



INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
FACULTAD DE HISTORIA, GEOGRAFÍA
Y CIENCIA POLÍTICA

El Boletín Electrónico de Geografía (BeGEO) es una publicación que intenta crear un espacio de difusión de los estudios realizados por los estudiantes del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

BeGEO reúne artículos originales de alta calidad que son elaborados por los estudiantes de pregrado en las distintas actividades curriculares impartidas por docentes del Instituto de Geografía.

ISSN 0719-5028

www.geografia.uc.cl

BeGEO

Boletín electrónico de Geografía

BeGEO, 2015, N°3

Propuesta metodológica para localizar probables zonas de almacenamiento de aguas subterráneas en el secano costero de Chile¹

Loreto Francisca Rojas Rojas²

Resumen

Hasta ahora, los estudios hidrogeológicos que se han realizado en Chile sólo abarcan las zonas agrícolas de grandes cuencas, por medio del trabajo en campo con equipos costosos y que requieren mucho tiempo de elaboración. Sin embargo, en otros lugares del mundo se han establecido modelos, que por medio del uso de percepción remota han ayudado en la delimitación de zonas probables de encontrar aguas subterráneas. Este artículo pretende ofrecer un modelo que permita desarrollar esta delimitación en la zona del secano costero de Chile, presentando en la introducción, el contexto en que se llevó la investigación, el procedimiento utilizado (metodología) y los principales resultados obtenidos en su aplicación en el territorio de la Comunidad Agrícola de Peñablanca, en la Región de Coquimbo. Con los resultados obtenidos hasta el momento y la corroboración en terreno, este modelo podría replicarse en el resto del territorio que presente características similares.

Palabras clave: Desertificación, Aguas subterráneas, Modelos de percepción remota.

A methodological proposal for locating probably areas of groundwater storage in dry coastal Chile

Abstract

Until now, the hydrogeological studies that have been conducted in Chile only cover agricultural areas of large river basins and have been based on field-work conducted using expensive equipment and time-consuming processes. However, in other regions worldwide, models based on remote sensing have been established, which have helped to define probable areas of groundwater storage. This article offers a model to develop probably groundwater storage boundaries in the areas of dry coastal Chile. In the introduction we present the context in which the research was conducted, followed by our methodology and the main results obtained by implementing this model in the Agricultural Community of Peñablanca, in the Coquimbo Region. Based on the results obtained to date and the field corroboration, this model could be replicated in the rest of the territory with similar characteristics.

Key words: Desertification, Groundwater, Remote sensing models.

¹ Artículo recibido el 11 de junio de 2015, aceptado el 24 de junio de 2015 y corregido el 10 de julio de 2015.

² Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile). E-mail: lforjas1@uc.cl

Un problema que ha estado afectando gravemente a la zona norte y centro-sur del país, corresponde a la desertificación, el que ha sido considerado como uno de los aspectos del cambio global más importantes a los que se enfrenta la humanidad y definido por la Convención de Lucha contra la Desertificación de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como la degradación de la tierra en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas resultante de varios factores, incluyendo las variaciones climáticas y las actividades humanas (Reynolds *et al.*, 2005). Es por esta razón que la excavación de pozos para la captación de aguas subterráneas se ha vuelto una prioridad en muchas zonas de nuestro territorio, sobre todo en aquellos lugares que se encuentran en el secano costero de las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Maule (ANDESS, 2013). Sin embargo, muchos pozos excavados hace unos 10 – 30 años atrás han disminuido sus niveles de agua, obligando a sus dueños a profundizarlos³.

Si bien en Chile se han tomado medidas para conocer y estimar la cantidad de agua subterránea disponible, por medio de la labor de la Dirección General de Aguas (DGA) (DGA, 1999, 2004, 2006, 2007a y b, 2011, 2012; Waterloo Hydrogeologic Latino América, 1999), muchos de estos trabajos se han limitado a las zonas de grandes cuencas andinas, donde suelen localizarse la mayor parte de los productores agrícolas y la población urbana, pero las zonas del secano costero donde viven pequeñas comunidades agrícolas se han dejado de lado o sólo se las ha favorecido con la inscripción de sus pozos, sin conocer la verdadera capacidad hídrica de las cuencas costeras. A esto se suma el alto costo que tiene el realizar prospecciones con radares u otro tipo de estudios hidrológicos (Daza, 2012), que permitan a los comuneros conocer el comportamiento de las aguas subterráneas y plantear estrategias de uso que les pueda ayudar en sus actividades agrícolas, y en el consumo de animales y personas.

Frente a estas problemáticas, es necesario buscar métodos simples y de bajo costo que permitan delimitar zonas altamente probables de almacenar aguas subterráneas, de acuerdo a un modelo que permite predecir el comportamiento de las subcuencas costeras, donde se emplazan estas comunidades vulnerables. Sener *et al.* (2005) en Çine (Burdur, Turquía) y por Surabudin Mondal *et al.* (2007) en Rishikesh (Uttarakhand, Indi), utilizaron métodos simples que les permitieron detectar las zonas donde las aguas se encuentren más cerca de la superficie, en base a criterios morfológicos, hídricos, meteorológicos y pedológicos.

En el presente trabajo, se aplicó un modelo en la Comunidad Agrícola de Peñablanca (Comuna de Ovalle, Región de Coquimbo), debido a que presentaban los problemas anteriormente descritos, y ya estaban sufriendo algunas de estas consecuencias, como la pérdida total de sus cultivos de trigo y la migración de los hijos de comuneros hacia Ovalle y La Serena, en busca de mejores oportunidades laborales⁴. Este sector abarca una superficie total de 6.587 Ha, localizado en un clima semiárido con nublados abundantes (BSn, según la clasificación de Köppen) y presentar generalmente precipitaciones invernales (Errázuriz, 1998).

³ Sr. Daniel Rojas: Presidente de la Comunidad Agrícola de Peñablanca. Comunicación personal.

⁴ Sra. Erika Tello (comunera). Comunicación personal.

Se consideró como hipótesis principal que el uso de herramientas de percepción remota, pueden comprobar la probabilidad de existencia de napas subterráneas en el área de estudio (Rojas, 2014).

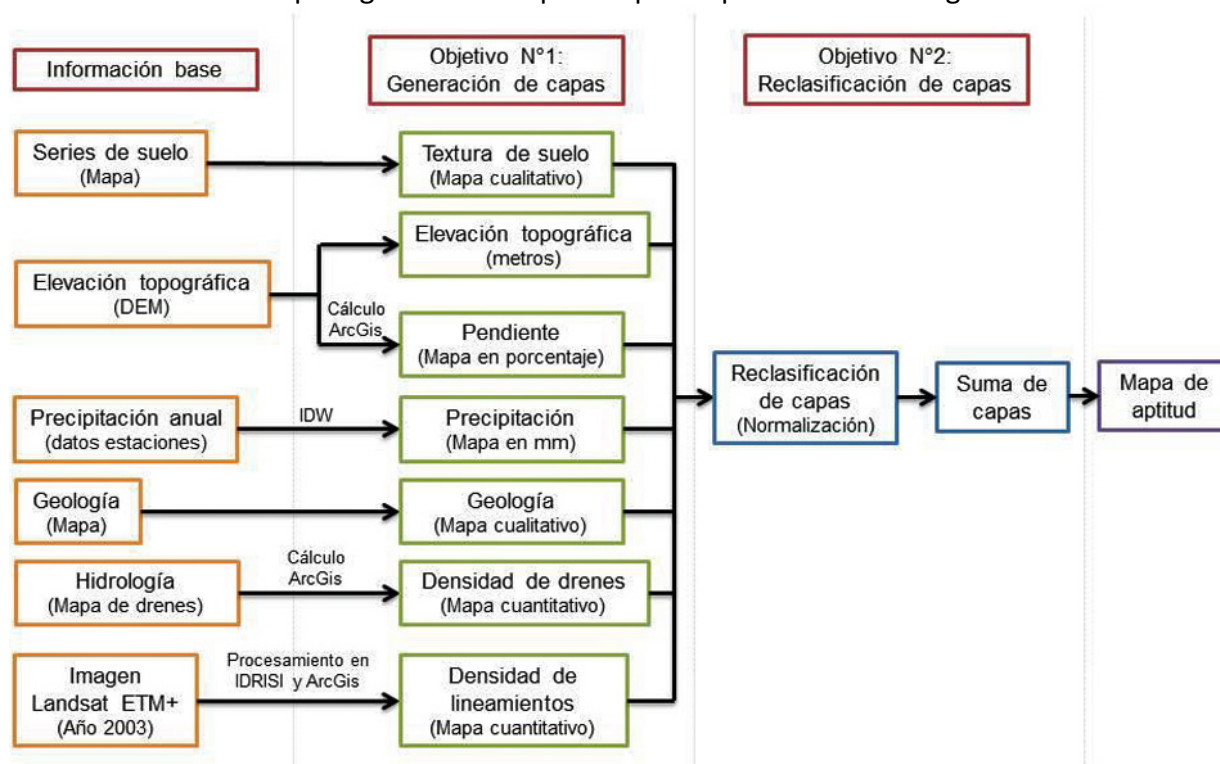
Metodología

Para generar el modelo, se utilizaron imágenes multiespectrales del Satélite Landsat 7 ETM+, cuya resolución es de 30 metros. Estas imágenes fueron procesadas en el programa IDRISI Selva, donde se prepararon (corrección radiométrica, atmosférica y geográfica) para su utilización posterior en el modelado por ArcGis 10.1. De aquí se generaron las imágenes para delimitar los lineamientos. Los datos de geología fueron obtenidos del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y el Modelo de Elevación Digital fue obtenido desde el sitio web de ASTER-GDEM (Figura N°1).

Asimismo se utilizaron los datos de precipitación disponibles en la DGA (2013) y en Corporación Nacional Forestal (CONAF) (2013), cuyo procesamiento se efectuó en el programa ArcGis 10.1, con lo que se generó la capa de precipitaciones para el área de Peñablanca. Finalmente con la información recopilada de drenaje se realizó el mapa de densidad en el mismo programa (Figura N°1). El procesamiento detallado por capa se describe más adelante.

Figura N° 1:

Modelo utilizado para generar el mapa de aptitud para almacenar aguas subterráneas



Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004)

Cobertura de precipitación anual

Con los datos de precipitación anual para un total de diez estaciones cercanas al área de estudio, de las disponibles en la Dirección General de Aguas (DGA), en la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Centro de Estudios Avanzados de Zonas Áridas (CEAZA) se procede a elaborar una tabla con los datos de precipitación media anual (mm), y sus coordenadas en la Proyección Transversal de Mercator, en el Datum WGS84 Zona 19S, las que fueron ingresadas en *ArcGis 10.1* como elementos puntuales. Luego por medio del algoritmo geoestadístico de Distancia Inversa Ponderada (IDW), se procesaron los datos para obtener una cobertura general de la precipitación en el área de estudio. El resultado se definió en formato ráster y con una resolución espacial de 30 metros (Sener *et al.*, 2005).

Una vez desarrollado el ráster con datos en mm, se procedió a una reclasificación de los datos para otorgarles valores de 10 a 50 (ver Cuadro N°1), los que servirán como ponderadores a la hora de desarrollar el modelo general y hacer comparables estos datos con los de las otras coberturas (Sener *et al.*, 2005).

Cuadro N° 1
Rangos y ponderación de la variable Precipitación (mm)

Descripciones/Rangos	Ponderaciones
143,1 - 145,3	10
145,3 - 147,5	20
147,5 - 149,6	30
149,6 - 151,8	40
151,8 - 154	50

Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004)

Cobertura de suelo

En el estudio de Sener *et al.* (2004), esta información estaba referida al uso de suelo agrícola y urbano, considerando que el primero tenderá a almacenar mejor los recursos hídricos en el subsuelo en vez que el segundo. Como el área de estudio, corresponde a una zona netamente rural, se consideraron las características granulométricas de los suelos, de acuerdo a la determinación de las series de suelo, elaborada por Instituto de Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (IREN) (1977).

De acuerdo a la información sobre texturas de suelo de esta fuente, se determinó de acuerdo a parámetros de velocidad de infiltración para cada textura la ponderación correspondiente de 10 a 60 (ver Cuadro N°2), donde los suelos con mayor velocidad de infiltración y menor densidad granulométrica, tenderán a tener una capacidad de almacenaje mayor que aquellos suelos con texturas más densas y menor velocidad de infiltración (Baver *et al.*, 1973 y Porta *et al.*, 2005).

Cuadro N°2
Rangos y ponderación de la variable Suelos

Descripciones/Rangos	Ponderaciones
Arcilloso denso (PA)	10
Arcilloso denso (MO)	20
Arenas (TAL)	50
Franco-arcillo-arenoso (PE)	30
Pedregoso (MQ)	60
Pedregoso (TMR-1)	40

Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004)

Coberturas de elevación topográfica y pendientes

Para elaborar ambas capas, se recuperó desde el sitio web de ASTER-GDEM el cual posee coberturas globales de modelos de elevación, con una resolución espacial de 30 m. A este archivo, se le extrajo, por medio de la función “Recorte” de ArcGis 10.1 el área de trabajo para la investigación con la elevación correspondiente (Rojas, 2014).

Una vez obtenida el área de trabajo, la capa ráster fue sometida a dos procedimientos: el primero correspondió a la generación de la capa de pendientes, para lo cual se utilizó la herramienta “Pendiente” de ArcGis 10.1 para obtener este resultado en porcentajes. Una vez generada la capa, se establecieron 5 rangos de clasificación (ver Cuadro N°3), a los cuáles se les asignó un valor mayor, mientras menor fuese la pendiente (Sener *et al.*, 2005).

Cuadro N°3
Rangos y ponderación de la variable Altitud (msnm)

Descripciones/Rangos	Ponderaciones
131 - 245,6	50
245,6 - 360,2	40
360,2 - 474,8	30
474,8 - 589,4	20
589,4 - 704	10

Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004)

El segundo procedimiento utilizó la capa ráster tal cual fue recortada del archivo original y se reclasificaron las pendientes, de acuerdo a los rangos establecidos anteriormente (ver Cuadro N°4) y definiendo las zonas con menor altitud como más aptas de almacenar aguas subterráneas, a diferencia de las zonas más altas (Sener *et al.*, 2005).

Cuadro N°4
Rangos y ponderación de la variable Altitud (msnm)

Descripciones/Rangos	Ponderaciones
0 - 5	50
5 - 15	40
15 - 30	30
30 - 50	20
Más de 50	10

Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004).

Cobertura de Densidad de drenaje

Preliminarmente se usaron los drenes digitalizados del trabajo realizado por Ramírez (1987), la cual fue corregida manualmente por medio de la digitalización de los drenes sobre la Banda 3 de *Landsat 7 ETM+*, en el software *ArcMap 10.1*, obteniéndose una cobertura más fiable y detallista de las condiciones actuales, considerando en este caso no sólo los escurrimientos principales, sino las líneas de Talveg (Rojas, 2014).

Una vez obtenida la capa de drenes, se aplica la herramienta “Densidad de líneas” disponible en el mismo software el cuál arrojó como resultado una capa raster con la cantidad de drenes que pasan por una misma celda de resolución espacial de 30 m. Una vez obtenido el resultado, se consideró que, mientras mayor sea la cantidad de drenes en un cuadrante, mayor será la ponderación y ocurrirá lo contrario cuando la densidad sea menor, en una relación directamente proporcional, lo que permitió realizar la reclasificación a los rangos ya conocidos (ver Cuadro N°5) para su cálculo final con las otras coberturas (Surabuddin Mondal, 2007; Sener *et al.*, 2004).

Cuadro N°5
Rangos y ponderación de la variable Densidad de drenes (drenes/m²)

Descripciones/Rangos	Ponderaciones
0,00003 - 0,000780	10
0,000781 - 0,002130	20
0,002131 - 0,003210	30
0,003211 - 0,004430	40
0,004431 - 0,00862	50

Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004).

Cobertura de litología

Para desarrollar esta cobertura se utilizaron los datos digitalizados (Tabla N°10) de la carta geológica desarrollada por SERNAGEOMIN (2013), en escala 1:250.000. Una vez obtenidos estos para el área de estudio, se procedió a considerar aquellos tipos geológicos que presentaron una mayor condición geológica sedimentaria (ver Cuadro N°6) que aquellos que tenían una

condición más estabilizada en el tiempo y por ende, presentaban una mayor dureza (Sener *et al.*, 2005).

Cuadro N°6
Rangos y ponderación de la variable Litología

Descripciones/Rangos	Ponderaciones
Q1: Pleistoceno - Holoceno	40
TrJg: Triásico - Jurásico	20
Qa: Pleistoceno - Holoceno	50
Jsg: Jurásico Medio Superior	30
DC4: Devónico - Carbonífero	10

Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004)

Cobertura de densidad de lineamientos

Para realizar esta capa, se debió digitalizarlas a partir de un procedimiento desarrollado en el software IDRISI Selva. En primer lugar y luego del procesamiento previo de la imagen, como se especificó en el inicio de esta sección, se aplicó un filtro de paso bajo, en este caso “Media”, el cual suavizó los contrastes espaciales de acuerdo a una máscara de convulsión de 3x3, con nueve coeficientes iguales a 1/9 (Aldalur *et al.*, 2002).

A este resultado se le aplicó luego un filtro de paso alto direccional de realce de bordes, el cual exhibe sólo el detalle de bordes y fronteras. Al ser un filtro tan específico y que arroja resultados en cuatro direcciones (Norte-Sur, Este-Oeste, Noreste-Suroeste y Noroeste-Sureste), se especificó una máscara de convulsión de 5x5, con tal de maximizar las diferencias entre los lineamientos y las otras áreas de la imagen, acuerdo a los valores de la Figura N°2.

Figura N°2
Máscaras de filtro direccional

Norte-Sur					Este-Oeste				
-1	-1	4	-1	-1	-1	-2	-3	-2	-1
-2	-2	8	-2	-2	-1	-2	-3	-2	-1
-3	-3	12	-3	-3	4	8	12	8	4
-2	-2	8	-2	-2	-1	-2	-3	-2	-1
-1	-1	4	-1	-1	-1	-2	-3	-2	-1
Noroeste-Sureste					Noreste-Suroeste				
4	-1	-1	-2	-3	-3	-2	-1	-1	4
-1	8	-2	-3	-2	-2	-3	-2	8	-1
-1	-2	12	-2	-1	-1	-2	12	-2	-1
-2	-3	-2	8	-1	-1	8	-2	-3	-2
-3	-2	-1	-1	4	4	-1	-1	-2	-3

Fuente: Recondo *et al.* (2000).

Una vez obtenidas las imágenes, se llevaron a ArcMap, donde el usuario comienza la digitalización de aquellos lineamientos observados en el área, cuidando de no marcar aquellos correspondientes a caminos y a quebradas, ya que estas últimas ya presentan su propia capa de densidad de drenes (Recondo *et al.*, 2000). Una vez lista la capa, se procedió a la reclasificación de estos, de acuerdo a la lógica que se implementó en la densidad de drenes (ver Cuadro N°7).

Cuadro N°7
Rangos y ponderación de la variable Densidad de lineamientos (líneas/m²)

Descripciones/Rangos	Ponderaciones
0 - 0,00050	10
0,00051 - 0,00140	20
0,00141 - 0,00230	30
0,00231 - 0,00320	40
0,00321 - 0,0046	50

Fuente: Modificado de Sener *et al.* (2004).

Procesamiento final

Una vez listas todas las coberturas, con su correspondiente reclasificación, se procedió a abrir la herramienta "Calculadora Ráster" de ArcGis 10.1, para generar la suma de las ponderaciones se utilizó la fórmula presentada a continuación, que constituye el modelo potencial (MP), donde los valores mayores serán las áreas más aptas para albergar aguas subterráneas y los valores menores las áreas menos aptas (Sener, 2004).

$$MP = Pa + Go + Dl + Ss + Et + Pe + Dd$$

Donde:

MP: Modelo Potencial	Ss: Series de suelo
Pa: Precipitación anual	Et: Elevación topográfica
Go: Litología/Geología	Pe: Pendientes
Dl: Densidad de lineamientos	Dd: Densidad de drenaje

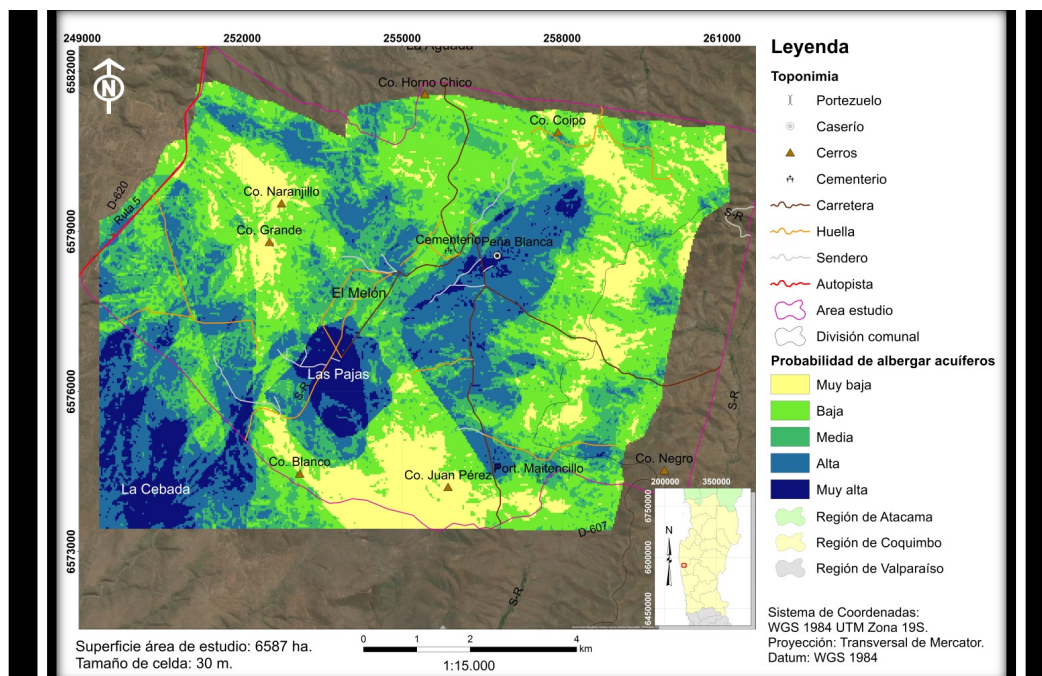
Una vez obtenido el resultado se procedió a una cualificación de los datos, de acuerdo a rangos establecidos por la “clasificación de corte natural de Jenks”, disponible en el mismo software.

Localización de probables zonas de almacenamiento de aguas subterráneas

Se intentó abarcar la superficie total del área de estudio, sin embargo la falta de estudios de suelos en todo el predio de la Comunidad, dificultó severamente la cobertura total, dando por resultado lo observado en la Figura N°3, donde se observan los resultados dentro de la Comunidad, como también en parte de la zona sur del predio adyacente, correspondiente a la Comunidad Agrícola La Cebada.

Figura N°3

Resultado final de mapa de aptitud del territorio para el almacenamiento de aguas subterráneas en la Comunidad Agrícola de Peñablanca



Fuente: Elaboración propia.

Solo el 7% del total del área modelada presenta una “muy alta” aptitud para almacenar aguas subterráneas (610 Ha), mientras que el 22% del total presenta una aptitud “alta” de

almacenamiento (1.788 Ha), un 23% una aptitud “media” de almacenamiento (1.898 Ha), un 34% una aptitud “baja” (2.860 Ha) y un 14% presenta una “muy baja” aptitud de almacenamiento (1.194 Ha).

En el área dentro del predio estudiado, la situación es aún menos favorable, ya que solo el 4% presentó una “Muy alta” probabilidad de almacenar aguas subterráneas (272 Ha), un 20% del territorio adquirió una “Alta” aptitud (1.360 Ha), mientras que las aptitudes “Media”, “Baja” y “Muy baja”, abarcaron la mayor parte de la superficie del predio, con 24% (1.596 Ha), 37% (2.491 Ha) y 15% (1.010), respectivamente. Si bien este resultado arroja un área más grande que la de estudio, el desfase se debe al tamaño de celda utilizado, el cual sobreestima en algunos sectores el tamaño real de la Comunidad.

Cabe destacar además, que previo a la aplicación del modelo, se hizo un levantamiento de los pozos disponibles en la Comunidad, los que al tener profundidades mayores a 7 y 8 metros, y que se encontraban en zonas más elevadas, coincidieron con las zonas de probabilidad “Media” y “Alta”, mientras que uno de los pozos que se encontraba a 9 metros de profundidad, coincidió con el área de “Muy alta” probabilidad, en el sector de Las Pajas. Sin embargo este pozo en particular presenta un caudal promedio de 2,5 pulgadas por minuto⁵, de acuerdo a las estimaciones de los mismos comuneros.

Importancia de las variables en la modelación

Si bien el modelo resultó bastante real con la condición en terreno de la comunidad, hubo algunos problemas relacionados a los métodos e insumos de estos para estimar las capas que se utilizaron en la construcción del modelo general. La primera falla se observa con el uso del método IDW para estimar la precipitación promedio del área, ya que este no considera las variaciones que podrían producirse por la geografía del lugar (barlovento/sotavento) y de las estaciones meteorológicas utilizadas, pocas se encontraban al oeste de la de Peñablanca, a excepción de la ubicada en el Parque Nacional Fray Jorge, la que además puede estar sesgada por la presencia de la niebla costera, debido a su ubicación actual.

La cobertura de suelos utilizada para este trabajo, corresponde a un trabajo de CIREN realizado en 1994, por lo que gran parte de la nomenclatura utilizada para la descripción de los suelos se encuentra obsoleta. Además de esto, el trabajo sólo se enfoca en los suelos de los límites de las comunidades agrícolas y no en todo el territorio de la cuarta región, dejando grandes zonas sin descripción e impidiendo conocer las características de los suelos colindantes o si existen más variaciones de series que las descritas.

Si bien, en el trabajo realizado por Sener *et al.* (2004) se utilizó la variable “uso de suelo”, en este trabajo se optó por la identificación de series de suelo, ya que permiten tener un mayor

⁵ Esta información fue entregada por comuneros el día 14 de abril del presente año (2015), que estuvieron realizando trabajos de mantención en el pozo, por lo cual tenían que drenarlo cada cierto tiempo (no especificaron cada cuánto tiempo lo drenaron, ni mucho menos entregaron la altura que alcanzaba el agua) para poder seguir realizando sus labores sin problemas.

conocimiento sobre la capacidad de infiltración de estos y se enfoca en la detección de aguas subterráneas en los niveles superiores de estos.

En relación al modelo digital de elevaciones, recuperado desde el proyecto ASTER GDEM, cabe destacar que este sitio web contiene información disponible desde el año 2009, lo que da seguridad sobre la actualización de la base de datos, la que además cuenta con resolución espacial de 30 m y una precisión de 7 a 14 m en la escala vertical.

En el caso de la densidad de drenaje, el único problema destacable corresponde al ajuste de la capa de la Biblioteca del Congreso Nacional, la cual se encontraba en escala 1:250.000 y a la incorporación a esta de las líneas de Talveg del territorio, ya que las aguas subterráneas suelen moverse por el terreno, de acuerdo a la morfología de este (Strahler & Strahler, 1989).

En relación a la cobertura de geología, recuperada desde SERNAGEOMIN, ésta no presentó mayores problemas, salvo en la asignación de valores de los estratos por edades geológicas y no por textura del sustrato, ya que podría haber sesgado el resultado a encontrar agua en niveles más profundos de los requeridos para el estudio. Esta determinación se llevó a cabo según lo establecido en el trabajo de Sener *et al.* (2004)

Finalmente, para la cobertura de lineamientos esta puede ser una de las que presente mayores errores en su ejecución, ya que la falta de experiencia visual de la autora pudo generar algún error en la digitalización de los lineamientos al momento de diferenciarlos de los cursos de agua o bien de las rutas locales.

A pesar de lo mencionado anteriormente, cabe señalar que la similitud de este modelo, con los empleados por Surabuddin Mondal (2007) y Sener *et al.* (2004), son bastante altas (Cuadro N°8), ya que, si bien las metodologías difieren en algunos componentes utilizados para el análisis, como en la asignación de ponderadores para cada capa, también hay elementos comunes donde las tres metodologías utilizan las variables de densidad de lineamientos (presencia de agua subterránea), densidad de drenaje (asociación entre escorrentía superficial y subterránea) y pendiente (dónde el agua se almacenará naturalmente).

Cuadro N°8

Comparación de capas utilizadas por Sener (2004), Surabuddin Mondal (2007) y Rojas (2014)

Sener (2004)	Surabuddin Mondal (2007)	Rojas (2014)
Precipitación anual		
Litología	Litología	Litología
Densidad de lineamientos	Densidad de lineamientos	Densidad de lineamientos
Densidad de drenaje	Densidad de drenaje	Densidad de drenaje
Elevación topográfica	Relieve	Elevación topográfica
Pendiente	Pendiente	Pendiente
Uso de suelo	Hidrogeomorfología	Textura de suelo

Fuente: Elaboración propia.

La gran diferencia entre las tres metodologías se da en la última fila del Cuadro N°8, donde Sener ocupa la capa “uso de suelo”, ya que considera que las zonas agrícolas y con cuerpos de agua en su superficie tenderán a tener mayor probabilidad de almacenar aguas subterráneas, contra las zonas urbanas y forestales que tenderán a tener menor probabilidad, mientras que Surabuddin Mondal (2007) considera la hidrogeomorfología considerando las estructuras, las características del relieve y las zonas de depositación aluvial para determinar las áreas más aptas o no. En el caso de este trabajo, y como se mencionó anteriormente, se prefirió optar por las texturas de suelo, las que permiten conocer sus índices de infiltración, lo que determinará donde es más probable encontrar aguas subterráneas y donde no.

En consideración de lo presentado hasta ahora, se puede empezar a concluir que, como todo modelo de percepción remota, el trabajo está sujeto a una alta probabilidad de éxito, como también a una alta probabilidad de fracaso, ya que las condiciones predictivas pueden variar tanto a favor como en contra. Una de estas puede ser la precipitación, ya que en un año seco, las napas tenderán a bajar su nivel, e incluso tenderán a desaparecer en las zonas de más alta pendiente, mientras que en un año lluvioso, los niveles tenderán a subir.

Conclusiones

En relación a la metodología aplicada, las coberturas necesarias para alimentar el modelo de aptitud del territorio para albergar aguas subterráneas son: precipitación (mm), suelos (series), altitud (m.s.n.m.), pendiente (%), densidad de drenaje (drenes/ m²), geología (edad) y densidad de lineamientos (lineamientos/m²).

Sin embargo, las variables que más pesaron en la elaboración del modelo correspondieron a la de textura del suelo (derivada de la series), pendiente, elevación, densidad de drenaje y geología, ya que al comparar las áreas que resultaron con mayor aptitud, coinciden con las áreas con textura pedregosa y arenosa (series TMR-1, MQ y TAL), baja pendiente (0 – 15%), baja elevación (131 a 360 m.s.n.m.), alta densidad de drenaje (0,003211 a 0,00862 drenes/m²) y formaciones geológicas más actuales (Qa y Q1, del período Pleistoceno-Holoceno).

Dentro del área donde se aplicó el modelo, el territorio manifestó cinco niveles de aptitud para albergar aguas subterráneas, siendo estas: “Muy alta” (4%), “Alta” (20%), “Media” (24%), “Baja” (37%) y “Muy baja” (15%).

Cabe decir a modo final, que se comprueba que el uso de herramientas de percepción remota permite, ajustando adecuadamente las variables, comprobar la probabilidad de encontrar aguas subterráneas y se convierte en una herramienta simple y a bajo costo para ayudar a comunidades vulnerables como la Comunidad Agrícola de Peñablanca.

En una reciente visita a la Comunidad Agrícola de Peñablanca, el día 14 de abril de 2015, hubo una reunión con los encargados regionales del Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y de la Dirección General de Aguas, a quienes se les presentó el trabajo realizado y

quienes se encargarán de evaluar y construir pozos en las zonas determinadas con “alta probabilidad de almacenar agua”, lo que se llevará a cabo en conjunto con la Comunidad.

Referencias bibliográficas

ALDALUR, B y SANTAMARÍA M. Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, 2002, Vol. N° 17, p. 31-42

ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESAS DE SERVICIOS SANITARIOS (ANDESS). *Informe de Gestión de la Sequía 2014, Industria Sanitaria en Chile, Regiones de Atacama al Biobío*. Santiago: ANDESS Chile, 2013

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. y GARDNER, W.R. *Física de suelos*. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1973.

DAZA, F. A. *Métodos geoeléctricos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales*. Concepción: Tesis de pregrado, Universidad de Concepción, 2011.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS – DGA. *Acuífero de Sierra Gorda (Minuta técnica N°120)*. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas, 1999.

DGA. *Actualización delimitación de acuíferos alimentadores de vegas y bofedales, II Región* (Publicación SIT N°98). Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas, y de Transportes y Telecomunicaciones, 2004.

DGA. *Actualización delimitación de acuíferos de vegas y bofedales de la región de Antofagasta*. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas, 2006.

DGA. *Actualización de la oferta del recurso hídrico subterráneo en el sector Acuífero de Codegua, IV Región* (Publicación SDT N°245). Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas, 2007a.

DGA. *Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Choapa* (Publicación SDT N°248). Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas, 2007b.

DGA. *Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal*. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas, 2011.

DGA. *Levantamiento de información hidrogeológica para la modelación del acuífero de Pica, cuenca de la Pampa del Tamarugal, Región de Tarapacá* (Publicación SIT N°294). Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas, 2012.

ERRÁZURIZ, A.M.; CERECEDA, P.; GONZÁLEZ, J.I.; GONZÁLEZ, M.; HENRÍQUEZ, M. y RIOSECO, R. *Manual de Geografía de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Andrés Bello, 1998.

PORTA, J. y LÓPEZ-ACEVEDO, M. *Agenda de Campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2005.

RECONDO, C.; MENÉNDEZ, C.; GARCÍA, P. GONZÁLEZ, R. y SÁEZ, E. Estudio de las zonas propensas a sufrir deslizamientos en los Consejos de Oviedo y Mieres (Asturias) a partir de una imagen Landsat TM y de un Modelo Digital de Elevaciones. *Revista de Teledetección*, 2000, N° 14, p. 1-10.

REYNOLDS, J.; MAESTRE, F.; HUBER-SANNWALD, E.; HERRICK, J. y KEMP, P. Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación. *Ecosistemas*, 2005, Vol. N° 3, p. 1-19.

ROJAS, D y TELLO, E. Entrevista personal a comuneros en primera visita a Comunidad Agrícola de Peñablanca. (L. Rojas, Entrevistador). Agosto, 2013.

ROJAS, L. *Aptitud del territorio para albergar aguas subterráneas en la Comunidad Agrícola de Peñablanca, Comuna de Ovalle, IV Región de Coquimbo*. Santiago de Chile: Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2014.

SENER, E.; DAVRAZ, A. & OZCELIK, M. An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 2005 Vol. N°13: p. 826-834.

SERNAGEOMIN. "Geoportal". Disponible en internet:
<http://geoportal.sernageomin.cl/geovisor/GeoVisor/index.html>.

STRAHLER, A., & STRAHLER, A. *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega, 1989.

SURABUDDIN MONDAL, M.; PANDEY, A. & GARG, R. Groundwater prospects evaluation based on Hydrogeomorphological mapping using high resolution satellite images: A case study in Uttarakhand. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 2007, N° 36, p. 69-76.

WATERLOO HYDROGEOLOGIC LATINOAMÉRICA y EDRA. *Actualización del modelo de agua subterránea del campo de pozos Negrillar*. Santiago de Chile: Compañía Minera Zaldívar, 1999.