

Impacto de las Sequías en la Recarga Natural al Acuífero Libre

María del Valle Venencio, Norberto O. Garcia

Instituto Nacional del Agua (INA) – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL)
C.C. 217, Ciudad Universitaria, Paraje El Pozo – (3000) Santa Fe, Argentina – mvenencio@fich.unl.edu.ar

Recibido: 30/06/04 revisado: 25/11/04 acepto: 28/03/05

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó el comportamiento del acuífero libre en el contexto de la variabilidad climática estacional e interanual, particularmente de la precipitación durante los períodos secos en el ámbito de la provincia de Santa Fe. Se buscaron cuasi-periodicidades y tendencias, tanto de la precipitación como del nivel freático.

Para definir las sequías se utilizó un análisis decílico de los registros históricos de la precipitación, y la variabilidad espacial y temporal se analizó mediante un Análisis Espectral de los Años Compuestos Secos para establecer diales armónicos, que caracterizan la situación climática de cada región. Asimismo se aplicaron diferentes métodos estadísticos para evaluar la respuesta del acuífero libre durante las sequías.

Se observó que la ocurrencia de sequías anuales a partir de 1970 disminuyó su frecuencia en toda la Provincia de Santa Fe verificándose un promedio de una sequía cada tres años hasta 1969 y, una cada cinco años a partir de esta última fecha. Desde el punto de vista de los montos relativos de agua caída, se observó que se producen períodos secos más intensos en otoño, invierno y primavera que durante el verano o a nivel anual.

El comportamiento espacial y temporal de los períodos secos mostraron que los valores de amplitud y fase de los tres armónicos más significativos de las series corresponden a los años compuestos secos. Tanto las lluvias de verano como las sequías invernales acentúan la amplitud del segundo armónico, que contiene información de los montos de lluvia además de representar al ciclo anual de la precipitación, mientras que las sequías de verano lo atenúan. En el acuífero se puede inferir la baja variabilidad temporal del nivel freático en contraste con la alta variabilidad de la precipitación.

Los diales armónicos en la región mostraron gráficamente que la segunda componente espectral es la más significativa; mientras que la primera indica su relación con la región EL NIÑO. En los niveles freáticos se observa una caracterización regional similar a la de las lluvias, con el norte homogéneo respecto del primer armónico y también en el centro-sur.

Se verificó una disminución generalizada de la recarga por precipitación en toda la región estudiada durante los períodos de sequía que se manifestó con descensos sostenidos de los niveles freáticos. Para dos de las estaciones se estimó una recarga entre el 2.2 y 5.9 % de la precipitación en dichos períodos.

La disminución del nivel freático en los años compuestos secos osciló entre 0.58 y 3.79 metros con una variación del volumen almacenado entre 580 y 3790 m³/ha.

Los resultados indican, en promedio, que en la región norte y la región centro sur de la Provincia de Santa Fe tienen un comportamiento homogéneo, en cuanto a intensidad y época de ocurrencia, mientras que en el extremo sur hay un comportamiento con características particulares durante los eventos secos.

Palabras clave: Relaciones atmósfera-acuífero, sequías, recarga.z

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico subterráneo, particularmente el acuífero libre, cuya principal fuente de recarga natural es la precipitación, es una parte esencial del ciclo hidrológico e integra la variabilidad meteorológica local. Responde con variaciones en el volumen almacenado y durante sequías prolongadas acusa no sólo profundizaciones sostenidas sino también cambios en su calidad. Estimar la disminución de riesgos por ocurrencia de sequías

as posibilitará un uso adecuado de los recursos hídricos subterráneos ya que su manejo debe realizarse integrado al clima.

La provincia de Santa Fe (Figura 1) cuenta aproximadamente con 20.500 ha bajo riego suplementario, de las cuales 11.000 ha son ocupadas por arroz, 4.000 ha por hortalizas y flores, 2.000 ha para caña de azúcar y 4.000 ha dedicadas a cultivos extensivos, fundamentalmente trigo, soja y maíz (Pecorari C., 2000).

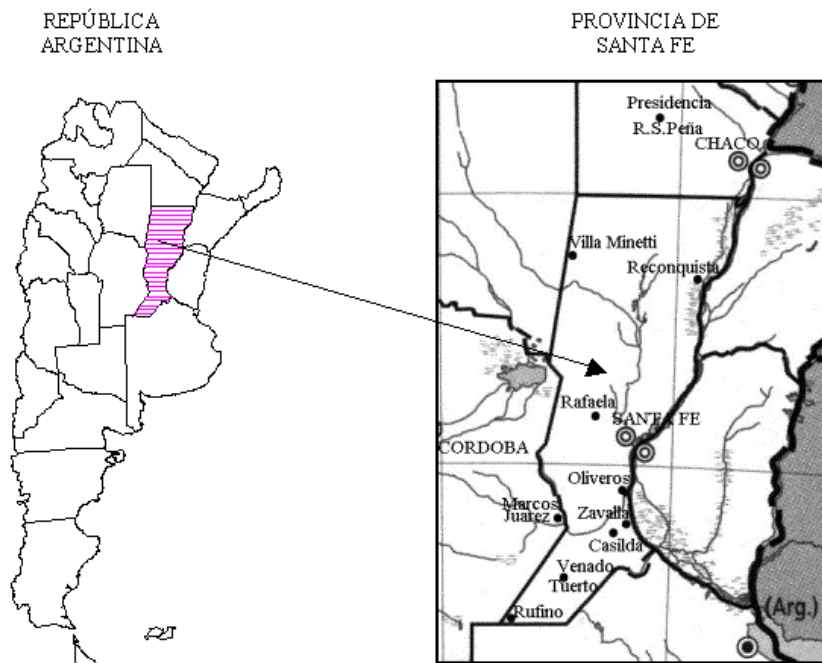


Figura 1. Área de estudio

Las sequías, cuyo impacto es importante en la Provincia de Santa Fe, han sido tratadas extensamente en los medios de comunicación, que han expresado en artículos periodísticos comentarios tales como: *“Se piden una serie de medidas urgentes para afrontar la crítica situación en que la sequía colocó a la región pampeana”, “Hay 1300 productores en estado de desastre”, “Amplian área declarada en desastre agropecuario”, “Preocupación en el agro, la sequía ataca de nuevo”, “El Gobierno prorrogó la emergencia agropecuaria”, “La economía del interior se vió seriamente comprometida por una prolongada sequía. El quebranto fue calculado en 2.100 millones de pesos”, “Riego insisten en una legislación integral -(14-09-97)-: El riego complementario se está transformando en una importante alternativa para asegurar la producción agrícola. El consejo Regional norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe de la Federación Agraria Argentina, se refirió a la creciente actividad del riego en la zona, y calificó como anárquica la forma en que se aplican las nuevas tecnologías. La entidad ruralista indicó que se permite inferir un alto riesgo de agotamiento o drástica reducción de los acuíferos y una apreciable disminución de los volúmenes de agua para consumo de la población en algunas localidades. Señaló además, que la multiplicación de perforaciones se va transformando en una fuente de litigio entre productores vecinos, además de no realizarse determinaciones previas sobre cantidad y calidad”.*

Venencio y García (1998; 2002) abordaron el estudio de las sequías en la Pampa Húmeda a paso de tiempo climático focalizando la investigación en la búsqueda de herramientas de predicción de las relaciones entre precipitaciones y recursos hídricos alternativos.

El objetivo de este trabajo es contribuir al conocimiento del comportamiento de la relación “clima-acuífero libre”, particularmente en los períodos de sequía, ya que durante ellos la explotación del agua subterránea se intensifica.

En este contexto se determinaron relaciones entre las variabilidades internas de la precipitación y el nivel freático para situaciones de sequía del sistema durante los últimos treinta años del siglo XX. El nivel freático medio regional se supuso afectado únicamente por la variabilidad climática.

El régimen de precipitaciones de los últimos 30 años se ha caracterizado por un cambio intra-anual y un aumento generalizado de los montos anuales de lluvias. Esto se manifestó con un corrimiento hacia el oeste en las isohietas, indicativo de aumentos relativos de la precipitación de hasta un 25% en la provincia de Santa Fe (García, 1994). Los montos de agua caída son del orden de los 1100 mm en el este de la provincia de Santa Fe, disminuyendo gradualmente a 850 mm en el oeste, con una orientación general de las isohietas norte-sur. En lo que a temperatura se refiere, se

Tabla 1. Estaciones seleccionadas y períodos de información simultánea de precipitación y nivel freático

Estación	Lat.	Long.	Altitud	Período Precipita- ción	Período Nivel Freá- tico	Período Simultáneo Utilizado
Reconquista	29° 07' S	59° 24' W	53 m	1911/2001	1977/2001	1977/2001
Villa Minetti	28° 37' S	61° 37' W	72 m	1937/2001	(*)	1981 y 1988 (*)
Rafaela	31° 11' S	61° 33' W	100 m	1904/2001	1969/2001	1970/2001
Oliveros	32° 33' S	60° 51' W	27 m	1951/2001	1970/2001	1970/2001
Zavalla	33° 06' S	60° 53' W	50 m	1973/2001	1973/2001	1973/2001
Marcos Juárez	32° 02' S	62° 15' W	110 m	1910/2001	1970/2001	1970/2001
Casilda	33° 05' S	61° 10' W	90 m	1901/1999	=	=
Venado Tuerto	33° 45' S	62° 07' W	105 m	1911/1997	=	=
Rufino	34° 15' S	62° 45' W	115 m	1902/1981	=	=

(*) varios periodos interrumpidos

tienen veranos cálidos y húmedos, con inviernos templados y secos. Esta región tiene un régimen de precipitación anual con valores mínimos en invierno (Junio-Julio-Agosto), pero sin una estación seca bien definida, mientras que los máximos se producen en verano (Enero-Febrero-Marzo) (García, 1990).

Durante el siglo XX en el nordeste de Argentina, se manifestaron en promedio cuatro períodos hídricos bien caracterizados: uno semihúmedo que duró hasta 1918/20, otro húmedo desde esa fecha hasta 1943/44, uno seco entre 1943/44 y 1970/71 y finalmente uno hiperhúmedo a partir de esta última fecha (García y Vargas, 1998). Analizando la Provincia de Santa Fe Venencio y García (2002) corroboraron estos resultados en toda la región en estudio y pueden considerarse un rasgo climático temporal. Para el acuífero se encontró la fecha 1970/72 como un punto singular en el comportamiento del nivel freático de la región en estudio.

En los referente al subsuelo, las formaciones geológicas están compuestas por sedimentos de diferentes edades y ambientes de sedimentación. El horizonte más antiguo, de edad Mioceno y origen marino, corresponde a la Formación Paraná, denominadas como arcillas verdes. Constituida por mantos de arcilla y arenas arcillosas intercaladas de típico color verde o verde azulado. Hacia arriba y en discordancia erosiva, estos sedimentos están cubiertos por las arenas de la Formación Puelche, depositadas por el río Paraná en épocas geológicas pasadas (Plio-Pleistoceno). Conformada por arenas cuarzosas, maduras, de colores amarillentos, comúnmente de

grano fino a mediano con intercalaciones de gravilla en sus niveles inferiores. Presenta horizontes discontinuos de arcilla y arena arcillosa intercalada.

La parte cuspidal del paquete sedimentario está representado por limos de la Formación Pampeño. Es una secuencia de limos, limos arcillosos y arcillas generalmente de colores castaños. No presentan una clara estratificación y son frecuentes las intercalaciones calcáreas. Aloja al acuífero superior (libre o freático) con vinculación directa con el ciclo hidrológico exterior. Esta formación es la de interés para este trabajo.

Hacia el norte del área de estudio, la fracción arcillosa es más abundante. Su espesor disminuye desde más de 100 metros en la zona de Marcos Juárez, hasta aproximadamente a 15 metros en la zona de Reconquista, mientras que en el sur de la provincia, los sedimentos pampeños están parcialmente cubiertos por sedimentos eólicos pertenecientes al médano invasor. Los cambios texturales y estructurales presentes en los limos son el resultado de los cambios climáticos ocurridos durante el Cuaternario en el momento de su sedimentación, por lo que estos cambios litológicos dan como resultado propiedades anisótropas tanto en sentido vertical como areal. Esta complejidad litológica, a escala regional muestra un comportamiento simple, pero a nivel local evidencia particularidades.

METODOLOGÍA

Como la principal fuente de recarga natural al medio subterráneo es la precipitación, se

analizó su variabilidad espacial y temporal para inferir la respuesta del acuífero libre, para lo cual se contó con la información pluviométrica y freaticométrica de las estaciones indicadas en la Tabla 1, y aún cuando no existen registros con longitud uniforme, todas ellas se caracterizan por la buena calidad de sus datos.

De los criterios para la definición de sequías

Los períodos secos se caracterizaron en base a los déficit de agua precipitada por lo que la palabra “sequía” solo tendrá connotaciones meteorológicas y se referirá únicamente a períodos con déficit de precipitación desde el punto de vista estadístico. La detección de años con déficit de agua, o de aquellos años en que pudieron haberse producido sequías estacionales se realizó mediante la aplicación del criterio decílico, ordenando las series de precipitación por año hidrológico, de menor a mayor, en intervalos de clases o deciles sobre el registro completo de las lluvias que cayeron en cada estación pluviométrica durante el Siglo XX. Si la precipitación se encuadra dentro de los tres primeros deciles se considera que el año es seco, considerando los períodos secos que se encuadren dentro del primer decil como “fuertes”, en el segundo decil como “moderados” y los que correspondan al tercer decil como “débiles”.

Año compuesto seco para la precipitación y nivel freático

A fin de relacionar el comportamiento espacial de la sequía con la respuesta del acuífero se analizó el nivel freático durante los años compuestos secos. Se utilizó el criterio de definir al año compuesto seco de acuerdo al criterio de Ropelewski y Halpert (1987, 1989) para años compuestos de eventos climáticos significativos, que entienda a ese período por el lapso de veinticuatro meses consecutivos que comienza en enero del año en que da inicio un evento significativo (año hidrológico seco) al que denominan año [0], y finaliza en diciembre del año siguiente (año [1]).

Análisis espectral de los años compuestos secos para la precipitación y nivel freático

El comportamiento espacial y temporal de la precipitación y nivel freático en los períodos secos se estudió por medio de un Análisis Espectral de los Años Compuestos Secos. El método espectral utilizado está basado en una versión original-

mente realizada por el Dr. C. E. Grosch (Dept. Oceanography-Old Dominion University-Norfolk, VA.23508). Este método utiliza la transformada rápida de Fourier de Hockney para calcular el espectro de una serie de datos almacenados en forma de vector. A los efectos de disminuir la dispersión se trabaja por medio de ventanas de datos. El procedimiento consiste en aplicar un promedio pesado a tres amplitudes de Fourier consecutivas, con pesos 0.25, 0.50 y 0.25 respectivamente, que algunos autores denominan "Hanning", aunque tal nombre se le asigna en general a un procedimiento similar cuando se está trabajando con el método de Blackman-Tukey y el promedio es aplicado directamente al espectro crudo. El método permite calcular la varianza que explica cada componente armónica respecto de la varianza total (100%).

Para representar espacial y temporalmente estos resultados se utilizaron diales armónicos siguiendo el criterio adoptado por Ropelewski y Halpert (1987,1989) que establecieron el origen temporal contando a partir del norte de un gráfico polar, en el cuál al norte se le asigna Enero (0) y mediante una rotación horaria se fija un mes cada 15°; esto hace que al sur del diagrama le corresponda Enero (1). La característica del fenómeno en estudio está dada por la magnitud del vector, mientras que la fase indica el mes donde es más significativo. De esta manera, se muestra el comportamiento espacio-temporal de los años secos promedio y se representa sobre un mapa de la región los diales armónicos (amplitud y fase) de las dos primeras componentes espectrales.

RESULTADOS

Períodos secos por año hidrológico

La detección de los años secos se realizó mediante la aplicación del criterio decílico sobre el record completo de la precipitación en cada estación durante el Siglo XX. Si bien la longitud de las series de precipitación no es uniforme, se calculó la ocurrencia media de sequías anuales hasta 1969, y desde 1970 hasta el 2001 (Tabla 2). En primer lugar porque la fecha de 1970 fue considerada como crucial por registrarse un importante salto climático aproximadamente en 1970 (García and Vargas, 1998), y en segundo término porque los registros freaticométricos disponibles comienzan aproximadamente en esa fecha.

Tabla 2. Ocurrencia de sequías por períodos e intensidad del déficit hídrico

Estación	Ocurrencia de Sequías					
	Hasta 1969			1970-2001		
	Fuerte	Moderada	Débil	Fuerte	Moderada	Débil
Reconquista	7	7	6	2	2	3
Villa Minetti	6	2	5	=	4	1
Rafaela	10	6	9	=	4	1
Oliveros	3	3	2	2	2	3
Marcos Juarez	6	8	8	3	2	1
Casilda	8	9	6	2	1	4
Venado Tuerto	7	8	5	2	1	3
Rufino	7	7	7	1	1	1

Tabla 3. Frecuencia de ocurrencia de sequías por períodos, sin considerar su intensidad.

Estación	Frecuencia de Ocurrencia de Sequías	
	Hasta 1969	1970-2001
Reconquista	1 c/3 años	1 c/4 años
Villa Minetti	1 c/2.5 años	1 c/6 años
Rafaela	1 c/3 años	1 c/6 años
Oliveros	1 c/4 años	1 c/4.5 años
Marcos Juarez	1 c/3 años	1 c/5 años
Casilda	1 c/3 años	1 c/4.5 años
Venado Tuerto	1 c/3 años	1 c/5 años
Rufino	1 c/3 años	1 c/6 años

Estos resultados se tornan más significativos si se expresa la frecuencia de ocurrencia de sequías para cada período (Tabla 3). La frecuencia de ocurrencia de sequías ha disminuido sensiblemente a partir de 1970; verificándose en la Provincia un promedio de una sequía cada tres años hasta 1969 y de una cada cinco años a partir de esta última fecha.

Desde el punto de vista de los montos relativos de agua caída, se observó que se producen períodos secos más intensos en otoño, invierno y primavera que durante el verano o a nivel anual. Esto es debido a las características convectivas de las lluvias de verano, donde una sola tormenta puede disimular en los promedios, todo un período seco.

En la Tabla 4 se exponen los años con sequías. Se observa que los períodos secos más generalizados que cubrieron espacialmente con diferentes grados de intensidad toda la provincia correspondieron a 1969, 1971, 1981, 1988, y 1996. Considerando los años secos más críticos 1988 y

1996, el déficit de agua se manifestó en el centro-sur de la provincia hasta Venado Tuerto, (excluido el extremo sur). Los años con déficit de agua coinciden, en general, con el fenómeno LA NIÑA únicamente en 1988 y parcialmente en 1970, 1973, 1975, 1995, 1998 y 1999. Cabe aclarar que en 1969, 1971, 1974, 1976 a 1979, 1981 a 1984, 1987, 1993-1994 y 1996 se registraron déficit de agua en distintas localidades no coincidentes con el fenómeno LA NIÑA.

Desde el punto de vista estacional, resultados no mostrados en el presente trabajo, los períodos de más de dos meses consecutivos con déficit de agua fueron mucho más frecuentes que a nivel anual y se observaron diferencias entre los años secos y las estaciones secas. Por tomar solamente el período 1969-2000, se observó que prácticamente en casi todos los años hubo estaciones con sequías (Tabla 5), pese de transitar por el denominado período hiperhúmedo por García y Vargas (1998). En este caso se observó una mayor frecuencia de períodos secos invernales y estacio-

Tabla 4. Sequías del período 1969-2001 [Fuertes (+++), Moderadas (++) , Débiles (+)] y años LA NIÑA [*]

	Años LA NIÑA	Reconquista	Villa Minetti	Rafaela	Oliveiros	Zavalla	Marcos Juárez	Casilda	Venado Tuerto	Rufino
1969		++	+				+		+	
1970	*		++							++
1971				++	++		+	+++		+++
1972										
1973	*				++		+++	+		
1974			++							+
1975	*	+		+				+		
1976										
1977										
1978										
1979									+	
1980										
1981		+	++		+++	+		+		
1982					+	+++		++	+	
1983									+	
1984						++		+++	+++	
1985										
1986										
1987		++		++						
1988	*		++	++	+++	++	+++		+++	
1989										
1990										
1991										
1992										
1993		+++								
1994		+++		++	++	+			++	
1995	*		+		++	+				
1996					+	+++	+++	+	+	
1997										
1998	*	+			+		++			
1999	*	++								
2000	*									

nes de transición, por cuanto debido a las características de las lluvias de verano, que son predominantemente convectivas, se puede alcanzar valores normales para un mes o superiores a la media en un solo evento de lluvia sin que por ello se pueda mitigar la insuficiencia hídrica.

Precipitación y nivel freático por año compuesto seco

Para los periodos simultáneos de precipitación y nivel freático, se representó el año compuesto seco, en el cuál queda comprendido el

año hidrológico seco. Se observa un descenso gradual en el tiempo del nivel de agua alcanzando su máxima profundidad al final del año (1), asociado a la disminución de la recarga recibida por precipitación. Como ejemplo se muestran sólo cuatro localidades, Figuras 2 [(a) – (c)].

El acuífero en sequías

Se observó en todas las estaciones analizadas que en forma general el acuífero responde a los años con sequía con un cierto retraso y con una profundidad mayor o igual a la media. En las Figu-

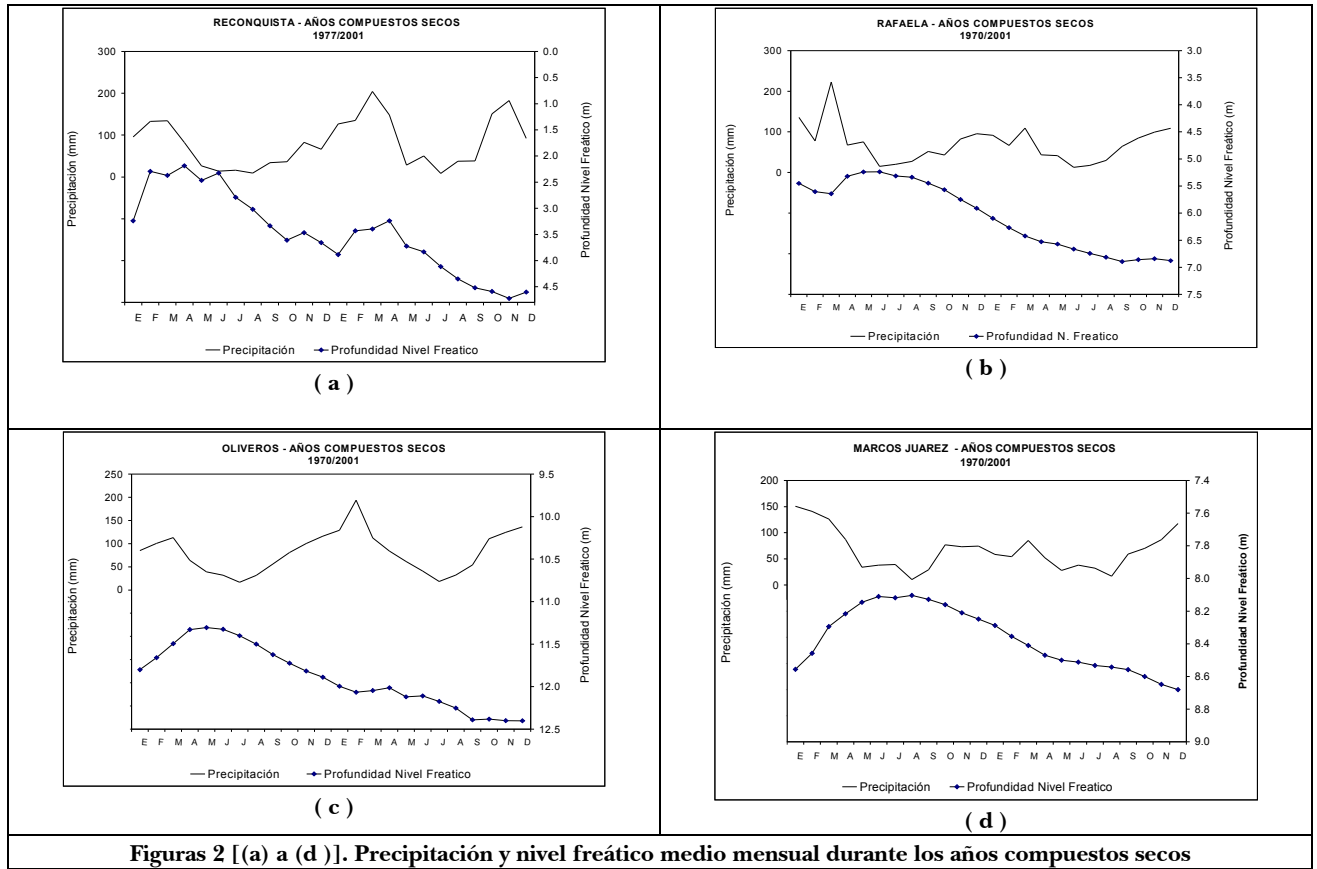


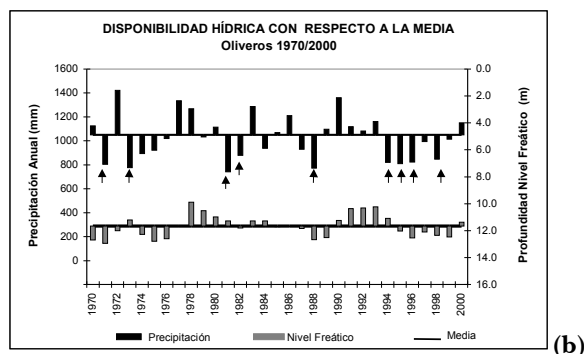
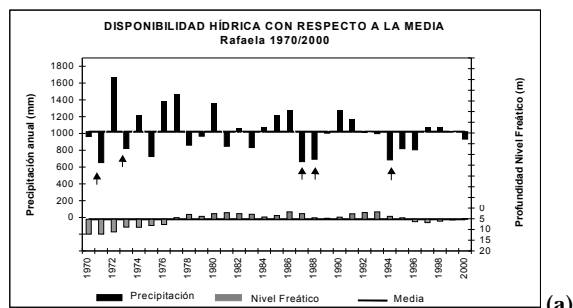
Tabla 5. Sequías estacionales 1969/2000, sin discriminación de estación pluviométrica.

Año	Nº de Eventos	Año	Nº de Eventos	Año	Nº de Eventos
1969	5	1980	2	1991	2
1970	6	1981	6	1992	3
1971	7	1982	2	1993	4
1972	—	1983	5	1994	8
1973	6	1984	3	1995	10
1974	4	1985	3	1996	6
1975	6	1986	—	1997	2
1976	4	1987	7	1998	7
1977	2	1988	9	1999	7
1978	2	1989	3	2000	—
1979	4	1990	—		

ras 3 [(a)-(b)] se representa la variabilidad para el periodo 1970-2001 de la precipitación y el nivel freático con respecto a la media. Se observan claramente los años con déficit de agua, y se indican

con una flecha los años de sequías por ejemplo para las localidades de Rafaela y Oliveros.

Venencio y Varni (2003), aplicaron el método de la fluctuación del nivel freático (Healy y Cook, 2002) que analiza el comportamiento del nivel freático frente a eventos de precipitación a nivel diario, y discrimina aquellos ascensos manifestados por la recarga natural que llega al acuífero. Asume que el agua que llega al nivel freático pasa a integrar el flujo subterráneo y que las variables de entrada y salida del sistema son nulas, entre ellas, la evapotranspiración desde el nivel freático, aportes al flujo base o regional subterráneo. También se evalúa el retardo entre el aporte de la recarga al nivel freático, contabilizando toda el agua ingresante por recarga. Esto es válido especialmente en cortos periodos de tiempo, de horas a pocos días. Así la recarga (R) es directamente proporcional al almacenamiento específico (Sy) y a la variación del nivel freático Δh en un tiempo (Δt), como: $R = S_y (\Delta h / \Delta t)$. Los ascensos de nivel para las series se obtuvieron restando al nivel del pico del hidrograma, el último nivel registrado previo al ascenso.



Figuras 3 [(a)-(b)].

Venencio y Varni (2003) estimaron la recarga por precipitación con registros a paso de tiempo diario, de precipitación y nivel freático, en las localidades de Rafaela (1982/2001) y de Oliveros (1970/2001). En los periodos mencionados la recarga promedio para Rafaela fue del orden de 14.8% de la precipitación total (1000.9 mm) y el acuífero acusó una profundidad media de 3.9 metros. Para la localidad de Oliveros la recarga promedio condujo al orden de 9.7% de la precipitación total (1026.6 mm) y el acuífero registró una profundidad promedio de 11.7 metros.

Con esta misma metodología, se estimó la recarga en los años de sequía obteniéndose valores del orden del 2.3 y 3.5% de la precipitación promedio para el periodo seco (676.4 mm) en Rafaela y entre el 2.2 y 5.9% de la precipitación promedio (801 mm) para Oliveros.

Para estimar la disminución del volumen almacenado del acuífero en los períodos compuestos secos se tomaron los valores de almacenamiento específico estimados por Venencio y Varni, (2003) de 7.3% para Rafaela y 7.7% para Oliveros. Para el resto de las localidades se adoptó el orden del 10%, siguiendo relaciones medias con el tamaño medio de grano, por ejemplo (Stephens et al., 1996).

En la Tabla 6 se expone la disminución en porcentaje de la magnitud de la precipitación de

toda la serie de los años secos, y para los períodos compuestos secos del nivel freático y del volumen almacenado del acuífero. También se observa en esta tabla, que la magnitud en el descenso del nivel freático es mayor, coincidentemente con la intensidad de las sequías.

Tabla 6. Disminución de la precipitación, nivel freático y volumen almacenado del acuífero.

Localidad	% Δ P (mm)	Δ NF (m)	Disminución volumen almacenado (m ³ /ha)
Reconquista	-29.4	-3.43	3430
Villa Minetti	-25.9	-3.79	3790
Rafaela	-26.1	-1.88	1372
Oliveros	-23.0	-1.20	924
Zavalla	-21.3	-1.49	1490
Marcos Juárez	-25.9	-0.58	580
Casilda	-24.6	-	-
Venado	-17.1	-	-
Rufino	-31.3	-	-

Análisis espectral de los años compuestos secos

*** De la precipitación**

El comportamiento espacial y temporal de los períodos secos se refleja en los resultados de la Tabla 7. En ésta se vuelcan los valores de amplitud y fase de los tres armónicos más significativos de las series correspondientes a los años compuestos secos, ya que son los únicos armónicos que superan el nivel de confianza del 95% establecido por el método.

La amplitud del segundo armónico se acentúa tanto por las lluvias de verano como por las sequías invernales, y contiene información de los montos de lluvia de verano además de representar al ciclo anual de la precipitación, mientras que las sequías de verano lo atenúan. En la Tabla 8 se muestra la varianza explicada de los tres armónicos, resultando el tercero poco significativo debido a la pequeña varianza que explica.

**** Del nivel freático**

A los años compuestos del nivel freático que corresponden a los años compuestos secos también se le realizó idéntico análisis espectral con fines comparativos. El comportamiento espacial y temporal del nivel freático durante los períodos secos se refleja en los resultados de la Tabla 9. De

Tabla 7. Amplitud y fase de los tres primeros armónicos de la precipitación de los años compuestos secos

ESTACIÓN	PRIMER ARMÓNICO		SEGUNDO ARMÓNICO		TERCER ARMÓNICO	
	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase
Reconquista	22.3210	2.9400 rad.	58.5660	2.4802 rad.	5.2439	5.5671 rad.
Villa Minetti	36.3924	5.1712 rad.	57.1150	2.5056 rad.	3.9827	9.8317 rad.
Rafaela	9.5186	6.9639 rad.	49.0752	3.2645 rad.	4.0871	6.8461 rad.
Oliveros	15.3516	4.5604 rad.	50.7808	3.3298 rad.	5.9442	2.2437 rad.
Zavalla	14.8273	4.8295 rad.	48.1928	3.3653 rad.	6.7037	0.2350 rad.
Marcos Juárez	22.3300	4.6511 rad.	43.0858	3.8486 rad.	9.2675	0.4089 rad.
Casilda	27.5338	4.3920 rad.	47.6800	3.8159 rad.	15.8954	1.4503 rad.
Venado Tuerto	5.7989	3.4913 rad.	48.0504	3.6089 rad.	5.2742	2.6416 rad.
Rufino	15.3974	5.7705 rad.	36.8276	4.3358 rad.	5.8935	5.9382 rad.

Tabla 8. Varianza explicada de los tres primeros armónicos de la precipitación

ESTACIÓN	PRIMER ARMÓNICO (Varianza Explicada)	SEGUNDO ARMÓNICO (Varianza Explicada)	TERCER ARMÓNICO (Varianza Explicada)
Reconquista	10.48 %	72.13 %	0.58 %
Villa Minetti	16.12 %	56.49 %	0.19 %
Rafaela	2.25 %	59.88 %	0.42 %
Oliveros	7.67 %	83.93 %	1.15 %
Zavalla	7.47 %	78.95 %	1.53 %
Marcos Juárez	18.05 %	67.20 %	3.11 %
Casilda	17.14 %	51.4 %	5.71 %
Venado Tuerto	1.14 %	78.6 %	0.95 %
Rufino	9.20 %	52.61 %	1.35 %

Tabla 9. Amplitud y fase de los tres primeros armónicos del nivel freático de años compuestos secos

ESTACIÓN	PRIMER ARMÓNICO		SEGUNDO ARMÓNICO		TERCER ARMÓNICO	
	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase
Reconquista	0.7765	0.6799 rad.	0.6858	2.2710 rad.	0.1603	1.9244 rad.
Villa Minetti	1.8927	0.4739 rad.	0.2770	0.4612 rad.	0.4494	0.2414 rad.
Rafaela	0.6530	0.1119 rad.	0.1168	4.4265 rad.	0.0858	1.8409 rad.
Oliveros	0.4482	0.9134 rad.	0.2120	3.7458 rad.	0.0725	2.7943 rad.
Zavalla	0.6048	1.6275 rad.	0.1869	2.2528 rad.	0.0983	2.3755 rad.
Marcos Juárez	0.2517	2.6350 rad.	0.0659	6.4436 rad.	0.0409	6.7709 rad.

la comparación de los resultados de las Tablas 7 y 9 se puede inferir la baja variabilidad temporal del nivel freático, en contraste con la alta variabilidad de la precipitación.

Diales armónicos

* De la precipitación

Para representar espacial y temporalmente los resultados del análisis espectral se utilizaron

diales armónicos donde la característica del fenómeno en estudio está dada por la magnitud del vector. De esta manera, se muestra el comportamiento espacio-temporal de los años secos promedio y se representa sobre un mapa de la región los diales armónicos (amplitud y fase) de las dos primeras componentes espectrales (Figura 4), donde la segunda (negro) es la más significativa e indica la intensidad del fenómeno; mientras que la primera (gris) indica su relación con la región EL NIÑO.

Tabla 10. Varianza explicada de los tres primeros armónicos de los niveles freáticos.

ESTACIÓN	PRIMER ARMÓNICO (Varianza Explicada)	SEGUNDO ARMÓNICO (Varianza Explicada)	TERCER ARMÓNICO (Varianza Explicada)
Reconquista	51.01 %	39.80 %	2.18 %
Villa Minetti	89.33 %	1.91 %	5.03 %
Rafaela	90.08 %	2.88 %	1.56 %
Oliveros	77.99 %	17.45 %	2.04 %
Zavalla	80.48 %	7.69 %	2.13 %
Marcos Juárez	90.58 %	6.21 %	2.39 %

Los resultados indican, en promedio, que el extremo sur de la Provincia de Santa Fe (Rufino) tiene un comportamiento con características particulares durante los eventos secos. La región desde Rafaela hasta Venado Tuerto tiene un comportamiento homogéneo, en cuanto a intensidad y época de ocurrencia, y lo mismo ocurre en la región norte de la Provincia.

Estos resultados se representan resumidos en la Figura 5, donde se observa una caracterización regional similar a la de las lluvias, con el norte homogéneo respecto del primer armónico y el centro-sur también. Rafaela en una zona que parece ser de transición entre el norte y el sur mientras que Marcos Juárez presenta un comportamiento bien diferenciado.



Figura 4. Diales armónicos correspondientes a los años secos compuestos promedio de la precipitación

**** Del nivel freático**

Con el mismo objetivo se realizó el mismo procedimiento con el nivel freático durante los períodos secos compuestos también se utilizó la técnica de representación sobre un mapa de la región de los diales armónicos (amplitud y fase) de las dos primeras componentes espectrales, pero aquí el armónico significativo es el primero (gris).



Figura 5. Diales armónicos del nivel freático correspondientes a los años secos compuestos promedio (primer armónico en gris y segundo armónico en negro)

En la Tabla 10 se indica la varianza explicada de los tres primeros armónicos del nivel freático.

CONCLUSIONES

- El sistema subterráneo de la región analizada mostró de manera manifiesta

una relación con las entrada climática de la precipitación tanto espacial como temporalmente.

- Se detectaron numerosos casos de sequías anuales y estacionales entre 1969 y el año 2001 (período hiperhúmedo 1970/71)., lo que permitió establecer una comparación entre la frecuencia de ocurrencia de sequías antes y después de la fecha de quiebre climático. Se estableció que las sequías anuales, cualquiera sea su intensidad, se produjeron en promedio una cada tres años antes de 1969 y una cada 5 años a partir de 1970.
- Se observó en todas las localidades estudiadas que en el transcurso de las sequías hubo disminución de la recarga por precipitación y el acuífero mostró una sostenida profundización del nivel freático.
- La recarga estimada en los años de sequía fue del orden de 2.3 y 3.5 % de la precipitación promedio del periodo seco (676.4 mm) en Rafaela y en Oliveros entre el 2.2 y 5.9 % de la precipitación promedio (801 mm).
- La magnitud en la disminución del nivel freático para los años compuestos secos osciló entre 0.58 a 3.79 metros lo que significó un volumen almacenado de 580 a 3790 m³/ha.
- Tanto las lluvias de verano como las sequías invernales acentúan la amplitud del segundo armónico que contiene información de los montos de lluvia además de representar al ciclo anual de la precipitación, mientras que las sequías de verano lo atenúan. En los niveles freáticos se puede inferir la baja variabilidad temporal en contraste con la alta variabilidad de la precipitación.
- Los diales armónicos mostraron gráficamente que en la precipitación la segunda componente espectral es la más significativa; mientras que la primera indica su relación con la región EL NIÑO. En los niveles freáticos se observa una caracterización regional similar a la de las lluvias, con el norte homogéneo respecto del primer armónico y también en el centro-sur.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue parcialmente financiado con un subsidio de la Universidad Nacional del Litoral (Programa 028, Proyecto 201) y con un subsidio otorgado por el Instituto Nacional del Agua (INA) a un proyecto de investigación conjunta INA-Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la UNL.

REFERENCIAS

- García, N. O.; 1990: Climatografía de la República Argentina - *Publicación UNL-FICH No. 36/90*, de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, 31 pp., Santa Fe.
- García, N. O.; 1994: Elementos de climatología – *Colección Ciencia y Técnica*, N° 6, Universidad Nacional del Litoral, pp. 280, Santa Fe, Argentina.
- García, N.O. and Vargas, W.M.; 1998: The Temporal Climatic Variability in the Rio de la Plata Basin Displayed by the River Discharges. *Climatic Change*, 38, pp. 359-379.
- Healy R.W. and Cook P.G.; 2002. "Using groundwater levels to estimate recharge". *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91-109.
- Pecorari, C.; 2000. Manejo del agua y factores vinculados. *Jornada de Riego. Una alternativa posible*, Santa Fe. 1-6.
- Ropelewski, C. & Halpert, M.S.; 1987: Global and regional scale precipitation pattern associated with the El Niño/ Southern Oscillation, *Mon. Weather Rev.*, 115, 1606-1626.
- Ropelewski, C. & Halpert, M.S.; 1989. Precipitation pattern associated with the high index phase of the southern oscillation, *J. Climate*, 2, 268-284.
- Seneyers, R.; (1975). *Sur L'analyse statistique des séries d'observations*, Technical Note Nro. 143, WMO., Geneve.
- Stephens, D.B.; Hsu, K., Prieksat, M.A.; Ankeny, M.D.; Blandford, N.; Roth, T.L.; Kelsey, J.A. & Whitworth, J.R.; 1996. "A comparison of estimated and calculated effective porosity". *Hydrogeology Journal*, 6(1), 156-165.
- Venencio, M.V. & García, N.O.; 1998: "On the Droughts in the "Pampa Húmeda" (Argentina) and its Relations with Alternative Water Resources", *Proceeding Special Symp. Hydrology*, 78th AMS Annual Meeting, Phoenix, Arizona, 11-16 Jan, pp 230-233.
- Venencio, M.V. y García, N.O.; 2002: "Análisis de la variabilidad del clima y su impacto en el acuífero libre con fines de riego en la Provincia de Santa Fe". Pro-

yecto de Investigación conjunto INA-FICH. Santa Fe, pp 70.

Venencio M. y Varni M.; 2003. "Estimación de La Recarga y del Almacenamiento Específico a través del Análisis de Registros de Nivel Freático". Memorias del III congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Tomo I, pp. 153-160.

Drought Impact on the Natural Recharge of the Unconfined Aquifer

ABSTRACT

The present study analyses the unconfined aquifer behaviour in the context of seasonal and interannual climatic variability, and particularly precipitation variability, during the dry periods in Santa Fe Province, with the aim of finding quasi-periodicities and trends, both in precipitation and the freatic level.

Droughts were defined by the decilic analysis of historical precipitation records, while spatial and temporal variability was analysed by a Spectral Analysis of the Dry Compound Years in order to establish the harmonic dials which characterise the climatic conditions of each region. As well as this, different statistics methods were applied to assess the response of the unconfined aquifer during droughts.

It was observed that the frequency of occurrence of annual droughts has decreased over the whole Province of Santa Fe since 1970, showing an average of a drought every three years until 1969, and one every five years from that date onwards. Considering the relative amounts of precipitation, it was concluded that the more intense dry periods take place during autumn, winter and spring rather than summer, or at an annual level.

An overall decrease in the recharge by precipitation was observed in the whole studied area during the drought periods, which manifested itself in sustained falls in the freatic levels. For two seasons, the recharge was estimated between 2.2 and 5.9% of precipitation in those periods.

The decrease at the freatic level in the dry compound years varied from 0.58 to 3.79 m with a volume variation between 580 and 3790 m³/ha.

The spatial and temporal behaviour of the dry periods showed that the amplitude and phase values of the three most significant harmonics in the series correspond to the dry compound years. Both the summer rainfall and the winter droughts stress the amplitude of the second harmonics, which contain information of the amount of precipitation and represent the annual precipitation cycle, whereas the summer droughts diminish it. The low tempo-

ral variability of the freatic level can be inferred in the aquifer, in contrast to the high precipitation variability.

The harmonic dials in the region graphically showed that the second spectral component is the most significant, while the first shows its relation to the EL NIÑO region. It could be noticed that, at the freatic level, there is a regional characterisation similar to that of rainfall, with a homogeneous north region regarding the first harmonic, as well as in the centre-south region.

The results indicate that, on average, both the north region and the centre-south region of Santa Fe Province have a homogeneous behaviour as regards intensity and time of occurrence, while the extreme southern region shows a behaviour with peculiar characteristics during the dry events.

Key-words: *atmosphere-aquifer relations, droughts, recharge*