

# **CÁLCULO DE LA RECARGA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS A PARTIR DE INFORMACIÓN DIGITAL Y TIPO DE SUELO: CASO DEL PARTIDO DE SALLIQUELÓ, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA.**

**Raúl Rivas, Marcelo Varni, Ilda Entraigas y Eduardo Usunoff**

Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA-CIC-Municipalidad de Azul), CC 44 (7300), Azul, Bs. As.  
rrivas@faa.unicen.edu.ar

## **RESUMEN**

La recarga del agua subterránea es el proceso por el cual la precipitación que infiltra el suelo y no es perdida por evapotranspiración, drena a través del perfil no saturado y pasa a formar parte del agua subterránea. La determinación de la recarga es de vital importancia para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Dada la alta variabilidad espacial de los parámetros climáticos, biológicos y geológicos, las medidas puntuales no permiten obtener estimaciones adecuadas de la recarga areal. Por lo tanto, es necesario recurrir a metodologías que tengan en cuenta la variabilidad espacial de los factores más relevantes para el cálculo de la recarga.

La zona de estudio es el partido de Salliqueló, de 794 Km<sup>2</sup> de superficie, ubicado al oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. La metodología propuesta en este trabajo utiliza la información proveniente de la clasificación de uso del suelo a partir de imágenes Landsat TM y del tipo de suelo según información digitalizada de las cartas de suelo de INTA. Para las diferentes combinaciones entre el uso y tipo de suelo se calcularon balances de agua a escala mensual según la metodología de Thornthwaite y Mather. Como resultado de los balances mensuales se obtuvo la distribución espacial de la recarga, con valores anuales comprendidos entre 124 y 149 mm. Se concluye que la metodología propuesta permite una mejor estimación de la recarga de agua al acuífero.

## **ABSTRACT**

Groundwater recharge is understood as that fraction of the water which percolates the soil and , traveling through the unsaturated zone, avoids evapotranspiration and reaches the aquifer. Due to the various phenomena included and their uneven spatial distribution, its point estimation is prone to errors and other space-sensitive methodologies are preferred.

This paper, dealing with Salliqueló County (794 km<sup>2</sup> in western Buenos Aires Province), presents a combined processing of land use (from Landsat TM images) and soil type (from INTA soil maps). For the various combinations, Thornthwaite and Matter soil-monthly water budgets were calculated. Results show annual recharge values between 124 and 149 mm, spatially distributed. Is concluded this methodology is an appropriate better estimator of the regional aquifer recharge.

## **INTRODUCCIÓN**

La recarga del agua subterránea es el proceso por el cual la precipitación que infiltra el suelo y no es perdida por evapotranspiración, drena a través del perfil no saturado y pasa a formar parte del agua subterránea. El conocimiento de la recarga es de vital importancia para

estudios y para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Dada la variabilidad espacial de este parámetro se hace necesario recurrir a técnicas que no involucren medidas puntuales las cuales conducen a estimaciones inadecuadas. El presente trabajo intenta evaluar la distribución espacial de la recarga de agua al acuífero utilizando información satelital, datos meteorológicos y cartas de suelo.

El sector de estudio se ubica en la región centro oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina más específicamente en el partido de Salliqueló y sector aledaño (Figura 1). Abarca una superficie de 797 km<sup>2</sup>.



Figura 1. Ubicación del partido de Salliqueló en la provincia de Buenos Aires, Argentina.

La geomorfología de la región corresponde a una planicie arenosa ondulada generada fundamentalmente por fenómenos hídricos (de escurrimiento difuso) y eólicos (de acumulación-deflación) (Salazar Lea Plaza, 1980). Estos han dado lugar a la morfología actual, arenosa y ondulada con planicies intermedias y frecuentes áreas deprimidas que albergan lagunas freáticas (González, 1986). Este relieve de pequeñas áreas positivas y negativas se corresponde con una marcada variación de calidad en las aguas subterráneas. Las áreas positivas contienen agua de bajo contenido en sales debido a su posibilidad de favorecer la infiltración del agua de lluvia, actuando como áreas de recarga, mientras que en las partes bajas (áreas negativas) las aguas aumentan su contenido salino por ser zonas de descarga de agua subterránea (Varni *et al.*, 2000).

En este paisaje de llanura, alejado de montañas, los sedimentos que lo componen son limosos y loessoides, cubiertos en parte por arenosos (médano invasor) (Tapia, 1935). Estos, cuando son de poco espesor, no influyen fuertemente en las condiciones hidrogeológicas; pero donde originan cuerpos de un volumen y morfología marcada presentan características locales interesantes para la extracción de agua dulce para consumo humano (Sala, 1981).

La profundidad de los niveles freáticos medidos en los pozos de la región es función de la ubicación topográfica de la perforación. Para las zonas altas el desarrollo de la zona de aireación está comprendida entre 3 y 7 metros, mientras que para los sectores bajos es cercana al metro, pudiendo en períodos lluviosos aflorar el agua freática.

El clima, de acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite es subhúmedo seco, mesotermal, con nulo o pequeño exceso de agua y con baja concentración de la eficiencia térmica (Morosi *et al.*, 1987).

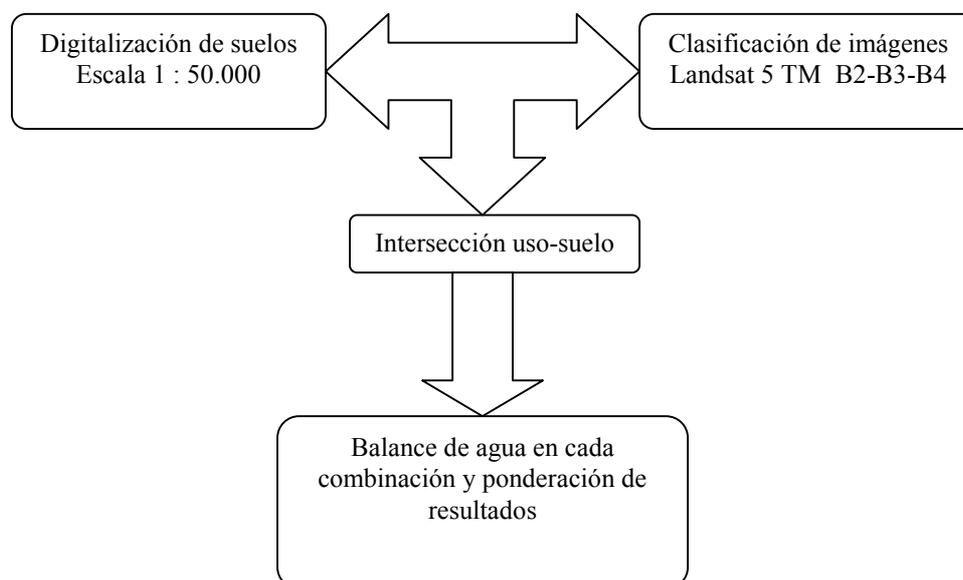
La precipitación media (1910-98) es de 755 mm por año, la evapotranspiración potencial media (1941-50) es de 804 mm y la real, obtenida mediante el balance de Thornthwaite y Mather (1957) es de 712 mm (Auge *et al.*, 1989). El menor registro de precipitaciones fue en 1938 (346 mm) y el máximo en 1919 (1209 mm). Las menores precipitaciones ocurren en invierno (13% de la media anual) y las mayores se presentan entre noviembre y marzo (45% de la media anual). Julio es el mes menos lluvioso (1.7 %) y enero el más lluvioso (14%).

La temperatura media anual es de 15.5 °C, con la media máxima en enero (23.9 °C) y la media mínima en julio (7.6 °C) (Auge *et al.*, 1989).

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se utilizaron las imágenes registradas por Landsat TM 5, carta de suelos del partido de Salliqueló a escala 1:50.000, información meteorológica de la zona para el período 1983-1996 (precipitación y temperatura), e información estadística de uso del suelo en el partido.

El diagrama siguiente muestra esquemáticamente la metodología de trabajo.



Para la clasificación supervisada se identificaron parcelas de control en la composición color obtenida por combinación de las bandas 2, 3 y 4 de LANDSAT TM. Las clases fueron: laguna, bajo, pastura, pasto llorón, rastrojo-arado-sembrado, campo natural y urbano. Se analizaron las matrices de confusión para cada clase y se crearon las respuestas espectrales para cada tipo de clase. Una vez obtenida las curvas espectrales, se clasificó la imagen correspondiente al partido utilizando la regla de Bayes, que reposa en la hipótesis de la normalidad de los valores radiométricos (Muller, 1996). La probabilidad está dada por:

$$P(C_i/x) = P(x/C_i) * P(C_i) / P(x)$$

siendo:

x: valor radiométrico del pixel a clasificar

C<sub>i</sub>: la clase i

P(C<sub>i</sub>/x): probabilidad de afectación del pixel a la clase C<sub>i</sub> conociendo su valor x

P(x/C<sub>i</sub>): probabilidad de observar el valor x dentro de la clase C<sub>i</sub>

P(x): probabilidad de observar el valor x

P(C<sub>i</sub>): probabilidad de encontrar la clase C<sub>i</sub>

La digitalización de las cartas de suelo del INTA (1993, 1994) se realizaron utilizando el programa Ilwis 2.2 (ITC, 1998). Las series de suelo fueron reclasificadas de acuerdo a su composición textural de la siguiente manera: 25 de Mayo y Phajouapé, arenosos; Bolívar y Piedritas, franco arenosos y Epecuén, franco. Por último se procedió a la intersección entre suelos y los usos del suelo logrado de la clasificación de imágenes satelitales.

Para el cálculo de la recarga se procedió en primer lugar a la verificación de la consistencia de los datos meteorológicos.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se utilizó la fórmula de Thornthwaite (Thornthwaite, 1955) que requiere disponer de los valores de temperatura media mensual. Se calcularon los valores de ETP media mensuales y por sumatoria de los anteriores la ETP media anual.

Para la estimación de la evapotranspiración real (ETR) se utilizó el método de Thornthwaite y Mather (1957), con el que se realiza un balance de agua a nivel del suelo. Para aplicar este método se requiere conocer la capacidad de almacenamiento de agua del suelo por unidad de espesor y la profundidad radicular.

Se calculó para cada combinación de suelo y uso del mismo el agua útil disponible para las plantas según:

$$AU = Da * (CC - PMP) * Hr \quad (1)$$

donde,

AU: agua útil,

Da: densidad aparente,

CC: capacidad de campo,

PMP: punto de marchitez permanente, y

Hr: profundidad radicular.

De la diferencia entre capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se obtiene el agua útil porcentual (peso en peso) por metro de profundidad. Su producto por la densidad aparente permite pasar de proporciones en peso a proporciones en volumen. Finalmente, la profundidad radicular lleva el agua útil por metro a agua útil total.

Los usos del suelo considerados y su profundidad radicular correspondiente fueron: pastura y/o cereal (1.05 m), pasto llorón (1.30 m), rastrojo (1.17 m) y campo natural (0.80 m). Existe un quinto uso del suelo con pequeña representatividad areal, que es el uso urbano, al que

se le asignan los mismos parámetros que al campo natural. La profundidad radicular fue tomada de los valores promedio de la vegetación preponderante en cada zona (Doorembos y Pruitt, 1977).

Los tipos de suelo definidos fueron: arenoso, franco arenoso y franco. Las áreas lagunares no fueron consideradas en el análisis. Para cada uno de estos suelos se tomaron de Hillel (1982) la densidad aparente, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

Por último, se calcularon los excesos hídricos de agua en cada conjunto suelo-uso según la metodología de Thornthwaite y Mather (1957) y, que para la región corresponde a la recarga dada la ausencia de escurrimiento superficial. Los valores obtenidos se ponderaron de acuerdo a su representatividad en el partido:

$$\sum S_i/S_t * R_i = R$$

## RESULTADOS

Los valores radiométricos mínimos y máximos para cada banda son los que se presentan en la Tabla 1. Estos corresponden a la imagen de agosto de 1998 que se considera la más representativa del uso del suelo en el área de estudio en relación a las estadísticas productivas del partido.

	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Radiometría	8-31	11-51	5-71

Tabla 1. Valores radiométricos de los canales considerados.

El resultado de la clasificación de uso del suelo es presentado en la Figura 2. Es posible observar que los predios donde se práctica agricultura presentan manchones con campo natural o llorón. Ello se debe a la alta susceptibilidad de los suelos a la erosión eólica por lo cual los agricultores evitan el laboreo de estos sectores y, en casos excepcionales fijan a éstos con la implantación de pasto llorón.

El resultado de la intersección de uso del suelo (Figura 2) y tipo de suelo luego de la reclasificación de las series (Figura 3) da como resultado 10 combinaciones (Tabla 3). En la Figura 4 se presenta el mapa obtenido de la intersección.

Los valores de ETP mensual obtenida para el período utilizando la fórmula de Thornthwaite se muestran en la Tabla 1. El valor de ETP media anual es de 787 mm.

	Ene	Feb	Mar	Abr	may	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
P (mm)	128	87	117	82	64	17	42	47	57	87	103	81
ETP (mm)	131	102	87	56	35	19	20	26	39	65	86	121

Tabla 2. Precipitación y ETP (según Thornthwaite, 1955) medias mensuales para el período 1983-1996.

En la Figura 5 se han graficado los valores de precipitación y de evapotranspiración potencial mensual. Los meses que presentan déficit hídrico son diciembre, enero, febrero y junio.

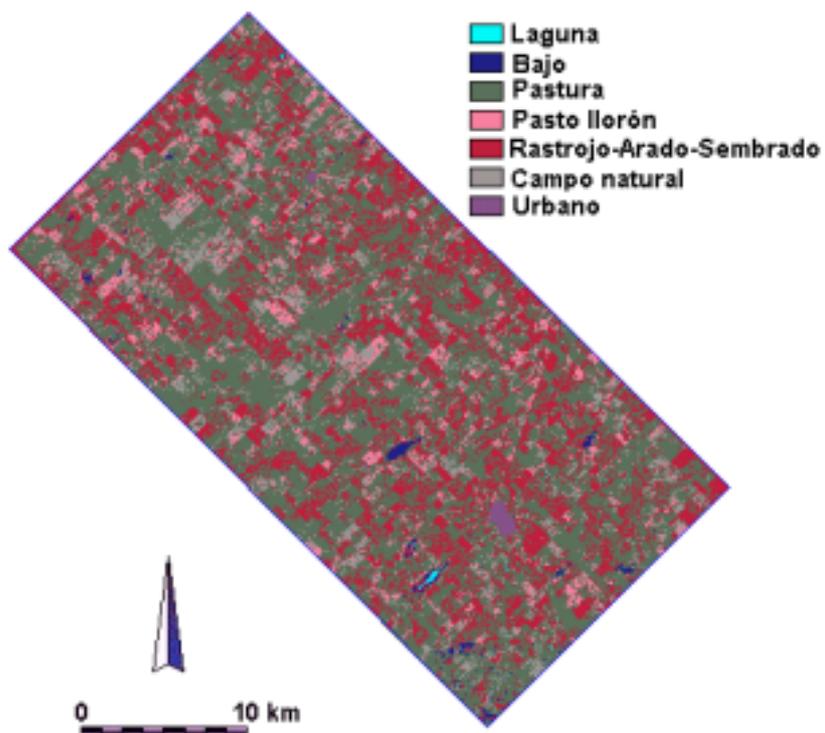


Figura 2. Resultados de la clasificación supervisada para agosto de 1998.

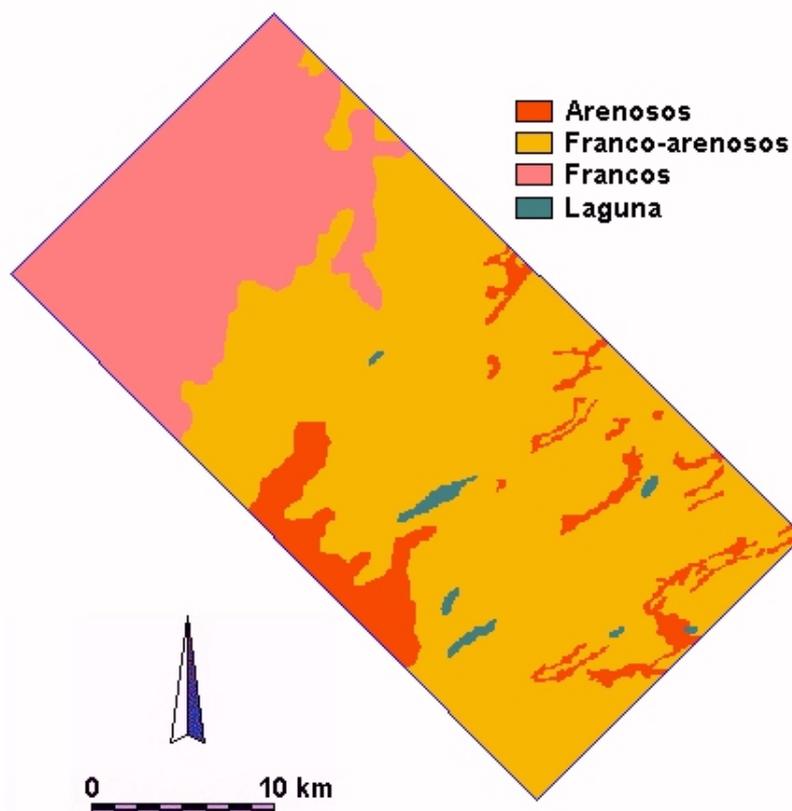


Figura 3. Distribución espacial de suelos y lagunas en el partido luego de la reclasificación de las series.

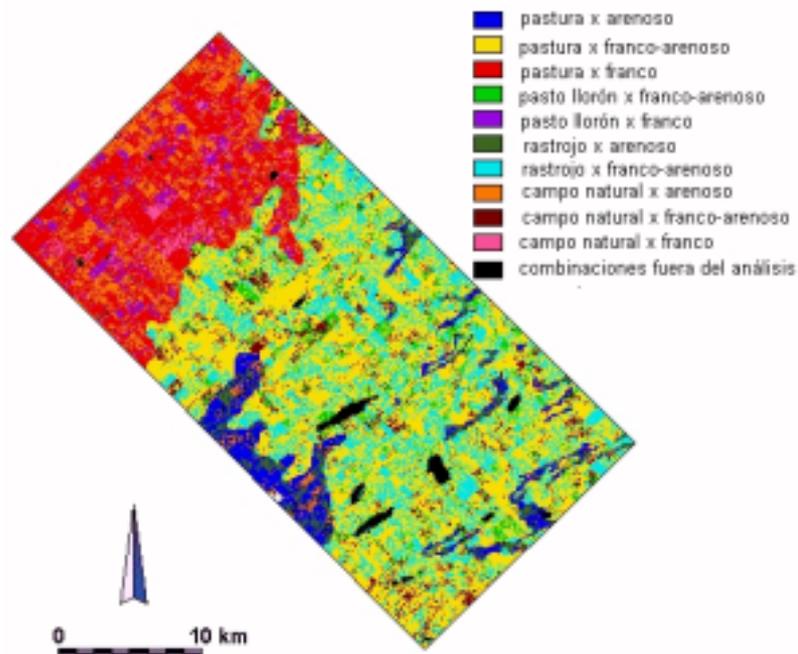


Figura 4. Resultado de la intersección entre uso y tipo de suelo.

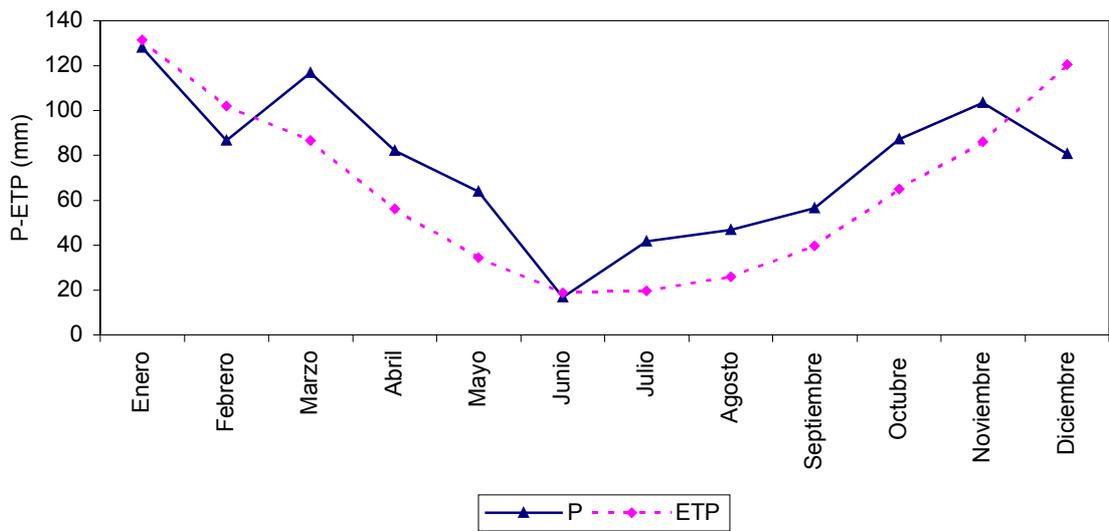


Figura 5. Precipitación y evapotranspiración mensual para el período 1983-1996.

En la Tabla 3 se presentan las combinaciones uso y tipo del suelo, su agua útil calculada según la Ecuación 1, la evapotranspiración real, la superficie de la combinación, el ponderador ( $S_i/S_t$ ), la recarga, la recarga ponderada por la proporción de área y déficit anual. Se observa que, a pesar de la variedad de combinaciones entre suelo y uso, sólo existe déficit en las combinaciones entre menor profundidad radicular (campo natural y pastura) y el suelo arenoso, dada su menor agua útil por metro de espesor. La ETR es menor que la ETP solamente en el caso que exista déficit.

A partir de los resultados de recarga se observa que es posible distinguir 4 zonas de recarga diferente. Los valores de recarga son: 124 mm, 129 mm, 136 mm y 149 mm (Figura 6).

Uso del suelo	Tipo de suelo	AU (mm)	ETR (mm)	$S_i$ (km <sup>2</sup> )	$(S_i/S_t)$	Recarga (mm)	$R_i^*(S_i/S_t)$ (mm)	Déficit (mm)
Pastura	Arenoso	54	782	37.8	0.05	129	6	5
Pastura	Franco arenoso	126	787	300.5	0.38	124	47	-
Pastura	Franco	176	787	122.5	0.15	136	21	-
Pasto llorón	Franco arenoso	156	787	31.6	0.04	124	5	-
Pasto llorón	Franco	218	787	19.23	0.02	124	3	-
Rastrojo	Arenoso	60	787	18.45	0.02	124	3	-
Rastrojo	Franco arenoso	140	787	138.9	0.17	124	22	-
Campo natural	Arenoso	34	762	56.78	0.07	149	11	25
Campo natural	Franco arenoso	96	787	36.42	0.05	124	6	-
Campo natural	Franco	134	787	16.9	0.02	124	3	-

Tabla 3. Combinaciones de uso y tipo de suelo, agua útil y resultados del balance correspondiente. Los valores de ETR, recarga y déficit son valores medios para el período de análisis.

La máxima recarga se presenta en las zonas arenosas con campo natural que es coincidente con sectores medanosos. La recarga calculada para la zona de estudio una vez ponderada es de 125 mm.

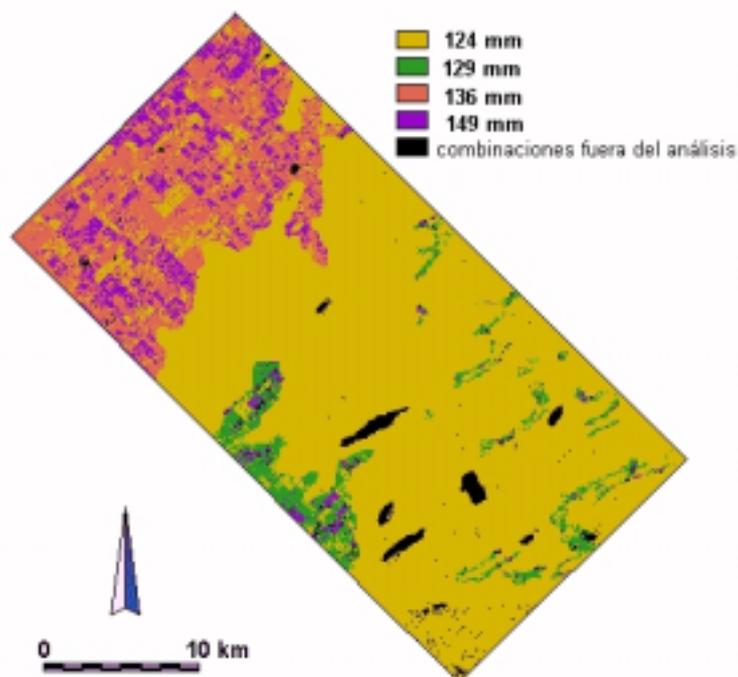


Figura 6. Zonas de recarga.

## CONCLUSIÓN

La metodología propuesta contribuye a evaluar la recarga al acuífero permitiendo discriminar su variación espacial. Evidentemente, un mapa como el obtenido es una poderosa herramienta para la gestión y protección del recurso hídrico subterráneo en el partido de Salliqueló. Este recurso es el único disponible para el consumo humano, animal y el uso industrial. Considerando que el agua dulce en la zona es escasa, merece resaltarse la importancia del resultado obtenido.

Se han identificado zonas con valores de recarga de 124 mm, 129 mm, 136 mm y 149 mm. Estos valores pueden cambiar si se modifica el uso del suelo, y es en estos casos que se puede recurrir a la clasificación de imágenes de satélite actualizadas y así recalcular la recarga para cada zona mediante el uso de un sistema de información geográfica..

## BIBLIOGRAFÍA

- Auge, M., Nagy, M y R. Mendez Escobar 1989. Hidrogeología del partido de Salliqueló, provincia de Buenos Aires, República Argentina. HGLL-II/61/TRA, Buenos Aires: 6 páginas.
- Doorembos, J. y Pruitt, W. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudios FAO: riego y drenaje 24, 144 páginas.
- González, N., M. Hernández Y C. Vilela. 1986. Léxico Hidrogeológico. Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires, La Plata, 249 páginas.
- Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic Press, New York, 364 páginas.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1993. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3763-9, 3763-10 y 3763-15. CIRN. Castelar.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1994. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3763-16. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Castelar.
- ITC. 1998. ILWIS 2.2. The Integrated Land and Water Information System: User's Manual. Computer Dept, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Morosi, J., Mogica N., Lamberti D., Vitalone C., Copani M., Ambrosio J., Gamallo, E., Roca, M. y G. Molinari 1987. Salliqueló: Plan de ordenamiento y desarrollo del partido. CIC, informe 39, La Plata: 326 páginas.
- Muller, E. 1996. Classification des images de teledetection. Centre d'Ecologie des Systemes Fluviaux. Centre National de Recherche Scientifique, 1-16 páginas.
- Sala, J.M. 1981. Geología en cuencas de llanura con énfasis en hidrogeología. Comité de Cuencas Hídricas, Área del Gran Rosario, 72 páginas.
- Salazar Lea Plaza, J. 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa. Geomorfología. Instituto Salesiano de Artes Gráficas, Buenos Aires, 1- 493 páginas.
- Tapia, A. 1935. Causas geológicas y consecuencias políticas de los cambios del cauce del Pilcomayo, en Formosa. ASAG T IV, 2. Buenos Aires.
- Thornthwaite C. W. y J. R. Mather, 1957. Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and water balance. Laboratory of climatology. Dresel Institute of technology, 10:185-311.
- Thornthwaite C. W., 1955. The water balance. Publication in Climatology 8 (1), Laboratory of Climatology. Centerton.
- Varni M., R. Rivas e I. Entraigas 2000. Caracterización hidrogeológica y regionalización ecológica de una zona arenosa ondulada del oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina: caso del partido de Salliqueló. I Joint World Congress on Groundwater, Actas en CD.