

# ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA ENDORREICA DE BAJO DE AÑELO, PROVINCIA DE NEUQUÉN

<sup>1</sup>Gatica José y <sup>1</sup>Dufilho Ana Cecilia

<sup>1</sup> Departamento de Geología y Petróleo, Universidad Nacional del Comahue. Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina. Tel. 0299 498300. email: josenqn@gmail.com

## Resumen

La cuenca endorreica del Bajo de Añelo está ubicada al noreste de la provincia de Neuquén, en una región con condiciones de clima árido. El recurso hídrico presenta una gran demanda debido a la expansión de la industria hidrocarburífera y su consecuente desarrollo de las zonas urbanas aledañas. La recarga de los acuíferos en esta región de clima árido es un problema central para la evaluación de las reservas de agua disponibles en los sistemas acuíferos.

La utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite caracterizar la distribución espacial de la precipitación y la evapotranspiración, permitiendo aplicar modelos de balance en toda la cuenca a efecto de obtener áreas donde los excedentes de agua podrían ser potenciales fuentes de recarga de los acuíferos de la cuenca. Se analizaron datos medios mensuales para determinar posibles excedentes hídricos. Se estimó la evapotranspiración potencial para la vegetación de este ecosistema árido mediante un factor de paisaje.

Los resultados encontrados reflejan que existen excedentes hídricos al menos en los meses de junio, julio y agosto. Dentro de la cuenca las zonas con predominio de rocas más permeables formadas por rocas basálticas y por areniscas, son áreas favorables para la infiltración y la recarga de los acuíferos de la cuenca. Para realizar el ajuste de estas zonas con mayor precisión es necesario utilizar información de la capacidad de infiltración de las rocas aflorantes y del efecto de las pendientes del terreno en la infiltración y percolación.

**Palabras clave:** balance, SIG, evapotranspiración de la estepa arbustiva

## Abstract

The endorheic Bajo de Añelo basin is located northeast of the province of Neuquen, in a region with arid climate conditions. Water resources present a great demand due to the expansion of the oil industry and the consequent development of the surrounding urban areas. The aquifers recharge in this region of arid climate is a central problem for the evaluation of available water reserves in aquifers systems.

The use of a geographic information system (GIS) to characterize the spatial distribution of rainfall and evapotranspiration allow apply balance models throughout the basin in order to obtain areas where surplus water could be potential source of groundwater recharge. Average monthly data were analyzed to determine possible surplus water. Potential evapotranspiration for vegetation of this arid ecosystem was estimated with a factor of landscape.

The results show that there is a water surplus in the months of June, July and August. Within the catchment areas with predominantly more permeable rocks (basaltic rocks and sandstones) are favorable for the infiltration and for the aquifer recharge. To make the adjustment more accurately of these areas it is necessary to use information from the infiltration capacity of the exposed rocks and consider the effect of terrain slopes in infiltration and percolation processes.

**Keywords:** balance, GIS, evapotranspiration of shrubsteppe

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La cuenca endorreica del Bajo de Añelo (fig. 1) está ubicada al noreste de la provincia de Neuquén, tiene unos 9000 km<sup>2</sup> de superficie con alturas comprendidas entre 220 msnm en la parte central del Bajo y 2215 msnm en el Volcán Auca Mahuida (al norte), con precipitaciones anuales que no superan en promedio los 180 mm, predominando condiciones de clima árido. Se ubica en la Región Extraandina (Ferrer *et al.*, 1990) con relieve de planicies, serranías y colinas al oeste y mesetas al este, formadas en rocas sedimentarias y volcánicas. La vegetación predominante corresponde a la estepa herbácea arbustiva. Los límites de las divisorias de agua de la cuenca son: al norte el volcán Auca Mahuida, al oeste por el Alto del Dorso de los Chihuidos (el flanco este de un anticlinal que se extiende de norte a sur por más de 100 km) y hacia el este y sur niveles de antiguas terrazas fluviales. En el subsuelo existen acuíferos alojados en las rocas sedimentarias cretácicas de la Cuenca Neuquina. El recurso hídrico presenta una gran demanda debido a la expansión de la industria hidrocarburífera y su consecuente desarrollo de las zonas urbanas aledañas. La principal fuente de abastecimiento son los cursos superficiales, mientras que los acuíferos son explotados aunque la disponibilidad de agua no ha sido determinada para toda la cuenca.

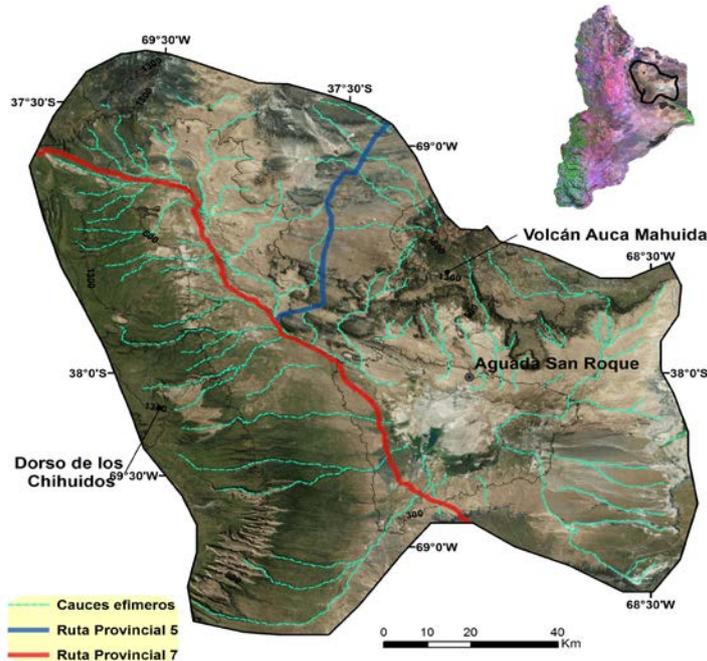


Figura 1. Área de estudio cuenca endorreica Bajo de Añelo

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una metodología para estimar el balance en toda la cuenca a efecto de obtener áreas donde los excedentes de agua podrían ser potenciales fuentes de recarga de los acuíferos, utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite caracterizar la distribución espacial de los parámetros del balance.

## METODOLOGIA

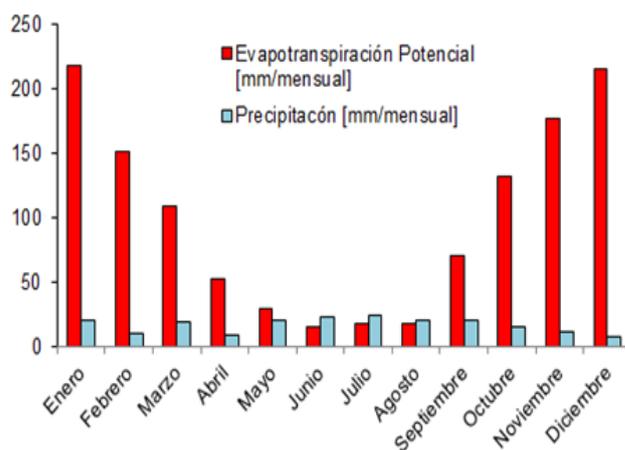
La estimación del balance hídrico en la cuenca implica la aplicación del principio de conservación de masa por el cual el balance neto de entradas y salidas de agua entre dos fechas determinadas debe coincidir con la variación de masa almacenada (Entradas – Salidas = Cambio de almacenamiento) en un sistema de volumen conocido y definido por unas condiciones de frontera. De este balance se desprende la estimación de la recarga al acuífero y puede expresarse como:  $R = P - E_s - ET - DS$ , donde R (recarga), se obtiene como la diferencia entre los parámetros: P (precipitación),  $E_s$  (escorrentía superficial), ET (evapotranspiración) y DS (cambio en el almacenamiento). Esta ecuación es válida si se considera que la precipitación (P) es la única entrada al sistema y no existen aportes de aguas subterráneas de acuíferos vecinos, por ende se asume que la divisoria de la cuenca coincide con la divisoria de aguas subterráneas.

Se define como recarga al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del mismo; igualmente se llama recarga al volumen de agua que penetra en el acuífero durante un intervalo de tiempo dado (Custodio, 1998). El origen de la

misma puede ser muy diverso, sin embargo bajo las condiciones de estudio se asume que la recarga es originada exclusivamente por agua meteórica y aceptando como nulas las recargas concentrada a partir de cauce efímeros o lagos; retorno de regadíos, pérdida de los sistemas de distribución agrícolas o urbanos; acuíferos vecinos; artificial, etc.

Para el estudio de la cuenca endorreica del Bajo de Añelo, asumimos que la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración de la vegetación presente en la zona, puede generar un excedente hídrico que puede incorporarse a los acuíferos. La litología aflorante y las pendientes presentes en la cuenca son las principales responsables (además de las características de la precipitación) del proceso de infiltración que determina la distribución del agua entre escorrentía superficial y escorrentía subterránea.

Debido a que la cuenca se desarrolla en un ecosistema árido, el balance anual presenta un marcado déficit hídrico que no posibilitaría la existencia de excedentes para recargar los acuíferos y por lo tanto no existirían acuíferos en la cuenca. Sin embargo, dado que las mayores láminas de precipitación se producen en invierno (cuando la evapotranspiración es baja), pueden existir períodos con excesos hídricos. Por lo tanto se analizó la distribución anual de la precipitación y la evapotranspiración potencial a escala



mensual. Con la utilización del software LocClim (FAO, 2002) que contiene datos climáticos de 28.800 estaciones de todo el planeta, se realizó la evaluación mensual (fig. 2), teniendo en cuenta: las estimaciones de error y restringiendo las variables de búsqueda a estaciones dentro de un radio de 200 km. Utilizando datos disponibles desde el año 1960, se determinó que en los meses de junio, julio y agosto existen precipitaciones que superan las pérdidas por evapotranspiración potencial.

Figura 2. Precipitación vs. evapotranspiración potencial mensual

La estimación del balance hídrico en una cuenca requiere el estudio de los parámetros (precipitación, evapotranspiración real, etc.) distribuidos en el espacio. Por lo tanto la utilización de un SIG permite el análisis de aquellos parámetros espaciales complejos que presentan además una variación temporal y facilita la observación de sus patrones y tendencias. El empleo de datos espaciales tipo raster es idóneo para el estudio de fenómenos cambiantes en el espacio, representando también simplicidad en la ejecución de los operadores.

La delimitación espacial de la cuenca hidrográfica del Bajo de Añelo se realizó con ArcGIS utilizando modelos de elevación digital obtenidos del sensor SRTM disponible en el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey) con una resolución de malla de 90 metros.

La precipitación es un parámetro importante dentro de un balance, ya sea por ser un valor de entrada, por su variabilidad espacial y temporal o por su importancia como recurso natural. La variabilidad espacial de la precipitación para los meses con excesos hídricos se determinó por el método de interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW: Inverse Distance Weighting) a partir de los valores medios mensuales de las estaciones meteorológicas.

La evapotranspiración es el proceso mediante el cual la superficie terrestre devuelve agua a la atmósfera en forma de vapor a través de dos procesos: uno físico como es la evaporación directa -de la humedad del suelo, de las láminas de agua, de las capas de hielo, nieve, de la interceptada por la vegetación-, y otro biológico como es la transpiración de las plantas. Para la estimación de la ET potencial se adoptó el método climático de

Thornthwaite (1948) que requiere únicamente datos de localización y de temperaturas medias mensuales, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. Por su simplicidad permite calcularla fácilmente a escala mensual con ArcGIS en toda el área de la cuenca. Esta ET potencial del cultivo de referencia, implica la máxima cantidad de agua que puede evapotranspirarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación (el cultivo de referencia), que se desarrolla en óptimas condiciones y en el supuesto caso de no existir limitaciones en el suministro de agua. La vegetación en las regiones áridas está adaptada al estrés hídrico y ha desarrollado estrategias específicas para la utilización del agua (Villagra *et al.*, 2011) y a pesar del escaso recubrimiento de vegetación en los ecosistemas áridos, la cubierta vegetal juega un papel importante a la hora de cuantificar la cantidad de agua que llega al subsuelo (Chirino, 2013). Las características de la cobertura vegetal como la densidad, estructura y especie, determina la magnitud de la evapotranspiración (potencial y real), por lo que su influencia sobre el balance es una cuestión a tener en cuenta a la hora de estudiar la recarga. La ET potencial para la vegetación de monte y estepa de la región (ETm) se obtuvo por el método de Costello *et al.* (2000) donde la evapotranspiración de referencia se la multiplica por un coeficiente de paisaje:

$$ETm = ET \times KL$$

donde el coeficiente de paisaje (KL) es el producto de tres factores: un factor de especies (ks), un factor de microclima (kmc) y un factor de densidad (kd).

$$KL = ks \times kd \times kmc$$

Este método está siendo utilizado en California, pero el autor advierte acerca de la subjetividad del método ya que las estimaciones de los requerimientos de agua no son valores exactos y esto dependerá fundamentalmente de la experiencia de campo (observación) a la hora de adoptar los tres valores de los factores que intervienen en KL.

Para el factor de especie (ks) se utilizó de base al mapa de vegetación de la provincia de Neuquén de Movia *et al.* (2007) a escala 1:500.000, asignando a cada tipo de vegetación un valor tabulado dividido en cuatro categorías: muy bajo (0,1-0,2), bajo (0,3-0,4), medio (0,5-0,7) y alto (0,8-0,9). Como los valores tabulados corresponden a zonas climáticas de Estados Unidos, se tomaron los valores que más se asemejan a nuestra zona semiárida según el tipo de vegetación. Estos valores muestran que el requerimiento de agua de la estepa arbustiva y de la estepa herbácea es muy bajo.

El factor de densidad de vegetación (kd) se utiliza para dar cuenta de las diferencias en la densidad de la vegetación. Este factor se divide en tres categorías: bajo (0,5-0,9), medio (1,0) y superior (1,1-1,3). Paisajes inmaduros y con pocas vegetación, con menos área foliar, se les asigna un valor bajo. Las zonas con mezclas de árboles, arbustos y cubiertas vegetales se les asignan un valor de factor de densidad en la categoría alta. A las zonas cubiertas con vegetación predominantemente de un mismo tipo se les asigna la categoría media. Para determinar el coeficiente kd se utilizó el índice verde normalizado (NDVI) que ofrece el sensor MODIS de los satélites Terra/Aqua, que posee una resolución temporal de 16 días y espacial (píxel) de 250 m. Específicamente se emplea el producto MOD13Q1 que está elaborado y publicado por la NASA ([https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access)).

El factor de microclima (kmc) oscila entre 0,5 y 1,4 y se divide en tres categorías: bajo (0,5-0,9), medio (1,0) y superior (1,1-1,4). Una condición de microclima medio corresponde a condiciones de ET que presentan las zonas abiertas y sin vientos extraordinarios o entradas atípicas de calor. En una condición microclima alta aumentan las condiciones de evaporación. Valores bajos es común en zonas con vegetación que se encuentran a la sombra una parte importante del día o están protegidos de los fuertes vientos. La obtención de este coeficiente se realizó determinando la orientación de las laderas con el modelo de elevación digital SRTM. Las laderas orientadas a los vientos dominantes del sector oeste y sudoeste fuertes y secos aumentarían su ET, lo mismo que las laderas con exposición al norte.

Como se mencionó con anterioridad dentro de las bondades que ofrecen los SIG es la capacidad de geoprocesar, es decir proporcionar una ejecución metódica de una

secuencia de operaciones en los datos geográficos para crear nueva información. Dentro de sus operaciones la calculadora raster fue utilizada para obtener la evapotranspiración corregida ETm (multiplicando el raster de coeficiente de paisaje (KL) con el de evapotranspiración de referencia ET) y los excedentes hídricos (diferencia del raster precipitación y evapotranspiración ETm).

## RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSION

### Precipitación de los meses con excedentes

Para el análisis de las precipitaciones se utilizaron base de datos de 8 estaciones meteorológicas de la zona, distanciadas a no más de 200 km del área de estudio (tabla 1). Además de las 6 estaciones de LocClim (FAO), se utilizaron las estaciones de Colonia Catriel y Rincón de los Sauces a efecto de obtener la cobertura del área de estudio.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas

Estación	Longitud	Latitud	Fuente	Periodo
Plaza-Huincul	-69,16	-38,90	LocClim	
Cutral-Co	-69,25	-38,93	LocClim	
Chos-Malal	-70,28	-37,38	LocClim	
Neuquén	-68,11	-38,93	LocClim	
Cipolletti	-67,63	-38,95	LocClim	
Cnl.J.J.Gomez	-68,90	-39,00	LocClim	
Colonia Catriel	-67,74	-37,66	Evarsa	80-10
Rincón de los Sauces- Aeropuerto	-68,90	-37,86	Dir. Prov. de Estadísticas y Censos	80-10

En el mes de junio (el mes con mayor precipitación media de cerca de 34 mm), los valores más elevados ocurren en la zona oeste en la región norte del Dorso de los Chihuidos, mientras que en julio y agosto los mayores valores ocurren en la zona del volcán Auca Mahuida. Las precipitaciones menores del mes, tienen un patrón opuesto ocurriendo las menores precipitaciones en junio en la región este mientras que en agosto ocurren en la zona oeste (9,6 mm).

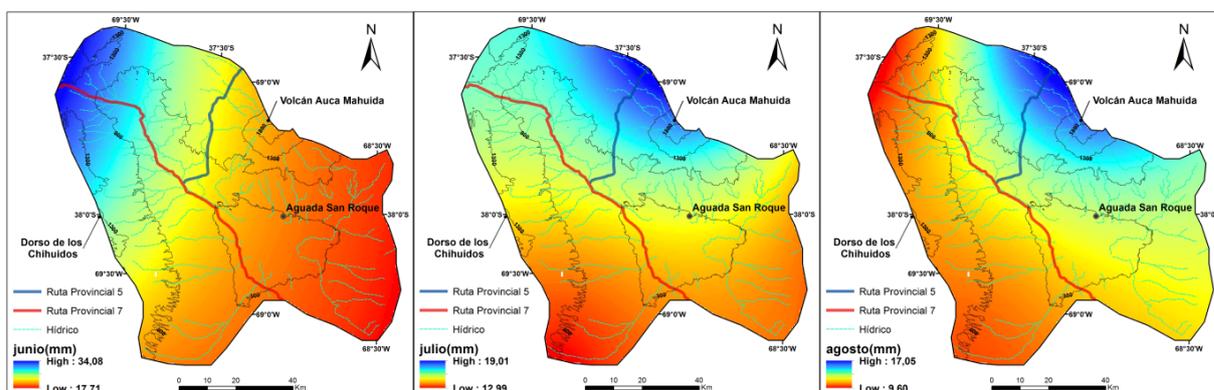


Figura 3. Precipitaciones para los meses con excedentes hídricos

El método de interpolación IDW se usa habitualmente para el análisis de precipitación, pero se debe tener en cuenta que la existencia de distintos factores -como el relieve- modifican la distribución de la precipitación. Además la densidad de datos utilizados en la interpolación pueden modificar los resultados sobretodo teniendo en cuenta que las series de las estaciones de Rincón de los Sauces y Colonia Catriel no han sido revisadas.

## Evapotranspiración potencial en los meses con excedentes

A partir de los datos de temperatura medias mensuales y de la localización de las estaciones, se calcularon los índices calóricos anuales y el factor de corrección por ubicación para cada estación con los cuales se calculó la ET potencial en cada sitio de medición. Luego, a partir de los valores puntuales de ET potencial se obtuvieron los rasters mediante aplicación del método de interpolación IDW (fig. 4). Se observa que los menores valores (cerca de 11 mm) se producen en junio y julio en la zona del volcán Auca Mahuida, mientras que en agosto las menores (cerca de 15 mm) ocurren en la zona suroeste.

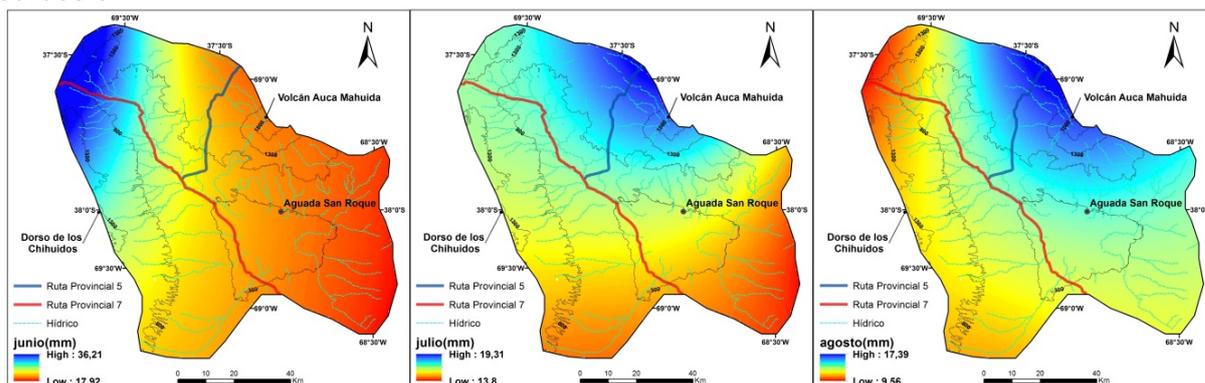


Figura 4. Evapotranspiración para los meses con excedentes hídricos

## Factor paisaje para la corrección de la evapotranspiración potencial

Utilizando la información base indicada en la metodología se obtuvieron los tres factores del coeficiente de paisaje, primero en formato vectorial y luego transformado a formato Raster para el mejor tratamiento con ArcGIS. Los resultados se indican en la fig. 5.

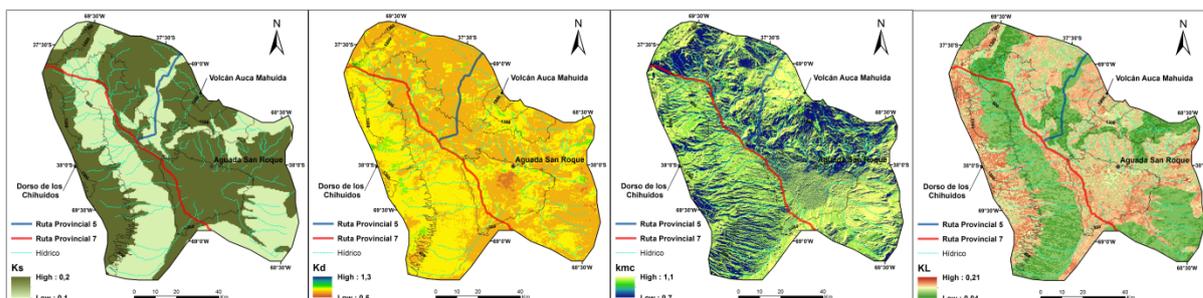


Figura 5. Factores ks, kd y kmc para obtener el coeficiente de paisaje KL (derecha)

El factor de especie ks presenta valores bajos dado que en la zona solo existen especies arbustivas y herbáceas que presentan bajos requerimientos hídricos.

El factor de densidad de la vegetación kd, muestra valores bajos en toda el área indicando la presencia de escasa vegetación y probablemente degradada. Las imágenes Modis permiten estimar adecuadamente este coeficiente con un nivel de detalle suficiente para la escala analizada. Los valores del factor microclima kmc reflejan la existencia de zonas que favorecen la disminución de la ET como el faldeo sur y sureste del volcán Auca Mahuida. En áreas planas como la región central del bajo de Añelo (al sur de Aguada San Roque) la ET es alta debido a la escasa protección del terreno a los vientos y a la insolación.

Multiplicando estos tres factores se obtiene el coeficiente de paisaje KL (fig. 5) para la corrección de la ET. Los valores son iguales e inferiores a 0,2145, indicando que la ET de este ecosistema árido es cercana al 22 % de la ET del cultivo de referencia. Los mayores valores se presentan donde la vegetación es más densa y donde la insolación y la exposición al viento son mayores.

## Evapotranspiración potencial de la estepa herbácea arbustiva ETm

Los valores de ETm obtenidos para los meses de invierno (figura 6) son muy bajos, con valores comprendidos ente 0,51 a 3,66 mm mensuales. La distribución espacial de ETm refleja las condiciones de los factores de corrección comentados en los puntos anteriores.

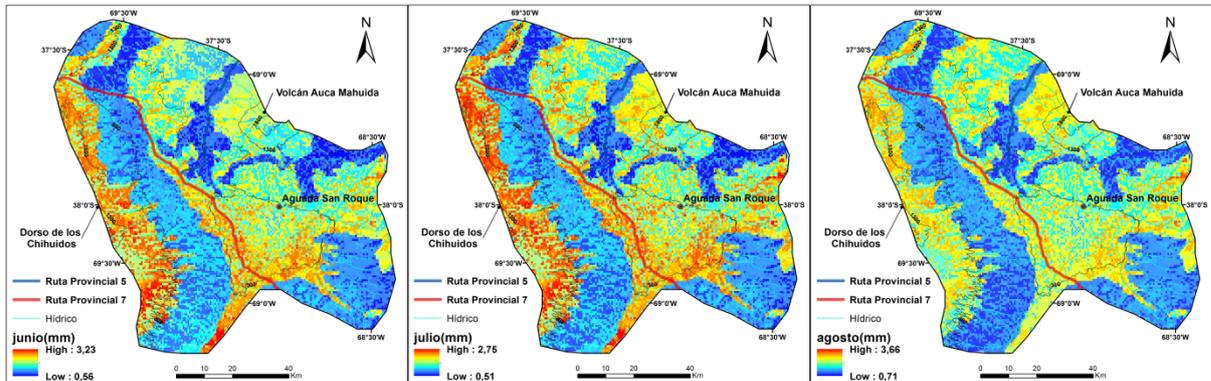


Figura 6. Evapotranspiración potencial ETm para los meses de junio, julio y agosto

## Excedentes hídricos

Teniendo en cuenta la ecuación de balance y sus simplificaciones, se obtuvieron los excedentes hídricos como la diferencia entre los rasters de precipitación y evapotranspiración potencial de la estepa ETm para los meses de junio, julio y agosto (fig. 7). Se observa que en los tres meses hay excedentes, pero en junio ocurren los mayores cercanos a 36 mm y en agosto los menores aprox. 6 mm. En la zona del volcán Auca Mahuida constituida exclusivamente por rocas volcánicas fracturadas (Bermudez y Delpino, 2000), se puede inferir que en los meses de julio y agosto al menos una parte de los excedentes recargarán los acuíferos subyacentes, dado que estas rocas son un excelente sitio para la infiltración y recarga. En la zona central ocupada por el Bajo de Añelo los excedentes estimados son bajos en los tres meses, aunque deben ser mayores debido a la acumulación de agua proveniente de la escorrentía superficial. Por otro lado, en este Bajo los depósitos lagunares y evaporíticos, en los que predominan los suelos salinos de texturas finas arcillo-limosas (Ferrer *et al.*, 2011), tienen una baja conductividad hidráulica por lo que no es esperable que sea una zona apta para la recarga, sino que más bien los excedentes se evaporarán durante los meses de primavera y verano.

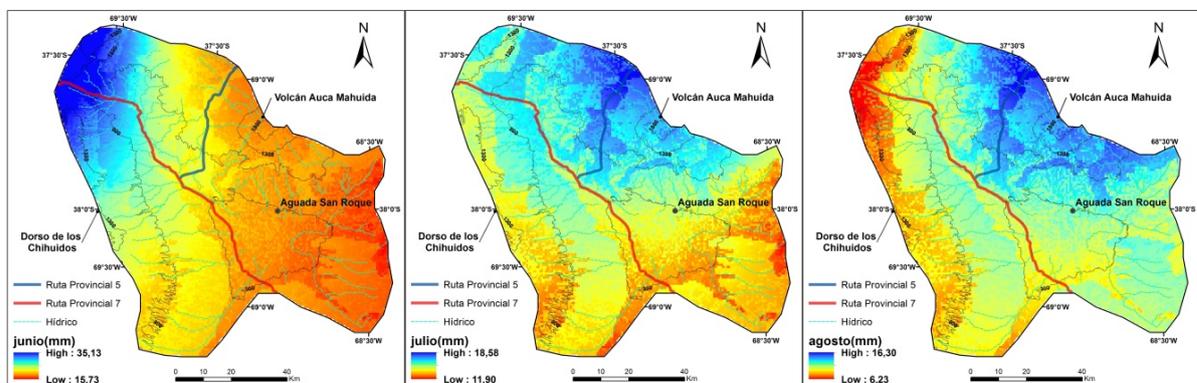


Figura 7. Excedentes hídricos para los meses de junio, julio y agosto

En el resto del área debe profundizarse el análisis de las relaciones entre la distribución de afloramientos y propiedades de las rocas (fundamentalmente capacidad de

infiltración y almacenamiento) con la distribución de los excedentes. Simultáneamente debe incluirse el análisis de las pendientes que juegan un rol importante en la infiltración.

## CONCLUSIONES

Para la estimación de la recarga en zonas áridas debe considerarse el balance a escala mensual o inferior, dado que el balance a escala anual establece un déficit muy marcado. En los meses de junio, julio y agosto la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial estimada por el método de Thornthwaite.

El método de ajuste de la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia con el factor de paisaje parece adecuado para obtener la evapotranspiración potencial de la vegetación de la estepa herbácea arbustiva, resultando en un 22 % de la ET potencial del cultivo de referencia. Esta corrección de ET para las especies de climas áridas a través del factor de paisaje puede permitir determinar otros meses con posibles excedentes.

Los excedentes hídricos obtenidos mediante diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración ajustada rondarían entre 6 y 36 mm mensuales en algunas áreas.

Los excedentes deben ser comparados con las litologías aflorantes y las pendientes del terreno a efecto de determinar las áreas más favorables a la recarga de los acuíferos. En estas áreas se podría estimar la recarga a escala diaria a efecto de tener en cuenta las precipitaciones torrenciales de las regiones áridas. Por otro lado, se debería aumentar la escala de trabajo en estas áreas obteniendo más detalle en la cartografía generada.

## REFERENCIAS

- Bermúdez, A., Delpino, D., Zencich, S. y Bolatti, N.** 2000. Evolución volcánica y petrológica del sector sur del campo volcánico Auca Mahuida, provincia del Neuquén, Argentina. 9º Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 1-5, Puerto Varas.
- Chirino, E.**, 2003. Influencia de las precipitaciones y de la cubierta vegetal en el balance hídrico superficial y en la recarga de acuíferos en climas semiáridos. Tesis doctoral Universidad de Alicante, España 387.
- Costello, L., Matheny, N., y Clark, J.**, 2000. The landscape coefficient method. In: A guide to estimating irrigation water needs of landscape plantings in California. University of California Cooperative Extension. California Department of Water Resources.
- Custodio, E.**, 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre". Boletín Geológico y Minero, 109 (4), 329-346
- FAO** (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2002. LocClim, Estimador Local Mensual Climático. Disponible en <http://www.fao.org/sd/locclim/srv/locclim.home>
- Ferrer J.A.; Mendía J.M. e Irisarri J.**, 1990. Estudio Regional de Suelos de la Provincia de Neuquén, Vol. 1, Tomos 1 a 4. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires. 543 pp
- Movía C., Ower G, Perez C.**, 2007. Estudio de la Vegetación Natural de la Provincia del Neuquén. Tomo I, II y III. Min.de Economía y Hacienda Prov. De Neuquén.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration)**,  
2010a, Shuttle Radar Topographic Mission, Jet Propulsion Laboratory: La Cañada Flintridge, California, EUA, disponible en <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>  
2010b, MODIS Land Quality Assessment, Goddard Space Flight Center: Greenbelt, Maryland, EUA, disponible en [http://modis-250m.nascom.nasa.gov/cgi-bin/QA\\_WWW/newPage.cgi?fileName=modland\\_guide](http://modis-250m.nascom.nasa.gov/cgi-bin/QA_WWW/newPage.cgi?fileName=modland_guide)
- Thornthwaite, C.**, 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geog. Review. 38: 55-94.
- Villagra, P., Giordano, C., Alvarez, J., Cavagnaro, J., Guevara, A., Sartor, C, Passera, C. y Greco, S.**, 2011. Ser planta en el desierto: estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte Central de Argentina. Ecol. Austral, vol.21, n.1, pp. 29-42.