

APLICACION SISTEMICA A SERIES DE TIEMPO HIDROLOGICAS

Por: Lic. J. C. GIANIBELLI * y Lic. H. A. GENTILE **

1. OBJETIVO DEL TRABAJO

Planteo de una metodología de análisis para procesos hidrológicos cuya aplicación sistemática permita una mejor evaluación, predicción, control y en suma administración del recurso hídrico correspondiente.

En nuestro caso particular el recurso mencionado está constituido por un sistema hidrogeológico (acuífero).

2. MARCO DE REFERENCIA TEORICO

PROLOGO

En las dos últimas décadas la investigación hidrológica ha logrado desarrollos en estadísticas, teoría de la probabilidad y teoría de las comunicaciones. El resultado ha sido la evolución de un campo de especialización llamado hidrología estocástica que se define como "el

* Investigador Director Inst Invest. y Práctica - Facultad Mat. Apl. UCALP.

** Investigador Inst. Invest. y Práctica - Facultad Mat. Apl. UCALP.

manejo de características estadísticas de variables para resolver problemas hidrológicos, sobre la base de sus propiedades estocásticas.

El camino para el estudio hidrológico contempla distintas filosofías: analítico o empírico, determinista o estocástico, macro o microscópico, campo o laboratorio de experimentación, etc.

La práctica ha demostrado, que la mejor vía para un mejor entendimiento del proceso hidrológico, es una síntesis de todas estas alternativas con las limitaciones de cada una de ellas.

NATURALEZA DE LAS SERIES DE TIEMPO HIDROLOGICAS

PROCESO HIDROLOGICO

Debido a que la mayoría de los fenómenos hidrológicos tienen como característica inherente, cambios tanto en espacio como en tiempo, podemos hablar de procesos hidrológicos.

Estos procesos temporalmente dependientes, son los que más interesan en hidrología. De esta forma $\{X(t): t \in T\}$, es un proceso hidrológico que se desarrolla en el tiempo con una definida secuencia de acontecimientos, X : hidrogramas de inundaciones, yetogramas de precipitaciones. La serie de tiempo resultante puede ser discreta o continua.

GRADO Y SECUENCIA

Los sucesos que constituyen una serie de tiempo hidrológica pueden considerarse de acuerdo al grado de magnitud y a la secuencia de ocurrencia. Al grado de magnitud se refieren los métodos tradicionales de análisis de frecuencias considerando a los sucesos, independientes. Han sido usados para predecir magnitudes máximas de caudal y el número de veces que un caudal determinado igualará o excederá, en el futuro, el valor promedio.

En contraste a esto, el estudio de la secuencia de ocurrencia presume que los sucesos pasados en la serie de tiempo pueden influir en las magnitudes de sucesos del presente y del futuro en la misma serie.

HOMOGENEIDAD EN TIEMPO Y ESPACIO

La serie de tiempo hidrológica es homogénea en tiempo, si cada suceso tiene la misma probabilidad de ocurrir en todas las veces. La no homogeneidad puede deberse a cambios naturales, cuasi naturales o debidos a la actividad humana. En cualquier caso, la ausencia de homogeneidad indica que las muestras de $\{X(t): t \in T\}$ no son elegidas de la misma población.

La homogeneidad espacial de estas series existen en el sentido estadístico, cuando dos o más de ellas poseen parámetros estadísticos que no son significativamente diferentes una de otra, o sea que cada una de ellas se obtuvo de la misma población. La determinación de la precipitación máxima probable (P.M.P.) por transposición de tormentas y técnicas de maximización, asume homogeneidad meteorológica sobre una gran área geográfica con similares rasgos topográficos.

PROCESOS DETERMINISTICOS Y ESTOCASTICOS.

La variación dentro de los procesos hidrológicos puede ser determinística o estocástica. En un proceso determinístico existe una relación definida entre la variable hidrológica y el tiempo. La ecuación funcional define el proceso para todo el tiempo de su existencia. Esto contrasta con un proceso estocástico, que se desarrolla enteramente o en partes, de acuerdo a un mecanismo aleatorio. El proceso puede ser aleatorio puro y no enteramente aleatorio. En la naturaleza es posible un espectro de diferentes procesos, ordenados desde uno puramente determinista a no puramente aleatorio. Está generalmente acordado que la mayoría de las series de tiempo hidrológicas son no estacionarias y no enteramente aleatorias.

Habíamos dicho que los fenómenos hidrológicos varían en tiempo y espacio. Si Z es el conjunto de puntos del espacio donde el fenómeno puede ser observado y ζ_0 un elemento específico de Z , entonces el proceso estocástico en ζ_0 , se expresa como:

$$\{ \times (t, \zeta_0): t \in T, \zeta_0 \in Z \}$$

El objetivo del análisis de la serie de tiempo en el punto ζ_0 , es inferir la ley de probabilidad de $\{ \times (t, \zeta): t \in T, \zeta \in Z \}$ para cada punto del régimen hidrológico Z .

CLASIFICACION CONCEPTUAL DE PROCESOS ESTOCASTICOS

En hidrología podemos encontrar tres clases de procesos estocásticos de corriente interés: procesos contador, procesos de tipo de transición y procesos caracterizados por funciones de primer y segundo momento.

El proceso contador cuenta los acontecimientos de simples sucesos de un determinado tipo.

La segunda clase comprende procesos que se desarrollan en el tiempo como una serie de transiciones de un sistema de un estado a otro. Aquí se especifican las probabilidades de transición de un estado a otro y el grado de dependencia hacia su historia pasada.

La tercera clase de procesos está basada en investigaciones empíricas de funciones de primer y segundo momento de series de tiempo reales.

ANALISIS ARMONICO GENERALIZADO

Esta teoría es una importante herramienta del análisis de datos y se puede resumir en orden creciente de complejidad para funciones periódicas, transitorias y aleatorias. Es aplicable para: formulación de modelos de series de tiempo, funciones espectrales, características de la respuesta en frecuencia de sistemas hidrológicos, etc., representa la interrelación entre la hidrología paramétrica y la estocástica.

Con el análisis espectral podemos transformar nuestros datos del dominio del espacio o tiempo al dominio de la frecuencia. Una analo-

gía física podemos observar en la descomposición de la luz natural en un arco iris (espectro) resultante, cuando ésta atraviesa un prisma.

El análisis espectral evalúa la naturaleza de la no aleatoriedad en un registro de dato y la simulación que se consigue con este tipo de modelos de los procesos hidrológicos, facilita la predicción de las condiciones de valores medios y extremos.

SERIES DE TIEMPO PERIODICAS.

Implica la descomposición de una señal en sus componentes armónicos. Su objetivo ha sido descubrir regularidades determinísticas extrayendo los períodos dominantes y, a su turno, resintetizar el fenómeno original.

La serie de tiempo $X(t)$ puede ser expandida en una serie de FOURIER de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + b_n \text{SEN} \frac{2n\pi t}{T}$$

donde:

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \cos \frac{2n\pi t}{T} dt, b_n = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \text{SEN} \frac{2n\pi t}{T} dt$$

son los coeficientes armónicos.

En una serie finita que contenga N observaciones igualmente espaciadas, podemos calcular $N/2$ armónicas (frecuencia de NYQUIST).

Con la expresión $S_n^2 = a_n^2 + b_n^2$ indicamos la energía, potencia o varianza acumulada al cabo de la n ésima armónica. Si graficamos los sucesivos valores de $(S_n)^2$ contra el número de armónica n , obtendremos así el llamado espectro de potencia ($S_o^2 = C_o^2 = a_o^2$).

Con el fin de obtener una mejor impresión de la verdadera estructura periódica de la serie de tiempo, podríamos aplicar al espectro un filtro constituido por un promedio móvil de alguna clase, logrando de esta forma, un espectro de potencia suavizado.

SERIES DE TIEMPO TRANSITORIAS

La representación de la serie de Fourier de una función periódica sobre una secuencia de armónicas, puede generalizarse al dominio de la frecuencia del continuo: haciendo

$$\begin{aligned} \lim_{T_1 \rightarrow \infty} n f_1 &= n/T_1 = df \\ n f_1 &\rightarrow f \end{aligned}$$

La función transitoria, entonces, es una función periódica con período infinito.

Los transitorios de corto término de interés en hidrología comprenden: pulsos de inundación, tormentas, etc. Los transitorios de largo término están referidos a las tendencias.

SERIES DE TIEMPO ALEATORIAS

Cada realización del proceso aleatoria $\{ X(t): t \in T \}$ posee una función de autocorrelación idéntica sobre el conjunto:

$$R_x(\xi) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) X(t+\xi) dt = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) e^{(-j2\pi f \xi)} df$$

su transformada de FOURIER $S_x(f)$ es la función densidad espectro

potencial par:
$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\xi) e^{(-j2\pi f \xi)} d\xi$$

Cuando $\xi = 0$, $R_x(0)$ es el valor medio cuadrático, cuando la secuencia está estandarizada, la nueva serie tiene valor medio cero y $R_x(0) = \text{Var}[X(t)]$, que es el área bajo la curva función densidad espectral sobre su rango de frecuencia entero $(-\infty, \infty)$. La función densidad espectral normalizada para una función aleatoria es análoga a la función densidad de probabilidad continua, así como la función espectro potencia para una función periódica es análoga a la función probabilidad de masa discreta.

3. PLANTEO DEL PROBLEMA PARTICULAR

MODELO HIDROLOGICO

Los modelos matemáticos en hidrología (como en otras ciencias) son adecuadas abstracciones de un fenómeno físico complejo. El modelo debería ser lo suficientemente completo en su descripción como para producir útiles resultados y suficientemente limitado en su complejidad como para ser matemáticamente manejable.

En la construcción de modelos para simular fenómenos hidrológicos podemos identificar uno de los caminos que brindan mayores ventajas. Su empleo utiliza los conceptos de análisis armónico generalizado. Los datos observados son tratados directamente para producir estimaciones eficientes de representaciones espectrales o de funciones momento de los procesos estocásticos.

El objetivo final de estos análisis espectrales empíricos, es mejorar los modelos existentes y sugerir nuevos modelos para una más eficiente predicción en hidrología.

PROBLEMATICA PARTICULAR

La problemática hidrológica específica que nos ocupa, consiste en identificar en el modelo que simulará el comportamiento del sistema hidrogeológico —acuífero— sometido a estudio, la naturaleza de la entrada, estado y naturaleza del sistema y naturaleza de la salida bajo todas las condiciones.

El sistema hidrogeológico actúa como un filtro de los componentes de alta frecuencia de la entrada, esto es suaviza la amplitud de la precipitación.

Los procesos que ocurren entre la entrada y la salida de una señal del sistema, son procesos no lineales. La respuesta total es el efecto final de muchos procesos individuales distribuidos dentro del sistema. Los sistemas no lineales generarán en la salida no sólo

frecuencias contenidas en la entrada, sino nuevas frecuencias relacionadas a éstas. Estamos entonces ante un típico caso de caja negra.

4. OBJETIVOS A ALCANZAR PARA LOGRAR LA SOLUCION

En virtud de la complejidad de la problemática planteada —caja negra—, los procedimientos que el tratamiento sistémico requiere sean formulados para llegar a la solución, generarán la información adecuada para lograr establecer las leyes que gobiernan el comportamiento del sistema.

En consecuencia, es imprescindible contar con series de tiempo de las distintas variables hidrológicas que actúan en el sistema, a fin de realizar su análisis y posterior correlación en el tiempo.

5. RELEVAMIENTO Y DIAGNOSTICO OBJETO

El sistema a relevar está constituido por un acuífero, embalse subterráneo o unidad hidrogeológica. Sobre el mismo, se plantea la demanda de abastecer a una población de agua potable por intermedio de un sistema centralizado de aprovisionamiento. O sea que este último, hace uso del sistema hidrogeológico (acuífero) para satisfacer la demanda mencionada, y está formado por los siguientes elementos:

Pozos de captación y cañería de impulsión a torre de carga (Zona de explotación).

Acueducto troncal (Zona de transporte).

Cañería de impulsión a tanque depósito y red de distribución (Zona de abastecimiento).

Dicho sistema de aprovisionamiento de agua potable, conjuntamente con otros dos: el tratamiento de los efluentes cloacales e industriales y el de tratamiento de los efluentes pluviales, integran

una organización mayor denominada sistema de saneamiento sanitario, y algunas veces interactúan entre sí. En nuestro caso, las tres organizaciones se encuentran separadas.

ESTUDIO DE LA DEMANDA

La población a abastecer con agua potable, la podemos ubicar en las localidades bonaerenses de PASTEUR, TIMOTE y CARLOS TEJEDOR, cuyas cifras son según detalla:

Localidad	Partido	Habitantes
Pasteur	Lincoln	2.000
Timote	Carlos Tejedor	1.000
Carlos Tejedor	Carlos Tejedor	7.000

El total es entonces, para las tres localidades de referencia, de 10.000 habitantes. Teniendo en cuenta las características predominantes de los recursos hídricos de esta zona de la provincia de Buenos Aires, que generalmente determinan que éstos sean considerados acuíferos pobres, se ha estimado para la misma un consumo por habitante y por día de 0,144 m³. de agua. Esta circunstancia hace que la demanda global, para la población de referencia, tenga un volumen de:

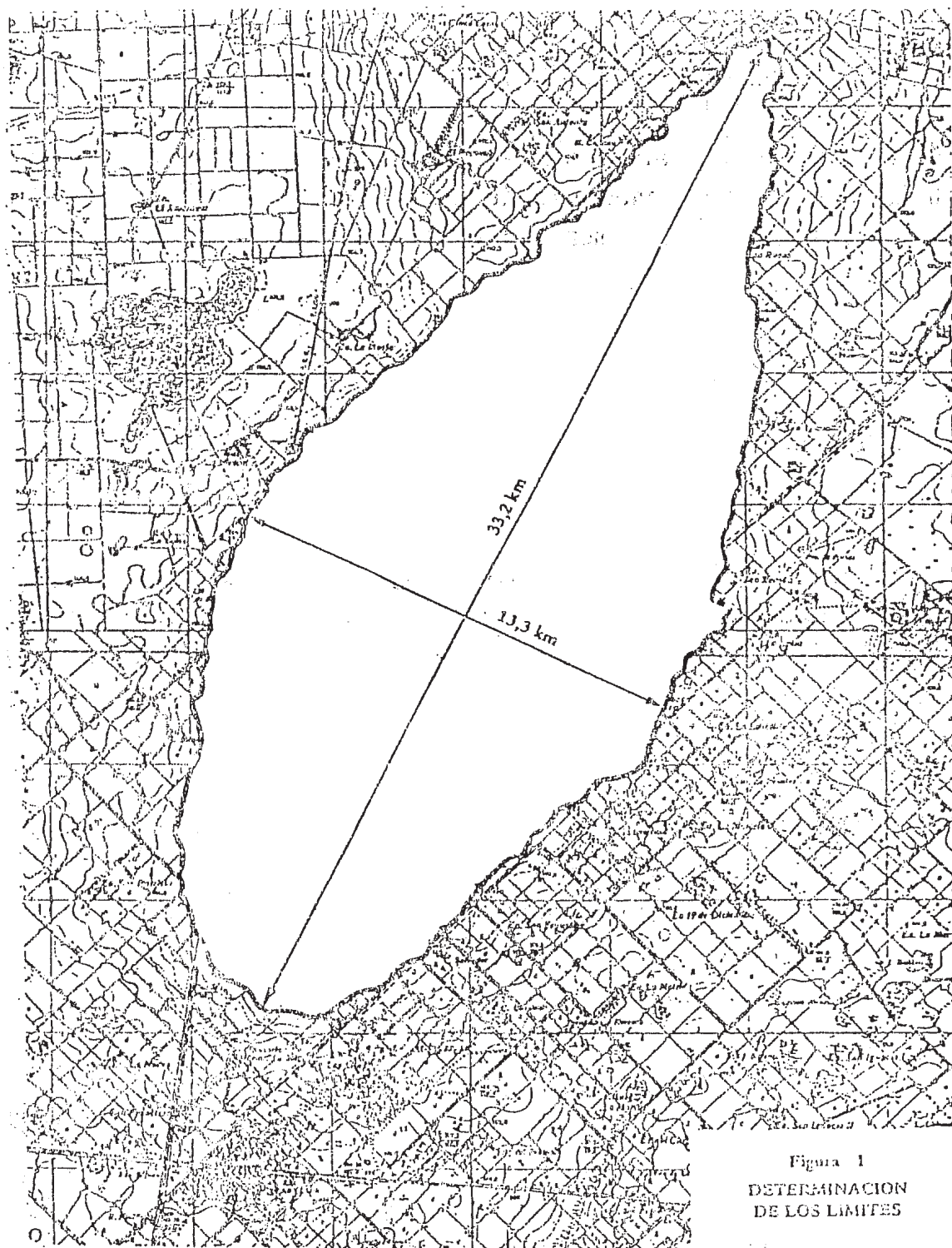
$$0,144 \text{ m}^3. \times 10.000 = 1.440 \text{ m}^3. \text{ de agua/día.}$$

ESTUDIO DEL ACUIFERO

DETERMINACION DE LOS LIMITES

Como resultado del relevamiento de los molinos existentes en la zona de las localidades mencionadas y del estudio de las curvas de nivel, se ha podido establecer que el acuífero se sitúa en un médano que se extiende en el área comprendida por la curva ce-

rrada de nivel correspondiente a cota 110 m. SNMM (cota de interés). Su aspecto geométrico asemeja una elipse deformada cuyos ejes alcanzan longitudes de 33,2 Km. y 13,3 Km. respectivamente. (Fig. 1).



SITUACION GEOGRAFICA

Su situación geográfica la podemos ubicar entre los $62^{\circ} 06' 21''$ y los $62^{\circ} 17' 39''$ de longitud Oeste y entre los $34^{\circ} 48' 00''$ y los $35^{\circ} 07' 00''$ de latitud Sur, en los partidos de General Pinto y Lincoln situados en el Noroeste bonaerense. (Fig. 2, situación gráfica acuífero-demanda).

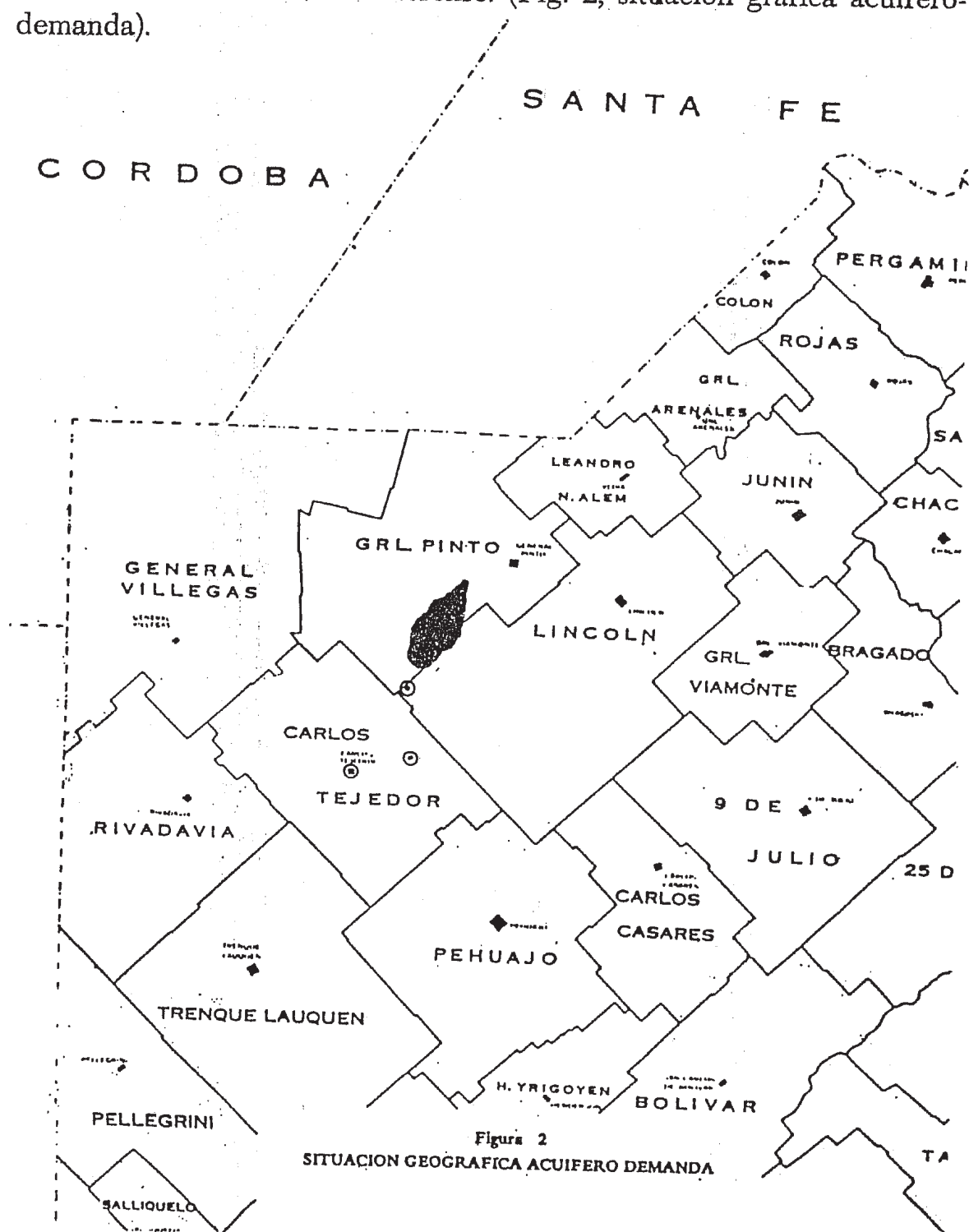


Figura 2
SITUACION GEOGRAFICA ACUIFERO DEMANDA

**POZO DE EXPLORACION, PROFUNDIDAD MAXIMA 41 mts. DETERMINACIONES QUIMICAS DE MUESTRAS
DE AGUA EXTRAIDAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES, NIVEL ESTATICO 11,3 mts. b.b.p.**

DETERMINACIONES QUIMICAS (mg/l)													
Profundidad Mts.	Nro. de Muestras	P. H.	Alcal. Total	As	Cl	Dureza Total	F	N03	N02	Residuo 105 ° C	S04	V	CALIFICACION
De 14 a 19	1	7,5	3,55	0,08	32	80	1,0	4	0	585	17	0,05	POTABLE
	2	7,5	3,60	0,08	32	90	1,0	4	0	587	20	0,05	POTABLE
	3	7,6	3,60	0,08	28	110	1,0	4	0	578	18	0,05	POTABLE
De 19 a 29	1	7,8	3,60	0,05	32	65	1,0	3	0	642	15	0,05	POTABLE
	2	7,8	3,60	0,05	35	50	1,0	3	0	624	18	0,05	POTABLE
	3	7,8	3,65	0,05	35	35	1,0	4	0	602	18	0,05	POTABLE
De 31 a 41	1	8,4	4,20	0,1	32	40	2,25	4	0	706	15	0,05	NO POTABLE
	2	8,4	4,15	0,1	35	25	2,25	4	0	621	16	0,05	NO POTABLE
	3	8,4	4,15	0,1	35	25	2,25	4	0	695	15	0,05	NO POTABLE

TABLA 1

Si llamamos: A el área aproximada por la semielipse de $\left\{ \begin{array}{l} \text{Semieje menor } a \\ \text{Semieje mayor } b \end{array} \right.$
 B el área aproximada por el rectángulo de lados c y d
 C el área aproximada por el triángulo de base e y altura f

y calculamos cada una de ellas, al sumarlas obtendremos una aproximación del área total.

$$\begin{aligned} \text{Area de A: } \frac{1}{2} \pi a.b \text{ con } a &= 5,650 \text{ Km., } b = 11,100 \text{ Km.} \\ A &= 98,512 \text{ Km}^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Area de B: } c.d \text{ con } c &= 5,750 \text{ Km., } d = 13,000 \text{ Km.} \\ B &= 74,750 \text{ Km}^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Area de C: } \frac{1}{2} e.f \text{ con } e &= 12,600 \text{ Km., } f = 16,000 \text{ Km.} \\ C &= 100,800 \text{ Km}^2. \end{aligned}$$

$$\text{Area total } A + B + C = 274,062 \text{ Km}^2.$$

AREA DE INTERES

Criterio de elección. En un primer análisis global, vemos que de las tres partes que hemos imaginado dividido el acuífero, una de ellas, la denominada Area A (Fig. 3), resulta ser la más apropiada para realizar la correspondiente explotación debido a su mayor proximidad con la ubicación geográfica de la demanda, circunstancia que redundará en una economía de la extensión del acueducto troncal que la abastecerá.

Queda entonces definida esta zona como Area de interés. En referencia cabe decir, que de las determinaciones químicas realizadas con las muestras de agua tomadas en el relevamiento de molinos, las correspondientes a la mencionada área y zonas de influencia las podemos observar como potables según la escala de OSBA.

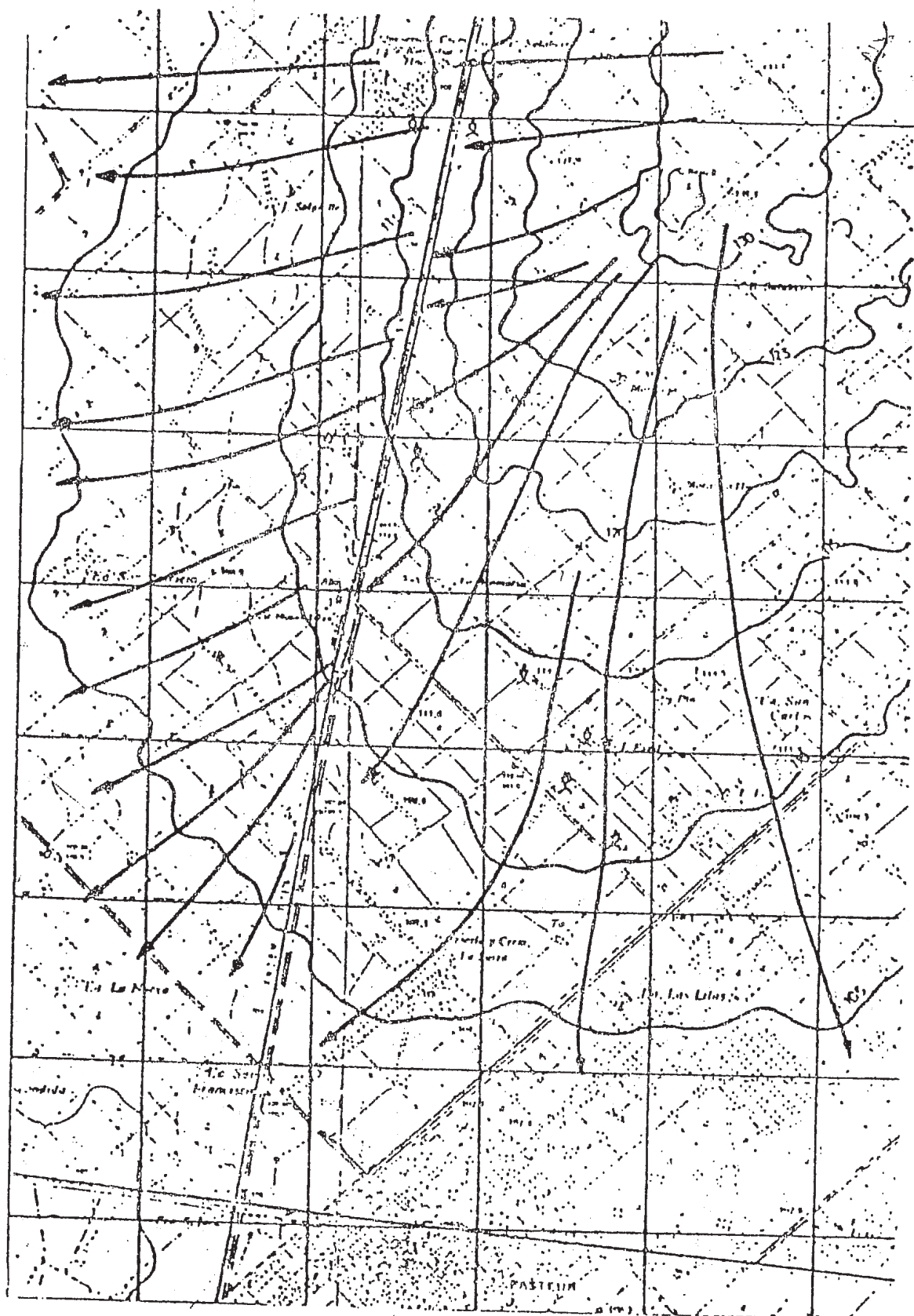


Figura 4

LINEAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

PERFIL TOPOGRAFICO

Podemos advertir en su topografía, que sus curvas de nivel se extienden entre la cota de interés 110 y la de máximo valor 133, determinando distintos gradientes de pendiente que gobiernan las condiciones de escorrentía superficial, como lo muestran las líneas de escurrimiento en la Fig 4. Del cálculo de sus valores se observa que los que atraviesan la línea del ferrocarril, son los gradientes más significativos del área (Figura 5).

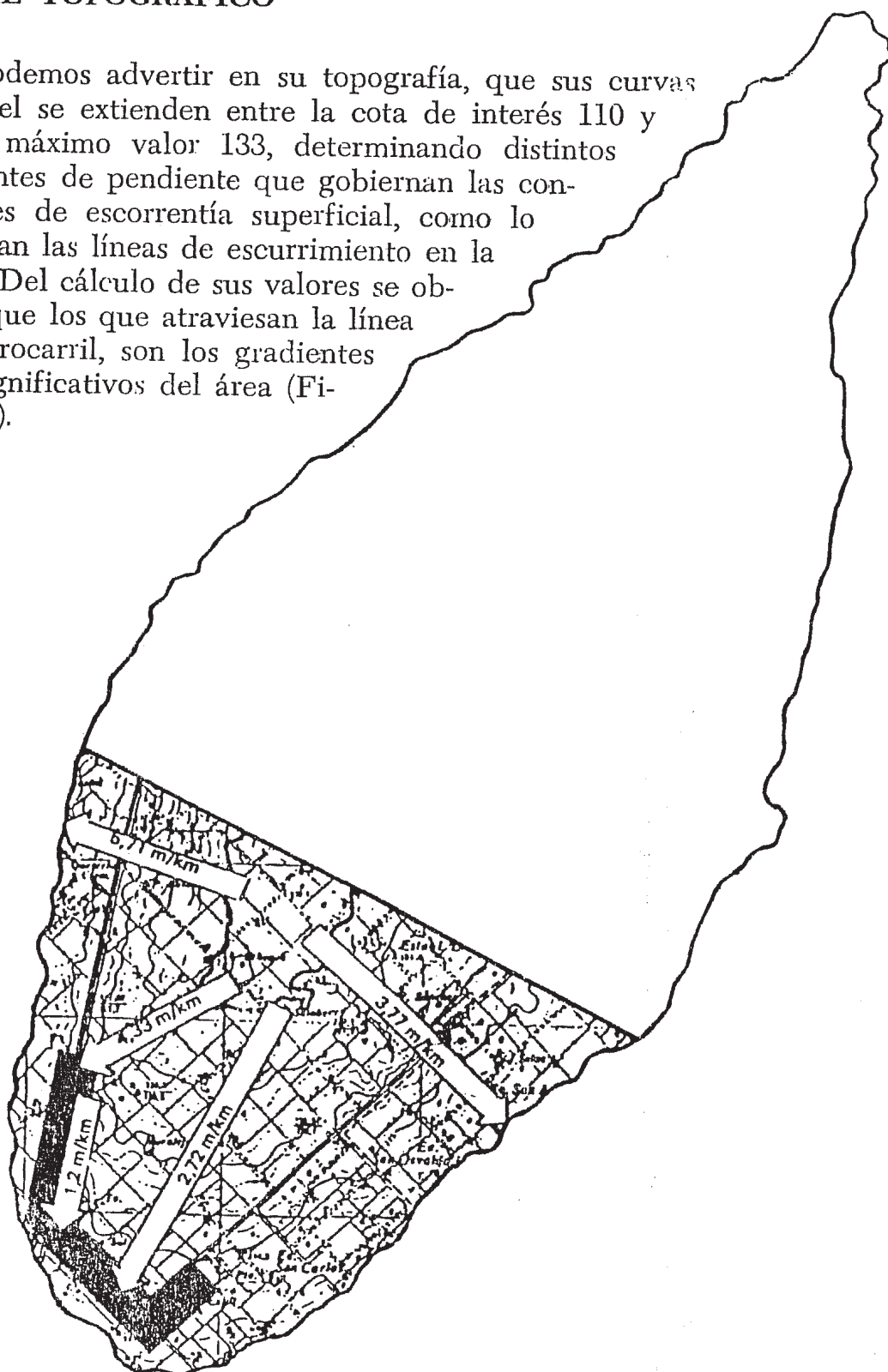


Figura 5
GRADIENTES DE PENDIENTE
Y ZONA DE EXPLOTACION

DETERMINACIONES QUIMICAS DE MUESTRAS DE AGUA DE POZOS DE EXPLOTACION A DIFERENTES TIEMPOS DE BOMBEO - CAUDAL: 5 m ³ / h.													
DETERMINACIONES QUIMICAS (mg/l)													
POZO DE EXPL. N°	FECHA	HORAS DE BOMBEO	p.H	ALCALINIDAD TOTAL	As	Cl	DUREZA TOTAL	F	NO3	NO2	RESIDUO 105 °C	SO4	CALIFICACION
1	6-5-82	2	7,4	375	0,05	28	65	1,3	12	0	612	15	POTABLE
1	6-5-82	4	7,4	375	0,05	28	65	1,3	12	0	641	13	POTABLE
1	6-5-82	6	7,4	375	0,05	28	65	1,3	12	0,01	596	14	POTABLE
1	6-5-82	16	7,4	380	0,05	32	65	1,3	8	0	610	13	POTABLE
1	6-5-82	18	7,4	380	0,05	32	65	1,3	8	0	541	13	POTABLE
1	6-5-82	20	7,4	380	0,05	32	65	1,3	8	0	539	12	POTABLE
1	7-5-82	3	7,5	370	0,05	32	60	1,3	8	0	560	12	POTABLE
1	7-5-82	5	7,5	370	0,05	32	60	1,3	8	0	546	12	POTABLE
1	7-5-82	6	7,6	365	0,05	32	65	1,3	8	0	541	11	POTABLE
3	14-5-82	2	7,4	405	0,05	35	95	1,15	5	0	704	17	POTABLE
3	14-5-82	4	7,5	405	0,05	35	85	1,7	5	0,01	635	13	POTABLE
3	14-5-82	6	7,5	390	0,05	32	75	1,4	6	0	635	15	POTABLE
3	14-5-82	10	7,5	390	0,05	32	70	1,4	6	0	645	15	POTABLE
4	4-6-82	2	7,9	320	0,05	46	90	0,75	13	0	570	18	POTABLE
4	4-6-82	4	7,9	320	0,05	43	90	0,75	13	0	570	18	POTABLE
4	4-6-82	6	7,9	325	0,05	43	90	0,8	13	0	569	18	POTABLE
4	5-6-82	2	7,3	345	0,05	43	110	0,06	2	0	570	17	POTABLE
4	5-6-82	4	7,3	345	0,05	50	110	0,06	2	0	575	17	POTABLE
4	5-6-82	6	7,4	340	0,05	39	120	0,06	2	0	575	18	POTABLE
4	5-6-82	8	7,4	340	0,05	43	120	0,06	2	0	580	18	POTABLE
5	10-6-82	Inicio	8,0	350	0,05	43	90	1,4	0	0	600	16	POTABLE
5	10-6-82	1	8,0	350	0,05	39	80	1,4	9	0	612	16	POTABLE
5	10-6-82	4	8,1	355	0,05	35	90	1,4	10	0,1	610	17	POTABLE
5	10-6-82	8	8,1	355	0,05	32	85	1,4	10	0	610	17	POTABLE
5	10-6-82	10	8,1	355	0,05	35	85	1,5	10	0	610	17	POTABLE
5	19-6-82	1	7,9	345	0,05	32	90	1,3	9	0,01	570	16	POTABLE
5	19-6-82	3	8,1	345	0,05	32	90	1,2	9	0,01	573	14	POTABLE
5	19-6-82	4	8,2	345	0,05	28	95	1,2	9	0	550	13	POTABLE

VEGETACION DE LA ZONA

Como consecuencia de la explotación agrícola-ganadera de la zona, se realiza una rotación de cultivos especialmente de trigo, sorgo y girasol.

Se encuentran algunos montes forestales de creación artificial.

ZONA DE EXPLOTACION

El perfil topográfico del área de interés presenta una de las condiciones más favorables para situar la zona de explotación, como vemos en la Fig. 5 sobre la línea quebrada delimitada por las vías del ferrocarril Mitre, la calle de acceso a la Estación Nueva Suiza y el acceso que corta a esta última en un ángulo de 90° , al aprovechar la circunstancia de que los respectivos terraplenes, obrando como "muros de contención", se oponen a las corrientes de escurrimiento que los gradientes de pendiente generan. De esta forma, se logra demorar la permanencia de importantes volúmenes de agua sobre el terreno, favoreciendo su correspondiente infiltración.

La existencia de los terraplenes compensa en grado harto suficiente, la circunstancia de que en la zona de captación existan gradientes de pendiente significativos, los que al provocar una mayor velocidad de escurrimiento, harían disminuir la posibilidad de infiltración, de no existir aquéllos.

POZOS DE EXPLOTACION O PILOTOS

Para explotar las condiciones hidrogeológicas del suelo y así poder decidir las características de los pozos de captación, se construyeron dos pozos (pilotos) en la zona de explotación.

PERFIL LITOLÓGICO DE LA ZONA DE EXPLOTACION

De la toma de muestras de suelos realizada en las perforaciones de los pozos exploración (pilotos), pudo determinarse el siguiente perfil litológico:

Profundidad en Mts. b.b.p.

De 0,0 hasta 0,3	Arcilla limosa pardo amarillenta clara con abundantes nódulos calcáreos.
De 0,3 hasta 0,5	Arcilla limosa parda oscura no calcárea.
De 0,5 hasta 10,0	Arcilla pardo rodada con escasos nódulos calcáreos.
De 10,0 hasta 15,0	Arcilla limosa pardo amarillento claro con calcáreo.
De 15,0 hasta 19,0	Limo arenoso muy fino pardo amarillento o rodado con abundantes nodulitos calcáreos.
De 19,0 hasta 21,0	Limo arenoso fino más arcilloso que el anterior pardo oscuro no calcáreo.

Se determinó que el nivel estático está a una profundidad de 11,3 m. b.b.p.

DETERMINACION QUIMICA DE MUESTRAS DE AGUA - POZO EXPLORACION

Con las muestras de agua extraídas a diferentes profundidades por los pozos exploración (pilotos), se realizaron las determinaciones químicas que figuran en la tabla 1.

DEFINICION Y CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES

Si las condiciones hidrogeológicas resultantes de la exploración del suelo de la zona de explotación, se extrapolan para toda el área de interés, teniendo en cuenta que su estratificación no presenta discontinuidades apreciables, podemos definir a nuestro sistema como "un acuífero libre" (no confinado) con una configuración semejante a una lente de agua químicamente potable, que flota sobre un substrato no potable.

Las características fundamentales son:

Porosidad:

Total: $m_t = 45 \%$ del volumen total

Eficaz: $m_e = 15 \%$ del volumen total

PERMEABILIDAD.: Si confrontamos el perfil litológico con los valores de la tabla 2, tendremos para la permeabilidad un coeficiente 10^{-2} m/día.

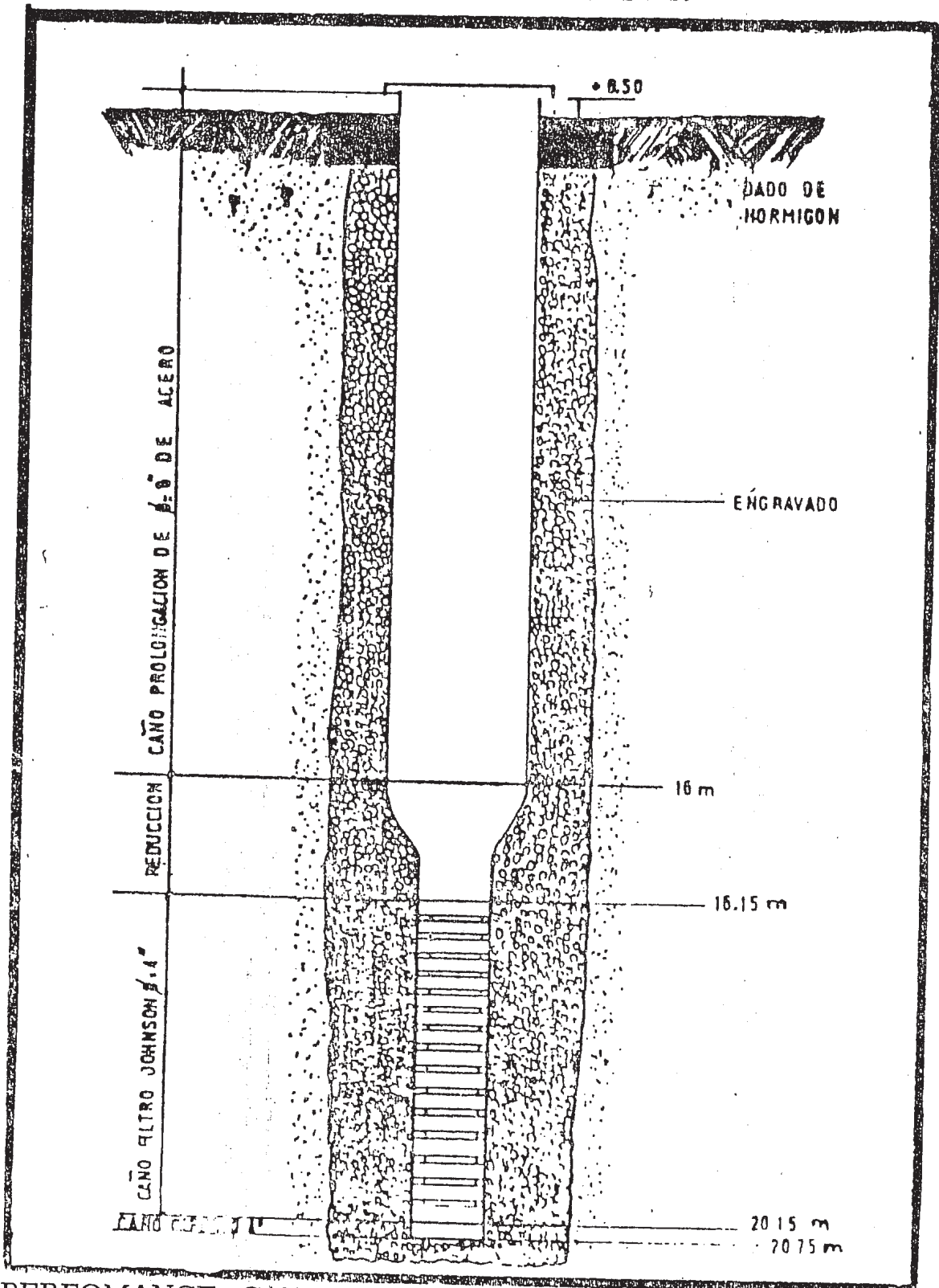
COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO: Por tratarse de un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento será igual a su porosidad eficaz o sea 15% del volumen total.

POZOS DE CAPTACION

De acuerdo al volumen de la demanda global y conocidas las condiciones hidrogeológicas del suelo de la zona de explotación, se construyeron 24 pozos iguales de captación cuyas características son:

PERFIL DE ENTUBAMIENTO: Como podemos observar en la figura 6 dicho perfil consta de un caño de acero de 8' de \varnothing hasta una profundidad de 16 mts. y luego de una reducción de 0,15 mts., un filtro de acero inoxidable de 4' de \varnothing hasta una profundidad de 20,75 mts. El entubamiento se encuentra engravado hasta la boca de pozo. Sobre la boca de pozo se construyó una pequeña cámara y pilar que afloja los tableros electromecánicos de manejo de la bomba.

Figura 6
PERFIL DE ENTUBAMIENTO
DE LOS POZOS EXPLOTACION



PERFORMANCE: CAUDAL = $5\text{ m}^3/\text{h}$.

ALTURA MANOMETRICA DE CADA EQUIPO ELECTROBOMBA:
35 mts.

TABLA 2

Calificación de acuíferos según la permeabilidad

Permeabilidad 10^4 10^3 10^2 10^1 1 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} (m/día)				
Tipo de terreno	Grava Limpia	Arena limpia: mezcla de grava y arena	Arena fina, arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas	Arcillas no meteorizadas
Calificación	Buenos acuíferos		Acuíferos pobres	Impermeables
Capacidad de drenaje	Drenan bien		Drenan mal	No drenan

DISTANCIA ENTRE POZOS: El cono de depresión que se origina en toda la extensión del filtro (4 mts. de longitud) determinó que los 24 pozos se construyeran con una separación de 300 mts. (Fig. 7). Esta equidistancia asegura una captación simultánea de todos los pozos, en el caso de tener que atender un pico de consumo excepcional, sin provocar un traslapamiento de los conos y por ende originar una depresión generalizada en toda la zona de explotación, que produciría la escensión del agua del substrato no potable. Así se verificó en los ensayos el bombeo de los pozos de explotación observando en ellos los niveles dinámicos y comparándolos con los de los pozos pilotos.

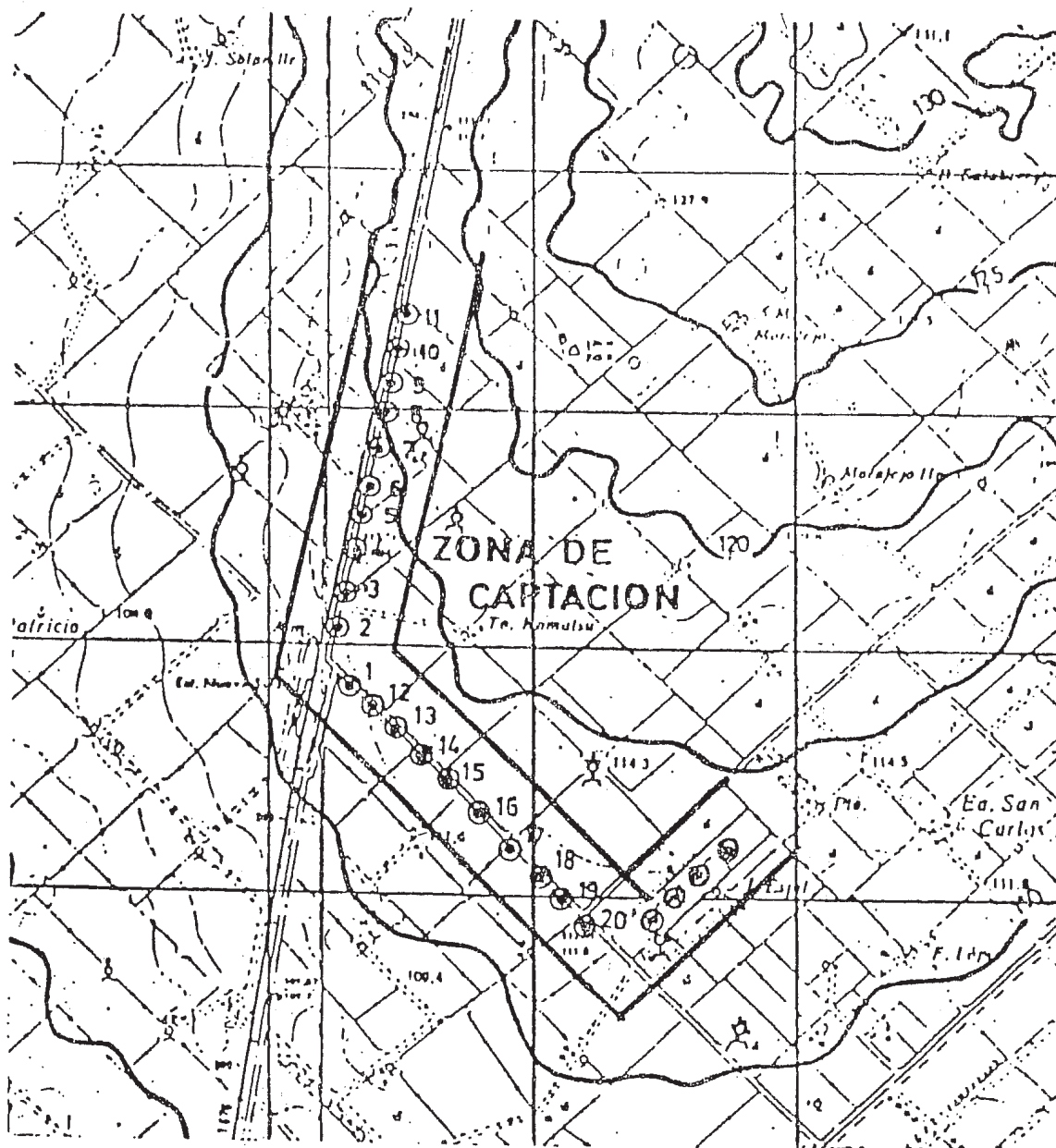


Figura 7
UBICACION DE LAS PERFORACIONES

DETERMINACION QUIMICA DE MUESTRAS DE AGUA - POZO CAPTACION

De las muestras de agua de los pozos captación con diferentes tiempos de bombeo, se practicaron las determinaciones químicas que podemos ver en la Tabla 3.

ESTIMACION DE LA RESERVA HIDRICA

Habíamos dicho, que el volumen de agua contenido en una muestra de suelo, estaba determinado por la porosidad eficaz m_e , es decir:

$$m_e = \frac{V_a}{V_t}$$

donde: V_a = Volumen de agua

V_t = Volumen total

y que para nuestro sistema (Acuífero), m_e era igual al 15 %. Entonces haciendo:

$$V_a = m_e \cdot V_t \quad (1)$$

vemos que, para estimar la reserva hídrica del Sistema, sólo nos resta obtener el valor de V_t , que será:

$$V_t = S \times h$$

donde: S = Superficie del acuífero (área de interés)

h = Altura de la lente de agua potable hasta su nivel estático.

O sea:

$$V_t = 100 \times 16^6 \text{ m} \times (30 \text{ m} - 11,3 \text{ m})$$

$$V_t = 1870 \times 10^6 \text{ m}^3$$

luego reemplazando V_t en (1); tendremos una estimación de la reserva del orden de:

$$V_a = 0,15 \times 1870 \times 16^6 \text{ m}^3$$

$$V_a = 280,5 \times 16^6 \text{ m}^3$$

ZONA DE OBSERVACION

OBJETO. La zona de observación nos permite tomar conocimiento del estado del sistema y de las magnitudes de las variables meteorológicas que influyen en él.

Constituye un elemento fundamental que sirve para efectuar el control de acuífero y para cuando sea necesario ampliar la zona de explotación del mismo.

POZOS DE MEDICION. Se distinguen dos clases de pozos: piezométricos y de observación, que podemos ubicar en la Fig. 8.

PIEZOMETRICOS: Tienen un perfil de entubamiento constituido por un caño de P.V.C. reforzado de 8' de \varnothing y una longitud de 20 m. b.b.p., ranurado en su parte inferior, lo que le permite conectarse, mediante una cámara de mampostería protectora con tapa, a un instrumento llamado limnógrafo. Dicho instrumento se utiliza para registrar, en una banda, las variaciones del nivel piezométrico —ya sea estático o dinámico— durante tiempos prolongados, por ejemplo, 15 a 30 días sin cambio de banda.

Existen dos pozos piezométricos: el Pz_1 , ubicado en la zona de captación, mide las variaciones del cono generalizado de depresión

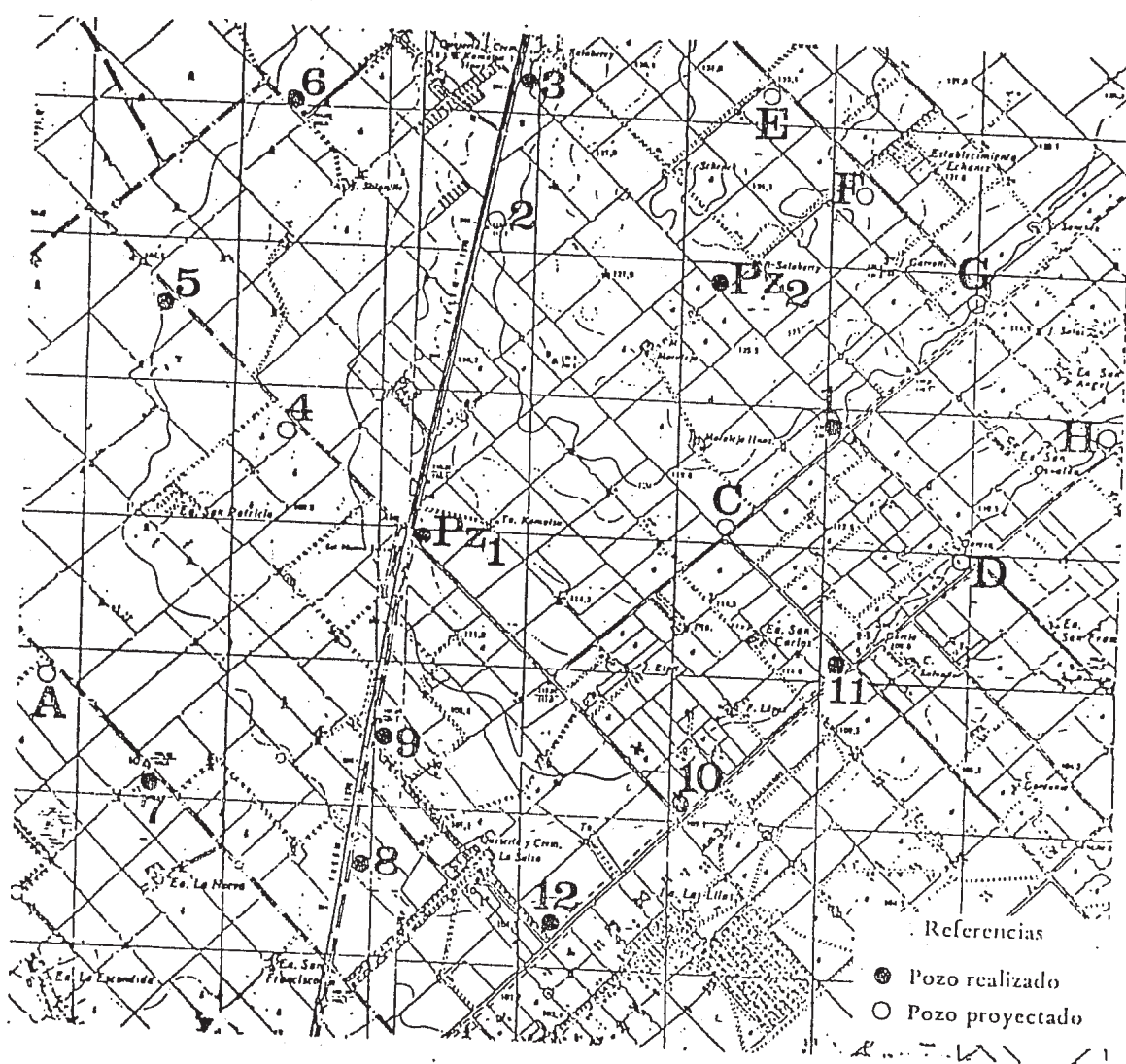


Figura 8
UBICACION DE LOS POZOS DE MEDICION Y ZONA DE OBSERVACION

en dicha zona. Estas variaciones se relacionan con los cambios del nivel dinámico que a su vez varía con el régimen de explotación. El otro, el Pz₂ ubicado fuera de la zona de captación y cerca de la parte más alta de la lente, mide las variaciones del nivel estático.

DE OBSERVACION: Tienen un perfil de entubamiento constituido por un caño de P.V.C. de 4' de \varnothing y una longitud de 20 mts. b.b.p., ranurado en su pared inferior. Estos pozos miden las variaciones del área de interés. Existen 10 pozos de observación.

Las determinaciones efectuadas por los pozos de medición se detallan en la Tabla 4.

OTROS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

En el relevamiento no se constató la existencia de otros instrumentos sobre el acuífero, tales como:

Pluviómetros: para determinar la cantidad de lluvia caída.

Pluviógrafos: para registrar de modo continuo sobre una banda la variación de lluvia con el tiempo-intensidad.

Lisímetros: para determinar volúmenes de la evapotranspiración real.

Termógrafos: para registrar el modo continuo sobre una banda la variación de temperatura.

Infiltrómetros: para determinar la capacidad de infiltración del suelo.

TABLA 4

Determinación de los niveles estáticos efectuadas desde boca de pozo

Pozo	Fechas		
	19/7/83	5/11/83	15/12/83
P.O. 1	11.67 m	11.63 m	11.67 m
P.O. 3	11.07 m	10.94 m	10.36 m
P.O. 5	2.42 m	2.84 m	3.06 m
P.O. 6	2.26 m	2.76 m	2.67 m
P.O. 7	4.49 m	4.66 m	4.54 m
P.O. 8	5.86 m	5.86 m	5.88 m
P.O. 9	10.01 m	9.97 m	9.97 m
P.O. 10	10.36 m	10.34 m	10.40 m
P.O. 11	8.89 m	8.86 m	8.75 m
P.O. 12	7.61 m	7.62 m	7.72 m
P.Z. 1	11.34 m	11.32 m	11.21 m
P.Z. 2	14.76 m	14.75 m	14.76 m

REFERENCIAS:

P.O.: POZO DE OBSERVACION

P.Z.: POZO PIEZOMETRICO

6. SOLUCION FACTIBLE. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO PLUVIOMETRICO.

DATOS DE LLUVIA

Definido el Sistema hidrogeológico podemos comenzar el estudio del comportamiento de la precipitación a lo largo del tiempo sobre el mismo, a partir de los datos de lluvia contenidos en las lecturas pluviométricas realizadas en su área de interés. Sin embargo, la falta de instrumental adecuado para medir la precipitación —entre otras variables metereológicas—, advertida en la zona de observación como resultado del relevamiento y la característica de homogeneidad física —climática predominante en toda el área de influencia del sistema, hicieron válidos los datos de lluvia obtenidos con las determinaciones pluviométricas realizadas en la estación PASTEUR —partido de Lincoln— (situado a unos 4 kilómetros del límite sur del acuífero).

SERIE HISTORICA

Los datos de lluvia mencionados se agruparon formando totales mensuales. Con estos valores mensuales se confeccionó una serie histórica de datos igualmente espaciados. Esta serie cubre un período de tiempo de 52 años o sea desde 1930 hasta 1981, con un total de 624 datos.

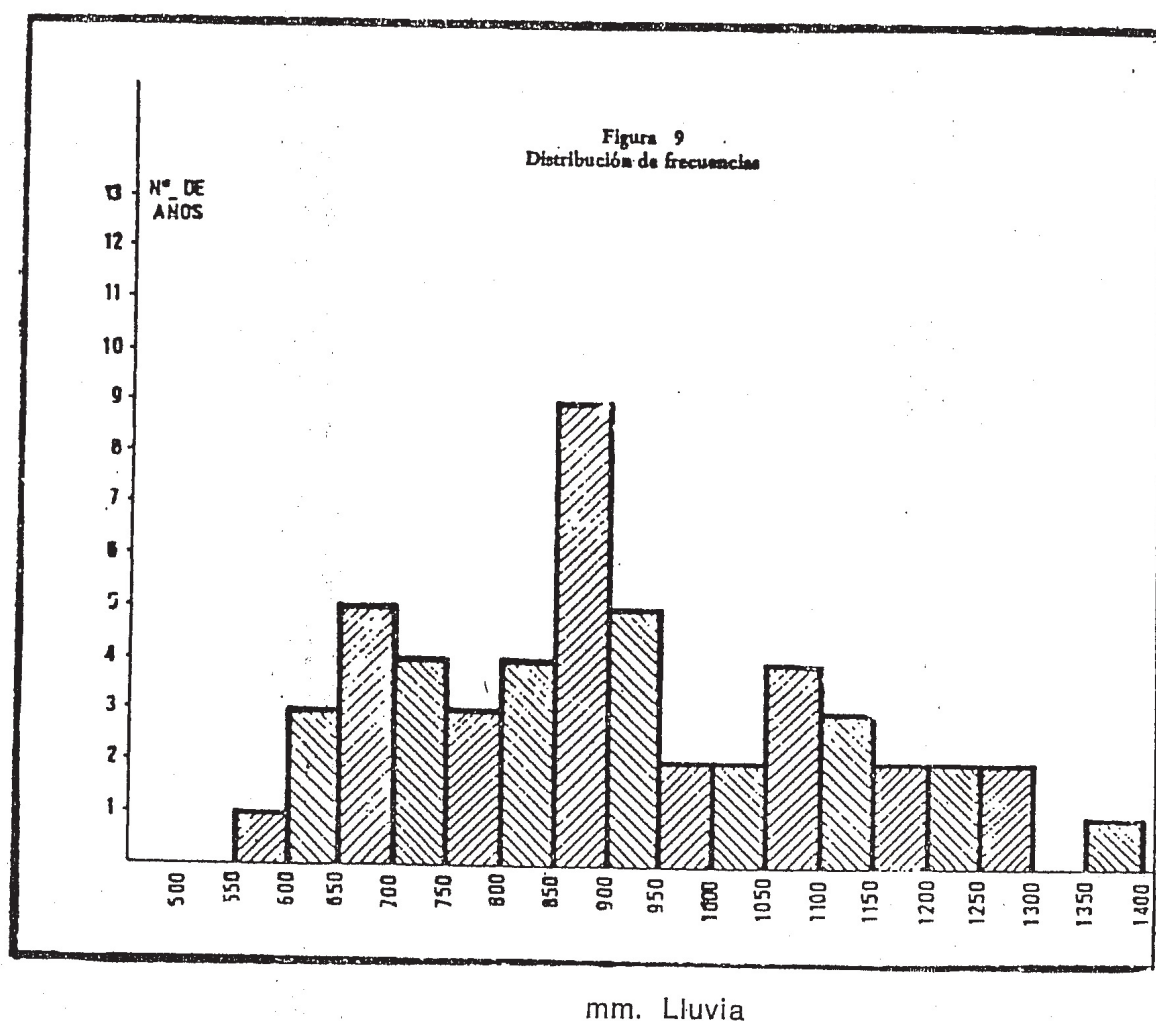
ESTUDIOS PREVIOS

Operando con los términos de la serie y antes de entrar de lleno a su estudio, podemos observar algunos comportamientos, como por ejemplo: marcando los valores anuales, de máxima, mínima y total, al graficarlos contra el número de años nos dará la variación que han seguido los mismos a lo largo de la serie.

Sumando los valores de un mismo mes para todos los años de la serie y dividiendo por el número de años, obtendremos el valor

total medio para ese mes. Con los valores totales medios de cada mes podemos graficar una curva tipo anual, o sea tenemos el comportamiento de la precipitación media anual.

Por último con los valores de la serie se puede realizar un conteo estadístico a fin de lograr una distribución de frecuencias (Fig. 9).



METODO EMPLEADO

Para abordar el estudio de la serie de tiempo, se utilizó —dentro del análisis armónico generalizado— el análisis de Fourier para una serie finita de datos igualmente espaciados.

Asimismo, se estimó conveniente aplicar al espectro de potencia resultante, una ventana o filtro de suavización de Hanning dado por la función triangular:

$$(S_n)^2 = \frac{(S_n - 1)^2}{4} + \frac{(S_n)^2}{2} + \frac{(S_n + 1)^2}{4}$$

Como método de cálculo para la solución se implementó un programa de computadora que, para el correspondiente espectro de potencia, calcula los valores de: los coeficientes A (N), B (N), la potencia o amplitud al cuadrado XOUT (N), el módulo o raíz cuadrada de la potencia XOUT² (N) y las correspondientes suavizaciones de XOUT (N) y XOUT² (N) para una serie de tiempo de las características mencionadas. Este programa acepta un conjunto finito ordenado de valores y efectúa los cálculos mencionados para todas las armónicas posibles (N/2). O sea, que en nuestro caso, ingresaron los 624 datos de la serie y se obtuvieron los cálculos referidos para 312 armónicas.

RECURSO Y SOPORTE

Para el tratamiento de los datos se utilizó una procesadora marca Texas Instrument de 256 KB de memoria, y dos unidades periféricas de Diskettes de 0,5 MB cada una. La programación correspondiente fue efectuada por los Lic. Gianibelli y Gentile con la colaboración del Sr. César Ferri, utilizándose Lenguaje BASIC extendido.

ANALISIS DEL ESPECTRO DE POTENCIA

Del análisis espectral, (calculado en forma clásica) se extractaron las armónicas cuyas amplitudes eran relevantes frente al nivel de ruido que presentaba el espectro. Esto está en correspondencia con la gráfica (Fig. 10) respectiva. En las tablas 5 y 6 se volcaron las armónicas correspondientes a períodos largos (mayor o igual a 1 año) y a períodos cortos (menores de 1 año), respectivamente.

En la Tabla 5 (períodos largos) se observa una modulación de 26 años y otra de 1,85 años cuyo origen deberá buscarse en factores climáticos megacíclicos en el primer caso. Para los períodos inferiores

a 2 años se tiene una distribución de armónicas que tiende al período clásico y fundamental anual que presenta la mayor amplitud, es decir, obedece fundamentalmente a una ciclicidad de 1 año a la que se agregan períodos comprendidos entre 1 y 2 años, $2\frac{1}{2}$ años, $3\frac{3}{4}$ años, $5\frac{3}{4}$ años, $6\frac{1}{2}$ años y 26 años. Llama la atención que el período correspondiente a la armónica número 2 haya surgido con un valor entero frente al resto de las armónicas, su amplitud ocupa el cuarto lugar.

En la tabla número 6 (períodos cortos) se tiene una distribución donde abundan mayor cantidad de armónicas en los períodos comprendidos entre los 3 y 4 meses. Es allí donde se encuentra la segunda armónica representativa frente a las demás con magnitud de 10,595 y período de 3,94 meses —podríamos decir prácticamente, de 4 meses—. Se hace notar también que el tercer lugar lo ocupa una onda semianual con amplitud de 9,912.

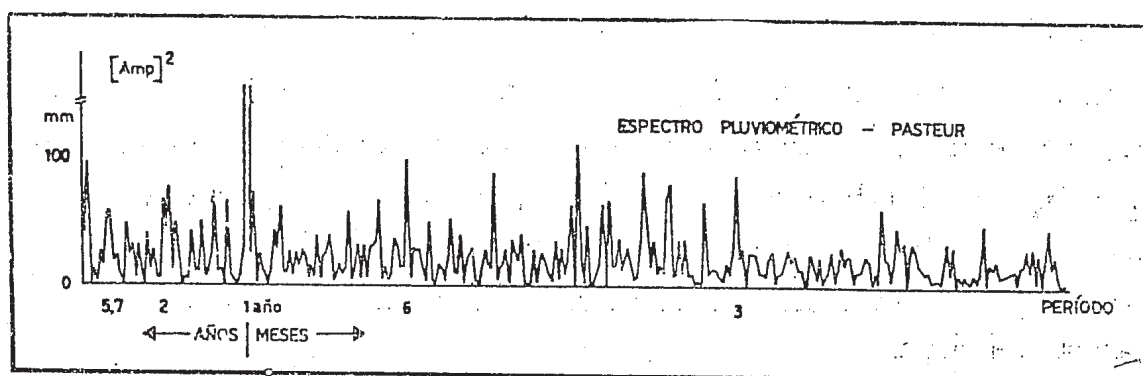


FIGURA 10

Todos estos períodos no enteros que presenta el espectro, colabora a darle a la curva resultante de la síntesis armónica, la forma de semejanza a la real.

Cabe destacar que el ruido con amplitud menor que 5,8 mm., será representado en el modelo mediante una variable aleatoria.

FORMULACION DEL MODELO MATEMATICO

Debido a que se modifica la forma en que interviene en las diferentes ecuaciones de balance hídrico, la variable pluviométrica

—que ahora es posible determinar en forma casi predictiva por sus valores probables futuros mes a mes y compararlos con las observaciones— se puede proponer para la misma, el siguiente modelo matemático:

$$P(t) = C_o + \sum A_k \cos \left(\frac{2\pi kt}{N} \right) + B_k \text{ Sen } \left(\frac{2\pi kt}{N} \right) + \epsilon(t) \quad (1)$$

con $[\epsilon(t)] \leq 5,8$

donde: Precipitación (P) pasa a ser una función temporalmente variable, K es el número de las armónicas tabuladas en las tablas 5 y 6 y $\epsilon(t)$ es una variable aleatoria con módulo menor o igual que 5,8. Si en las ecuaciones clásicas reemplazamos P por la expresión (1), los balances pueden realizarse entonces en forma retrospectiva para los meses anteriores al momento de efectuar las determinaciones y en forma adelantada hasta por lo menos estimativamente 6 meses, con control mensual y redeterminación trimestral de los coef. A_k y B_k de las tablas 5 y 6. Es decir, se efectúa un control del balance a medida que transcurren los meses ajustándose a las nuevas formas que la variable pluviométrica toma ante la variabilidad climática del área.

REFORMULACION DEL MODELO MATEMATICO DE BALANCE

De acuerdo a lo expuesto en el párrafo anterior, utilizando P(t) en la ecuación de balance de masa:

$$C_o + \sum A_k \cos \left(\frac{2\pi kt}{N} \right) + B_k \text{ Sen } \left(\frac{2\pi kt}{N} \right) + \epsilon(t) = ET(t) + R(t) + AS(t)$$

donde ET(t) es la evapotranspiración, R(t) son las escorrentías y S(t) es la variación de la reserva hídrica.

TABLA 5

 Espectro potencia - Armónicas de período largo ≥ 1 año

Armónica Nº	Período (Años)	Coeficientes		Amplitud C m.m	Angulo de Fase \varnothing
		A	B		
2	26,00	1,548	—9,599	9,723	179°,83
8	06,50	—6,643	—3,316	7,424	243°,47
9	05,77	5,772	—5,075	7,686	131°,32
14	03,71	1,285	—6,845	6,964	169°,36
21	02,47	—6,124	0,995	6,205	279°,22
26	02,00	—8,052	—1,411	8,175	260°,06
38	01,85	3,807	8,320	9,150	24°,58
30	01,73	3,621	—5,958	6,972	148°,71
35	01,48	—2,981	5,815	6,534	332°,85
38	01,36	—2,398	6,655	7,074	340°,18
42	01,23	—5,915	—5,779	8,270	225°,66
46	01,13	2,973	7,590	8,151	21°,39
52	1	42,125	0,482	42,128	89°,34

$$\frac{1}{N}$$

 VALOR MEDIO: $C_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(t_i)$

$$N \quad i=1$$

$$C_0 = 75,69$$

TABLA 6

Espectro potencia - Armónicas de período corto < 1 año

Armónica Nº	Período Meses	Coeficientes		Amplitud C m m	Angulo de Fase Ø
		A	B		
54	11,55	6,100	—6,021	8,571	134º,62
61	10,22	5,730	3,360	6,643	59º,61
63	09,90	2,185	—7,591	7,899	163º,94
75	08,32	—1,659	6,025	6,249	344º,60
79	07,89	—5,858	2,563	6,395	293º,63
85	07,34	0,256	—7,590	7,594	178º,06
95	06,56	5,502	—6,075	8,196	137º,83
100	06,24	3,300	—5,101	6,075	147º,09
104	06,00	—8,802	4,557	9,912	297º,37
111	05,62	—3,439	—6,181	7,073	209º,09
118	05,28	—6,013	4,115	7,286	304º,38
121	05,15	—2,948	5,614	6,341	332º,29
132	04,72	—8,586	—3,233	9,175	249º,36
138	04,52	3,282	—5,088	6,055	147º,17
140	04,45	—2,385	5,973	6,431	338º,23
151	04,13	6,151	—1,177	6,262	100º,83
156	04,00	—5,980	5,171	7,906	310º,85
158	03,94	4,665	—9,512	10,595	153º,87
161	03,87	6,464	2,352	6,879	70º,00
166	03,75	7,314	—3,265	8,010	114º,05
168	03,71	—2,706	7,807	8,262	340º,88
171	03,64	3,624	5,034	6,203	35º,75
179	03,48	—4,408	8,448	9,529	332º,44
182	03,42	2,366	—5,515	6,001	23º,21
186	03,35	—6,008	5,737	8,308	313º,67

TABLA 6 (Cont.)

Armónica Nº	Período Meses	Coeficientes		Amplitud C m m	Angulo de Fase Ø
		A	B		
187	03,33	—6,399	6,495	9,118	315º,42
190	03,28	6,023	—0,268	6,029	92º,54
192	03,25	—5,816	—1,358	5,972	256º,85
198	03,15	5,868	5,652	8,147	46º,07
208	03,00	3,240	—8,693	9,277	159º,55
254	02,45	5,326	5,831	7,897	42º,40
259	02,40	3,384	5,988	6,878	29º,47
261	02,39	0,349	—5,966	5,976	176º,65
264	02,36	5,485	2,184	5,903	68º,28
275	02,26	—5,740	—1,823	6,022	252º,38
287	02,17	—6,469	2,744	7,027	292º,98
307	02,03	4,991	—4,388	6,646	131º,32

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se arribó en el presente estudio son las siguientes:

VARIABLE DE ENTRADA

Si consideramos que la precipitación es no sólo la variable fundamental de entrada a nuestro sistema hidrogeológico sino también la materia prima que lo alimenta, podremos ponderar la importancia del estudio de sus variaciones temporales, en todo análisis del comportamiento de la relación estímulo-respuesta, que sobre el sistema se practique.

En consecuencia, el método desarrollado de análisis pluviométrico tiende a adecuar en forma predictiva (y al mismo tiempo retrospectiva), la formulación de balance y estimación de reservas

hídricas a lo largo del tiempo, con el fin de facilitar la toma de decisiones en cuanto a la productividad de la zona de captación, permitiendo un control real, a través de la zona de observación, de los parámetros de infiltración y escorrentía subterránea los que ya no sólo serán variables en el espacio sino también en el tiempo

SISTEMA HIDROGEOLOGICO

El problema hidrológico adquiere su mayor complejidad cuando pretendemos identificar el estado y la naturaleza del sistema. En efecto nuestro sistema, como todo acuífero, actúa como una caja negra —estructura desconocida e inaccesible— que transforma la señal de entrada —precipitación— en una corriente subterránea suavizada. Y en realidad se compone de dos sistemas, el sistema acuífero propiamente dicho y el sistema límite responsable en este

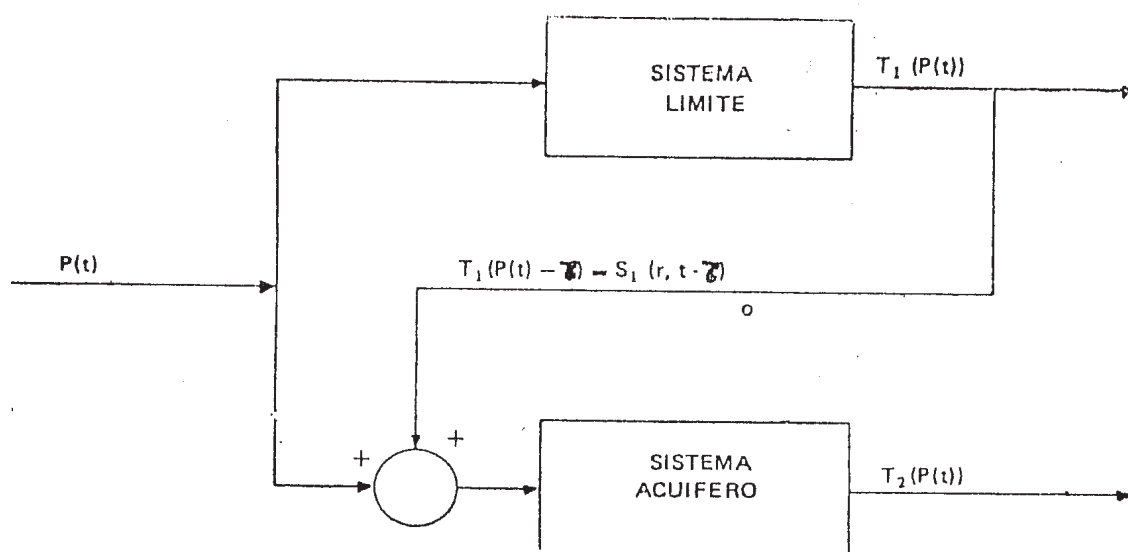


Figura 11
MODELO HIDROLOGICO

caso, de las funciones de transferencia correspondiente a los procesos de evapotranspiración y escorrentía superficial. Es decir, que la variable de entrada —pluviométrica— actúa sobre un sistema pro-

pio al que lo alimenta —acuífero— y sobre otro, que representa las relaciones de transferencia con el entorno o medio ambiente —límite— (Fig. 11).

VARIABLE DE SALIDA

Del esquema expuesto en la Fig. 11 se verifica la no linealidad del sistema, ya que, se ha supuesto que el sistema límite tiene una segunda entrada al sistema principal —acuífero— de forma retardada $S_1(r, t - \xi)$ que representa la esorrentía que infiltrará en forma retardada, a medida que transcurre el proceso pluviométrico. Esta expresión, tiene por objeto también representar aquellas partes de esorrentía superficial, que llega a límites del acuífero donde no ha ocurrido el fenómeno de precipitación, funcionando en este caso como entrada. Esto es razonable y real para nuestro caso, debido a la superficie total del acuífero.

Las variables de salidas son por lo tanto, la evapotranspiración y la esorrentía superficial para el sistema límite y la esorrentía subterránea y todo otro sistema artificial que por algún medio extraiga el fluido contenido en la estructura porosa, para el sistema acuífero.

INFLUENCIAS DEL ENTORNO

Las influencias que ejerce el entorno sobre el sistema están representadas fundamentalmente por factores meteorológicos tales como: radiación, temperatura, insolación, presión, humedad y viento.

Así vemos que el sistema atmosférico efectúa la precipitación pluvial sobre un área, según condiciones termo-hidrodinámicas de la atmósfera. Es de suponer entonces, que la evapotranspiración en áreas del entorno se pueda condensar y precipitar en el área de interés del sistema. Esto es fundamentalmente gobernado por los gradientes béricos y térmicos que generan los campos de viento (incluyendo el aspecto turbulento).

En resumen, existiría una realimentación por evapotranspiración de un área a otras, en sentido más amplio, de una región a otra. Sin embargo estas regiones no deben considerarse muy extensas, siendo necesario una estimación de las mismas, ya que, se ha observado numerosos frentes de tormenta que precipitan previamente en áreas —del entorno— cercanas entre 10 y 15 Km. al área de interés —del sistema— pasando sobre esta última sin efectuar precipitación y volviendo luego a efectuarla más adelante.

Siendo el fenómeno mencionado comprensible metereológicamente, ya que depende de los factores resumidos anteriormente, el desconocimiento de las características pluviométricas del entorno, impiden dar un mejor ajuste a la formulación del balance hídrico correspondiente.

RELACION DE VOLUMENES

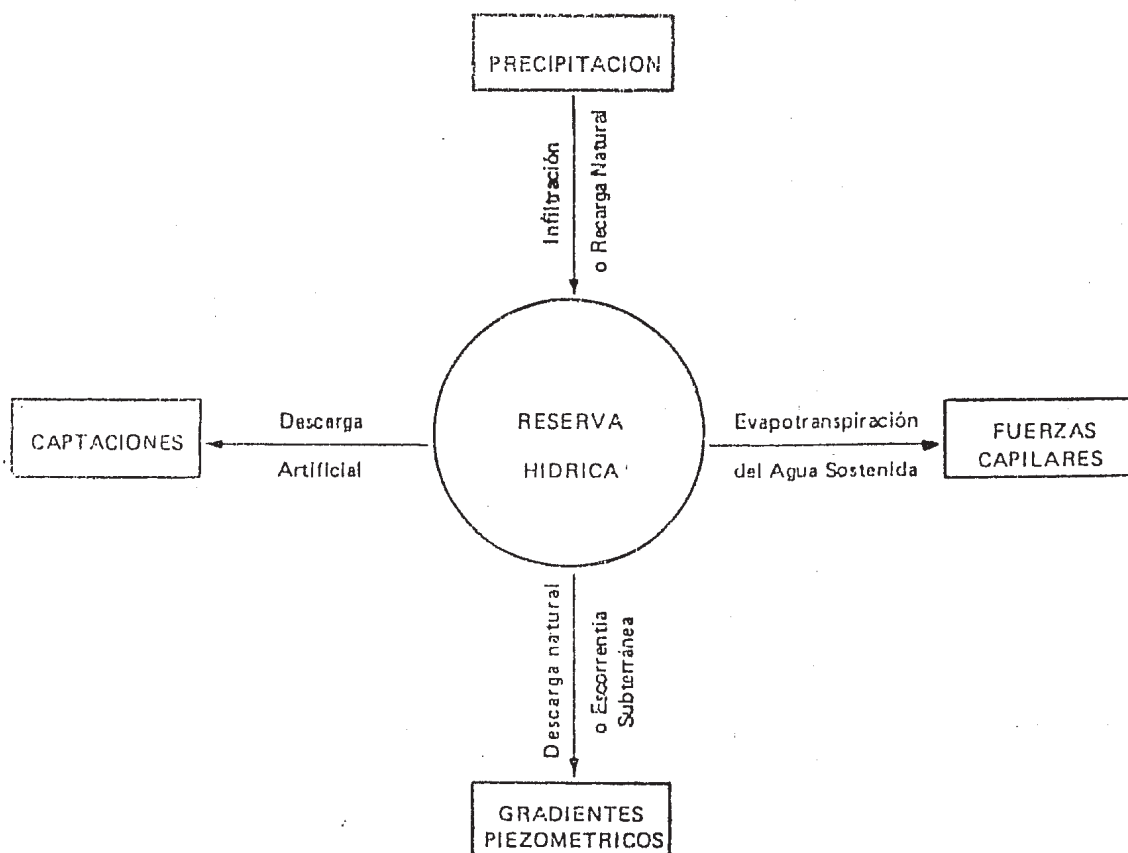


Figura 12
VARIACION DE LAS RESERVAS HIDRICAS

Por último, cabe señalar que, si bien la solución factible no alcanzó a resolver la problemática planteada en forma integral, se puede al menos establecer una relación de volúmenes entre la precipitación, la infiltración, la reserva hídrica y la demanda al sistema.

Lo anterior significa considerar el modelo hidrológico, como un modelo normativo; o sea, un modelo en el cual, a partir de estímulos determinados se busca establecer, como tendría que responder el sistema para producir un resultado deseado. Este resultado podría ser dar satisfacción a la demanda planteada. Es decir tenemos una demanda hídrica global anual sobre el sistema, de: (Fig. 12).

VOLUMEN DEMANDADO:

$$0,144 \text{ m}^3. \times 10.000 \text{ h.} \times 365 \text{ días} = 525,6 \times 10^3 \text{ m}^3.$$

Si tomamos de la serie pluviométrica los valores correspondientes al año de menos precipitación, tendremos para el área el interés

VOLUMEN PRECIPITADO:

$$0,580 \text{ m.} \times 10^3 \text{ m}^2. = 58 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Si ahora consideramos para la infiltración eficaz, el mínimo porcentaje que puede corresponderle de la precipitación total anual, estimado por la mayoría de los hidrólogos para acuíferos de las características de nuestro caso en un 10 %, tendremos:

VOLUMEN INFILTRADO:

$$10 \% \text{ de } 58.000.000 \text{ m}^3. = 5,8 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

y si además recordamos que la reserva hídrica se estimó para el área de interés en $280,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, es fácil observar que, aún tomando parámetros mínimos, el volumen demandado anual es insignificante, casi despreciable, ante los volúmenes correspondientes de infiltración y reserva. Y esta circunstancia, hace más válido el método de haber determinado empíricamente el porcentaje mencionado para la infiltración como parámetro mínimo, que resultaría inadecuado, a medida que la demanda se torne significativa.

8. PROPUESTA

Como epílogo de la secuencia de análisis hasta aquí desarrollada cabe la formulación de la propuesta, que contempla simultáneamente, dos aspectos diferenciados aunque altamente vinculados:

- a) El de encontrar la mejor solución a la problemática específica planteada en virtud de los procedimientos y sobre todo de la información disponible —solución factible—.
- b) La reformulación de los procedimientos para la generación de información de base, hoy faltante, para poder alcanzar en el futuro soluciones optimas e integrales.

En lo referente al segundo aspecto, habíamos visto, que del relevamiento practicado sólo pudimos apreciar pequeñas variaciones del nivel estático, con las determinaciones practicadas en los pozos de la zona de observación. Esto nos está indicando la necesidad de intensificar aquellas determinaciones en el tiempo, para su posterior correlación con otras variables hidrológicas.

Antes de que comience a funcionar el sistema de captación, nuestro sistema acuífero se mantendrá estático. Para realizar un ajuste de su superficie piezométrica (estática) que indicará si es necesario ampliar la zona de observación, se requerirán los datos de nivel de todos los pozos de la zona de observación (de observación y piezométricos). La diferencia de niveles a lo largo del tiempo entre el pozo piezométrico y todos los de medida, conformarán una serie de tiempo que intrínsecamente indicará la velocidad de escorrentía subterránea. Con ensayos de infiltración realizados una vez al año, en por lo menos cuatro lugares del área de interés para homogenizar los resultados, podremos observar las variaciones temporales que puedan existir en estos parámetros.

La termografía nos dará un gráfico de las variaciones de temperatura observadas en el área, que estarán vinculadas con la lisiometría.

La pluviometría permitirá determinar la relación intensidad o caudal —tiempo de la precipitación registrada—.

Conociendo la intensidad de la precipitación, estaremos en mejores condiciones de evaluar la escorrentía superficial.

Las determinaciones lisimétricas posibilitarán efectuar medidas de la evapotranspiración real, que involucrarán conocimientos de la velocidad del viento y de las determinaciones de niveles del agua en el estanque del instrumento.

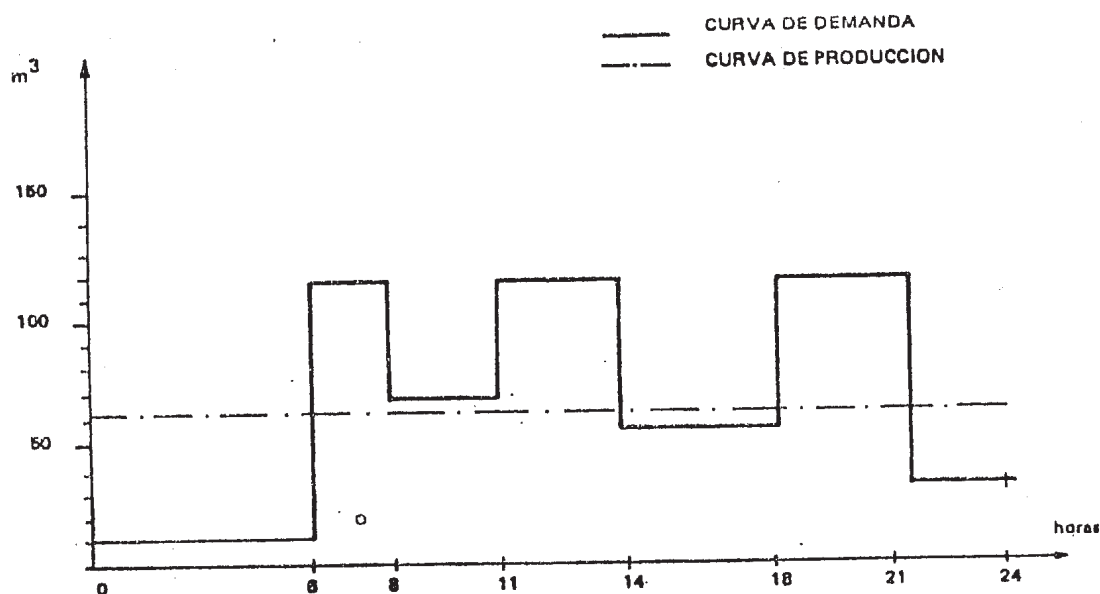
Cuando el sistema de captación esté funcionando, se aplicará la misma metodología que para la obtención de las determinaciones antes mencionadas (en el caso de acuífero estático). Además se efectuará el ajuste de una superficie piezométrica en el acuífero que denominaremos pseudodinámica. O sea, que en los lugares límites obtendremos una forma parecida al caso estático, y en la zona de captación, representará su variabilidad dinámica, en correlación al régimen de explotación.

Asimismo deberá efectuarse una nueva serie de tiempo con datos pluviométricos. Cada uno de estos datos será el promedio de las determinaciones efectuadas por tres o cuatro instrumentos repartidos en el área de interés, con el fin de homogeneizar los registros.

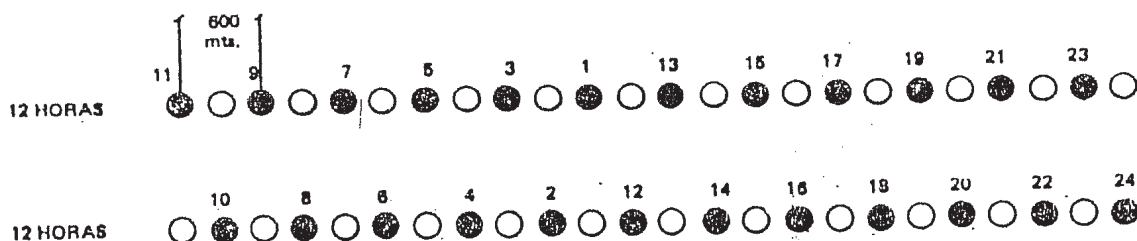
Con todas estas observaciones, se podrán estudiar las relaciones de los pares de estímulo, respuesta que existan en el tiempo, entre la variable pluviométrica y la correspondiente variable de salida, a fin de poder establecer las leyes que rigen el comportamiento del Sistema hidrogeológico.

Las evaluaciones de los distintos parámetros, permitirá optimizar el modelo matemático que exprese este comportamiento, permitiendo una predicción de las reservas hídricas del acuífero más acorde a las necesidades temporales de la demanda. Es decir, se posibilitará un racional régimen de explotación futuro hasta el límite de las reservas, para posteriormente estudiar la prefactibilidad de expandir la zona de captación, o utilizar medios de potabilización de oligoelementos (Fluor, Arsénico) mediante planta de tratamiento, utilizando los acuíferos subyacentes no potables, pero en áreas más cercanas.

ROL DEL SISTEMA DE CAPTACIONES



a) Gráfica de las curvas demanda - producción global diaria



b) Diagrama del funcionamiento alternado del sistema de captación.

Figura 13

De la evaluación efectuada entre la relación de volúmenes, —precipitación, infiltración, reserva hídrica y demanda— se desprende que los requerimientos hídricos del orden demandado, sólo podrían provocar suaves y temporales descensos del nivel estático de la reserva, siempre que el método de captación desarrollado por el sistema de aprovisionamiento de 24 pozos descrito, responda a los requerimientos de la demanda diaria con caudales de producción en coherente relación con los aspectos, estructurales físicos y químicos de la lente. (En este caso sería una respuesta del Sistema a baja

frecuencia). Esto es, que dichos caudales se mantengan a un régimen límite de $5 \text{ m}^3/\text{hora}/\text{pozo}$, como se describiera oportunamente, y que los gradientes de presión hidráulica producidos, no generen campos de velocidades con módulos mayores de $3 \text{ m}/\text{seg}$, evitando el fenómeno de sufusión que destruye la estructura porosa —matriz— del acuífero.

En concordancia a lo expuesto se podría proponer satisfacer la demanda global diaria de 1.440 m^3 con una producción constante de $63 \text{ m}^3/\text{hora}$ —12 pozos— alternando el funcionamiento de los pozos existentes, en dos turnos de 12 horas cada uno, para permitir la recuperación de los niveles piezométricos, a lo que también contribuye la mayor equidistancia entre pozos en funcionamiento, ahora de 600 metros, y dejar unidades alternativas en caso de desperfectos. (Fig. 13).

Todo aumento de la demanda requerirá una expansión del sistema de captación. De ninguna manera se podrá permitir un incremento de los caudales de explotación para satisfacerla. Esto generaría un aumento en la salida del sistema en corto período, que al superar el nivel del parámetro-caudal que lo regula, haría inestable la superficie equivalente de estabilidad hidroquímica inferior (que caracteriza a este acuífero como una lente de agua potable flotando sobre un acuífero infrayacente salinizado), produciendo la succión directa y posterior mezcla de agua no potable, dentro de la estructura del acuífero que contiene agua potable.

Alterada la estabilidad, las consecuencias a corto plazo son irreparables, debiéndose abandonar en forma parcial y en algunos casos total, el sistema de captación. Es propio de la estructura del acuífero, de la velocidad de escorrentía subterránea y de la variable de entrada pluviométrica, la restitución a un nuevo punto de estabilidad, pero a largo plazo. Mientras tanto como consecuencia, desde el punto de vista sanitario, se crearía una situación altamente anormal, produciéndose una alteración de los factores económicos correspondientes al saneamiento que redundaría en nuevas inversiones para producir obras (ya sea nuevas zonas de captación o plantas desalinizadoras por ósmosis inversa) para suplir el defecto.

En consecuencia, si suponemos un incremento estacional —para los meses de verano— de un 40 %, o sea una demanda diaria global del orden de 2.016 m^3 , el sistema de captación se vería seriamente perturbado hasta los límites de su estabilidad funcional. En efecto, una demanda como la referida obligaría una producción horario media de 84 m^3 utilizando 17 pozos, no permitiendo la recuperación de los niveles piezométricos de cada uno de ellos. Para restablecer las condiciones hídricas imperantes con la demanda anterior, — $1.440 \text{ m}^3/\text{día}$ — y manteniéndonos siempre dentro de los límites estipulados para el caudal unitario y módulo de velocidad de succión, tendríamos que expandir el sistema de captación a 36 pozos. Por otra parte, al desaparecer el incremento estacional de la demanda, se lograría una alternancia de funcionamiento de tres turnos de 8 horas con 12 pozos por turno, llegando al óptimo aconsejado, esto es, que cada uno de los pozos esté activo 8 horas y descanse 16 horas para la correspondiente recuperación del nivel piezométrico. Además se obtendría una equidistancia entre pozos en funcionamiento de 900 metros, que ayudarían a la referida recuperación (Fig. 14) en forma puntual, haciendo casi imposible el traslapamiento entre los conos de depresión.

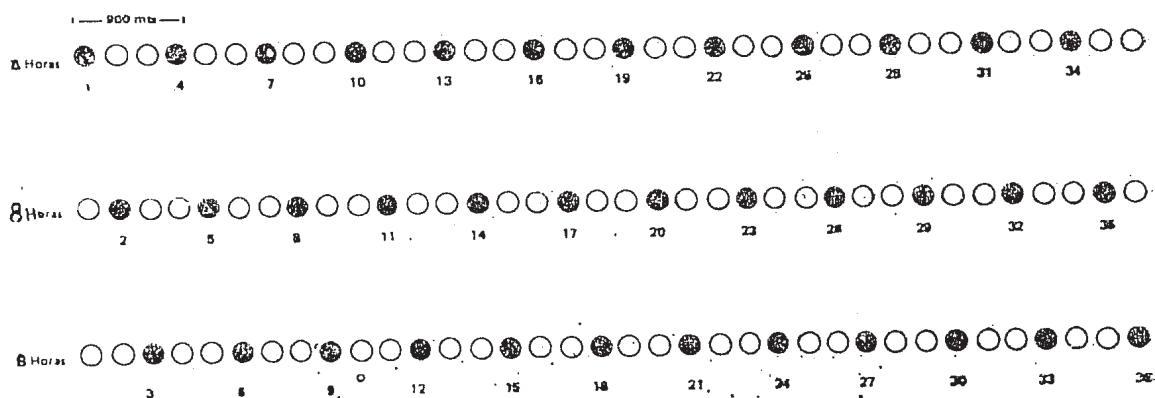


Figura 14

Diagrama del funcionamiento alternado del sistema de captación expandido

Físicamente la matriz porosa poseería, por cada intervalo de 8 horas sucesivo, 12 puntos sumideros alternantes cada 900 mts., permitiendo una mejor simulación matemática del sistema acuífero-captación.

B I B L I O G R A F I A

- BENDAT J. S. y PIERSOL A. G.: "Random Data" (1971), Ed. John Wiley, U. S. A.
- BRANDT S.: "Statistical and Computational Methods in Data Analysis" (1978), Ed. North Holland Pub. Co. Holland.
- CUSTODIO E. y LLAMAS M. R.: "Hidrología Subterránea", Vol. 1 y 2 (1976), Ed. Omega, España.
- DAVIS S. N. y DE WIEST R. J. M.: "Hidrogeología" (1972), Ed. Ariel, España.
- FEEZE R. A. y CHERRY J. A.: "Ground Water" (1979), Ed. Prentice Hall, Inc. U. S. A.
- GIANIBELLI J. C.: "Sistemas lineales y Análisis de Datos Aleatorios" (1980), Ed. Inip, Fama, UCALP, Argentina.
- KISIEL C. C.: "Time Series Analysis Hidrologic Data" (1969), "Advances in Hydrosience", Vol. 5, Ed. Academic Press U. S. A.
- LELLI R. R.: "Apuntes de la Cátedra de Análisis de Sistemas" (1981, Ed. Inip, Fama, UCALP, Argentina.
- RAUDKIVI A. J. y CALLANDER R. R.: "Analysis of Ground water Flow" (1976), Ed. E. Arnold, U. K.
- THOMAS R. B.: "Statistical Communication Theory" (1969), Ed. John Wiley, U. S. A.
- UNNY T. E.: "Pattern Analysis and Synthesis of Time-dependent Hydrologic Data", "Advances in Hydrosience", Vol. 12, Ed. Academic Press, U. S. A.
- VARGAS V. A.: "Técnicas y Análisis de Costos de Pozos Profundos y Aguas Subterráneas" (1976), E. Limusa, México.

RESUMEN

Se realiza una revisión del marco teórico. La metodología del análisis de Sistemas y el estudio de series de tiempo en hidrología son aplicables al acuífero frático de Pasteur (Prov. de Bs. As. El análisis de la pluviometría permite proponer una modificación de la fórmula del balance hídrico. La demanda de agua potable, es estudiado acorde con la distribución de los pozos de explotación y su producción.

SISTEM APPLICATION TO HYDROLOGIC TIME SERIES
ABSTRACTs

A review of the theory is made. The methodology of system analysis, and hydrologic time series studies are applied to the freatic aquifer of Pasteur City (Prov. Buenos Aires). The pluviometric analysis allows to present a hydrologic balance formula modification. The request of drinkable water, and the distribution of wells and their production are also studied.

ESTUDIO JURIDICO

"CEFERINO P. MERBILHAA"

Juan Pedro Merbilhaa
Roberto A. Salaberren
Alberto Ignacio Merbilhaa

ABOGADOS

Plaza Italia N° 22 - 4° "A" - T.E. 4-5176 - (1900) LA PLATA