



IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SECTOR DE LA MINA BRILLADOR

Sebastián Tapia¹, Ricardo Oyarzún^{2,3}, Jorge Nuñez^{2,4}, Jorge Oyarzún²

¹ Ingeniería Civil Ambiental, Universidad de La Serena, Benavente 980, La Serena, Chile (s.alfredo.tl@gmail.com)

² Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena, Benavente 980, La Serena, Chile (royarzun@userena.cl; jhnunezo@userena.cl; joyarzun@userena.cl)

³ Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Raúl Bitrán 1305, La Serena, Chile

⁴ Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC), Benavente 980, La Serena, Chile

Resumen Se ha aplicado una metodología que permite identificar zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas, utilizando sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG). El área de estudio seleccionada fue la Mina Escuela Brillador de la Universidad de La Serena, ubicada a 13 km de la ciudad de La Serena, debido a la presencia de aguas en su pique principal. Se obtuvieron imágenes Landsat del sector a través de la plataforma EarthExplorer, además de un DEM de la plataforma ASTER GDEM. Como parte del trabajo se crearon las capas temáticas Densidad de

Drenaje, Densidad de Lineamientos, Vegetación, Pendiente, Exposición Solar y Geología, mediante SAGA GIS. Las capas temáticas se integraron en un mapa de Zonas de Recarga Potencial de Aguas Subterráneas del sector de la mina Brillador, que muestra las zonas de recarga que podrían entregar agua a la mina, demostrando al mismo tiempo la utilidad de los sensores remotos y los SIG en estudios hidrogeológicos.

Palabras Claves: zona árida, agua en roca, mina Escuela

Introducción

En los últimos años, la Región de Coquimbo se ha visto afectada por cambios decadales en su régimen hidrológico (Nuñez et al., 2013). Estos cambios se acoplan, además, con tendencias de largo plazo y fenómenos cíclicos tipo ENSO. La precipitación en La Serena, por ejemplo, calculada como la media móvil de 30 años, ha caído desde valores cercanos a los 170 mm/año a principios del siglo XX hasta 77 mm/año a principios del siglo XXI (CONAMA, 2003).

La escasez hídrica de la región, generada por causas naturales, se ve acentuada por la alta demanda de aguas por parte de la comunidad, ya sea para consumo, riego agrícola o uso industrial y/o minero. Así, adquiere relevancia para hacer frente a la creciente escasez, el estudiar fuentes de agua “no convencionales”, como el agua en macizos rocosos. Es en este contexto que se propone aplicar una metodología que permita identificar zonas de recarga potencial de aguas subterráneas, con apoyo en el uso de los sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG).

Área de estudio

El área escogida para este estudio es donde se emplaza la Mina Escuela Brillador (M.E.B.), de la Universidad de La Serena. La razón es que un pique principal se encuentra

inundado (aproximadamente 25 metros por debajo del nivel 500 m.s.n.m.), por lo que constituye un buen caso de estudio para evaluar un método indirecto de identificación de posibles zonas de recarga potencial que aportan agua a la Mina Escuela.

La M.E.B. se encuentra a 13 km en línea recta de la ciudad de La Serena, provincia de Elqui, Región de Coquimbo. Está ubicada sobre el cerro Brillador, en el punto definido por las coordenadas 29,81° latitud sur y 71,19° longitud oeste. Su altura media es de 600 m.s.n.m y está a 5 km de la costa norte de la Bahía de Coquimbo. La zona de estudio, además de la mina, incluye el cerro Brillador y las cadenas de cerros adyacentes que tienen alturas que van de los 500 a 800 m.s.n.m. (Dubó, 1984). También se incluye el llano Juan Soldado, y las quebradas El Sauce y Santa Gracia (Figura 1).

Recursos utilizados

Para la realización del trabajo se dispuso de imágenes satelitales. Por una parte se obtuvieron bandas espectrales, provenientes de los satélites Landsat 5 y 7, de la zona identificada con Path 01 Row 81 (incluye la Región de Coquimbo), obtenidas gratuitamente a través de la plataforma EarthExplorer. Por otro lado, se contó con un modelo de elevación digital (DEM) gratuito, de la zona South 30 West 72, a través de la plataforma ASTER GDEM. También se utilizó un mapa geológico del sector

La Serena-La Higuera, de escala 1: 100.000, elaborado por Emparán y Pineda (2000).

Para el procesamiento de las imágenes satelitales se utilizó el software SAGA GIS. Además se ocupó el programa GIMP 2 para aplicar técnicas de aumento de contraste y detección de bordes a las imágenes. Ambos programas son de acceso gratuito.

Desarrollo y procesamiento

La metodología de este estudio consistió, en parte, en crear capas temáticas en formato raster. Los atributos de las capas temáticas debían ser factores de influencia para la recarga de aguas subterráneas, cuya selección se basó en estudios previos, tales como las de Prasad et al. (2007), Dar et al. (2010), Tessema et al. (2011) y Tillman et al. (2012). Las capas temáticas seleccionadas fueron las de: Pendiente, Exposición Solar, Densidad de Drenaje, Densidad de Lineamientos, Geología y Vegetación. El propósito de crear estas capas fue integrarlas para obtener un mapa raster que indicara las zonas potenciales de recarga que pudieran aportar agua a la M.E.B.. Previa a la creación de las capas temáticas, todas las bandas espectrales de las imágenes satelitales utilizadas fueron sometidas a lo que incluyó corrección del sombreado topográfico y corrección radiométrica y atmosférica..

Pendiente y Exposición Solar

Las pendientes bajas son especialmente favorables para la recarga, debido a que el agua puede aposarse e infiltrar en los suelos. Por otro lado, la exposición de las laderas hacia el sur resulta también favorable para la recarga, debido a que reciben menor radiación, y por tanto la humedad del suelo es mayor (Montecinos, 1982). Teniendo presente lo anterior, las capas temáticas de Pendiente y Exposición Solar fueron generadas mediante SAGA GIS, a partir de los DEM.. Un 52% del área de estudio presenta pendientes del rango de 0° a 12,5°. También predominan las superficies con exposición dentro del rango (orientación con respecto al Norte) de 45° a 225°, con aproximadamente un 54% del área de estudio.

Densidad de drenaje

Según Prasad et al. (2007), a mayor densidad de drenaje se produce una escorrentía más fuerte, y a menor aumenta la capacidad de infiltración del suelo. Por lo tanto, mientras menor sea la densidad de drenaje, mayor es la probabilidad de recarga potencial de la zona. Al igual que para Pendiente y Exposición, la capa temática de Densidad de Drenaje fue generada mediante SAGA GIS. Se definió la unidad del atributo de esta capa temática como número de segmentos/cuadrícula (esta última de 15 m²

aproximadamente). Como resultado del procesamiento se obtuvo que aproximadamente el 77% del área de estudio posee densidades de drenaje entre 0 y 3,5 segmentos/cuadrícula

Densidad de Lineamientos

Un lineamiento puede definirse como una característica lineal de la superficie, que está relacionada con fallas o fracturas. De esta forma, zonas con mayor densidad de lineamientos poseen un mayor grado de fracturamiento, y permiten una mayor infiltración del agua. Por lo tanto, a mayor densidad de lineamientos existe mayor probabilidad de recarga potencial de aguas.

En este estudio se extrajeron lineamientos del mapa geológico de La Serena-La Higuera (Emparán y Pineda, 2000) y de las imágenes del Landsat 7 (de fecha 6 de diciembre de 2001 y 26 de enero de 2003). En el segundo caso, se crearon las combinaciones de bandas 321(color verdadero) y 453 (falso color que resalta los tipos rocosos), con las imágenes del Landsat 7. Luego estas combinaciones de bandas fueron sometidas al filtro Retinex, del programa GIMP 2, para aumentar el contraste, y a continuación se les aplicó el filtro de Diferencias de Gaussianas para detectar bordes (también parte de GIMP 2). Las imágenes resultantes fueron integradas en el SIG junto mapa geológico (que fue georeferenciado en el mismo programa luego de ser cargado en él), para extraer los lineamientos en una capa vectorial la que fue posteriormente rasterizada. A partir de esta última se obtuvo la capa temática de Densidad de Lineamientos. Se definió la unidad del atributo de esta capa temática en número de lineamientos/15 m². Como resultado se obtuvo que aproximadamente el 85% del área de estudio presenta una densidad de lineamiento dentro del rango de 0 a 5 lineamientos/15 m².

Geología

Desde el punto de vista hidrogeológico, el tipo de geología presente en el área de estudio más favorable para la recarga de aguas son los depósitos fluviales, compuestos de grava gruesa poco consolidada y de buena estratificación, aunque predominan mayormente las rocas intrusivas graníticas y las rocas volcánicas de la formación arqueros. El mapa geológico fue dividido en el SIG en cuatro clases, según el potencial hidrogeológico de las rocas y/o sedimentos. De esta manera se separaron las clases en capas vectoriales, que luego se fusionaron dando origen a la capa temática de Geología en formato raster, la cual muestra cuatro categorías según el potencial de recarga potencial. La mejor categoría, desde el punto de vista de la recarga potencial, se clasificó como Clase 1 (depósitos fluviales y aluvionales) y la peor (rocas intrusivas graníticas a dioríticas) como Clase 4.

Vegetación

El estado de la vegetación puede ser un indicador de la humedad de los suelos. En este estudio se propuso diseñar un indicador propio del estado de la vegetación, basándose en el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI). Para calcular el NDVI se utilizaron las imágenes de Landsat 7, y las imágenes del Landsat 5 (de fecha 18 de enero de 2009 y 25 de febrero de 2011). Se calculó el NDVI de las imágenes seleccionadas, y a continuación se crearon dos rasters: uno de promedios de NDVIs y otro de desviaciones estándar de NDVIs. Para lo anterior se modificó la escala NDVI (de -1 a 1) a una escala de 0 a 2. Un promedio de NDVI alto junto con una baja desviación estándar de NDVI está relacionado a una alta probabilidad de recarga potencial. Para crear la capa temática de Vegetación se integró los rasters de promedio y desviación estándar, para lo cual se categorizaron los valores de estos según su afinidad con la recarga potencial de aguas. El resultado fue la capa temática de Vegetación, la cual tuvo como atributo un indicador original de este estudio, denominado Indicador de Vegetación Compuesto (IVC). Este indicador IVC tuvo una escala de 2 a 8, donde el 2 corresponde a la ausencia de vegetación y el 8 a la vegetación en el mejor estado.

Integración de las capas temáticas

Para integrar las capas temáticas creadas en un solo raster, se dividió cada atributo de las capas temáticas en cuatro rangos de valores. Posteriormente, a cada capa temática se le asignó puntaje por cada rango, según la afinidad del rango con la recarga potencial de aguas. Los puntajes asignados a los rangos de valores fueron 10, 20, 30 y 40, siendo el 40 para los rangos con mayor probabilidad de recarga potencial.

Después de dar puntaje a todas las capas temáticas, estas se sumaron para obtener un nuevo raster. Como resultado, este raster tuvo valores de celda entre 90 y 230. Nuevamente, y tomando como referencia el trabajo de Dar et al. (2010), se dividieron los valores de este mapa raster en cuatro intervalos de igual tamaño, y se etiquetaron cada uno con el nombre de una clase según el potencial de recarga: Bueno, Moderado, Moderado a Pobre y Pobre. Al mapa final se le denominó mapa de Zonas Potenciales de Recarga del sector Mina Escuela Brillador.

Resultados y Conclusiones

Debido a que el pique principal de la mina se encuentra inundado bajo el nivel 500, se consideró que las zonas que pueden aportar agua a la mina debiesen estar sobre los 450 m.s.n.m. Es por esto que mediante SAGA GIS se separó la zona sobre la cota 450 del mapa Zonas de Recarga

Potencial de Aguas Subterráneas, y de esta forma poder visualizar las zonas que podrían aportar agua a Mina Escuela Brillador (Figura 2).

Analizando el mapa Zonas de Recarga Potencial de Aguas Subterráneas sobre la cota 450, se observa que las principales zonas de aporte potencial de agua se encuentran entre el noreste y el este de la mina Brillador. También existen otras zonas al sureste que podrían aportar agua a la mina.

La elaboración de mapas de zonas de recarga de aguas subterráneas constituye un enfoque predictivo ante la necesidad de encontrar posibles nuevas fuentes de agua.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco de los Proyectos DIULS CDI14341 y Fondecyt 1150587, y corresponde a la Memoria de Título del primer autor.

Referencias

- CONAMA, 2003. *De Mar a Cordillera, Cuarta Región de Coquimbo*. Gobierno de Chile, SINIA. Disponible en http://www.sinia.cl/1292/articles-29099_recurso_3.pdf.
- Dar, I.A., 2010. *Remote sensing technology and geographic information system modeling: An integrated approach towards the mapping of groundwater potential zones in Hardrock terrain, Mamundiyar basin*. Journal of Hydrology 394, 285-295.
- Dubó, A., 1984. *Antecedentes geológicos y perspectivas de la mina Brillador (2948,7'S/7111,9'W)*. La Serena: Universidad de La Serena.
- Emparán, C., Pineda, F. 2000. Area La Serena-La Higuera. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa Geológico N° 18, escala 1:100.000.
- Montecinos, E., 1982. *Efecto de la exposición en el desarrollo de aridisols de la IV Región*. Santiago: Universidad de Chile.
- Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R. Arumí, J.L., 2013. *Influence of Pacific Ocean multidecadal variability on the distributional properties of hydrological variables in north-central Chile*. Journal of Hydrology 501, 227-240.
- Prasad, R.K., Mondal, N.C., Banerjee, P., 2007. *Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS*. Environmental Geology 55, 467-475.
- Tessema, A., Mengistu, H., Chirenje, E., Abiye, T.A., Demlie, M.B., 2011. *The relationship between lineaments and borehole yield in North West Province, South Africa: results from geophysical studies*. Hydrogeology Journal 20, 351-368.
- Tillman, F.D., Callegary, J.B., Nagler, P.L., Glenn, E.P., 2012. *A simple method for estimating basin-scale groundwater discharge by vegetation in the basin and range province of Arizona using remote sensing information and geographic information systems*. Journal of Arid Environments 82, 44-52.

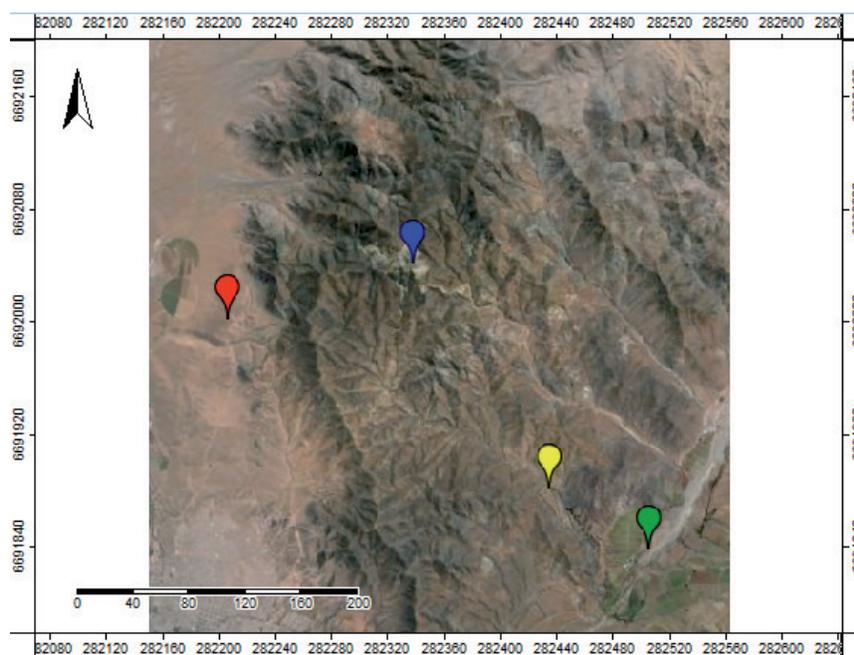


Figura 1. Área de Estudio. Se incluye en azul la mina Brillador, en amarillo la quebrada el sauce, en verde la quebrada Santa Gracia y en rojo el llano Juan Soldado.

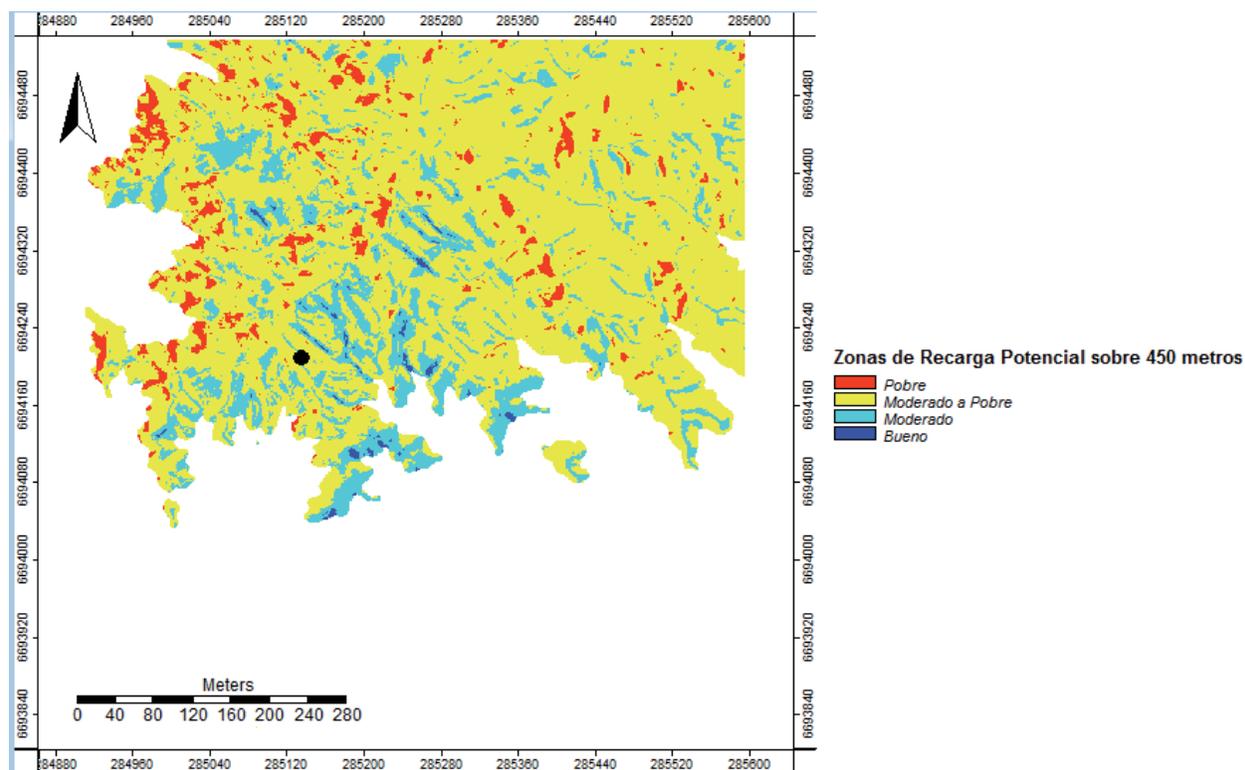


Figura 2. Mapa de Zonas de Recarga Potencial de Aguas Subterráneas, sobre la cota 450. En negro se indica la ubicación de Mina Escuela Brillador.