

**BALANCE HIDROLOGICO A NIVEL DE LA ZONA NO-SATURADA EN UN AREA DE  
LA CUENCA DE LOS ARROYOS MARTIN Y CARNAVAL.  
LA PLATA, PCIA. DE BUENOS AIRES. ARGENTINA.**

**Nilda González<sup>(\*)</sup>, Mario A. Hernández<sup>(\*\*)</sup> y V. Alejandro Ruiz de Galarreta<sup>(\*)</sup>**

(\*) Cátedra de Hidrogeología. Universidad Nacional de La Plata

Comisión de Investigaciones Científicas (CIC).

(\*\*) Cátedra de Hidrogeología. Universidad Nacional de La Plata - CONICET.

**ABSTRACT**

The resolution of a hydrologic balance at a Non-Saturated Zone (NSZ), carried out in a representative sector of the Martín-Carnaval basin, where a hydrometric register station is located since 1994, is presented. The balance is proposed for a non-steady flow, and is computed for the period 1995/96, whose pluvial registers are lower than those belonging to the previous years and to the historical mean. Since the other inputs were available, the real evapotranspiration could be determined at 734 mm. This value, when compared to those obtained with the serial resolution of Thornthwaite-Mather, Blaney-Criddle, Turc and Penman expressions - using for the three latter the value of the potential evapotranspiration as reference by means of the water balance - presents a very good approximation to the former, thus corroborating the usefulness of the balances in the NSZ to obtain information which is not as specific as direct measures, but more accurate than empirical formulae.

**INTRODUCCION**

Esta comunicación está referida a uno de los aspectos básicos de la investigación que la Cátedra de Hidrogeología de la Universidad Nacional de La Plata lleva a cabo en los sectores superior y medio de la Cuenca de los Arroyos Martín y Carnaval (Partido de La Plata, Provincia de Buenos Aires), con el apoyo de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC).

Contiene los resultados obtenidos para un lapso bianual (1995/96), relativamente menos húmedo que los años precedentes, intentando avanzar en la ejecución de un balance hidrológico a nivel de la Zona No-Saturada (ZNS) en el contexto de la investigación general.

Como más adelante se describe, el estudio se lleva a cabo en base a información generada por el Grupo a partir de 1994 con la puesta en operación de un área experimental, donde se implementó una estación de registración hidrométrica. Otros aspectos del mismo son analizados en Ruiz de Galarreta et al (1997, este Seminario).

Se agradece la gentil colaboración prestada por el Ing. Agr. Jorge Giménez, de la Cátedra de Pedología General de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo UNLP, en el tema de su especialidad.

**OBJETIVOS Y AREA DE ESTUDIO**

El objetivo es aproximar la resolución de un Balance Hidrológico teniendo como escenario a la Zona No-Saturada, en una área representativa dentro de la cuenca (Parque Ecológico Municipal La Plata).

Mediante la cuantificación de los insumos formularios del balance para régimen no-permanente, se pretende lograr un valor de evapotranspiración real y cotejarlo con el obtenido mediante el empleo de fórmulas empíricas y semiempíricas.

El área, localizada en el sector inferior de la cuenca media (Figura 1), ocupa una extensión aproximada de 200 has. e incluye materiales geológicos de origen continental, marino y de

transición entre ambos. Se ha implementado en ella una red monitorea compuesta por 11 freaímetros y una estación de registro dotada de un freaígrafo, un pluviógrafo, dos triadas tensiométricas y dos tubos de acceso para determinación de humedad por sondaje neutrónico. La descripción del instrumental es dada en otra contribución a este mismo Seminario (Ruiz de Galarreta et al, op cit). Se cuenta con información pluviográfica y termométrica diaria originada en una estación de primer nivel radicada en el Observatorio Astronómico La Plata (UNLP) asociada al Servicio Meteorológico Nacional, y en la Estación Experimental Ing. Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales UNLP. De la primera de ellas se obtuvieron además otros datos meteorológicos de interés.

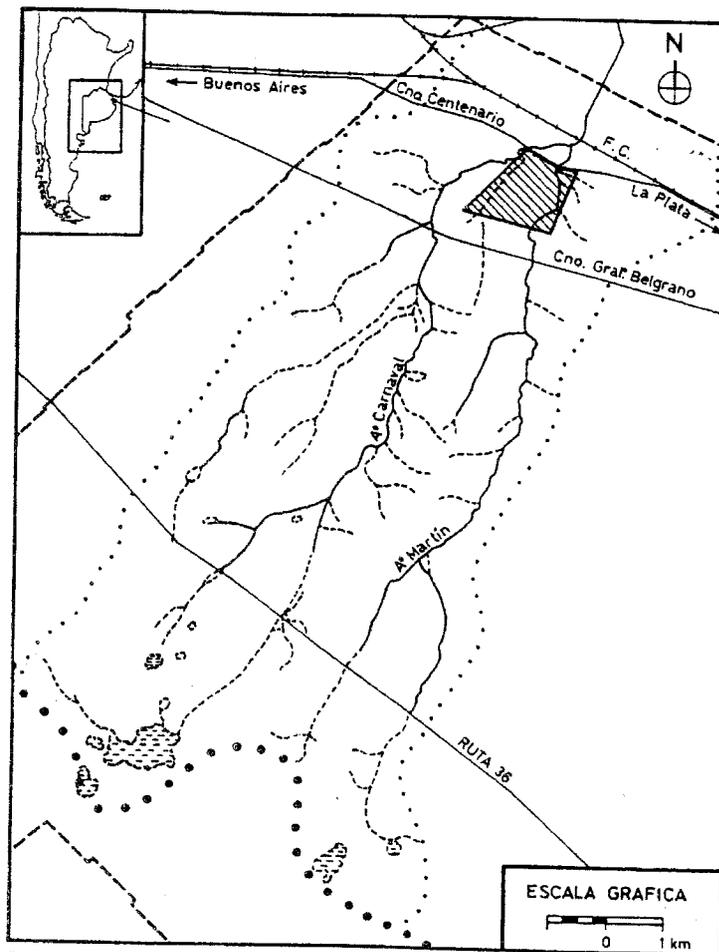


FIG. 1 - Ubicación de área de estudio.

### METODOLOGIA

El enfoque formular es sumamente sencillo, ya que parte de la conocida expresión de la ecuación del equilibrio hidrológico para régimen no-permanente, sin aportes o sustracciones antropogénicas:

$$P + AfSp + AfSb - EfSp - EfSb - Evtr = \pm \Delta Ssb \pm \Delta Ssp \quad (1)$$

donde:

- P** = Precipitación media anual  
**Afsp** = Afluencia superficial  
**Afsb** = Afluencia subterránea  
**Efsp** = Efluencia superficial  
**Afsb** = Efluencia subterránea  
**Evtr** = Evapotranspiración real  
 $\Delta Ssb$  = Variación almacenaje subterráneo  
 $\Delta Ssp$  = Variación almacenaje superficial

Esta expresión puede ser adaptada en función de las características físicas e hidrológicas de la comarca en general y el área en particular, de la manera que a continuación se sintetiza. Los dos álveos principales de la cuenca poseen una mínima razón de escurrimiento (Auge, 1995) y su estiaje está mantenido por escurrimiento básico y aportes antrópicos (efluentes domésticos, industriales y agrícolas), en un relieve llano a suavemente ondulado.

Dentro del área, el Arroyo Martín se halla canalizado, terraplenado y tiene una longitud de apenas 1.375 m, lo cual permite despreciar la afluencia/efluencia superficial, a excepción del escurrimiento básico como variable de egreso, y el almacenaje superficial dado el carácter llano del paisaje.

La composición del almacenaje subterráneo en cambio puede ser discriminada en el almacenaje capilar en la ZNS y el almacenaje freático, equivalente a la variación de la capacidad de almacenaje en dicha zona, razón por la cual se lo incluye en las fórmulas utilizadas.

En el primer caso el mayor volumen corresponde al almacenaje en la franja capilar continua, ya que el agua higroscópica + pelicular en una zona húmeda resulta prácticamente invariable, el agua capilar aislada es solicitada en todo tiempo por la vegetación y el agua grávida está implícita en la ecuación a través del aporte al almacenaje freático (infiltración efectiva).

La expresión resultante de esta adaptación de la fórmula (1) será entonces :

$$P + Afsb - Efsb - Eb - Evtr = \pm \Delta Ssb_c \pm \Delta Ssb_f \quad (2)$$

donde:

- Eb** = Escurrimiento básico  
 $\Delta Ssb_c$  = Variación almacenaje subterráneo franja capilar  
 $\Delta Ssb_f$  = Variación almacenaje subterráneo freático (capacidad de almacenaje ZNS)

Como el objetivo apunta a lograr un valor de evapotranspiración real, dado que es posible calcular las demás variables bajo las condiciones más arriba señaladas, la ecuación definitiva es:

$$Evtr = P + Afsb - Efsb - Eb \pm \Delta Ssb_c \pm \Delta Ssb_f \quad (3)$$

Los bordes del sistema bajo balance son : superior, la interfase atmosférica (superficie topográfica); inferior, la superficie freática; laterales, los límites convencionales del Parque Ecológico. Desde el punto de vista hidrológico, todos los bordes son considerados permeables. Nótese que los insumos referidos a los ingresos-egresos subterráneos transcurren por debajo del límite inferior, pero son incluidos dada su influencia directa en la movilidad de la superficie freática.

El modo de cálculo es inicialmente volumétrico y referido a los 24 meses que componen el lapso de balance (años 1995/96). Los resultados finales son expresados como altura de lámina/año.

Para el cómputo de la variable **Precipitación** se utilizan los valores diarios de los dos años, llevados a volumen para el área del Parque.

La **Afluencia y Efluencia subterráneas** son calculadas en base a sendas redes de flujo al 01-01-95 y 31-12-96 (Fig. 2) en base a las expresiones siguientes:

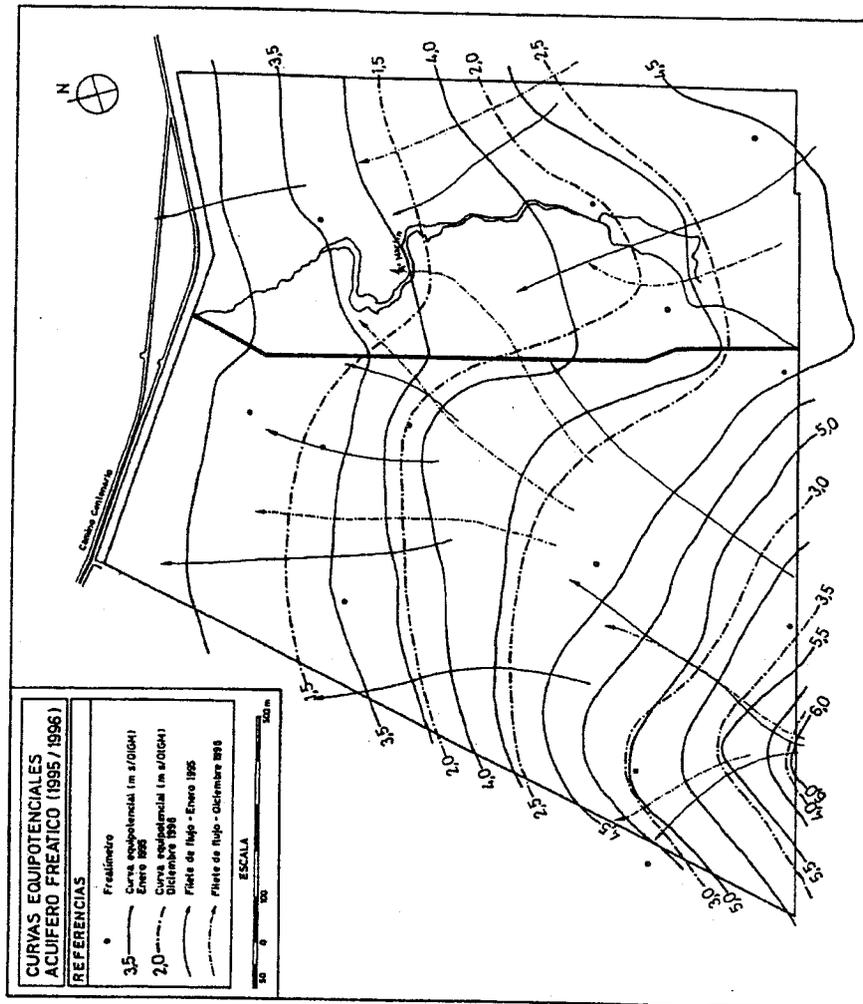


Fig. 2: Mapa equipotencial. Acuífero freático (1995-1996)

$$A_{fsb} = T \cdot i_i \cdot m_i$$

$$\text{Vol. } A_{fsb} \text{ total} = A_{fsb_{95}} (\text{m}^3/\text{d}) + A_{fsb_{96}} (\text{m}^3/\text{d}) / 2 \cdot 730 \text{ días}$$

$$E_{fsb} = T \cdot i_e \cdot m_e$$

$$\text{Vol. } E_{fsb} \text{ total} = E_{fsb_{95}} (\text{m}^3/\text{d}) + E_{fsb_{96}} (\text{m}^3/\text{d}) / 2 \cdot 730 \text{ días}$$

El Coeficiente de Trasmisividad ( $T$ ) es obtenido en base al de Permeabilidad ( $K$ ) del acuífero freático (7,5 m/día) y un espesor de 12,5 m. Los valores  $i_1$  son medidos en el sector de ingreso sobre las redes de flujo 1995 y 1996 respectivamente. Los de  $i_2$  en el sector de egreso para los mismos mapas. Idénticamente para las dimensiones  $m_1$  y  $m_2$ , a lo largo de las equipotenciales de borde de entrada y salida en ambos mapas.

El **Escorrimento básico** como egreso a través del canal del Ao. Martín, es calculado en base a la expresión de Dupuit aplicada al flujo hacia un dren, utilizando los mapas mostrados en la Fig. 2:

$$Eb = K. (h_1^2 - h_2^2) . L . 730 \text{ días} / l \quad \text{donde:}$$

$h_1$  = altura sup. freática en el punto  $h_1$

$h_2$  = altura sup. freática en el punto  $h_2$

$L$  = longitud del canal

$l$  = distancia  $h_1 - h_2$  sobre un filete de flujo

Es de hacer notar que en la red de flujo 1996, el Canal del Ao. Martín aparenta ser efluente-influente o en realidad indiferente (función del descenso de la superficie freática), por lo cual el valor volumétrico final resulta de atribuir 0 m<sup>3</sup>/día al momento de cerrar el lapso.

La **variación del almacenaje subterráneo freático** se obtiene de la diferencia de niveles freáticos al comienzo y fin del bienio, proporcionada por el freatígrafo en operación, la porosidad efectiva (coeficiente de almacenamiento) y el área del Parque.

Para el cálculo de la **variación del almacenaje subterráneo capilar** se utiliza la información de los sondeos neutrónicos, tomando como referencia el tenor de humedad en volumen de 40%, obtenido a su vez de los registros en cuentas/minuto y la densidad aparente medida sobre muestras extraídas coincidentemente. La porosidad efectiva que se utiliza está reducida en un 20% respecto a la del acuífero freático, teniendo en cuenta que participan poros subcapilares y fuerzas retentivas que no actúan en el medio totalmente saturado (Vauclin, 1994). El área a afectar es siempre la del Parque Ecológico.

Una vez obtenido el resultado perseguido en unidades de volumen para el bienio, se lo transformó en lámina anual para el área considerada.

El paso final fue la validación del resultado por cotejo con el producto de aplicar la metodología de Thornthwaite-Mather de modo seriado y el balance hídrico emergente de ella con los valores de evapotranspiración potencial obtenidos según las fórmulas de Penman, Turc (paso mensual) y Blaney-Criddle modificado.

De acuerdo con Carrica (1988), los resultados de un balance Thornthwaite seriado son más ajustados que los que ofrece el tratamiento clásico, de paso mensual modular. Para este caso se utilizó un valor de capacidad máxima de retención de agua dado por el tratamiento de las muestras de suelo en la membrana de Richards y por su densidad aparente, cotejados con las tablas de entrada textural dadas en Thornthwaite-Mather (1957) y Chambouleiron (1980). Se tomaron para los diferentes horizontes en cada tipo de suelo, de acuerdo con el porcentaje de ocupación de las siete unidades reconocidas dentro del Parque (Dangavs et al, 1997). En función de ello y de la profundidad radicular, el resultado se situó entre 150 mm y 200 mm, empleándose ambas cifras para el cómputo de la evapotranspiración real a partir de la potencial estimada por los cuatro métodos.

La evapotranspiración potencial de referencia que se logra de aplicar el método de Penman es convertida en evapotranspiración potencial ajustada utilizando coeficientes de transformación mensuales especificados para cobertura de gramíneas (Custodio y Llamas, 1983). Se utilizó también el programa de cálculo FAO-CROPWAT.

Para la fórmula de Blaney-Criddle, el cálculo de evapotranspiración potencial se realizó utilizando la modificación propuesta por FAO.

El balance hídrico ejecutado con las cuatro entradas (evapotranspiración potencial según Thorthwaite-Mather, Penman, Turc y Blaney-Criddle modificado) proporciona un rango de valores de evapotranspiración real, en torno al cual debería ubicarse el logrado a través de la metodología aquí expuesta.

## RESULTADOS

Para satisfacer la ecuación de balance hidrológico planteada, se tomó el volumen total de **precipitación** en los 24 meses, que resultó de 3,372 Hm<sup>3</sup>.

La **afluencia subterránea** fue calculada para una trasmisividad media de 100 m<sup>2</sup>/día, teniendo en cuenta el espesor saturado promedio para el período, el gradiente medido en la sección de entrada ( $1,25 \cdot 10^{-3}$  para 01/95 y  $1,5 \cdot 10^{-3}$  para 12/96) y el ancho de la sección (m = 1815 m para 01/95 y 1805 m para 12/96), resultando de 0,182 Hm<sup>3</sup>.

Para el cómputo de la **efluencia subterránea** se tomó igual temperamento en la sección de salida, con  $T = 100 \text{ m}^2/\text{día}$ ,  $i = 1,11 \cdot 10^{-3}$  (para 01/95);  $2,15 \cdot 10^{-3}$  (para 12/96) y  $m = 1050 \text{ m}$  (para 01/95); 1435 m (para 12/96), obteniéndose 0,156 Hm<sup>3</sup>.

El **caudal básico** fue calculado con los valores medidos en el mapa (Fig. 2) :  $h_1 = 5,25 \text{ m}$  ;  $h_2 = 4,00 \text{ m}$  ;  $L = 1375 \text{ m}$  y  $l = 650 \text{ m}$ , para la posición Enero 1995. Como a Diciembre de 1996 el canal no venía colectando caudal básico (ver Fig. 2), se ponderó el valor medio de 0,050 Hm<sup>3</sup> para el bienio.

Con la información freatigráfica de la estación hidrométrica se calculó la **variación del almacenaje subterráneo freático**, obteniéndose una diferencia de altura freática para las puntas del período (Fig. 3) de 1,76 m. La porosidad efectiva utilizada fue de 0,11 y el volumen de variación resultante alcanzó a 0,387 Hm<sup>3</sup>.

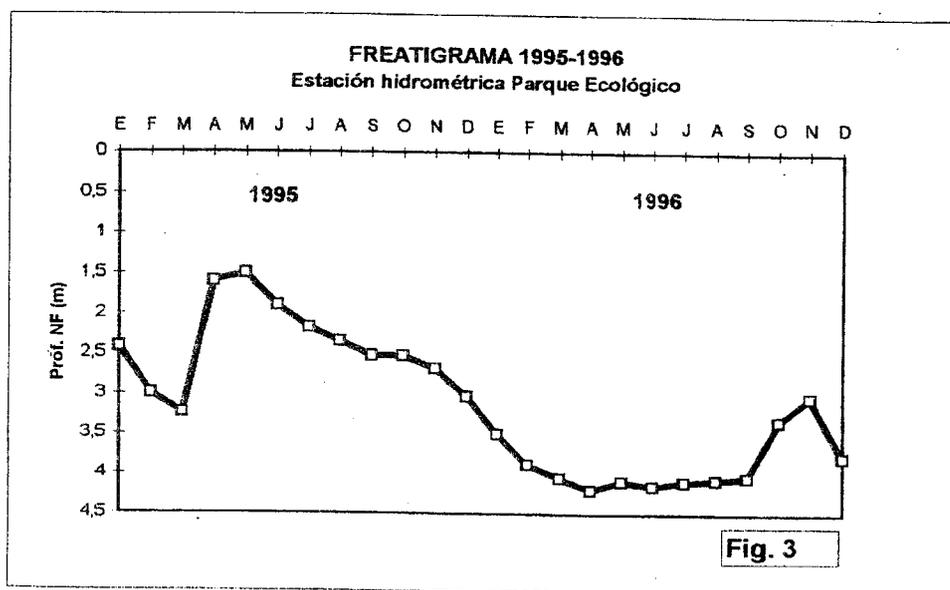


Fig. 3: Freatigrama 1995-1996. Estación hidrométrica Parque Ecológico.

Para la **variación del almacenaje subterráneo capilar** se tomó un valor de  $\Delta h$  de 0.15 m, extraído de los perfiles neutrónicos de humedad para comienzo y fin del lapso (Fig. 4) y de 0,088 de porosidad efectiva en base a los criterios expuestos en el ítem Metodología, arrojando un volumen de 0,026 Hm<sup>3</sup>.

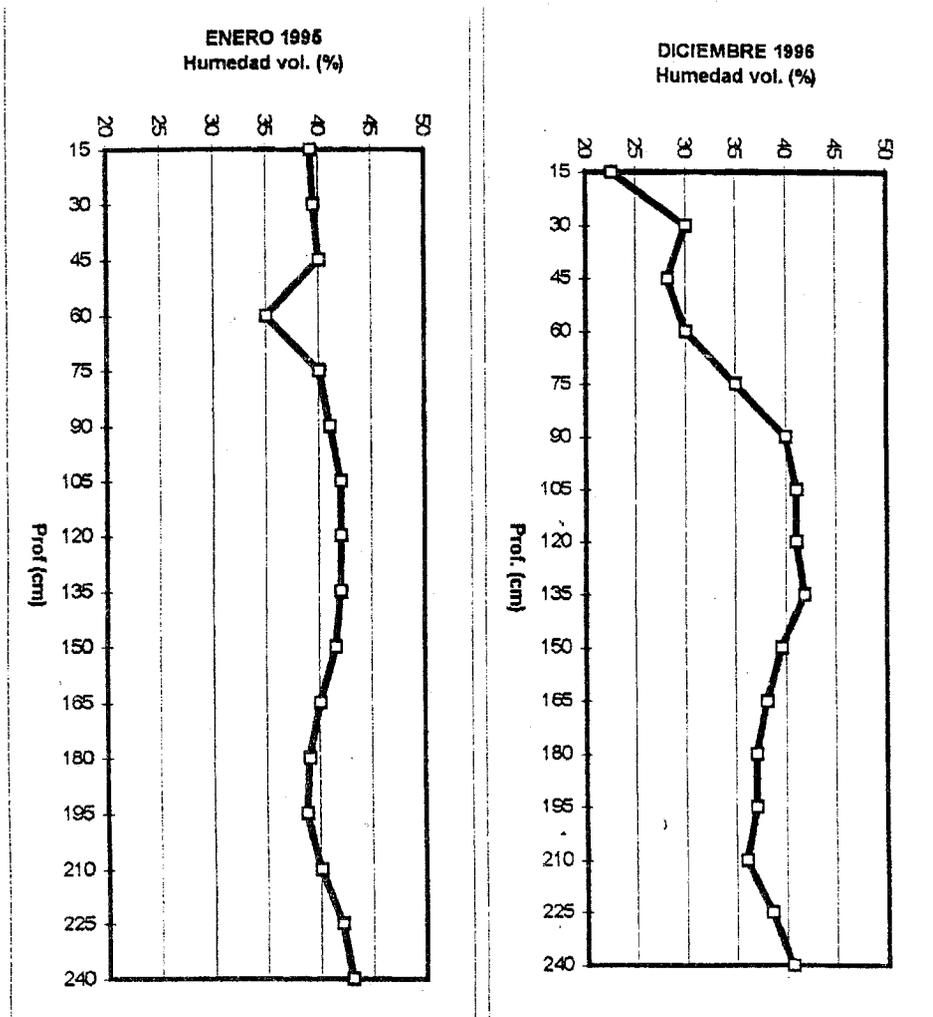


Fig. 4: Perfiles neutrónicos de humedad . Enero 1995-Diciembre 1996.

Se llega de esta manera a computar, utilizando la fórmula (3):

$$E_{vtr} = 3,372 \text{ Hm}^3 + 0,182 \text{ Hm}^3 - 0,156 \text{ Hm}^3 - 0,050 \text{ Hm}^3 - 0,026 \text{ Hm}^3 - 0,387 \text{ Hm}^3$$

$$E_{vtr} = 2,935 \text{ Hm}^3$$

Este volumen corresponde a una altura de lámina media de **evapotranspiración real de 734 mm/año** para los 200 Hm<sup>2</sup> de superficie del Parque

Para corroborar la verosimilitud de este resultado, se lo contrastó con los valores obtenidos de aplicar la metodologías empíricas de Thornthwaite-Mather, Turc, Blaney-Criddle modificado y semiempírica de Penman.

Los resultados del cotejo son los siguientes:

Método	Alm. suelo 150 mm	Alm. suelo 200 mm
Thornthwaite-Mather	742 mm	752 mm
Penman	732 mm	747 mm
Blaney-Criddle	722 mm	730 mm
Turc	807 mm	824 mm
<b>BALANCE ZNS</b>	<b>734 mm</b>	

## DISCUSION

De todas las variables participantes en la ecuación utilizada, la que ofrece mayor precisión de cálculo es sin duda la Precipitación, obtenida a partir de datos diarios.

En el caso de la afluencia-efluencia subterránea, los valores de coeficiente de Trasmisividad utilizados coinciden con los proporcionados por Auge (1995), no habiéndose computado el flujo de ingreso que no atraviesa íntegramente el predio, como es el caso del que ocurre en el sector SW (Fig. 2).

Para el cómputo del escurrimiento básico, se consideró igual a cero el que correspondería a fin de 1996, como ya se anticipara, debido a que de acuerdo a los niveles medidos, el Canal Martín fue perdiendo su carácter efluente hasta manifestarse como prácticamente indiferente en la mayor parte de ese año.

Los valores  $\Delta h_f$  y  $\Delta h_c$  del nivel freático y franja capilar respectivamente pueden considerarse como bastante precisos, dada la frecuencia de registro utilizada, al igual que la porosidad efectiva que coincide también con la dada por Auge (op cit). Para el caso del medio capilar, este valor fue reducido en mérito a no incluir espacios supercapilares y actuar fuerzas retentivas que no lo hacen en el medio saturado.

Una variable cuya estimación amerita una discusión más extensa es la evapotraspiración real.

El método de Thornthwaite-Mather, planteado para climas húmedos sub-húmedos, puede ser discutido en cuanto a su aplicabilidad en su expresión modular original. Pero como ya se comprobara (Carrica et al 1988 ; Carrica, 1993) sus limitaciones se minimizan al utilizárselo de manera seriada mes a mes (como en este caso) o día a día.

Los valores de evapotraspiración potencial obtenidos por Penman fueron calculados para una altura del viento de 2 m, factor a tener muy en cuenta ya que las velocidades que proporciona el Servicio Meteorológico Nacional lo son para 10 m de altura y requirieron por lo tanto de una corrección, muchas veces no realizada por otros autores en nuestro país, que incide lógicamente reduciendo los valores diarios.

La modalidad de incorporar los datos de evapotraspiración potencial mensual calculada por Penman, Turc o Blaney-Criddle modificada al balance hídrico según Thornthwaite, es perfectamente compatible con la definición original de éste y posibilita una comparación mucho más ajustada, siempre y cuando se utilicen valores de capacidad de retención procedentes de los suelos del lugar, para respetar el realismo pretendido

En este caso, dada la reconocida anisotropía horizontal originada en los diferentes tipos de suelo presente en el área del Parque Ecológico Municipal, se realizó una media ponderada de los valores de retención específica, logrados de algunas curvas parametrales obtenidas del procesamiento de

muestras con el equipo Richards y la determinación de su densidad aparente en laboratorio, validados con los rangos texturales obtenidos de tablas empíricas.

En todos los casos, la lámina adoptada correspondió a la suma de las láminas parciales calculadas para cada textura y profundidad de los distintos horizontes del suelo.

Otro punto de discusión podría ser la participación en la fórmula final de los ingresos-egresos subterráneos, ya que se plantea el balance para la ZNS. Sin embargo, la existencia comprobada de un flujo activo o local de intercambio y la influencia de aquellos en la posición de la superficie freática (límite inferior de la ZNS) aconseja su inclusión cuando, como en este caso, está avalada por un seguimiento suficientemente frecuente.

## CONCLUSIONES

Disponiendo de la instrumentación adecuada para aproximar un balance hidrológico a nivel de la ZNS, puede obtenerse un resultado bastante razonable de evapotranspiración real, al menos para las condiciones de este estudio (zona llana, clima húmedo, suelos perfectamente identificados, registros seriados).

La mayor proximidad del resultado con el obtenible mediante las metodologías de Thornthwaite-Mather, Penman y Blaney-Criddle modificada pareciera confirmar la validez de su empleo en la modalidad seriada para regiones de climas medios, utilizando la técnica de balance hídrico de la primera.

Resulta necesario contar con valores certeros de humedad disponible en el corrimiento de los balances hídricos, ya que su asignación aproximativa introduce distorsiones importantes, en especial en la distribución intranual de excesos y déficit.

En este caso, la ocurrencia intranual de los excesos en los balances hídricos por los diferentes métodos (a excepción del de Turc) coincide muy bien con la marcha freatigráfica, pudiéndose detallar esta relación en futuras aproximaciones al discretizar el balance en la ZNS con un paso resolutorio sub-anual.

Estos balances son una herramienta idónea para la extrapolación del monto de la evapotranspiración real a sectores con cobertura edáfica de similares características, con menor incertidumbre que las fórmulas empíricas y mayor representatividad que las mediciones directas.

Un paso futuro de aproximación debería incluir el cotejo de los resultados del balance en la ZNS con mayor detalle, con la resolución de un balance de energía aprovechando la información de la Estación La Plata Observatorio que cuenta con registros meteorológicos de buena precisión.

También es necesario en procura de mayor detalle, el empleo de la precipitación efectiva como entrada a los balances en lugar de la total, ya que descartar lluvias de muy baja intensidad para una sola tormenta acercará más los resultados a la realidad

## BIBLIOGRAFIA

- Auge, M.P.* (1995) "Manejo del agua subterránea en La Plata-Argentina". Convenio UBA-IDRC, T. I y II (ined). Buenos Aires.
- Carrica, J., A.Bonorino, G.Alvarez y R.Torrente* (1988) "Evaluación de métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración real en el ámbito de las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires". Actas II Jornadas Geológicas Bonaerenses, pp 589-598. Bahía Blanca.
- Carrica, J.C.* (1993) "El Balshort. Un programa de balance hidrológico diario de suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana" XII Congr. Geol. Arg. Actas IV:243-248. Mendoza.
- Custodio, E. y M.R. Llamas* (1983) "Hidrología subterránea". Omega (2a Ed.) Barcelona.
- Chambouleiron, J.L.* (1980) "Riego y drenaje", Fasc. 4.3.2. Ed. Acme SACI. Buenos Aires.

- Dangavs, N., C. Camilión, J.E. Giménez, M.A. Hernández, M.A. Hurtado y P.A. Imbelloni* (1997) "Estudio ambiental del Partido de La Plata y alrededores, Pcia. de Buenos Aires". Informe Programa BID-CONICET PID 0127 (inédito). IGS Fac. de Cs. Naturales y Museo UNLP. La Plata
- Hernández, M.A., V.A. Ruiz de Galarreta y A. Aragón* (1988) "Dinámica capilar de la zona no-saturada en un área piloto de la cuenca superior del Arroyo Tandileofú (Partido de Tandil)". Segundas Jornadas Geológicas Bonaerenses, pp. 537-548. CIC. Bahía Blanca.
- Hernández, M.A., A.V. Ruiz de Galarreta y L.F. Minghinelli* (1994) "Reconocimiento de la Zona No-Saturada y características ambientales del acuífero freático en la cuenca de los arroyos Martín-Carnaval. Provincia de Buenos Aires, Argentina. Metodología". II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea ALHSUD, I:55-66, Santiago de Chile.
- Ruiz de Galarreta, V.A., M.A. Hernández y N. González* (este Seminario, 1997) "Hidrodinámica de la zona no-saturada en el Parque Ecológico Municipal La Plata Pcia. de Buenos Aires (Argentina)". I Congreso Argentino de Hidrogeología y III Semin. Hispano-Arg. sobre Hidrol. Subterránea.
- Thornthwaite, C.W. y J.R. Mather* (1957) "Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance". *Climatology*. Drexel Inst. of Tech. Lab. of Climatology. N° 10,3:185-311.
- Vauclin, M.* (1994) "Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol" *Revue des sciences de l'eau*, 7:81-102. Grenoble.