubicados en la zona susceptible a inundables.

Figura 6. Correlación espacial de las zonas inundables y los depósitos de relave.

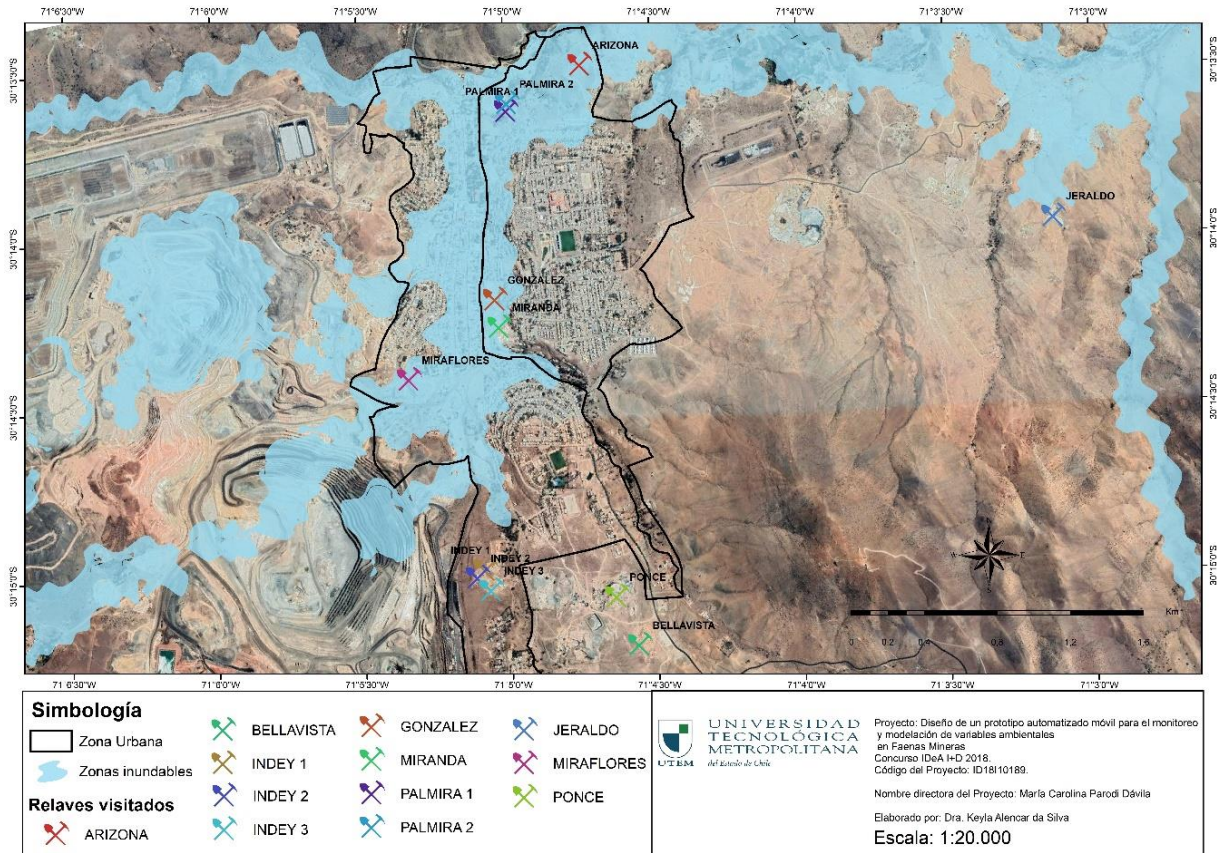


Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar que los relaves abandonados se encuentran sin protección, es decir sin cercos o carteles que adviertan la peligrosidad de estos, lo que genera un ambiente propicio a la ocupación humana, ya sea para recreación o vivienda improvisadas. Lo que representa un peligro a la salud de las personas. Durante la visita en terreno a algunos de los depósitos de relave ubicados en la zona inundable, se pudo observar el avanzado estado erosivo de algunos de ellos.

Destacase de los 54 depósitos de relaves ubicados en la zona inundable los siguientes: Arizona, Bellavista, Indeys, Jeraldo, Miraflores, Miranda y Gonzales, Palmas 1 y 2, y Ponce. Todos inactivos y con niveles de arsénico y plomo sobre la norma EPA AP-42 (Figura 7).

Figura 7. . Correlación espacial de las zonas inundables y los depósitos de relave seleccionados para campaña 2020.

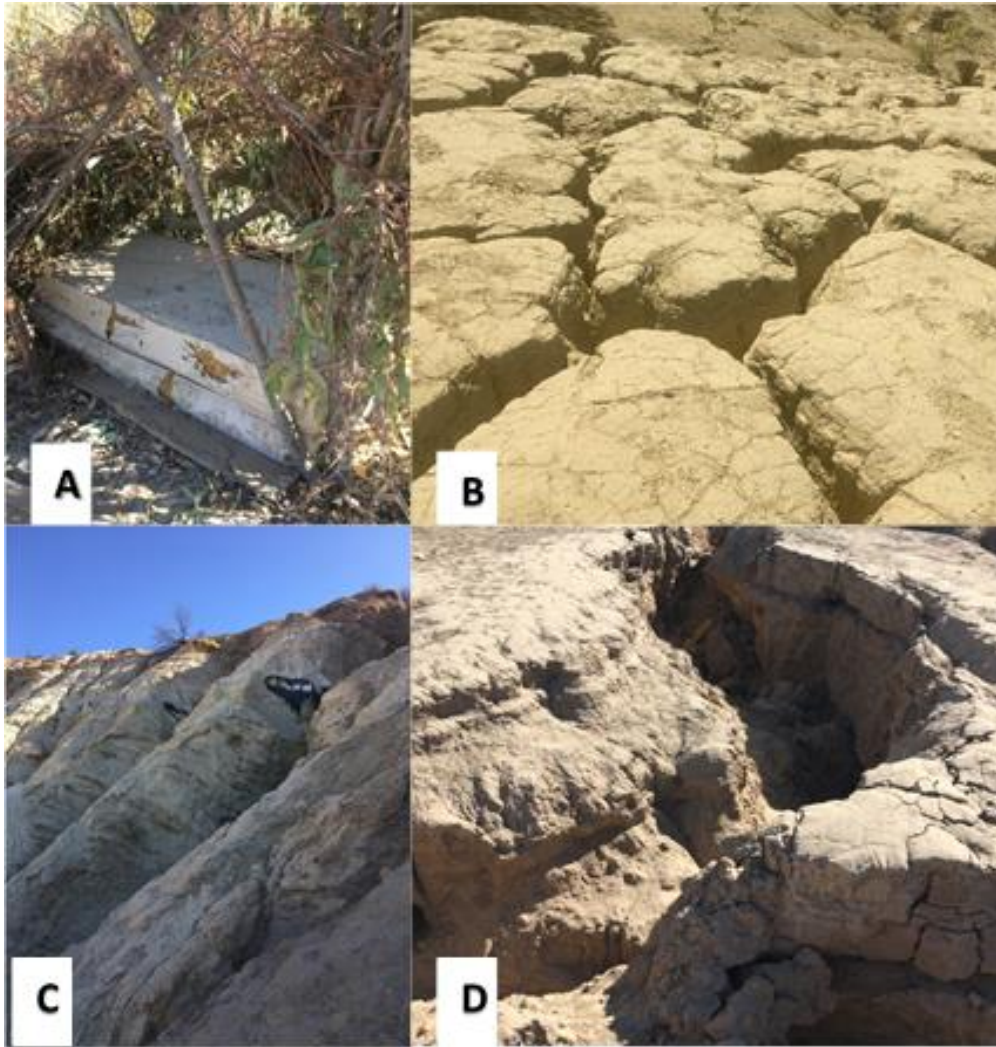


Fuente: elaboración propia.

Todos los relaves visitados presentaron aspectos erosivos en diferentes grados de degradación, algunos con pequeños surcos de erosión laminar, como el relave Arizona (A), pero con vestigios de refugios para ocupación humana. Y otros con socavones y cárcavas más profundas tales como Palmiras 1 y 2 (B), Miraflores (C), Miranda y Gonzales (D). Se destaca en estos depósitos la gran cantidad de cárcavas y socavones de diferentes tamaños y profundidades.

La presencia de estos registros erosivos demuestra la exposición de los depósitos a procesos erosivos hídricos, y la susceptibilidad de transporte del material sedimentario, que por su vez presenta baja cohesión. La erosión hídrica proporciona pérdida de material y transporte de estos. En particular, es importante enfatizar que el material transportado son sedimentos mineralizados que poseen altas concentraciones de metales pesados.

Figura 8. Registros fotográficos del estado erosivo de los depósitos de relaves seleccionado para inspección in situ



Fuente: elaboración propia.

Cartografía interactiva

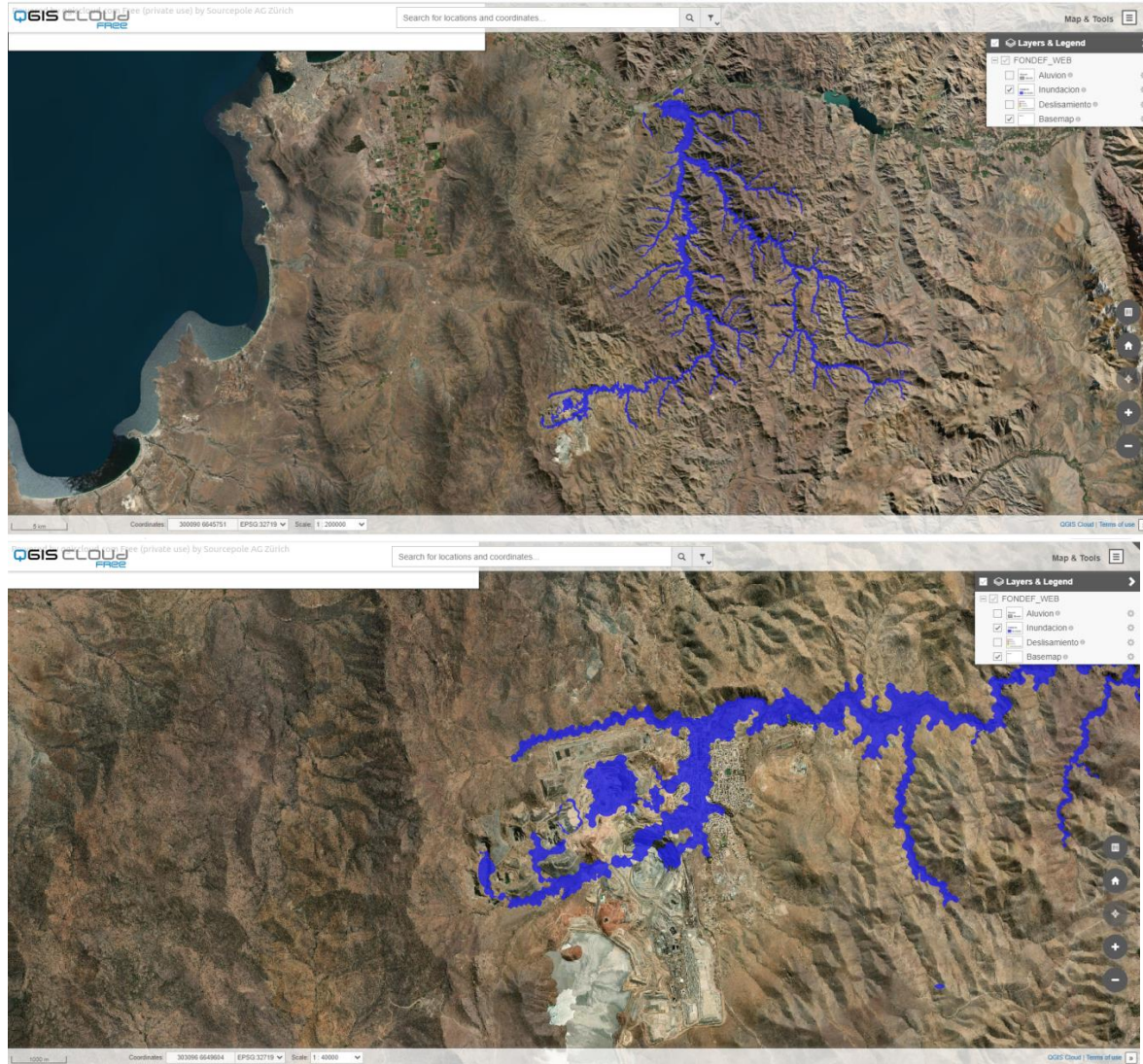
Los resultados de la modelación GFI, además de cartografiados, estarán disponibles en formato mapa web. Donde se podrá tener acceso por medio de la página www.sueloverde.cl, para uso interno de los investigadores del Laboratorio de Suelo y medio Ambiente de la Universidad Tecnológica de Chile (UTEM). Y para el público general los datos están disponibles en: https://qgiscloud.com/Jorgemr11/FONDEF_WEB/?bl=&l=Aluvion!%2CInundacion%2CDeslisamiento!%2CBasemap&t=FONDEF_WEB&e=248108%2C6641730%2C349708%2C6688720.

Las capas vectorizadas fueron agregadas a la herramienta del Qgis Export to web map, para la elaboración de la versión web de cartografía. Esta herramienta se presentó como una excelente opción para elaboración de mapas interactivos vectorizados y georreferenciados para público general que busquen tales informaciones.

Una vez seleccionada las capas vectorizadas que serían publicadas, estas fueron compartidos a través de los servicios web compatibles con OGC (Open Geospatial Consortium). Esta opción permitió mostrar los mapas a través de WMS. Donde también se pueden descargar los datos a través de WFS. Con WFS-T, permitiendo de esta forma que la información pueda ser accedida por el público de interés (servidores públicos de la Municipalidad de Andacollo, investigadores y estudiantes), donde incluso se puede editar los datos espaciales directamente a través del

servicio web. La administración y almacenamiento de los datos una vez en la web se hizo aplicando la herramienta QGIS Cloud. Esta herramienta nos ofrece una base de datos PostgreSQL9, extendida con el componente espacial PostGIS (Figura 9).

Figura 9. Cartografía interactiva de los resultados obtenidos de la modelación GFI para la zonificación de áreas susceptibles a inundación



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los softwares de Sistema de Información Geográfica permiten procesar modelos matemáticos en bases físicas que entregan resultados predictivos, tales como la identificación de zonas inundables. Según las características de las precipitaciones que podrían ocurrir en la zona, eso determinaría la magnitud de las inundaciones. Sin embargo, el hecho de que existan números depósitos de relaves en el área de estudio, es un factor que intensifica el riesgo. Principalmente considerando que el material de los depósitos es altamente tóxico y podrían ser transportados a otros sectores aledaños de su deposición original, así expandiendo la zona de contacto con materiales peligrosos. Es por esta razón, y considerando el histórico de ocurrencia de

inundaciones anteriores, se aplicó la modelación GFI, donde se identificó que los relaves Arizona, Palmira 1 y 2, Miraflores, Miranda y Gonzales, además de otros 50 depósitos de relaves están ubicados en zonas susceptibles a inundaciones. Además, los resultados de la modelación GFI, presentaron excelente ajuste al ser publicados utilizando del software Quantum GIS para la elaboración de los mapas webs.

AGRADECIMIENTOS

Iniciativa financiada por Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), por medio del “Primer Concurso IDeA de I+D del FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO, FONDEF/CONYCIT, 2018 Fondef ID18110189” y apoyada por la Municipalidad de Andacollo y por la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) de Chile. Se agradece también al Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente, dependiente del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería de la UTEM y al Consejo Nacional de Investigación y Técnicas (CONICET - ARGENTINA) por medio de la beca postdoctoral Latinoamérica 2020, por el apoyo en la ejecución del estudio.

REFERÊNCIAS

- BASTÍAS, R. A. Z., GONZALEZ, P. N., HANSHING, E., AMAR, G. A., & PIZARRO, C. Evaluación del riesgo ambiental por la presencia de mercurio en relaves mineros dentro de la ciudad de Andacollo, Chile. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 75-83. 2013-
- CORRAL, S., SÁEZ, D., LAM, G., LILLO, P., SANDOVAL, R., LANCELLOTTI, D., PANCETTI, F. Neurological and neuropsychological deterioration in artisanal gold miners from the town of Andacollo, Chile. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 95(2), 344-358. 2013
- FARIDANI, F., BAKHTIARI, S., FARIDHOSSEINI, A., GIBSON, M. J., FARMANI, R., LASAPONARA, R. Estimating Flood Characteristics Using Geomorphologic Flood Index with Regards to Rainfall Intensity-Duration-Frequency-Area Curves and CADDIES-2D Model in Three Iranian Basins. *Sustainability*, 12(18), 7371. 2020.
- LEOPOLD, L. B., MADDOCK, T. J. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geological survey professional paper 252* [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(96\)00028-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00028-1). 1953.
- MARDONES MORALES, Paula. Análisis estadístico de precipitaciones desencadenantes de flujos de detritos en la Región de Coquimbo [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2019 [Fecha consulta: 13 de junio 2021]. Disponible en <<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170764>>
- MIRALLES GONZÁLEZ, Carolina. Evaluación de los factores que controlan la geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región de Coquimbo, Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2013 [Fecha consulta: 13 de junio 2021]. Disponible en <<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115370>>
- NARDI, F., VIVONI, E. R., GRIMALDI, S. Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. *Water Resources Research*, 42. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004155>. 2006.
- Pacheco, P. R., Parodi, M. C., Mera, E. M., Salini, G. A. Variables meteorológicas y niveles de concentración de material particulado de 10 µm en Andacollo, Chile: un estudio de dispersión y entropías. *Información tecnológica*, 31(6), 171-182. 2020-
- ROJAS, O., MARDONES, M., ARUMÍ, J. L., AGUAYO, M. Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, (57), 177-192. 2014

SAMELA, C., TROY, T. J., MANFREDA, S. Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments. *Advances in Water Resources*, 102, 13–28. 2017 <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.01.007>.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. SERNAGEOMIN. Catastro Nacional Depósito de relaves (2020a). Disponible desde internet en: <https://www.sernageomin.cl/deposito-de-relaves/> (con acceso el 13/06/2021).

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. SERNAGEOMIN. Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile (2020b). Disponible desde internet en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2020/01/Geoquim.xlsx> (con acceso el 13/06/2021).