

Caracterización de las Inundaciones en la Depresión del Salado (Buenos Aires, Argentina): Dinámica de la Capa Freática¹

J.M. Paruelo*, O.E. Sala*

ABSTRACT

Topography, soil and climate of the flooding Pampa, in eastern Argentina, determine the occurrence of floods of variable intensity and frequency. Ground water level is one of the factors responsible for floods. The objectives of this paper are: 1) to describe the groundwater dynamics as related to flood occurrence and 2) to analyze the factors responsible for their dynamics in the central part of the flooding Pampa. Results showed that groundwater level had a seasonal behavior with maxima in September-October (late winter and early spring). On the contrary, extraordinarily high values did not occur during a specific time of the year. The length of periods during which the groundwater level exceeded the threshold, representing floods in low topographic positions, had a geometric distribution. Long periods of flooding occurred with low frequency while short ones took place throughout most of the year. Monthly average groundwater level fluctuation cannot be explained by rainfall. The budget of input and output of water from the system and the level of groundwater during the previous year were the principal determinants of the maximum yearly level of the aquifer.

INTRODUCCION

La Depresión del Salado abarca 6 millones de hectáreas en la provincia de Buenos Aires (Argentina). Su proximidad a centros de consumo como las ciudades de Buenos Aires y La Plata junto a su potencialidad ganadera le otorgan una gran importancia económica (16, 20). La actividad pecuaria que se desarrolla en esta región se basa en su mayor parte, en la utilización de los pastizales naturales que cubren el 70% de su superficie (2).

La zona central constituye el área más típica de la Depresión del Salado (5, 9). Las características topográficas, edáficas y climáticas de la zona determinan inundaciones de frecuencia y magnitud variables, las cuales constituyen uno de los principales determinantes de la estructura y el funcionamiento del pastizal (15). Las precipitaciones frontales de alta intensidad

COMPENDIO

La Depresión del Salado, ubicada en el este de la Provincia de Buenos Aires (Argentina), presenta características topográficas, edáficas y climáticas que determinan inundaciones de frecuencia e intensidad variables. El nivel del agua freática es uno de los factores causantes o agravantes del anegamiento. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) describir la dinámica de la capa freática en relación a la posibilidad de que ocurran inundaciones debido a su ascenso y 2) analizar los factores responsables de esa dinámica en la parte central de la Depresión del Salado. Los resultados obtenidos indican que la altura de capa freática tuvo un comportamiento estacional con máximos en septiembre-octubre (fines de invierno y principios de primavera). A este patrón estacional se superponen situaciones extraordinarias con valores de capa freática muy altos que no parecen tener lugar en un momento definido del año. Los resultados mostraron que la duración de períodos con altura de capa freática por encima de niveles que representan inundaciones en las cotas más bajas presenta una distribución geométrica. Períodos largos de inundación ocurren con baja frecuencia mientras que períodos cortos tienen lugar la mayor parte de los años. La precipitación no permitió explicar la variabilidad en la altura promedio mensual de la capa freática. Por el contrario el balance de entradas y salidas de agua del sistema y el estado del acuífero el año anterior explicaron satisfactoriamente el nivel máximo de la capa freática.

constituyen el factor desencadenante del fenómeno de inundación (3, 19). Las características del fenómeno una vez desencadenado por una tormenta, estarían moldeadas por una serie de factores, todos ellos subordinados en última instancia a la geomorfología de la región. Entre estos deben considerarse:

- a) Las características de drenaje interno de los suelos, las cuales determinan un movimiento vertical lento del agua debido a la presencia de horizontes subsuperficiales muy arcillosos y alcalinos de escasa permeabilidad (5). Según Perelman (13) un Natraquoll característico de la región posee una conductividad hidráulica saturada en el horizonte B₂ de 0.3 cm/día.
- b) Posibles desbordes de arroyos y ríos, y/o el aporte de agua en manto de circulación lenta, a causa de la escasa pendiente, que no encuentra cauce debido a las características arceicas o endorreicas de la Depresión del Salado (19).

1 Recibido para publicación el 12 de noviembre 1988.

* Departamento de Ecología. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453 1417. Buenos Aires, Argentina.

- c) La presencia de una capa freática próxima a la superficie, evidente a través de claros síntomas de hidromorfismo como así también en la distribución de sales en el perfil (7). La capa freática al aumentar su nivel determina el anegamiento total o parcial del suelo, según alcance o no la superficie.

En las grandes llanuras sin pendiente, el transporte vertical de agua y el almacenamiento local (sobre el terreno o en la capa freática) asumen en el balance hidrológico una importancia mayor que la de la escurriencia superficial (6, 19). En estos ambientes la capa freática integra en el valor de su altura los componentes verticales del balance hidrológico. Esto marca la importancia y necesidad de considerar a la capa freática como factor relevante en el desarrollo de las inundaciones.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) analizar la dinámica estacional de la capa freática en relación a la posibilidad de que tengan lugar inundaciones debidas a su ascenso y 2) analizar los factores determinantes de dicha dinámica en el área central de la Depresión del Salado.

Se analizó el comportamiento de la capa freática en relación a:

- a) El momento del año en que tienen lugar las alturas máximas y mínimas de la capa freática y si estas presentan algún tipo de regularidad.
- b) La duración que pueden presentar los períodos con la capa freática próxima a la superficie.
- c) La frecuencia de dichos períodos.

Por otra parte, para llevar a cabo el segundo objetivo, se evaluó qué factores resultan responsables de los valores mensuales máximos de altura de la capa freática.

Descripción del área

La Depresión del Salado pertenece a la denominada "Pampa Inundable" (10). Constituye una extensa área extremadamente plana, con muy escasa pendiente y consecuentemente con muy bajo potencial morfogenético. Sólo un curso de agua importante (el río Salado) cruza la región. El sistema de drenaje consta además de una red más o menos interconectada de lagunas. El área central constituye desde un punto de vista geomorfológico, edáfico y de vegetación la más típica (9).

El clima general es templado, subhúmedo hacia el oeste y húmedo hacia el Atlántico. La mayor parte

de los suelos son asociaciones halomórficas. Los principales grandes grupos son los Natraquolls y Natraqualfs (8). A diferencia de otros lugares del mundo estas unidades taxonómicas ocupan aquí extensas superficies (1).

MATERIALES Y METODOS

Para el estudio del comportamiento de la capa freática se utilizaron registros diarios de altura de la capa freática para dos localidades, ubicadas en la parte central de la Depresión del Salado y distantes aproximadamente 90 km entre sí: Real Audiencia ($36^{\circ} 80' S - 36^{\circ} W$) y Dolores ($36^{\circ} 18' S - 57^{\circ} 42' W$). Los datos corresponden a freatómetros del Servicio Meteorológico Nacional ubicados en posiciones topográficas relativamente altas.

El registro utilizado para Real Audiencia (23.62 msnm) fue de 41 años (1942-1982). Para la localidad de Dolores se contó con datos de dos estaciones ubicadas en distintas posiciones topográficas. Los registros comprenden 31 años (1913-1943) y 27 años (1942-1968) para Dolores "A" (7.59 msnm) y Dolores "B" (8.52 msnm) respectivamente.

A fin de estudiar los factores que explican el comportamiento de los valores mensuales de capa freática se utilizaron datos de precipitación mensual de Dolores para el período 1933-1948. Estos se correlacionaron con la altura media mensual de la capa freática. Se calculó a su vez el balance hídrico seriado (12) para dicho período, a fin de correlacionar los excesos invernales con la altura media mensual máxima de la capa freática. El balance hídrico seriado se basa en el método propuesto por Thornthwaite (17, 18), que computa déficit y excesos a partir de la precipitación y la evapotranspiración mensual, esta última calculada a partir de valores de temperatura media mensual. Los datos de precipitación, temperatura media mensual y capa freática fueron tomados del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.).

RESULTADOS

Los promedios mensuales de altura de capa freática para las tres estaciones consideradas, muestran una clara variación estacional, con máximos en setiembre-octubre y mínimos en marzo-abril (Fig. 1). La altura máxima promedio presenta, al igual que la altura promedio, un diseño estacional, con picos de máxima y mínima en primavera (octubre) y otoño (abril) respectivamente. Por el contrario, no se pudo detectar una clara tendencia estacional para los máximos absolutos de altura de capa freática (Fig. 2).

La Fig. 3 presenta, para cada mes, el número de días con altura de capa freática por encima de distintos umbrales en relación al total de días en que estos

umbrales fueron superados (número de días con altura de capa freática por encima del umbral j en el mes i / total de días con altura de capa freática por encima

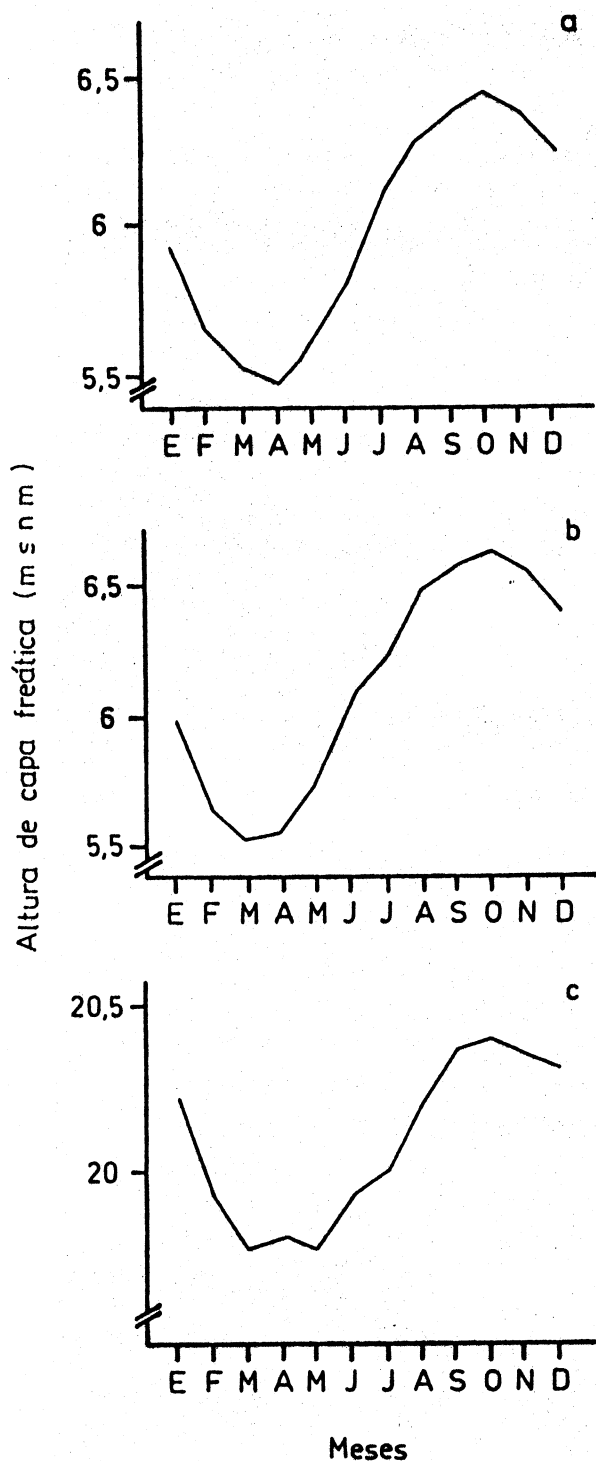


Fig. 1. Promedio mensual de la altura de la capa freática (metros sobre el nivel del mar) para las estaciones Dolores A (a), Dolores B (b) y Real Audiencia (c).

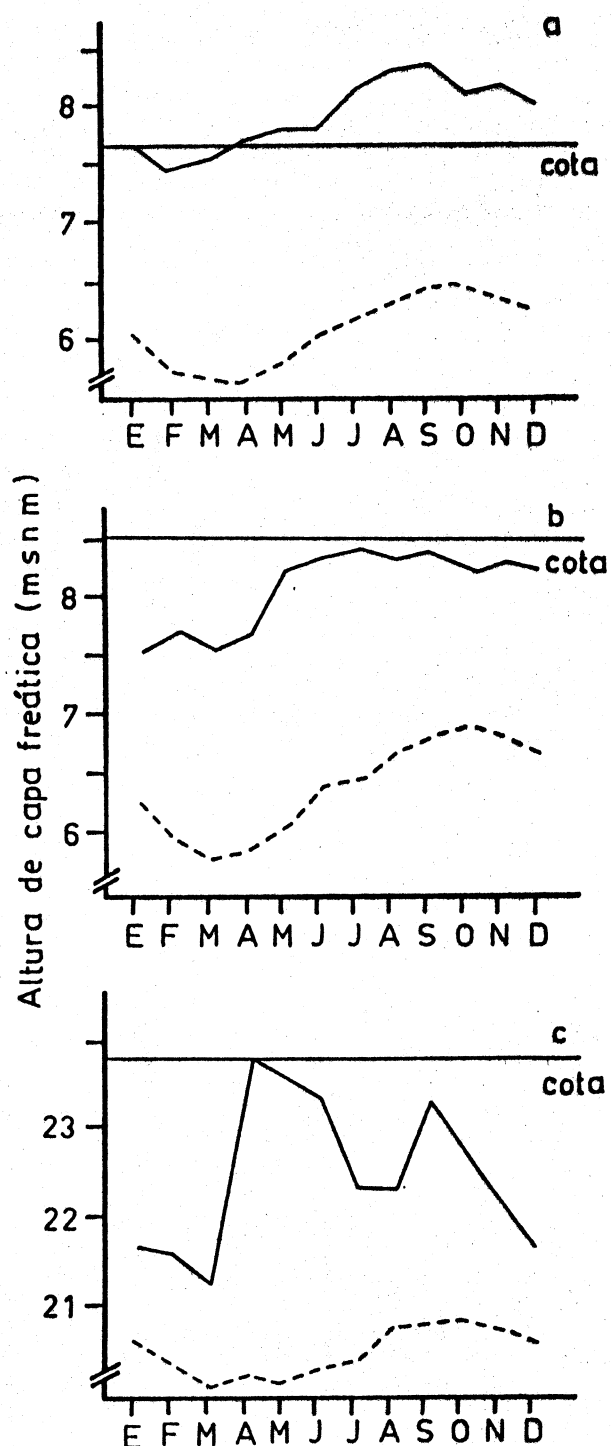


Fig. 2. Altura máxima promedio (- -) y altura máxima (-) absoluta (metros sobre el nivel del mar) para las estaciones Dolores A (a), Dolores B (b) y Real Audiencia (c).

del umbral j en el año). A fin de establecer un criterio común para las tres estaciones los umbrales elegidos para este análisis fueron la altura media de la capa freática más 1, 1.4, 1.8 y 2.0 desvíos estándar. El umbral inferior fijado ($M + 1$ DS) corresponde a 6.85 m para Dolores "A", a 7.23 m para Dolores "B" y 20.9 para Real Audiencia. Las frecuencias de días en los cuales la capa freática superó dicho umbral, ponen nuevamente de manifiesto el comportamiento estacional de la tabla de agua: las máximas frecuencias corresponden a los meses de primavera y las mínimas a los de fin de verano-principios de otoño (Fig. 3a).

Este patrón de comportamiento resulta menos evidente para los umbrales siguientes, para los cuales la estacionalidad comienza a diluirse (Fig. 3b y 3c). Al considerar alturas extremas (superiores a $M + 2$ DS) las frecuencias relativas mensuales no presentan, al igual que las alturas máximas absolutas, un patrón estacional (Fig. 3d).

Las fechas promedio de comienzo de períodos en los cuales la capa freática supera los distintos umbrales se concentran en los meses invernales para todos los casos considerados (Cuadro 1). Los umbrales supe-

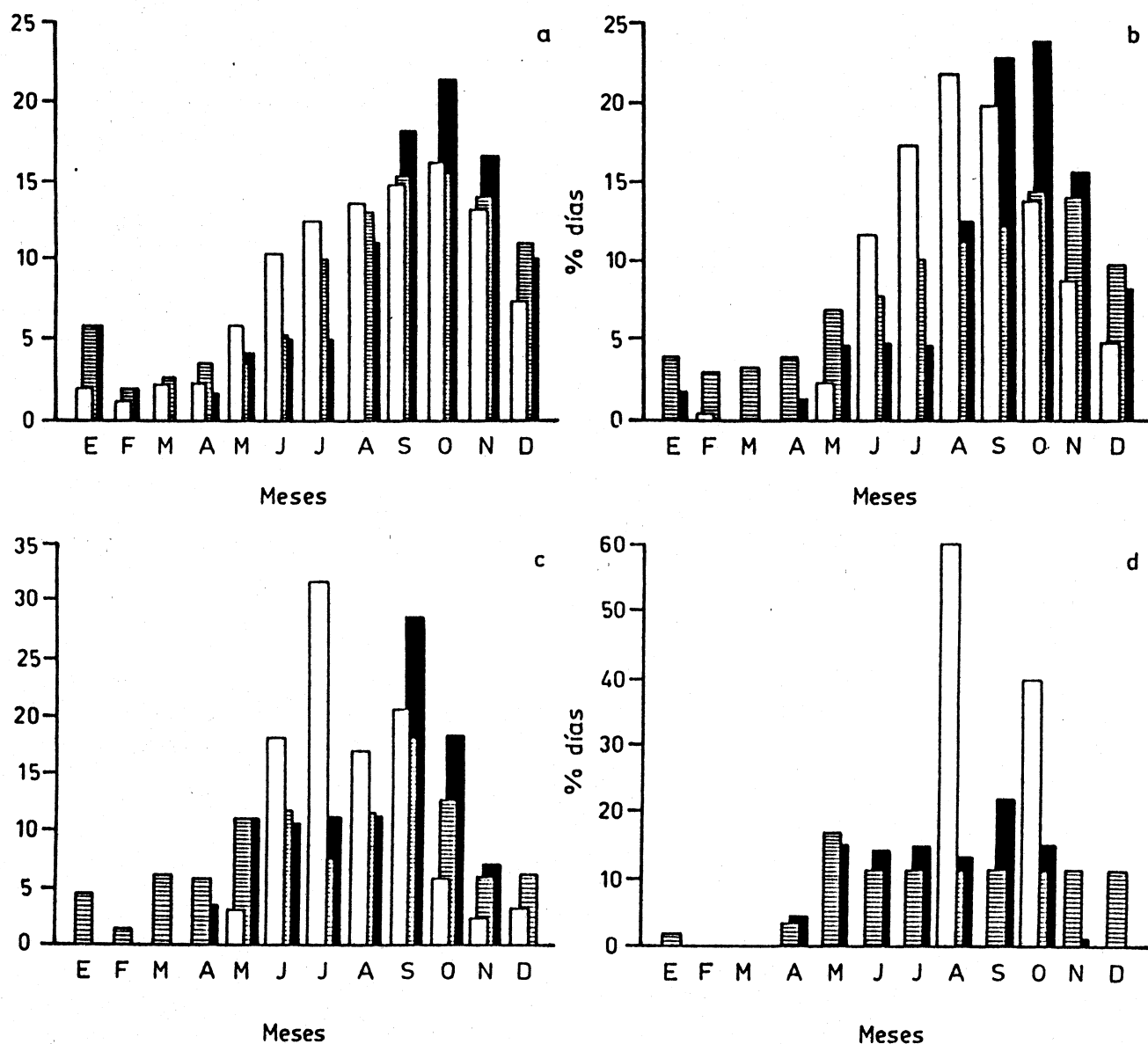


Fig. 3. Número de días por mes con altura de capa freática superior a la Media + D.S. (a), $M + 1.4 \times D.S.$ (b), $M + 1.8 \times D.S.$ (c) y $M + 2 \times D.S.$ (d), en relación al total de días en que estos umbrales fueron superados en el año. ■ Real Audiencia, ■ Dolores A y ▨ Dolores B.

riores presentaron una mayor dispersión de las fechas de comienzo.

Cuadro 1. Fecha de comienzo de períodos con altura de capa freática por encima de los distintos umbrales (FM fecha media. Intervalo de confianza $P < 0.01$). Para Dolores A no se calculó el intervalo de confianza para la fecha de comienzo de períodos con altura de capa freática superior al último umbral por que estos eventos resultaron muy infrecuentes.

Umbral		Dolores A	Dolores B	Real Aud.
X + D.E.	FM	31/7	9/7	1/9
	Int.	18/6 - 12/9	17/4 - 1/10	13/8 - 20/9
X + 1.4 D.E.	FM	19/7	5/7	5/8
	Int.	27/5 - 10/9	14/2 - 19/11	8/6 - 2/10
X + 1.8 D.E.	FM	1/7	12/7	14/8
	Int.	-	23/3 - 31/10	2/4 - 26/12

Para las tres estaciones analizadas, en un 41 a un 48% de los años la capa freática superó en algún momento el umbral inferior ($M + DS$) y entre un 6 y un 13% el superior ($M + 2 DS$) (Cuadro 2). Esta situación representa para Dolores "A", la estación ubicada en la cota más baja entre las estudiadas, la presencia de la capa freática una vez cada dos años en los primeros 74 cm del suelo y una vez cada 16 años por encima de la superficie.

La distribución de frecuencias de duración de períodos para los cuales la capa freática supera el umbral $M + 1.8 DS$ para las tres estaciones tomadas en conjunto ajusta satisfactoriamente ($P < 0.01$) a una distribución geométrica. La curva ajustada por mínimos cuadrados se presenta en la Fig. 4. Este comportamiento resulta análogo al presentado por distribuciones de secuencias de días secos y de días con lluvia (4).

Cuadro 2. Frecuencia relativa de años en los que la capa freática superó los distintos umbrales (número de años en los que la capa freática superó el umbral/número total de años considerado).

	Dolores A	Dolores B	Real Audiencia
Umbral	F.R.%	F.R.%	F.R.%
X + D.E.	48.4	41.7	45.8
X + 1.4 D.E.	35.5	29.2	37.5
X + 1.8 D.E.	12.9	25.0	20.8
X + 2 D.E.	6.5	12.3	12.5

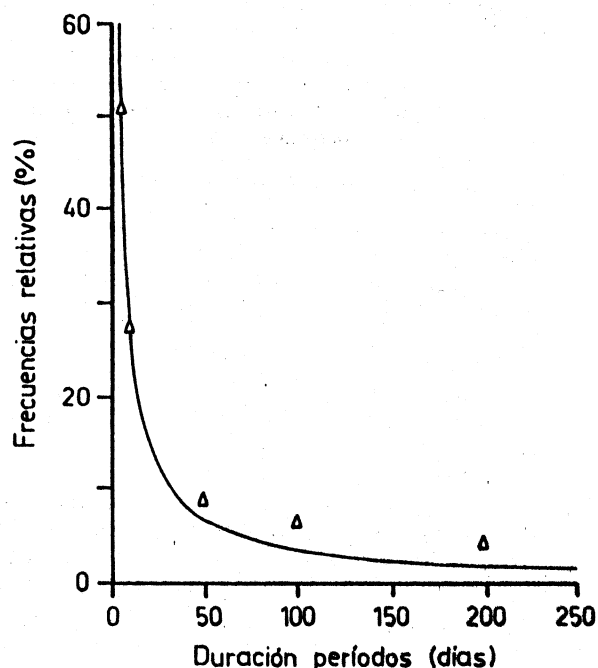


Fig. 4. Distribución de frecuencias de duración de períodos para los cuales la capa freática supera el umbral de $M + 1.8 \times D.S.$ ajustada por mínimos cuadrados ($y = 216 \cdot x^{-0.88} r^2 = 0.99$) (línea llena). Los triángulos representan los valores observados.

La altura media mensual de la capa freática no puede ser explicada por la precipitación mensual ($r^2 = 0.022$, $gl = 182$ ns). Esto indica que la altura de la capa freática depende de otros factores además de la entrada de agua al sistema. Entre estos factores los más importantes son el balance hídrico y el nivel de la capa freática en el ciclo anterior. El balance hídrico seriado puso de manifiesto la existencia de excesos hídricos invernales prácticamente todos los años de la serie estudiada.

Los excesos invernales acumulados permitieron explicar una parte importante de la variancia de las medias mensuales máximas del año ($r^2 = 0.47$, $F_{1,14} = 12.61$ $P < 0.01$). Cuando se incluye el valor mensual mínimo previo al pico de altura de capa freática, el porcentaje de la variancia explicado aumenta al 65% ($r^2 = 0.65$). La ecuación de la superficie de respuesta ajustada es:

$$CF_{\max} = 3.4 + 0.004 \cdot Exc_{\text{acum}} + 0.50 \cdot CF_{\min}$$

en donde CF_{\max} es el promedio mensual máximo de altura de capa freática, CF_{\min} el mínimo previo al máximo anterior y Exc_{acum} los excesos, calculados mediante el balance hídrico seriado, acumulados entre el valor mínimo y máximo de altura de capa freática ($F_{\text{parcial } Exc_{\text{acum}}} = 18.95$ $P < 0.01$, $F_{\text{parcial } CF_{\min}} = 6.94$ $P < 0.025$) (Fig. 5).

Cuadro 3. Análisis de correlación entre altura de capa freática media mensual para distintos pares de localidades de la Depresión del Salado. Para cada par de estaciones se presenta el número de años considerado, el coeficiente de correlación y el valor de probabilidad asociado.

Estaciones	No Datos	r
Real Audiencia-Las Flores	39	0.529 ($P < 0.01$)
Chascomus-Dolores	139	0.557 ($P < 0.01$)
Real Audiencia-Dolores	220	0.600 ($P < 0.01$)

DISCUSION

Sobre la base de los resultados presentados es posible separar en la parte central de la Depresión del Salado, dos patrones de comportamiento de la capa freática. En primer lugar es posible definir un patrón cíclico de recurrencia anual, el cual presenta picos de máxima en primavera (octubre) y de mínima a fines de verano-principios de otoño (marzo-abril) (Fig. 1). Este patrón responde, pues, a un modelo de recarga otoño-invernal coincidiendo con los momentos de

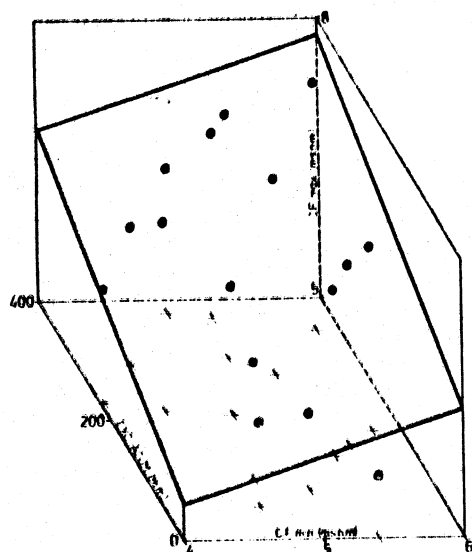


Fig. 5. Altura media mensual máxima de la capa freática para los distintos años durante el período 1933-1948, en función de los excesos hídricos acumulados durante el invierno y la altura media mensual mínima en el ciclo anterior. Con trazo grueso se indica la superficie de respuesta ajustada ($C.F. \max = 3.4 + 0.004 \cdot Exc \text{ acum} + 0.50 \cdot C.F. \min$, $r^2 = 0.65$, $p < 0.01$). Los puntos llenos corresponden a los ubicados por encima de la superficie de respuesta y los grisados a los ubicados por debajo. Las cruces representan las proyecciones de los puntos en el plano definido por las variables independientes.

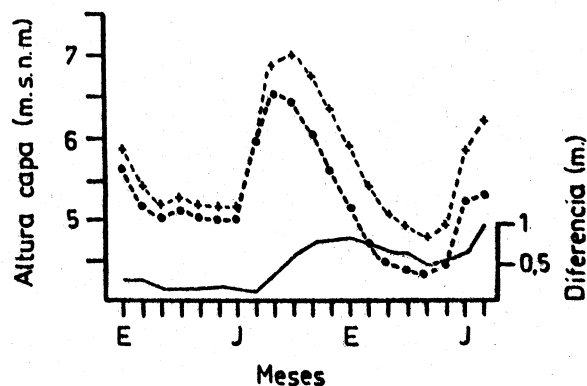


Fig. 6. Comportamiento de la capa freática a lo largo tiempo para las estaciones Dolores A (• •) y Dolores B (+ +). La línea llena corresponde a la diferencia de altura entre ambas estaciones.

excesos de agua en el balance hidrológico. Superponiéndose a este patrón, se insinúa otro responsable de los valores extremadamente altos de capa freática, el cual no muestra, como fue señalado, un comportamiento estacional, ni presenta los picos de máxima y mínima en momentos definidos del año (Fig. 2). Esto podría deberse a que responden a mecanismos distintos a los que determinan el comportamiento de ciclo anual de la capa freática. Las alturas extremas de capa freática, presentan un patrón que se superpone al patrón estacional, y cuya recurrencia no es posible establecer dado el gran intervalo entre eventos. Las inundaciones asociadas a cada uno de dichos patrones constituirían disturbios distintos y ejercerían por lo tanto distintos efectos sobre el ecosistema (14).

La extrapolación de estos resultados a otras situaciones topográficas se ve dificultada porque la capa freática no presenta un comportamiento uniforme en el espacio. El nivel de la capa freática depende del balance hídrico del suelo y del nivel previo del acuífero, tal como lo pone de relieve la relación presentada en la Fig. 5. El balance hídrico a su vez está controlado no sólo por la precipitación sino también por las características fisicoquímicas del suelo, la vegetación, la cobertura y el grado de alteración antrópica. Esto determina que la distribución de la capa freática en una determinada área presente, en los sistemas donde el movimiento vertical de agua resulta de mucha mayor importancia que el horizontal, un patrón tipo mosaico, en correspondencia con la variación espacial de los factores locales responsables de la recarga y las pérdidas (6). Para la Depresión del Salado este comportamiento puede ponerse de manifiesto al analizar la altura de la capa freática en dos estaciones muy próximas pero ubicadas en distinta posición topográfica (Dolores "A" y "B") (Fig. 6). Si bien la altura media mensual de capa freática entre las dos estaciones mostró una alta correlación ($r^2 = 0.85$, $P < 0.1$)

la diferencia en los promedios mensuales es grande variando entre 86 y 0.3 cm. Esto refleja la influencia tanto de factores regionales como locales, principalmente las características edáficas y topográficas.

La correlación en el comportamiento de la capa freática entre sitios distantes y pertenecientes a distintos paisajes dentro de los definidos para la región (11) (Cuadro 3) permiten extender las conclusiones respecto de la estacionalidad, momento del año en

que tienen lugar los máximos y duración, al resto de la región central de la Depresión del Salado. El patrón de variación estacional respondería a señales de grano grueso (características generales del mesoclima: precipitación y demanda atmosférica), que actuarían a una escala regional. Por otra parte, la altura alcanzada en un determinado lugar respondería, en un nivel jerárquico subordinado al anterior, a factores locales de grano fino (características edáficas y topográficas).

LITERATURA CITADA

1. BERASATEGUI, L.A.; BARBERIS, L.A. 1982. Los suelos de las comunidades vegetales de la región Castelli-Pila, Depresión del Salado (Provincia de Buenos Aires). Universidad de Buenos Aires, Revista de la Facultad de Agronomía 3:13-25.
2. DEREGIBUS, V.A.; CAHUEPE, M.A. 1983. Pastizales naturales de la Depresión del Salado: Utilización basada en conceptos ecológicos. Rev. Inu. Agrop. 18(1):47-78.
3. DURAN, D. 1982. La alternancia de sequías e inundaciones un problema clave en la Pampa Deprimida. Arg., Oikos. 117 p.
4. HERSHFIELD, D.M. 1981. Frequency of dry day sequences. Water Resources Bulletin 17:317-320.
5. INTA. (Arg). 1977. La Pampa Deprimida: Condiciones de drenaje de sus suelos. Centro Nacional de Investigación Agropecuaria. Departamento de Suelos. Publicación no. 154. 167 p.
6. KOVACKS, G. 1983. Particularidades hidrológicas de las grandes llanuras. In Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras (1983, Olavarría, Arg.). 555p.
7. LAVADO, R.S. 1983. Occurrence of magnesium-bearing calcites in Pampean soils, Argentina. Geoderma 29:59-66.
8. LAVADO, R.S.; TABOADA, M.A. 1988. Water, salt and sodium dynamics in a Natraquoll in Argentina. Catena 15:577-594.
9. LEON, R.J.C. 1975. Las comunidades herbáceas de la región Castelli-Pila. La Plata, Arg., C.I.C. Monografías 5:73-108.
10. LEON, R.J.C. s.f. Geographic limits of the region. In Natural Grasslands of South America: Temperate subhumid grasslands. Ed. by A. Soriano. Also in: Ecosystems of the World; Natural Grasslands. Ed. by R.T. Coupland. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company. v. 8 (en prensa).
11. MOVIA, C. 1975. Relevamiento fisiográfico de la región Castelli-Pila. La Plata, Arg., C.I.C. Monografías 5:19-46.
12. PASCALE, A.J.; DAMARIO, E.A. 1977. El balance hidrológico seriado y su utilización en estudios agroclimáticos. Rev. Fac. Agr. de La Plata 52:20-35.
13. PERELMAN, S. 1984. Modelo de circulación de agua en una comunidad de pastizal de la Depresión del Salado. La Plata, Arg., C.I.C. [Informe.]
14. PICKETT, S.T.A.; WHITE, P.S. 1985. The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Academic Press Inc. 457 p.
15. SALA, D.E.; SORIANO, A.; PERELMAN, S. 1981. Relaciones hídricas de algunos componentes de un pastizal de la Depresión del Salado. Rev. Fac. de Agronomía 2:1-10.
16. SORIANO, A. Natural Grasslands of South America: Temperate subhumid grasslands. In Ecosystems of the World; Natural Grasslands. Ed. by R.T. Coupland. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company (en prensa).
17. THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. 1955. The water balance. N.J., EE.UU., Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology 8(1). 104 p.
18. THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. N.J., EE.UU., Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology 10(3):185-311.
19. TRICART J.C. 1973. Geomorfología de la Pampa Deprimida. Arg., INTA. Colección Científica XII. 202 p.
20. VERVOORST, F.B. 1967. La vegetación de la República Argentina. VII. Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado (Prov. de Buenos Aires). INTA. Serie Fitogeográfica no. 7. 262 p.