

0,125

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA

"ACUIFEROS EN FORMACIONES CALCAREAS"

TESIS SIN CREDITO ACADEMICO  
Que para obtener el grado de Maestro en:  
INGENIERIA HIDRAULICA  
p r e s e n t a  
ARTURO DIFURT CANDELARIA

México D.F.

Febrero, 1981.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEPFI

T. UNAM  
1981  
DIF

# I N D I C E

	<u>No.</u> <u>Página</u>
Introducción	
I. Descripción general de los acuíferos calcáreos	1
I.1 Desarrollo de la hidrogeología cárstica	1
I.2 Investigación de acuíferos cársticos	2
I.3 Rocas calizas	4
I.4 Estructura de la caliza	4
I.5 Permeabilidad en el medio cárstico	5
I.6 Fenómeno cárstico	
II. Estudios a realizar en acuíferos calcáreos	11
II.1 Estudio de exploración	
II.2 Estudios del marco geológico regional	11
II.3 Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico	12
II.3.1. Factores geológicos regionales	13
II.4 Estudios hidrológicos	16
II.4.1 Precipitación efectiva para recarga	17
II.4.1.1 Ejemplo de aplicación	23
II.4.2 Respuestas de los sistemas cársticos	33
III. Estado del arte	37
III.1 Resumen de estudios desarrollados en la República Mexicana en formaciones calcáreas	46
Conclusiones y recomendaciones	49
Bibliografía	48
Referencias	

## INTRODUCCION

En los últimos años el continuo aumento de la población en el mundo ha dado lugar a que las fuentes de abastecimiento de agua superficial sean insuficientes para satisfacer las demandas para consumo doméstico, agrícola e industrial; es por ello que en este siglo el estudio del agua subterránea adquirió gran importancia. Uno de los pioneros en el estudio del flujo subterráneo fue Henry Darcy (1876); el cual expuso una ley lineal conocida como ley de Darcy en la que establece una similitud entre el movimiento del agua subterránea y el movimiento en régimen laminar del agua a través de tubos; llegando a la conclusión que el caudal que circula a través de un medio poroso es inversamente proporcional a la distancia recorrida y directamente proporcional a la pérdida de energía y a un coeficiente de permeabilidad dependiente del tipo de material por donde circula.

Posteriormente Theis (1935) desarrolló su ecuación para el estudio del flujo del agua en régimen no permanente haciendo intervenir el tiempo como variable.

La aplicación de las ecuaciones de estos investigadores además de otros (Thiem, Jacob, Hantush, etc.), proporciona la determinación de las características hidráulicas para un medio poroso, entendiéndose como tal aquel que tiene una parte sólida, constituida por granos minerales separados y rodeados por poros. Es importante recordar que los principales estudios relacionados con el agua subterránea llevados a cabo son aplicables a medios granulares homogéneos e isotrópicos.

En este siglo se comenzó a prestar atención al estudio de los acuíferos en formaciones calcáreas, primeramente a partir de la observación de manantiales, los pozos artesianos brotantes y las cavernas de las rocas calcáreas; aumentando el interés por la explotación intensiva de los grandes sistemas en los que se tiene una gran permeabilidad debido en unos casos al grado de fracturación y en otros a procesos secundarios que se producen por la ampliación de las fisuras debido a la acción disolvente del agua y ocasionando la existencia de conductos por donde circula el agua, la mayoría de las veces a altas velocidades estableciéndose un flujo turbulento lo que hace inaplicables las ecuaciones usadas en medios porosos, por lo que el estudio sobre el funcionamiento de los acuíferos en formaciones calcáreas no cuenta actualmente con una tecnología que conduzca a la determinación de los volúmenes de agua que pueden llegar a contener estos acuíferos, factor importante para establecer el rendimiento seguro que se puede obtener, sin llegar a producir efectos perjudiciales tales como afectación a aprovechamientos existentes o bien inseguridad en la utilización del agua en las calizas como fuente de abastecimiento.

En México es de importancia el estudio de los acuíferos en este tipo de formaciones debido a las extensas áreas del territorio nacional cubiertas por afloramientos de calizas (Figura 1), como son la Sierra Madre Oriental; parte de la Sierra Madre del Sur; la Sierra de Chiapas y la Península de Yucatán.

El orden seguido en este trabajo es el siguiente:

En el Capítulo I se hace una descripción general de los acuíferos calizos, desde el origen de las rocas calizas, su estructura y permeabilidad.

En el Capítulo II se describen en forma general los estudios que se realizan como son: estudios de exploración; estudios del marco geológico regional; estudios geoquímicos y estudios hidrológicos.

En el Capítulo III se describe el estado del arte, enumerando los principales investigadores y los países en que se han desarrollado los estudios; describiendo por último los estudios desarrollados en la República Mexicana.

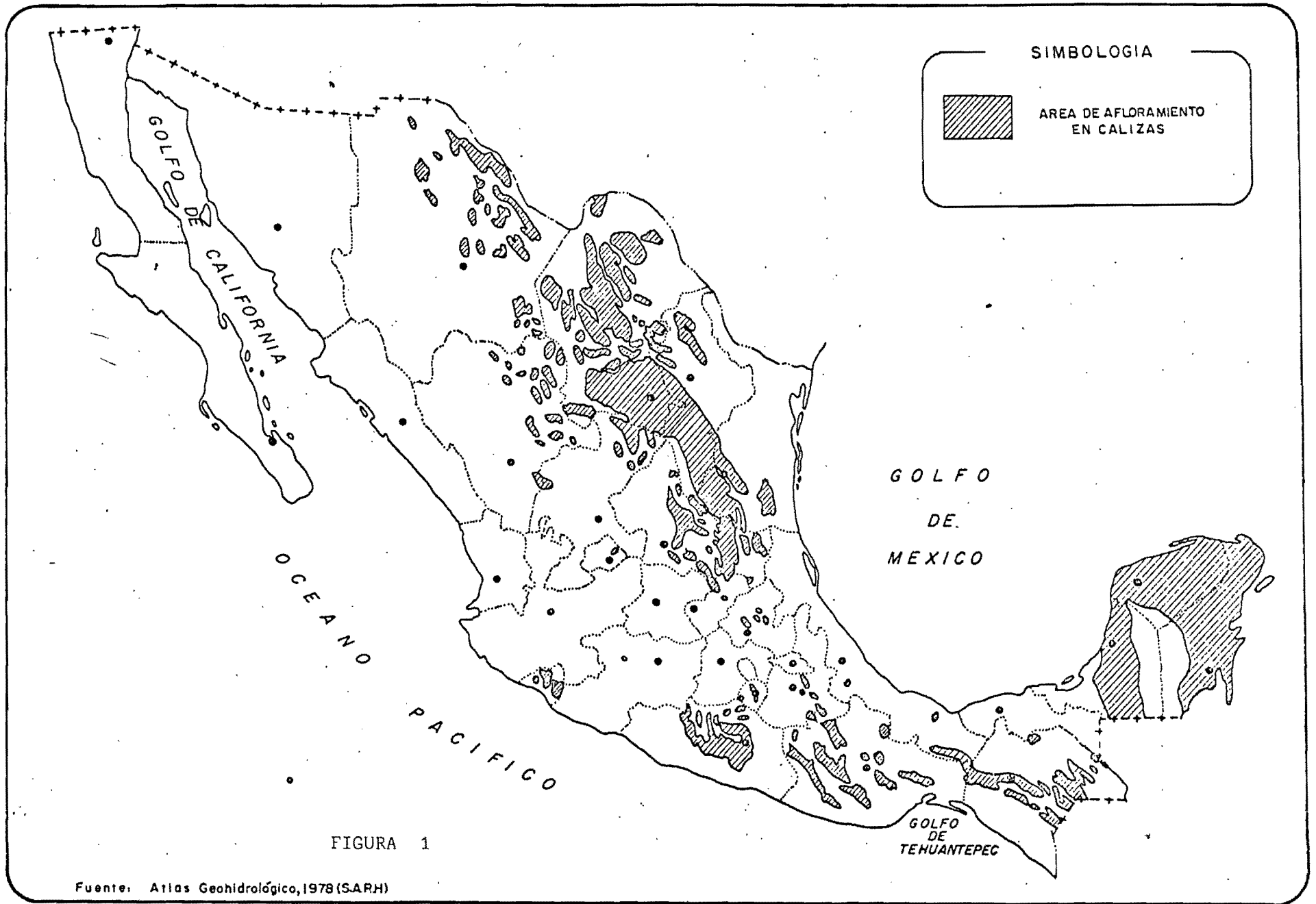


FIGURA 1

Fuente: Atlas Geohidrológico, 1978 (SARH)



## I. DESCRIPCION GENERAL DE LOS ACUIFEROS CALCAREOS

### I.1 Desarrollo de la Hidrogeología Cárstica

La Hidrología hace su aparición en el siglo XIX, concentrándose en ella todo lo relacionado con el agua. Más tarde cuando los conocimientos sobre las aguas subterráneas aumentaron considerablemente se agruparon constituyendo la Hidrología Subterránea, la que hoy se conoce como Hidrogeología, a consecuencia de las estrechas relaciones que tiene el agua subterránea con la estructura geológica y con la litología y estratigrafía.

En la mayoría de los tratados se admite que el vocablo Hidrología hace referencia a los conocimientos sobre aguas superficiales y el de Hidrogeología (o Geohidrología) al de aguas subterráneas.

La Hidrogeología como ciencia que estudia exclusivamente las aguas subterráneas, se ha dividido en una serie de especialidades como consecuencia de los diferentes puntos de vista por los que puede ser estudiada. De este modo pueden establecerse las siguiente partes (Llopis Lladó):

1. Hidrogeología Química que estudia la composición del agua y su origen.
2. Hidrogeología Física, que se dedica a la física y dinámica del agua subterránea.
3. Hidrogeología Estructural, que establece las relaciones entre el agua y la tectónica.
4. Hidrogeología Cárstica, dedicada al estudio de las aguas que circulan por las calizas y rocas afines.

5. Hidrogeología Aplicada, que estudia captaciones y sondeos.
6. Hidrogeología Termomineral, o conocimiento de las aguas minero-medicinales.

El desarrollo de estas partes exige establecer estrechas relaciones con otros cuerpos de doctrina sin los cuales la Hidrogeología no podría estructurarse; así la Hidrogeología está relacionada con la Climatología y la Meteorología - por la rama de las Ciencias de la Atmósfera; con la Hidráulica, por la de las Ciencias Físicas; con la Geoquímica, por la de las Ciencias Químicas; con la Tectónica, la Estratigrafía, la Petrología y la Geofísica, por la de las Ciencias Geológicas; con la Biología y sus diversas ramas, cuando se trata de conocer el contenido geológico del agua.

## I.2 Investigación de Acuíferos Cársticos

El estudio de problemas de agua en regiones cársticas ha sido aprovechado por investigadores en estudios con puntos de vista disciplinarios e interdisciplinarios. Históricamente los estudios sobre el medio cárstico fueron iniciados por especialistas de algunas disciplinas, en el sentido que fueron ellos los primeros en determinar el karst como un medio generador de problemas de investigación científicamente interesante. Estos especialistas fueron los geógrafos y los geomorfólogos, a los cuales llamó la atención los rasgos característicos, tales como las formas no usuales de las superficies del karst, la desaparición y reaparición de ríos y otros fenómenos cársticos similares. Pronto a estos investigadores se unieron los geólogos, ya que el fenómeno cárstico - no puede ser estudiado efectivamente sin las descripciones y generalizaciones

geológicas. Después se agregaron los biólogos, los geofísicos y especialistas de las otras ciencias de la tierra. Sin embargo, para explicar algo del fenómeno del flujo del agua a través de las formaciones cársticas, fue necesario el uso de la Hidráulica, la cual ha sido adicionada a los métodos de consulta.

Como se indicó anteriormente Hidrogeología Cárstica es la parte de la Hidrogeología que estudia la circulación del agua en las rocas calizas y rocas solubles en general. La circulación va acompañada de una serie de fenómenos - químico-físicos, que no se encuentran en los demás tipos de circulación subterránea; el estudio de la Hidrogeología Cárstica, comienza en el exterior, sobre la superficie topográfica, antes de que el agua penetre en la caliza, puesto que los fenómenos fisicoquímicos comienzan ya durante las lluvias y la circulación de las aguas de escurrimiento.

Los fenómenos cársticos son el conjunto de transformaciones que se producen en una región caliza como consecuencia de la circulación del agua. La generalización de estos fenómenos es una de las diferencias fundamentales que - existe entre la circulación cárstica y cualquier tipo de aguas de fisura.

El término "Karst" se tomará como sinónimo de aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas y cuyos poros o fisuras han sido ensanchados por la acción disolvente de las aguas subterráneas, hasta - formar grandes conductos y cuevas que dan lugar a unas características geomorfológicas típicas. El nombre de "Karst" se dio por llamarse así la región yu--

gozlava donde se describieron y estudiaron por primera vez los principios fundamentales de la circulación del agua en rocas fisuradas.

Las rocas en las que la acción disolvente del agua produce estos efectos, son las calizas, las dolomías, los yesos, la sal común y casi todas las restantes rocas evaporitas; estando el interés primordial desde el punto de vista hidrogeológico en las calizas y las dolomías.

### I.3 Rocas Calizas

El origen de las calizas es muy variado. Es una roca sedimentaria, formada en cuencas marinas o lacustres, y aún en ambientes subaéreos. Siendo la caliza - por excelencia una roca organógena, formada por la concentración de millares y millones de caparzones foraminíferos, acumulaciones de conchas de moluscos - (Lumaquelas) o de braquiópodos, o por construcción de arrecifes coralinos - - (Klintita).

### I.4 Estructura de la Caliza

Como toda roca sedimentaria, la caliza tiene dos tipos de estructura: 1) congénita o sinsedimentaria, producida durante la sedimentación; 2. tectónica o mecánica, producida por acciones orogénicas, posteriores casi siempre a la - sedimentación.

La estructura congénita se manifiesta ante todo por la presencia de planos de estratificación y por la disposición interna de los elementos macroscópi

cos del material sedimentario.

La estructura congénita de la caliza, está a menudo alterada por la estructura tectónica, producida por un conjunto de fuerzas que han actuado con posterioridad a la sedimentación. Las deformaciones tectónicas de las rocas dependen ante todo de la reacción de cada tipo de material entre los esfuerzos orogénicos; - estas deformaciones se clasifican en dos conjuntos principales: a) los pliegues o deformaciones continuas y b) roturas o deformaciones discontinuas. La generación de pliegues o roturas es consecuencia del grado de cohesión del material sobre el que actúa la presión orogénica de tal modo que las rocas plásticas se pliegan y las rígidas se rompen, faltas de elasticidad para una deformación con tínua. De este modo se han dividido las rocas en orógenas o plásticas, capaces de originar pliegues y plegamientos, y cratógenas o rígidas, aptas sólo para en gendrar roturas.

#### I.5 Permeabilidad en el Medio Cárstico

No todas las rocas compactas son impermeables, puesto que durante o posteriormente a su compactación, pueden haber sido fisuradas; es decir que pueden aparecer en ellas fisuras (planos de estratificación, esquistosidad, diáclisas, - fallas) que permiten el paso libre del agua. Por lo que se establecieron dos tipos de permeabilidad existente: permeabilidad por porosidad o permeabilidad primaria y permeabilidad por fisuración o permeabilidad secundaria.

En la permeabilidad primaria el agua penetra a través de los poros y circula por ellos, por lo que esta permeabilidad es particularidad del medio poroso.

La permeabilidad por fisuración, es propia de las rocas compactas fisuradas. Las fisuras pueden compararse, desde el punto de vista geométrico, a planos, por los cuales el agua penetra y circula, acumulándose en las zonas anchas de los planos y reduciendo su volumen en las zonas estrechas.

Los tipos de aguas subterráneas que se forman en materiales fisurados y fracturados son: (a) Aguas de fisura, las que se definen como aquellas que penetran y circulan por las fisuras, quedando en seco las zonas interfisurales, - esta circulación puede ser libre o con carga hidrostática; (b) Aguas cársticas, las cuales son fundamentalmente aguas de fisura, pero que circulan por rocas solubles y de manera especial, por las calizas.

Tomando en cuenta que la circulación del agua a través de las rocas calizas es debida a una permeabilidad por fisuración o secundaria, ésto es, por fracturación, canales de disolución y planos de junta abiertos, en una localización de una formación acuífera cualquiera existirá el riesgo de que la perforación correspondiente no atraviese por una zona caliza que tenga conexión con el acuífero a través del sistema de fracturas y se obtenga un pozo con poco o nulo caudal.

La producción de un pozo dependerá de la conexión que tenga la perforación con las zonas de esa permeabilidad secundaria, siendo los conductos que la producen de una variedad en cuanto a su forma y dimensiones de las grietas, canales de disolución, planos de junta o diáclisas que corte la perforación.

Para mostrar el sistema de conductos en las calizas acuíferas, en las Figu--

ras 2 y 3 se muestran los diagramas presentados por E. H. Walker sobre las condiciones del acuífero artesiano de Hopkonsville Quadrangle, Kentucky, publicado en el libro "Hydrogeology". Estos diagramas ilustran cómo tres pozos localizados en una misma estructura pueden tener condiciones de producción buena, regular o nula; la Figura 2 muestra el comportamiento de los niveles en verano y la Figura 3 durante el invierno. Se observa que el pozo No. 1 atravesó en toda su profundidad por varios conductos de reducido espesor; su rendimiento será regular pero podrá aumentarse mediante tratamientos de estimulación. El pozo No. 2 no atravesó por ninguna zona de conductos y es un pozo seco. El pozo No. 3 cortó zonas de fracturamiento y disolución de importancia y es un pozo con muy buena producción.

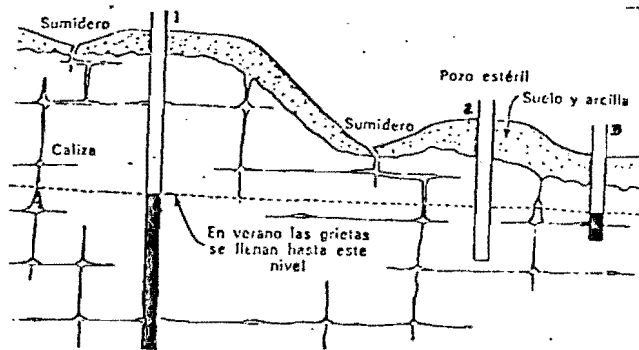


FIGURA 2 DIAGRAMA DE WALKER  
NIVEL EN VERANO

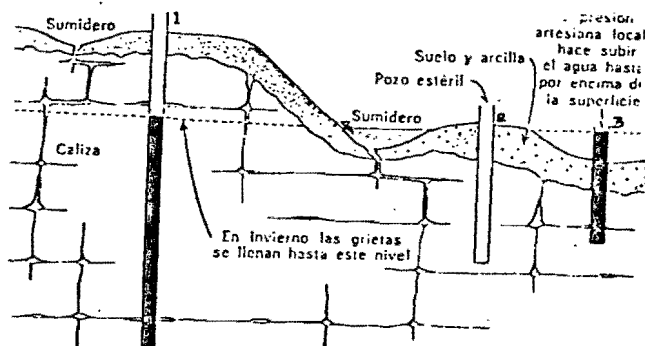


FIGURA 3. DIAGRAMA DE WALKER  
NIVEL EN INVIERNO

## I.6 Fenómeno Cárstico

Como se mencionó en párrafos anteriores el fenómeno cárstico es el resultado de la dinámica del sistema agua-caliza. Este fenómeno en esencia se reduce a dos procesos fundamentales: uno químico, de disolución, y otro mecánico, de erosión del agua. Cuando el volumen de agua cárstica es pequeño y la circulación se realiza a lo largo de fisuras estrechas, no es posible desarrollar fuerza viva suficiente para que se produzca erosión, presentándose entonces principalmente el proceso de disolución.

Cuando el agua corre como río subterráneo, accionada exclusivamente por la gravedad, se produce el proceso de erosión sin excluir la disolución.

El fenómeno de disolución de la caliza depende de dos factores: 1) De la composición química de la caliza y 2) De la acidez del agua cárstica. Bastará recordar que la acción disolvente se debe principalmente al  $\text{CO}_2$  que llevan en disolución las aguas y que dicho  $\text{CO}_2$  aumenta con el descenso de la temperatura y con el incremento de la presión atmosférica.

Los terrenos carbonatados que han sido parcial o totalmente carstificados (con desarrollo amplio de porosidad y permeabilidad secundaria por los procesos de disolución) tienen las características hidrogeológicas e hidrológicas básicas siguientes:

- a) La permeabilidad cárstica es raramente uniforme en espacio.
- b) Al empezar las rocas carbonatadas a carstificarse, la superficie abierta



permite la entrada de sedimentos y el agua acarrea materiales hacia el subterráneo, estos materiales pueden ser depositados para cambiar la porosidad y la permeabilidad del sistema cárstico.

- c) Dependiendo por un lado del proceso de disolución y la erosión física de los conductos subterráneos y las condiciones superficiales (erosión, cubierta biológica, uso de la tierra, efectos humanos y animales, etc.) por el otro, el estado de porosidad puede ser aumentado o decrementado lenta o rápidamente para algún tiempo particular.
- d) Debido a que la porosidad fracturada resulta de procesos complejos especialmente geológicos y tectónicos, tales como condiciones de depositación y presión de deformación el movimiento del agua a lo largo de las fracturas disuelve las paredes creando una gran variedad de permeabilidades dentro de distancias cortas, que básicamente dependen sobre la solubilidad local de materiales carbonatados y las condiciones del flujo del agua.
- e) Más que en otro tipo de rocas, la permeabilidad y la porosidad varían de un tipo de roca carbonatada a otro y también de un lugar a otro dentro de los mismos bloques de un tipo de roca dada.
- f) El coeficiente de infiltración y la circulación subterránea se incrementan con el grado de desarrollo de la permeabilidad cárstica superficial y subterránea, y con la variación en la intensidad de las tormentas.
- g) Debido a la superposición e interacción de varios tipos de porosidad en rocas carbonatadas (porosidad primaria, porosidad secundaria por fracturación, porosidad secundaria por disolución, porosidad de sedimentos

finos depositados dentro de la amplia porosidad secundaria, etc.), la gran variabilidad de porosidad en el espacio, los diferentes tipos de permeabilidad, hacen muy riesgoso para interpolar o para extapolar las propiedades de las rocas carbonatadas o especificar volúmenes de acuerdo a las técnicas clásicas de agua subterránea de investigaciones hidrogeológicas.

- h) Los terrenos con recursos de aguas cársticas son frecuentemente muy rugosos, topográficamente separados, con una muy variable distribución de sus recursos en tiempo y espacio. Estos suelos son frecuentemente delgados y cubiertos con tierras pobres. Sin embargo existen muchas excepciones alrededor de todas las regiones cársticas del mundo.
- i) El desagüe que contribuye al drenaje de acuíferos cársticos, puede ser completamente diferente en los límites de las cuencas. Los límites del desagüe superficial pueden estar cambiando en función de los niveles de agua subterránea, el estado del flujo del agua en sistemas de canales, y la intensidad de infiltración de las aguas.
- j) Relaciones igualmente existentes entre el nivel de composición mineral de aguas que vienen de fuera de rocas carbonatadas y el tiempo de residencia de estas aguas en el subterráneo.

## II. ESTUDIOS A REALIZAR EN ACUIFEROS CALCAREOS

### II.1 Estudio de Exploración

Es de importancia un estudio geológico similar al de cualquier embalse subterráneo, pero teniendo en cuenta las peculiaridades que pueden introducir los fenómenos cársticos. Como son una gran rapidez en la descarga de la infiltración de la lluvia; anomalías en la dirección del flujo respecto a la dirección del gradiente de la superficie piezométrica, etc.; los estudios estructurales y estratigráficos permiten localizar las formas de bancos calcáreos, pero la predicción de los caudales que estas formaciones pueden proporcionar a los pozos es difícil de determinar debido más que nada a la anisotropía y heterogeneidad de estos acuíferos, por lo que su potencialidad y funcionamiento no se pueden determinar por los métodos utilizados para acuíferos en medios granulares (se tiene la mayoría de las veces altas velocidades de circulación del agua lo que ocasiona un flujo turbulento). El emplazamiento de las grietas de disolución en los potentes bancos de calizas y dolomías es función de una serie de factores tales como la fracturación menor de las rocas, las diferencias de composición, las fallas, los pequeños lechos de arcilla o de calizas con nódulos de silex y la permeabilidad primaria.

### II.2 Estudios del Marco Geológico Regional

Como primera parte para un estudio de un acuífero en formaciones calcáreas, tendremos el Estudio Geológico, dentro del cual es aconsejable plantear el Marco Geológico Regional, a fin de poder establecer las condiciones que regulan el comportamiento del agua subterránea en el área de estudio; se reali

zará también un análisis de la información estratigráfica, verificándose éste mediante recorridos de campo aéreos y terrestres, clasificándose los materiales encontrados en diferentes series.

### II.3 Estudio Hidrogeológico e Hidrogeoquímico

#### Hidrogeología

El conocimiento de las características, funcionamiento y relaciones hidrogeológicas que presentan las diferentes unidades litoestratigráficas se realiza mediante el análisis de los factores geológicos regionales que determinan el emplazamiento del agua subterránea.

Los principales factores que intervienen en el comportamiento del agua subterránea contemplan varios aspectos que afectan de uno a otro modo las propiedades hidrológicas (permeabilidad, porosidad, transmisibilidad, etc.), en el cuadro siguiente se muestran los factores geológicos y sus aspectos más importantes.

FACTORES	ASPECTOS
Estratigrafía	Litología Posición Tiempo/espacio
Geomorfología	Topografía Area de recarga Carticismo
Tectónico-Estructural	Intensidad tectónica Disposición del fracturamiento Homogeneidad estructural Continuidad estructural

### II.3.1 Factores Geológicos Regionales

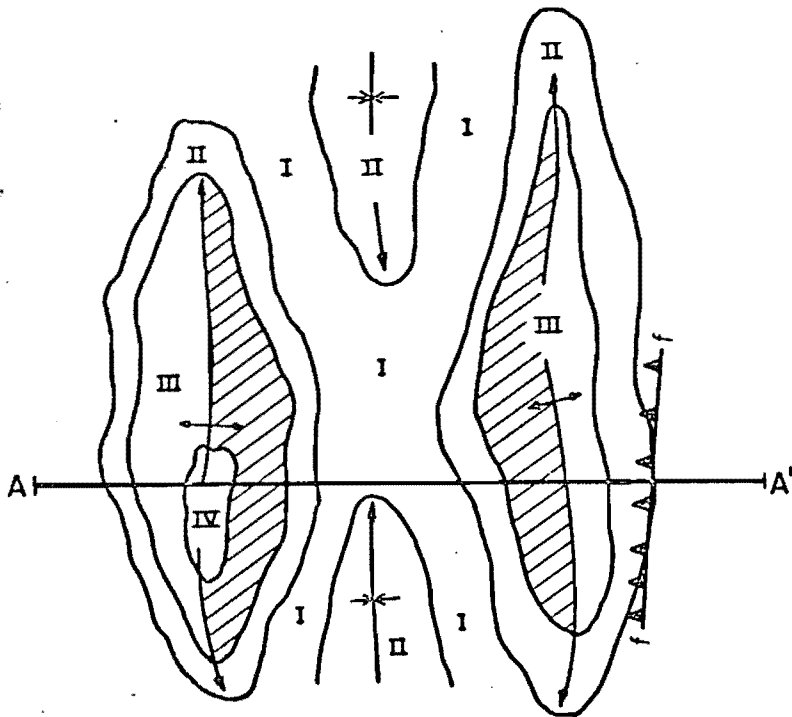
Dentro del factor estratigráfico el aspecto litológico es el que más influye en el comportamiento hidrológico de los diferentes materiales, la litología - identifica secuencias permeables e impermeables, la posición delimita verticalmente y sitúa estas secuencias en el tiempo, la continuidad y sus raíces - limitan lateralmente y colocan estos paquetes de rocas en el espacio pudiendo se establecer las bases geológicas para la implantación de sistemas hidrogeológicos.

En el factor geomorfológico los aspectos a analizar son: la topografía, área de recarga y carsticismo, cuya magnitud y disposición superficial influyen principalmente en la cantidad de agua infiltrada en el sistema o sistemas hidrogeológicos del área de estudio.

En el factor tectónico-estructural, sus aspectos (intensidad tectónica, disposición del fracturamiento, homogeneidad estructural y continuidad estructural); al relacionarse con los aspectos de los factores estratigráficos y geomorfológico, nos permiten delinear sistemas hidrogeológicos, así como diferenciar - áreas favorables para el emplazamiento de los acuíferos.

Un sistema hidrogeológico queda limitado estructuralmente al coincidir las proporciones altas de las sierras con la posición del eje de los anticlinales; constituyendo estas partes altas las zonas de recarga del acuífero calcáreo. En la Figura 4 se muestra un sistema hidrogeológico, en el que se observa que en la parte central se forma un sinclinal estructuralmente más bajo, existiendo co-

PLANO GEOLOGICO (PLANTA)



SECCION A-A'

SIMBOLOGIA



Eje Anticlinal



Eje Sinclinal

I

Acuífero Libre en Rellenos

II

Confinante Superior

III

Acuífero en Calizas

IV

Confinante Inferior



Línea de Sección



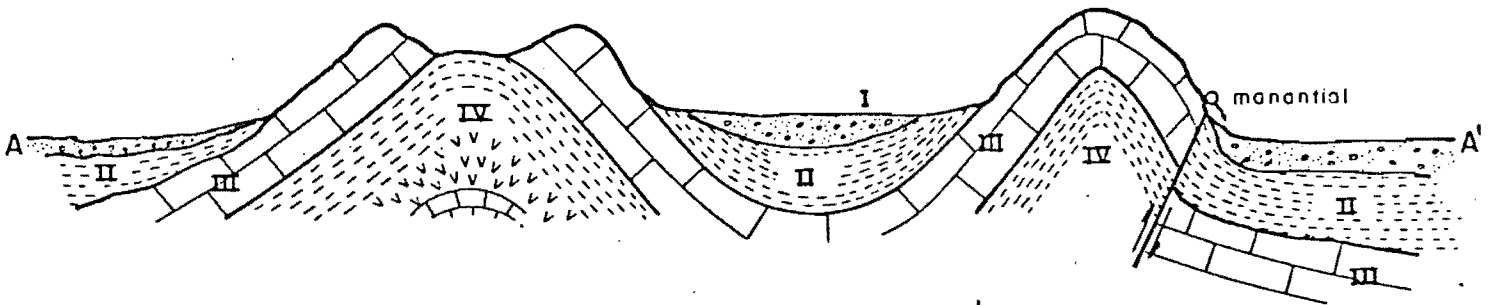
Zona de Recarga del Sistema Hidrogeológico



Falla Inversa

Sistema Hidrogeológico en Calizas Plegadas

Áreas de Recarga



PERFIL GEOLOGICO A-A'

FIGURA. 4

Criterio Geológico (Estructural y Estratigráfico) para definir  
Sistemas Hidrogeológicos en Rocas Calcáreas Plegadas y  
Principales Límites que Intervienen.\*  
\*tomado del estudio realizado por la CPNH

municación entre la parte alta o zona de recarga y la parte donde se encuentra el sinclinal.

#### Hidrogeoquímica

Para realizar la interpretación hidrogeoquímica, es necesario obtener muestras de agua de los aprovechamientos seleccionados, mediante recorridos de campo, - estas muestras deberán analizarse para su estudio, comprendiendo este análisis: las determinaciones de calcio, magnesio, sodio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, temperatura del agua y potencial de hidrógeno.

Las características hidrogeoquímicas determinadas en el agua de los aprovechamientos muestreados, permitirán establecer las hipótesis de comportamiento hidrológico de los acuíferos y a identificar si existe uno o varios sistemas en el acuífero existente.

Para conocer las condiciones climáticas que prevalecen en cualquier zona de estudio, es necesario (al igual que para los estudios en cualquier tipo de formación geológica), recopilar y analizar los datos de precipitación, temperatura y evaporación potencial, obteniéndose como resultado la determinación de las condiciones climáticas que prevalezcan en esa zona.

Es recomendable llevar registros diarios de lluvia a fin de hacer un análisis más exacto de la respuesta del sistema cárstico a la infiltración de la precipitación.

#### II.4 Estudios Hidrológicos

En acuíferos cársticos, los sistemas de amplios canales cársticos subterráneos, y salidas a través de manantiales, pueden ser estudiados por sistemas de análisis, llamando a estos sistemas entrada-respuesta-salida.

Un análisis apropiado del sistema, es el uso de la estadística matemática aproximada en sistemas de identificación de parámetros, la cual tiene una buena perspectiva para la producción de resultados confiables.

La entrada de sistemas cársticos es considerada principalmente como la parte de la precipitación que se infiltra, ya que toda la precipitación que ocurre sobre un área no es efectiva para la recarga de los acuíferos, representando la recarga sólo una porción de la precipitación, la que llamaremos precipitación efectiva; la salida corresponderá las extracciones tanto naturales como artificiales que se lleven a cabo en el sistema acuífero. La entrada es parcialmente conocida, no así la salida, que es usualmente mejor conocida, ya que la descarga concentrada es fácilmente accesible para mediciones sistemáticas y observaciones.

El sistema entrada-salida-respuesta es tomado en la actualidad como el método más prometedor en investigaciones hidrológicas de sistemas cársticos, con dos puntos de ataque principales: 1) Un incremento del conocimiento sobre precipitación y cantidades de agua infiltrada; y 2) Un conocimiento de varios aspectos de sistemas cársticos, en orden para suplementar el conocimiento el cual es aprovechable en entradas y salidas. Varias investigaciones geológicas, geo-



físicas e hidrogeológicas serán necesarias para suplementar los conocimientos para la obtención de información sobre entradas y salidas.

#### II.4.1 Precipitación efectiva para recarga

Numerosos elementos afectan la determinación exacta de la parte de la precipitación que se recarga. La precipitación no infiltrada puede ser considerada como pérdida con respecto a la recarga, pero en realidad representa transposición de agua en el ciclo hidrológico. 0

Entonces la recarga de agua subterránea representa una porción de la precipitación que se infiltra en la superficie de la tierra; otras partes de la precipitación corresponden a la interceptada por vegetación, la superficie de detención y superficie de escurrimiento; si bien muchas áreas cársticas no experimentan escurrimiento superficial, dependiendo la existencia o no de esta componente de las características del suelo y la intensidad de la precipitación.

La cantidad de agua infiltrada es dependiente de la distribución de la precipitación en el área y sus estaciones de ocurrencia. Varios temporales que producen pequeñas cantidades de lluvia no producen recarga en los acuíferos cársticos si pasan varios días entre los eventos de temporal. La evaporación y transpiración pueden agotar el agua en el suelo lo cual proporciona una capacidad de almacenamiento renovada durante subsecuentes temporales. Si el manto del suelo es suficientemente profundo puede ser requerida una precipitación considerable para producir una recarga.

La estimación separada de varias componentes distintas (intercepción, evaporación, transpiración, aumento y decremento de agua en el suelo y superficies de escurrimiento) constituyen un problema considerable empeño por si mismo. También, cada componente es una fuente de error considerable en la estimación de la recarga.

Un método de estimación de la recarga de precipitación es considerar separación lineal en todo el rango de precipitación experimentado. Una relación simple tratando las pérdidas linealmente, para promedios relativos de precipitación diaria y descargas de manantiales diarios puede ser expresada como:

$$R = \frac{\bar{Q}}{\bar{P}} P \quad . . . . . (1)$$

Donde  $R$  es la recarga valuada en  $m^3/\text{seg}$ ,  $\bar{Q}$  es el promedio diario de la descarga de los manantiales en  $m^3/\text{seg}$ ,  $\bar{P}$  es el promedio de precipitación diaria en  $mm$ , y  $P$  es la precipitación diaria observada en  $mm$ . La ecuación (1) considera que las pérdidas son lineales para todos los valores de  $P$  y  $R$  incluye algún escurrimiento superficial que podría ocurrir.

En áreas donde no se presenta superficie de escurrimiento, las pérdidas pueden ser tomadas no linealmente aplicando una curva exponencial como la indicada en la Figura 5. En la cual la región abajo de la curva debe ser representativa de la evaporación, transpiración y cambios en la humedad del suelo. Las cantidades de pérdidas posibles deben de ser dependientes sobre las cantidades de precipitación disponibles. La curva exponencial de la Figura 5 no representa condiciones donde la superficie de escurrimiento ocurre. Tal representación pudiera ser hecha si la curva indicada incrementara pérdidas con el incremento de la precipitación.

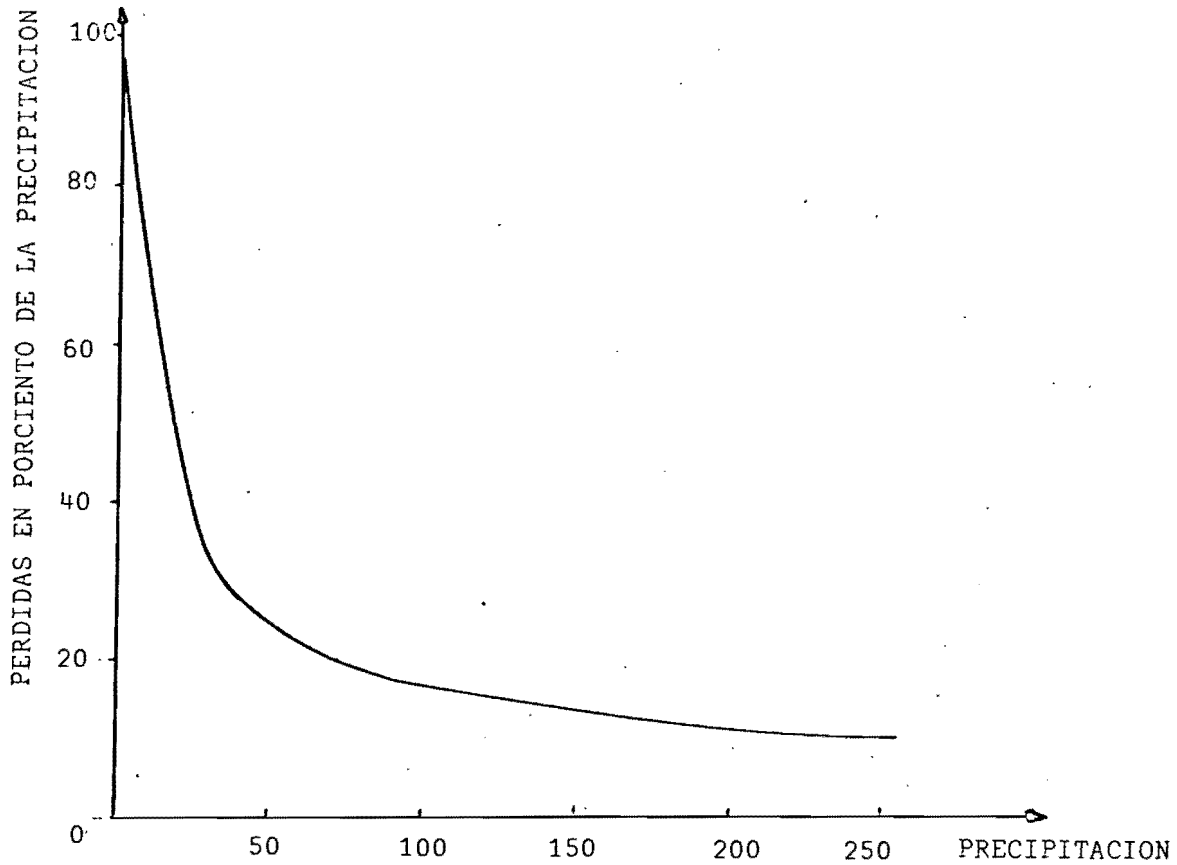


FIGURA 5. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE PERDIDAS EN LA RECARGA DE AGUA SUBTERRANEA RELACIONADAS EXPONENCIALMENTE A LA PRECIPITACION

En la Figura 6 se muestra una descripción más significativa de pérdidas no lineales con superficies de escurrimiento, la recarga es expresada como una función de la precipitación. Una relación tal como la mostrada en la Figura 6 - proporciona una fácil comparación de recarga y precipitación. La región hacia la izquierda del punto de recarga máxima debe ser indicativa de pérdidas

por evaporación, transpiración e intercepción, mientras que en la porción a la derecha en el punto de recarga máxima se incluyen las pérdidas por escurrimiento.

Knisel (Ref. 114) mediante estudios en la meseta de Edward en Texas encontró que la cantidad de precipitación necesaria para producir una superficie de escurrimiento no es constante para toda temporada, dependiendo de varios factores entre los cuales se incluyen precipitación, antecedente, intensidad de precipitación, cubierta de suelo compleja, estaciones del año y profundidad del suelo. Sin embargo, los datos indican que aproximadamente 7.6 mm de lluvia son requeridos para iniciar el escurrimiento.

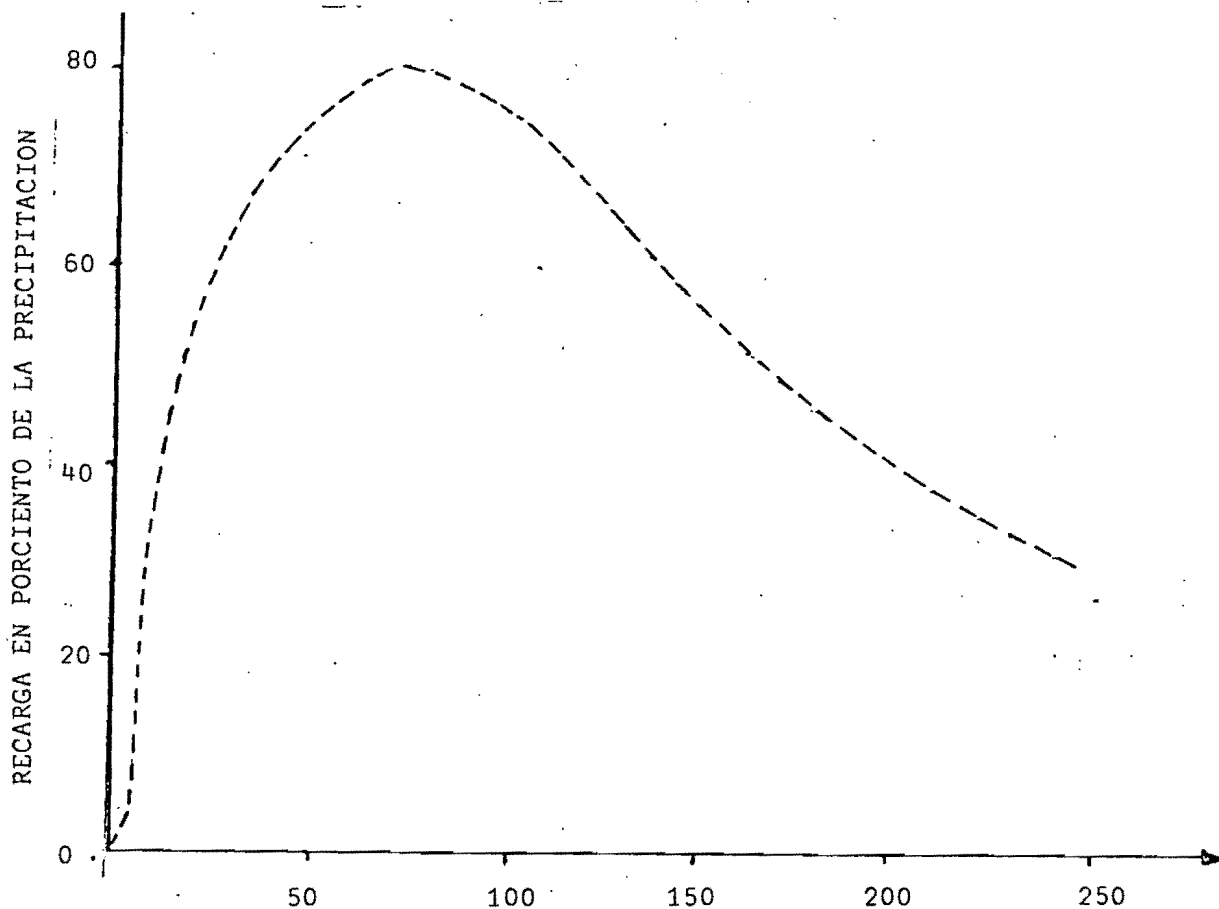


FIGURA 6. RECARGA COMO UNA FUNCIÓN DE LA PRECIPITACION CUANDO LAS PERDIDAS INCLUYEN SUPERFICIE DE ESCURRIMIENTO

Knisel en su estudio considera que la recarga máxima después del punto de iniciación del escurrimiento debe ser del orden del 80% de la precipitación.

La ecuación que se adapta a la curva hipotetizada de la Figura 6 es:

$$Y = \frac{abX}{a^2 + X^2} \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

En la cual  $a$  es el parámetro de forma y  $b$  es el parámetro de escala; sustituyendo la recarga ( $r$ ) por  $Y$ , donde ( $r$ ) es expresada como porcentaje de la precipitación; y la precipitación ( $p$ ) por  $X$ , la ecuación (2) puede ser expresada como:

$$r = \frac{abp}{a^2 + p^2} \quad \text{para } p \geq 0 \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

La ecuación (3) es adecuada para seleccionar puntos en la curva de la Figura 6 y la valuación de  $a$  y  $b$  fue determinada como 76.44 y 1.604 respectivamente. Sustituyendo estos valores en la ecuación, obtenemos:

$$r = \frac{122.61 p}{5483 + p^2} \quad \text{para } p \geq 0 \quad . \quad . \quad (4)$$

La ecuación 4 fue sobrepuesta a la Figura 6 y el resultado es graficado en la Figura 7, en donde se observa que en el lado ascendente coincide con la curva hipotetizada, pero diverge un poco en la curva de recesión.

La lámina de recarga está dada como un porcentaje de la precipitación en la ecuación (4), multiplicando en esta ecuación ambos miembros por la precipitación ob

tenendremos la lámina de recarga total como una función de la precipitación y la ecuación puede ser escrita como:

$$R = \frac{122.61 p^2}{5483 + p^2} \dots \dots \dots (5)$$

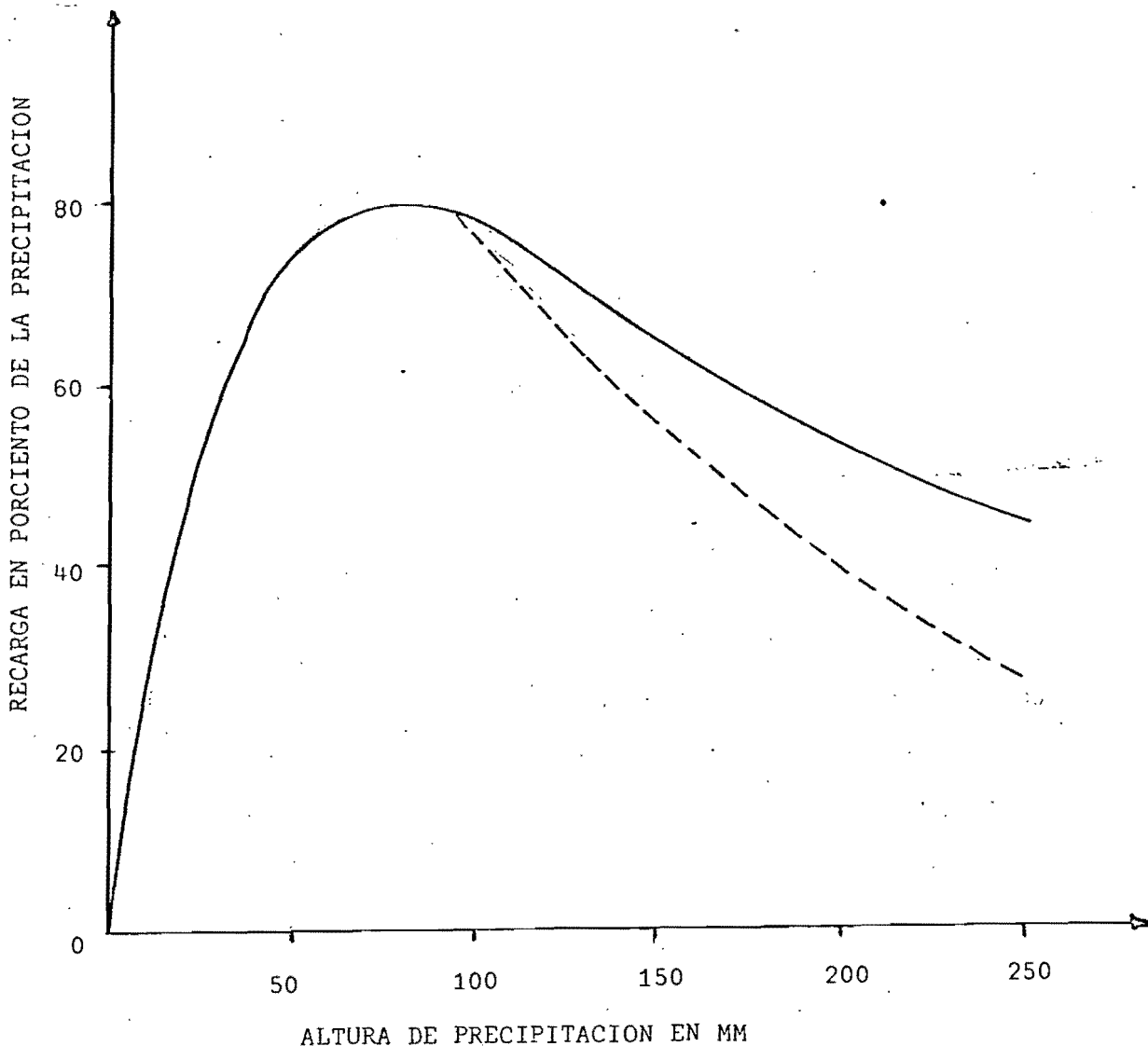


FIGURA 7. CURVA AJUSTADA A LA RECARGA HIPOTETIZADA COMO UNA FUNCIÓN DE LA PRECIPITACION

#### II.4.1.1. Ejemplo de aplicación

Se determinará la recarga de agua subterránea para la parte norte del estado de Nuevo León aplicando la ecuación (5) a los datos de precipitación de las estaciones seleccionadas. El área utilizada se muestra en la Figura 8; localizándose en ésta los principales campos de explotación de agua subterránea que actualmente cubren en parte la necesidad de agua potable para el área metropolitana de Monterrey, N.L. (campo de pozos Mina, campo de pozos Buenos Aires, campo de pozos Topo Chico y campo de pozos Monterrey); esta área se encuentra sobre formaciones calizas (Figura 1).

Se seleccionaron 20 estaciones climatológicas, ajustándolas a un período de registro de 25 años (1960-1974); aplicando la ecuación (5) a los datos de cada estación se determinó una lámina de recarga promedio anual para cada una de las estaciones localizadas en el Plano 1; por último se trazaron curvas de igual lámina de recarga para a partir de éstas y de las áreas de recarga obtener el volumen de recarga promedio anual, por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen de recarga} = \sum_{i=1}^n R_i A_i \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Cabe aclarar que mediante estudios isotópicos (Ref.111), se determinó que la recarga de los acuíferos que se encuentran en esta área, no ocurre en forma regional, sino que se presenta en forma local; es decir que los campos de pozos no constituyen un solo sistema y que las áreas de recarga para cada uno de los campos de explotación se encuentran muy cercanos a los lugares de extracción. Esto se puede comprobar al observar la variación de los niveles en

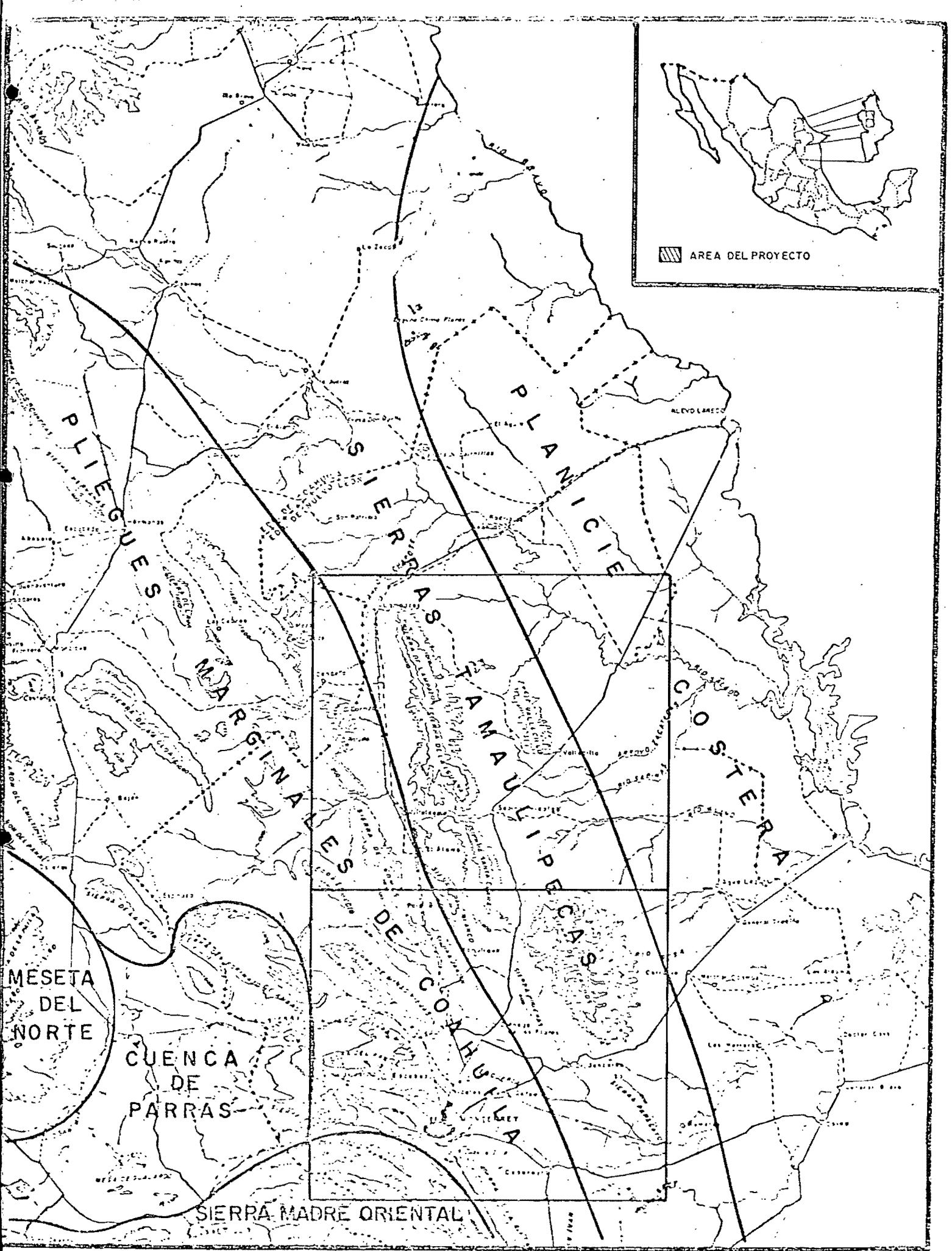


FIGURA 8. Provincias Fisiograficas (modificado de Erwin Raisz (1964))



el tiempo, lo que se muestra en las Figuras de la 9 a la 15, para los campos de pozos Mina y Buenos Aires. Para hacer más clara esta representación, se muestran en la parte superior de estas gráficas los hietogramas de precipitación de las estaciones más cercanas a los campos de bombeo; así se puede ver la rápida respuesta del acuífero a una lluvia más o menos significativa, y por el contrario el descenso en los niveles durante los períodos de sequía (enero, febrero, marzo).

#### Cálculo de la Recarga en los Sistemas Mina y Buenos Aires

Ahora se calculará la recarga que se tiene en el Sistema Mina, a partir del Plano 1; aplicando la ecuación (6) obtenemos un volumen de recarga promedio anual de  $34.91 \times 10^6 \text{ m}^3$  que equivale a una extracción de 1 100 lps. La extracción promedio anual que se tiene en el campo Mina actualmente es de  $26.11 \times 10^6 \text{ m}^3$ , es decir 830 lps (Cuadro 1), la cual es menor que la recarga promedio anual, lo que nos indicaría que no existe sobreexplotación en el acuífero; sin embargo en los años 1977 y 1978 se han registrado extracciones de  $37 \times 10^6 \text{ m}^3$ /año lo que equivale a  $1.17 \text{ m}^3$ /seg, si observamos la Figura 12 notaremos que durante estos años los niveles se han abatido considerablemente.

Procederemos de igual forma para el cálculo de la recarga media anual en el Sistema Buenos Aires, para el cual la principal zona de recarga la constituye la Sierra Madre Oriental debido a la gran extensión en que afloran las formaciones acuíferas y por la elevada capacidad de infiltración que éstas poseen. Aplicando la ecuación (6) de igual forma que en el Sistema Mina -

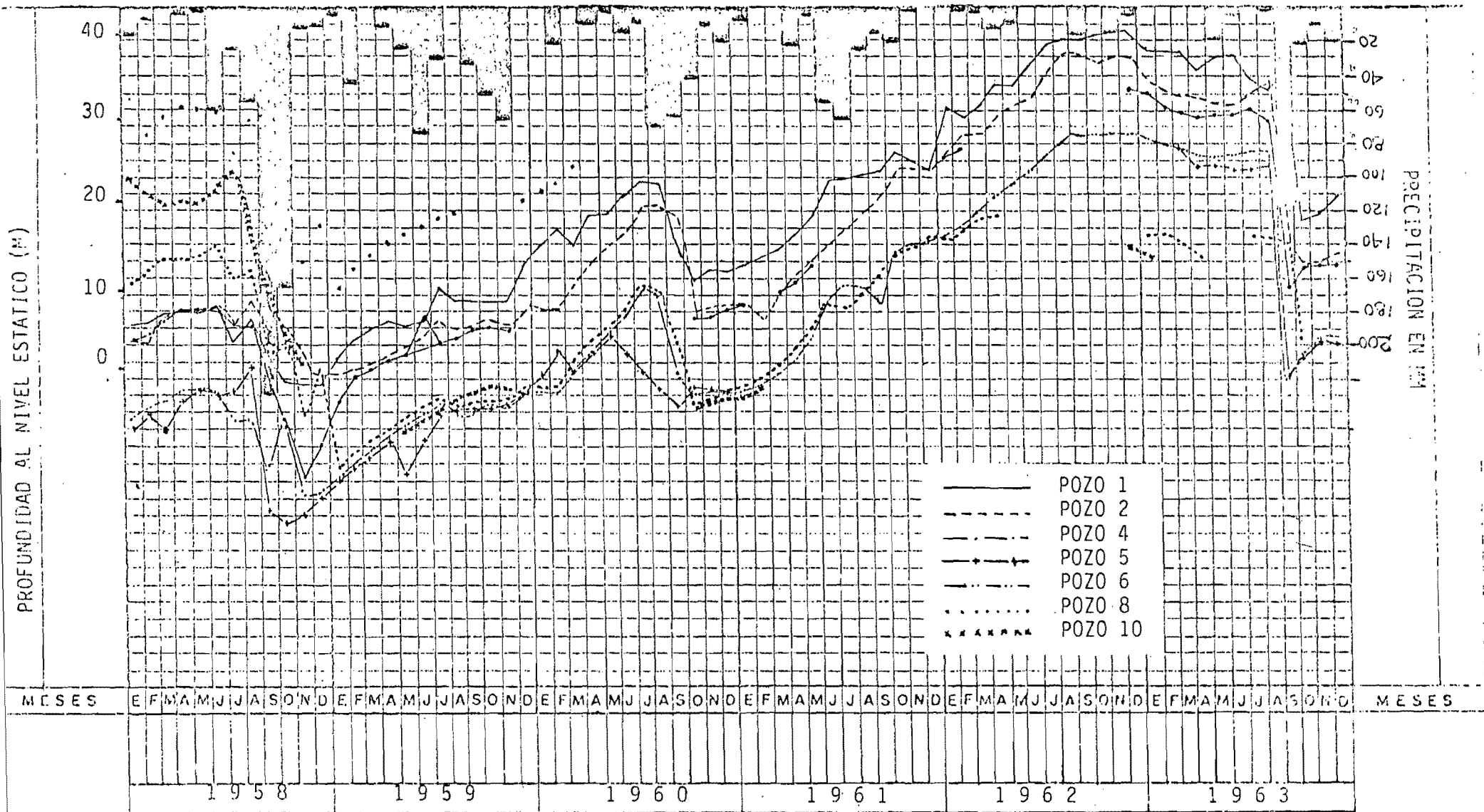


FIGURA 9 VARIACION DE LOS NIVELES ESTATICOS EN TIEMPO, CAMPO MINA

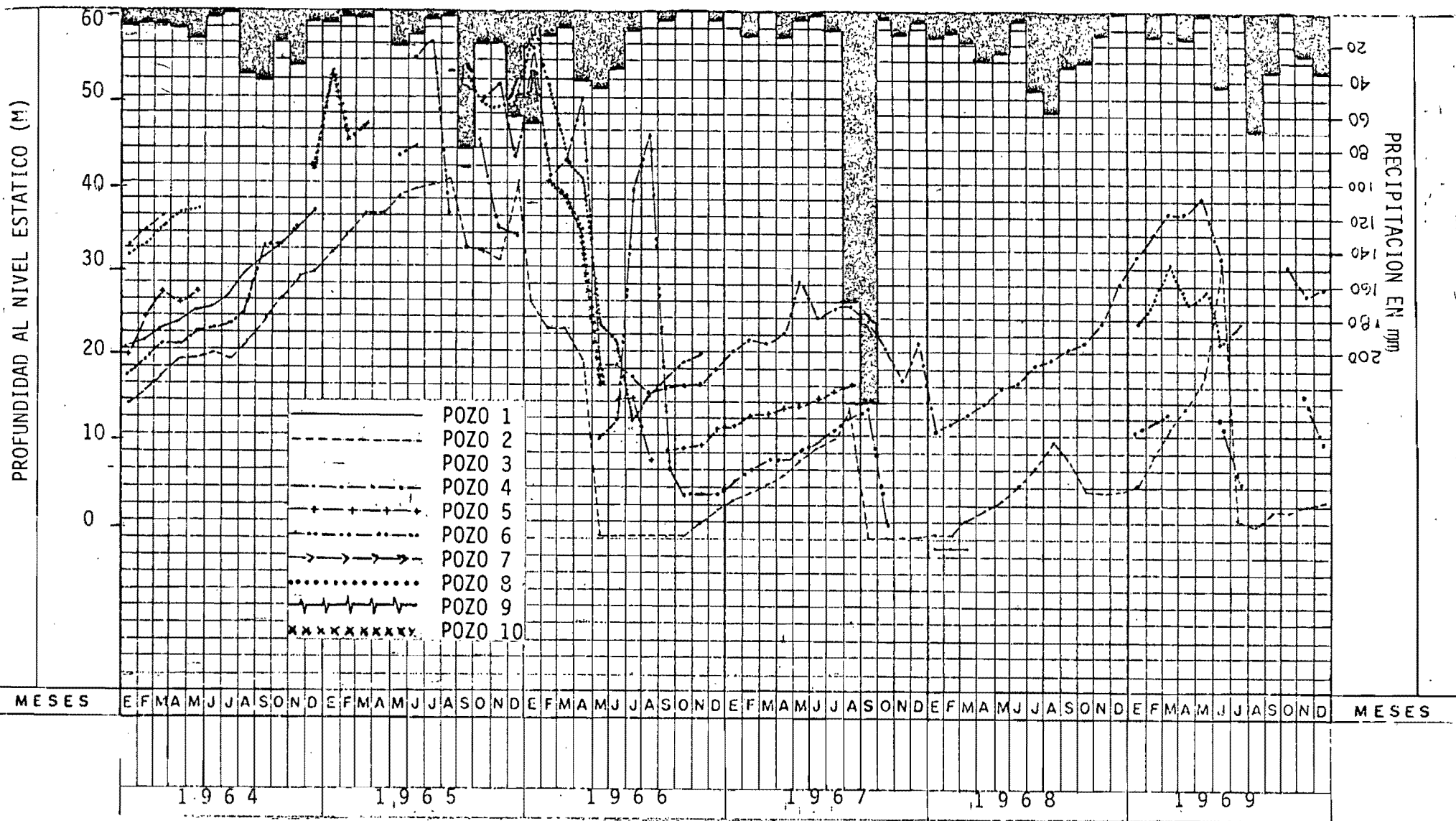


FIGURA 10. VARIACION DE LOS NIVELES ESTATICOS EN EL TIEMPO, CAMPO MINA

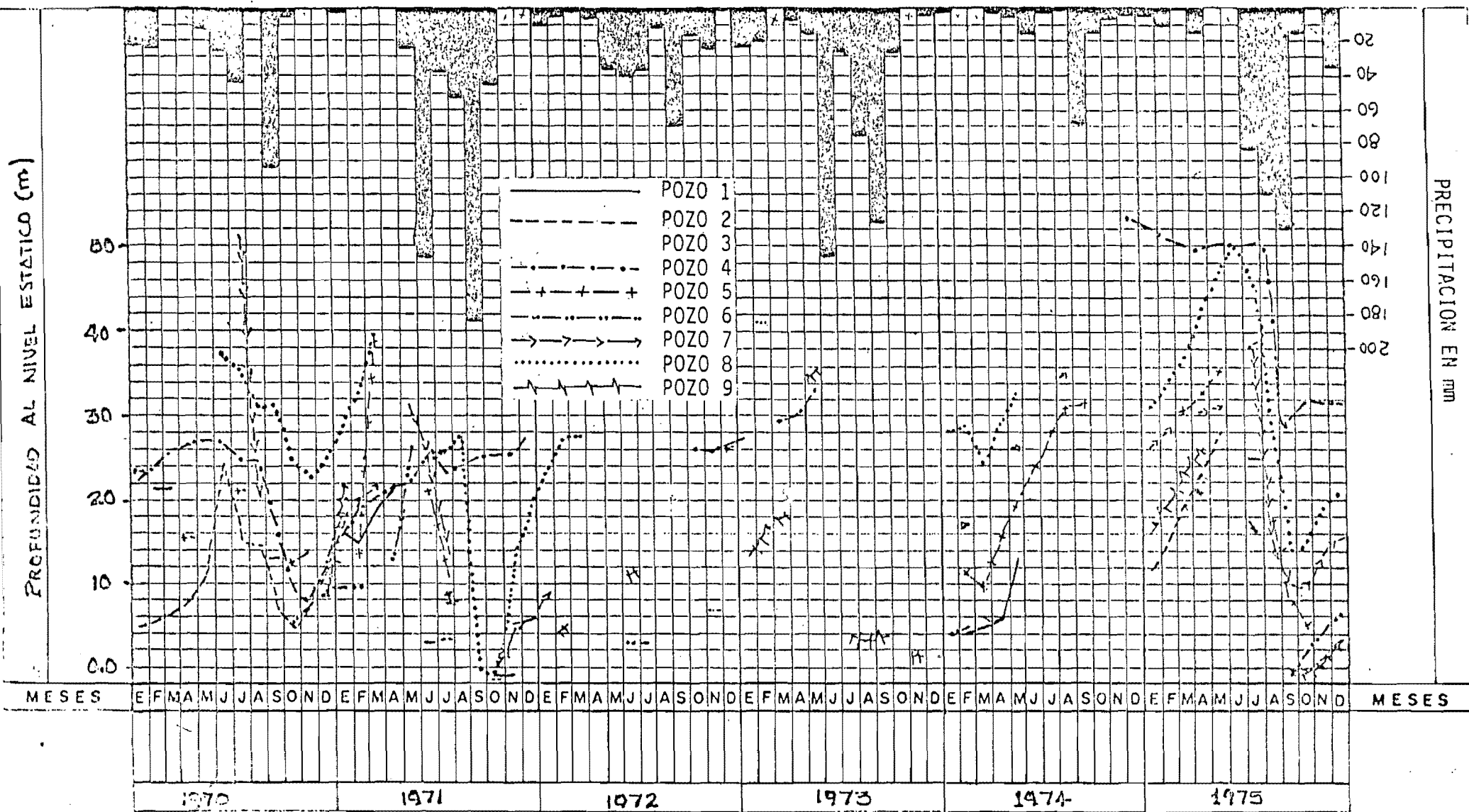


FIGURA 11. VARIACION DE LOS NIVELES ESTATICOS EN EL TIEMPO. CAMPO MINA.

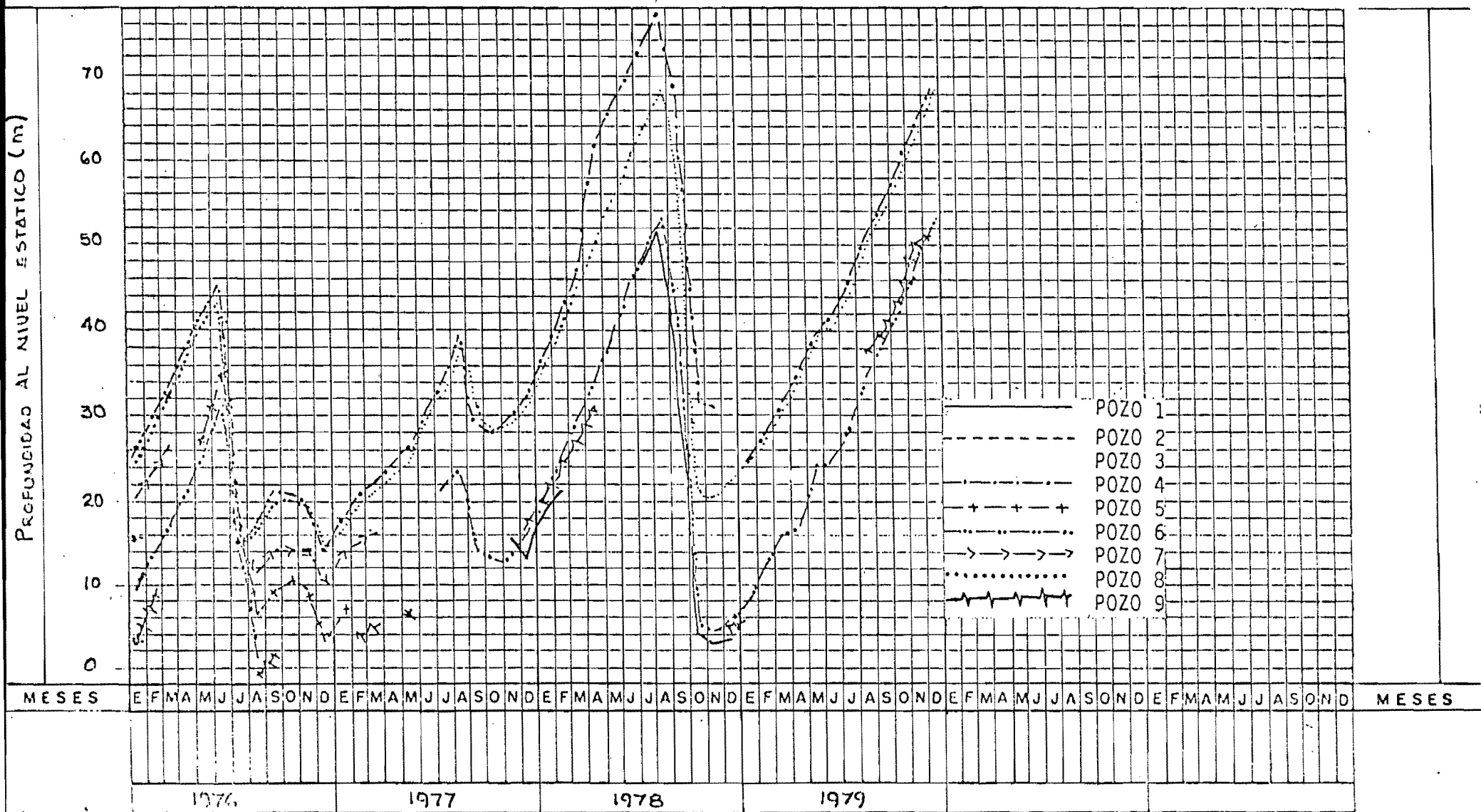


FIGURA 12', VARIACION DE LOS NIVELES ESTATICOS EN EL TIEMPO, CAMPO MINA

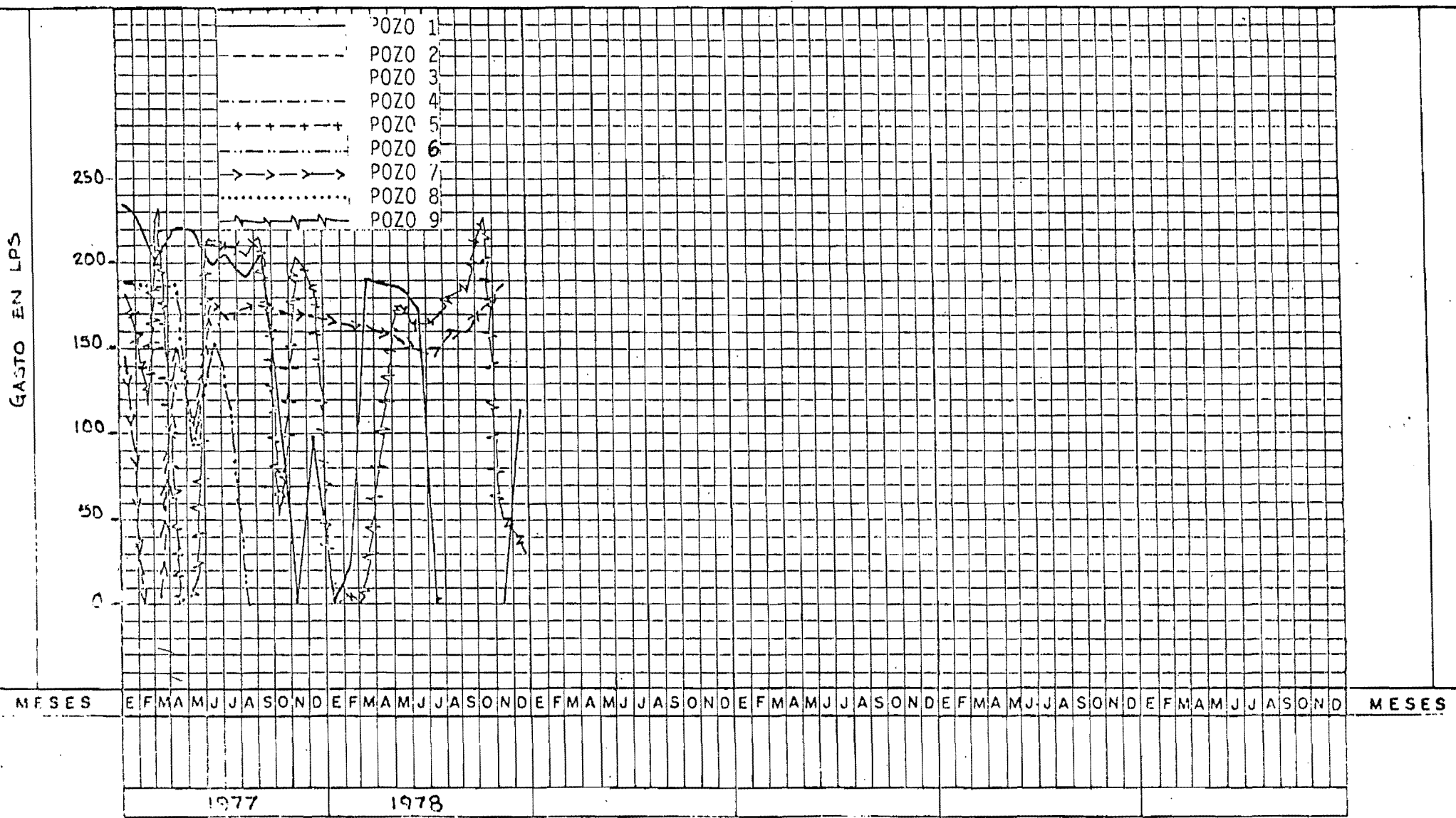


FIGURA 13. REGISTROS DE EXTRACCION DE LOS POZOS EN EL CAMPO MINA

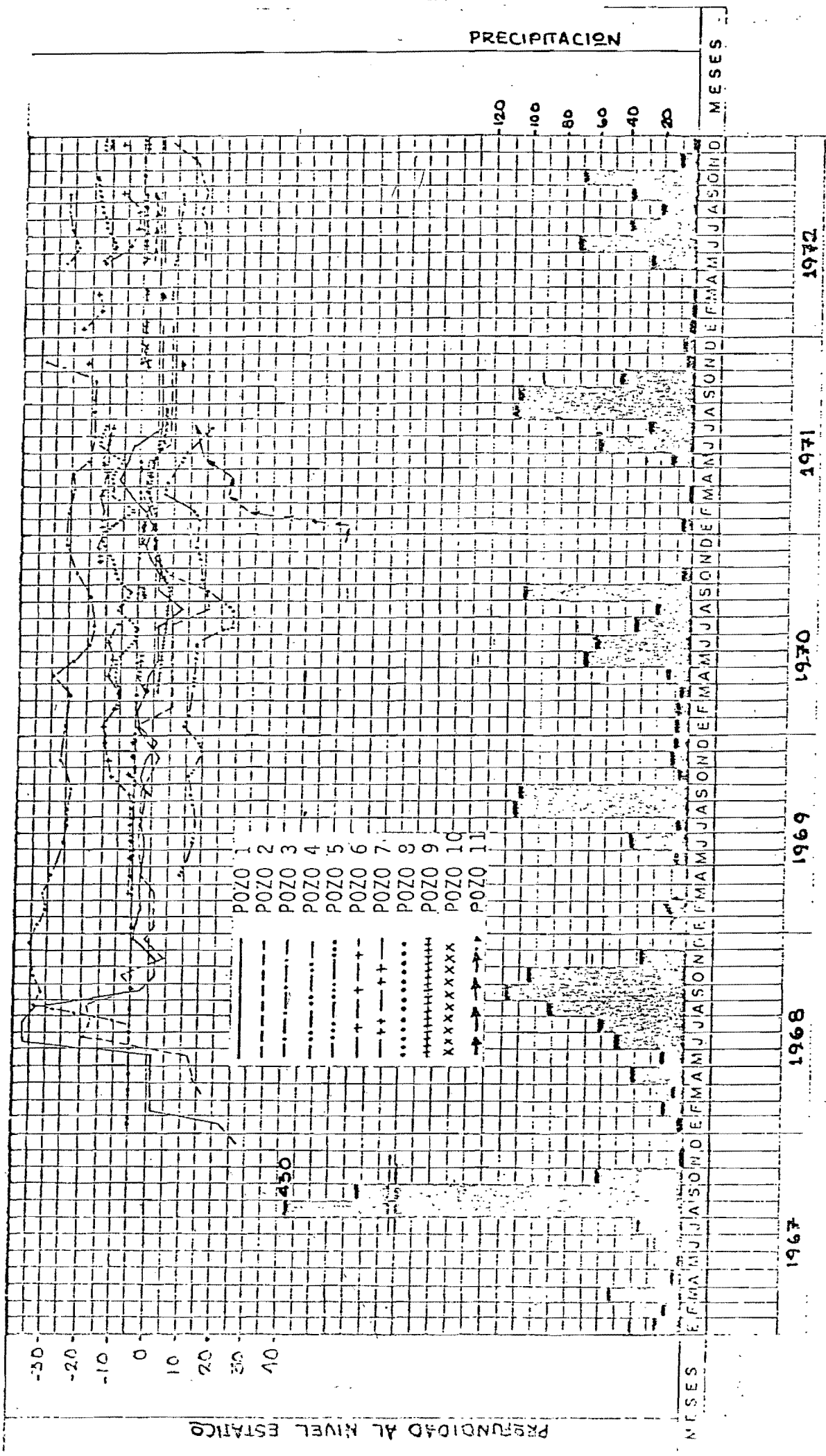


FIGURA 14. VARIACION DE LOS NIVELES ESTATICOS EN EL TIEMPO, CAMPO BUENOS AIRES

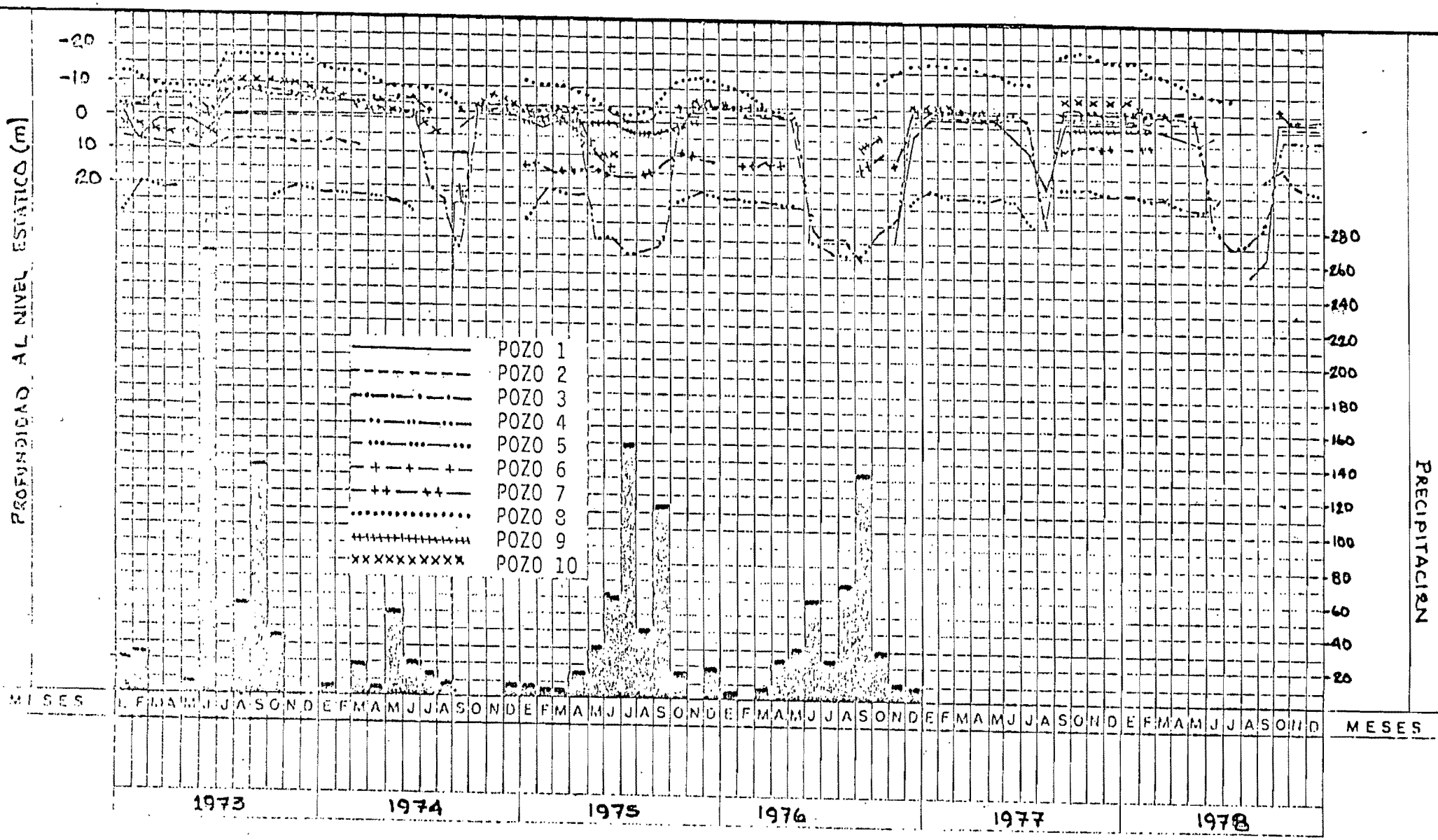


FIGURA 15. VARIACION DE LOS NIVELES ESTATICOS EN EL TIEMPO, CAMPO BUENOS AIRES



CUADRO 1. EXTRACCIONES PROMEDIO EN LOS CAMPOS DE POZOS MINA Y BUENOS AIRES

AÑO	CAMPO LPS	MINA $10^6 \frac{m^3}{m}$	CAMPO LPS	BUENOS AIRES $10^6 \frac{m^3}{m}$
1965	509.38	16.06	-	-
1966	417.91	13.18	-	-
1967	540.81	17.05	-	-
1968	587.76	18.53	-	-
1969	760.94	24.00	-	-
1970	818.83	25.8	-	-
1971	838.75	26.4	-	-
1972	911.01	28.7	-	-
1973	909.16	28.68	451.6	13.51
1974	969.92	30.59	476.32	15.01
1975	923.89	29.13	853.70	26.88
1976	1 102.43	34.77	1 532.60	48.29
1977	1 130.0	35.63	1 317.60	41.51
1978	1 172.33	36.47	1 368.5	43.12
1979			1 351.0	42.57

para el Sistema Buenos Aires que aparece en el Plano 1, obtenemos un volumen de recarga medio anual de  $47.93 \times 10^6 \text{ m}^3$ , que equivale a un gasto de extracción de 1 520 lps; en el Cuadro 1 se muestran las extracciones anuales en el campo de pozos Buenos Aires, teniéndose una extracción promedio de 1 050 lps, es decir 450 lps, abajo de la recarga, pero en el mismo cuadro tenemos que en 1976 la extracción fue ya de 1 500 lps, y apoyándonos en las gráficas de variación de los niveles en el tiempo para el campo de pozos Buenos Aires que se muestran en las Figuras 14 y 15; se observa para 1976 el descenso en los niveles producido por el aumento de las extracciones.

Podemos de los resultados determinados, decir que la recarga encontrada con este método no se encuentra fuera de la realidad.

#### II.4.2 Respuestas de los Sistemas Cársticos

Los hidrogramas de respuesta de precipitación efectiva en superficies impermeables con pendiente, tienen un pico agudo y amplio, un tiempo de pico relativamente corto y una rápida recesión. Los hidrogramas de respuesta de acuíferos clásicos de baja porosidad tienen un corto pico, un amplio tiempo de pico y una larga pero baja recesión de salida. Las formaciones cársticas en algunos casos tienen respuestas entre estos dos extremos. Ocurren diferencias significativas en porosidad, especialmente entre los canales subterráneos muy amplios, para las pequeñas fisuras de rocas y poros de depósitos de arcilla. También se tiene todo tipo de flujo en formaciones cársticas: capilar, transición de capilar a laminar, transición de laminar a turbulento, y

flujo turbulento.

Las respuestas cársticas son una combinación de varios tipos de hidrogramas de respuesta, con todas las transiciones. Una respuesta tal es cuando se tienen canales subterráneos de gran tamaño y ampliaciones (cavernas), con flujo de agua continuo y trabajando a presión o como superficie libre; tienen una respuesta relativamente rápida pero una amortiguación menos rápida que para las superficies impermeables con pendiente. Otras respuestas son aquellas para formaciones con porosidades más bajas, tales como materiales finos de arenas depositadas y sedimentos, rocas fisuradas y otras formaciones con permeabilidades cercanas a los acuíferos comunes de baja permeabilidad. Por último en los acuíferos de fisuras finas filtrantes y materiales arcillosos de depósito se produce muy lenta respuesta. Sin embargo, ya sea que el sistema cárstico tenga respuestas rápidas, medianamente lentas o muy lentas, el hidrograma de respuesta total es ajustada a hidrogramas de respuesta de áreas superficiales o al de acuíferos de baja permeabilidad. La figura 16 muestra los hidrogramas de respuesta para diferentes formaciones y la figura 17 los hidrogramas de respuesta usuales en acuíferos cársticos o sistemas de canales subterráneos para precipitación infiltrada.

La representación de los hidrogramas es solamente conceptual, con la intención de mostrar que los hidrogramas unitarios para terrenos cársticos son comunmente muy complejos. Con frecuencia se pueden encontrar dos picos o hidrogramas unitarios de respuesta con múltiples picos en estas regiones, demostrando que diferentes áreas o partes del sistema responden con diferente tiempo de pico, y cuando son integrados, producen estos complejos hidrogramas unitarios.

Esta complejidad en respuestas deberá ser usada asimismo para aclarar o reforzar de otro modo información aprovechable sobre los sistemas de estructuras y propiedades.

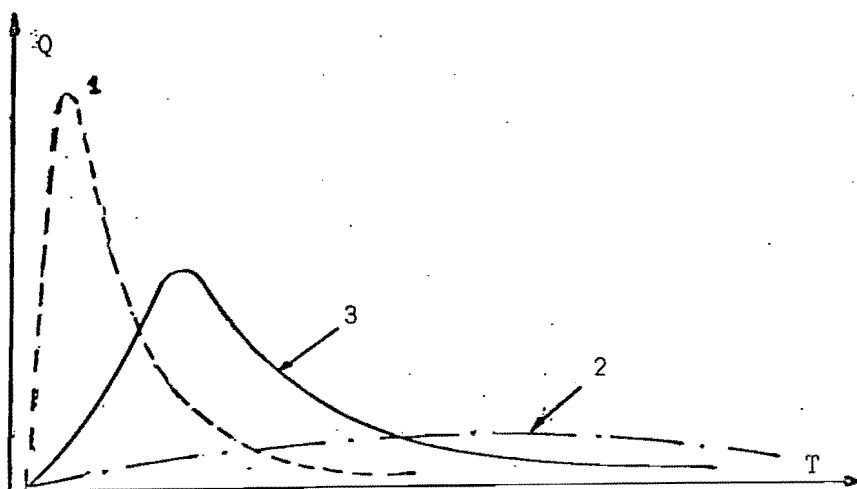


FIGURA 16 . HIDROGRAMAS UNITARIOS DE RESPUESTA PARA DIFERENTES FORMACIONES

1. RESPUESTAS RAPIDAS DE SUPERFICIES IMPERMEABLES CON PENDIENTE;
2. RESPUESTAS BAJAS DE ACUIFEROS COMUNES DE BAJA PERMEABILIDAD;
3. RESPUESTAS DE MEDIANAMENTE ALTAS A BAJAS DE ACUIFEROS CARSTICOS Y SISTEMAS DE CANALES

Un sistema cárstico subterráneo está constituido de un amplio número de diferentes subsistemas traslapados y entremezclados en el mismo medio. Por consiguiente, las tres mayores propiedades de sistemas cársticos son: a) Hidrogra

mas unitarios con pico de tamaño mediano y tiempo de respuesta mediano; b) Los hidrogramas unitarios son formados por muchos hidrogramas individuales de características varias, cada uno reflejando la reacción de tipos diferentes de porosidad, permeabilidad y régimen de flujo de agua.

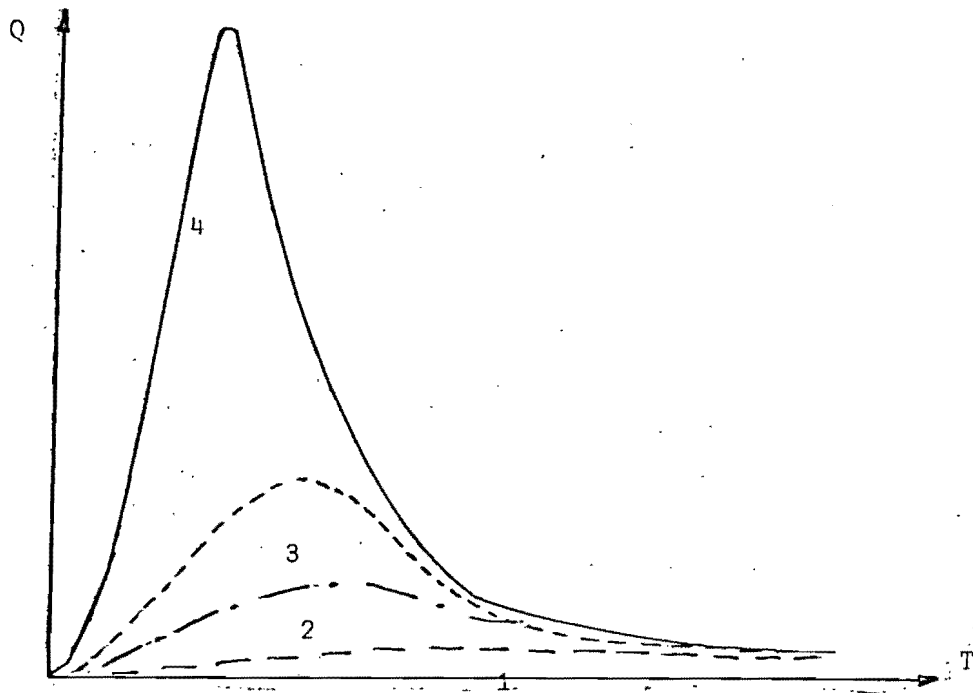


FIGURA 17 DESCOMPOSICION ESQUEMATICA DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE RESPUESTA DE UN ACUIFERO CARSTICO O UN SISTEMA DE CANALES SUBTERRANEOS DE ROCAS FISURADAS: 1) RESPUESTA MUY LENTA EN FISURAS FINAS Y DEPOSITOS DE SEDIMENTOS ARCILLOSOS; 2) RESPUESTA LENTA DE SEDIMENTOS Y DEPOSITOS DE ARENA Y FISURAS DE TAMAÑO MEDIANO; 3) RESPUESTA DE LENTA A MEDIANAMENTE LENTA EN DEPOSITOS DE ARENA A GRAVA Y FISURAS DE TAMAÑO MEDIANO; Y 4) RESPUESTA RAPIDA DE CANALES ANCHOS Y AMPLIACIONES.

## III. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hará una breve descripción de estudios realizados en forma ciones cársticas y sus autores, presentando al final un resumen de los estudios efectuados en el país.

En los últimos años ha aumentado el interés sobre el estudio de estas formaciones y sus características hidrogeológicas. Este interés ha quedado demostrado por la gran cantidad de publicaciones de todos tipos que ha aparecido; la cual varía desde artículos en periódicos, revistas técnicas, libros de texto y tratados. Encontrándose publicaciones en el mundo entero, que ilustran la distribución de formaciones y su importancia para el hombre.

Dentro de los primeros artículos aparecidos sobre información geológica se en encuentran las clasificaciones iniciales sobre rocas carbonatadas en América en 1904 y 1913 por Grabau (Ref. 36); en 1935 apareció una monografía sobre petrología carbonatada por el francés Cayeux (Ref. 20); y una introducción al conocimiento de las rocas carbonatadas por el inglés Black (Ref. 6). En 1936 el austriaco Sander (Ref. 84), contribuyó al conocimiento concerniente a los procesos comunes de sedimentación para rocas carbonatadas; los científicos soviéticos hacen una aportación en 1956 con Teodorovich (Ref. 100) y Strakhov en 1956 (Ref. 88), los cuales publicaron investigaciones fundamentales sobre la litología, génesis y clasificación de rocas carbonatadas. En 1951 Johnson (Ref. 46) contribuyó al conocimiento acerca de los constituyentes bióticos de rocas calizas y su clasificación, origen y terminología. En 1958 Bramkam y Powers (Ref. 14) y en 1959 Folk (Ref. 32), elaboraron dos clasificaciones de-

talladas de rocas carbonatadas, la que fue seguida en 1967 por Chillingar (Ref. 21). En 1962 Ham (Ref. 40) editó "Una clasificación de rocas carbonatadas".

Las investigaciones sobre el karst han tenido la hegemonía de los europeos más que nada debido a lo extenso de sus terrenos cársticos, mientras que los demás investigadores han estudiado por tradición aspectos menos prácticos del karst.

El comienzo de la investigación del karst en Rusia es marcado en 1921 y 1915 por Kruber (Ref. 53), en el que describe el fenómeno cárstico y la hidrología en la Crimea y el Cáucaso.

Otros artículos en los inicios de este campo son: en 1922 Wray (Ref. 118 ), publica un reporte sobre tierras cársticas del oeste de Yugoslavia; en 1927 -- Weller (Ref. 103) hace un estudio sobre la geología de la región de cavernas de Mammoth. Dentro de los primeros trabajos cuantitativos sobre la ocurrencia del agua en acuíferos calizos se encuentra el realizado en 1936 por Theis (Ref. 96), en el sur de Tennessee y en 1924 por Cvijic (Ref. 25) en Yugoslavia. En 1931 Davis (Ref. 28) realizó un tratado sobre las cavernas en rocas calizas y en 1942 Swinnerton (Ref. 95) hizo una sinopsis sobre este trabajo y un capítulo sobre hidrología en terrenos calizos.

En 1962 Sokolov (Ref. 85) publicó un artículo en el cual presenta resultados teóricos de investigaciones en terrenos cársticos, en el que analiza las condiciones geológicas, hidrogeológicas, físicas y químicas del desarrollo del proceso cárstico, considerando en el análisis de condiciones hidrogeoquímicas la



disolución natural y las sustancias de disolución.

A principio de la década de los 60's se aclararon los términos usados en la discusión de la hidrología y geomorfología de los terrenos carbonatados. En 1965 apareció el vocabulario francés de fenómenos cársticos (Ref. 23) ("Vocabulaire Francais des Phénomènes Karstiques") que presenta la equivalencia de los términos cársticos. En 1970 Monroe (Ref. 70) recopiló un glosario de la terminología cárstica y en 1973 la UNESCO publicó un glosario multilingüe. En 1973 Swecting (Ref. 94), hizo un glosario menos completo en la conclusión de su libro sobre Karst.

En la Unión Soviética fue publicada terminología cárstica en 1968 por Kalesnik (Ref. 47) en su diccionario geográfico; en 1971 por Makkaveev (Ref. 60) en su diccionario hidrogeológico y en libros en 1954 por Gvózdetsky (Ref. 39); en 1962 por Sokolov (Ref. 85) y en 1963 y 1969 por Maksimovich (Refs. 63 y 64).

Relacionado con el estudio de la circulación del agua en terrenos cársticos, existen varios trabajos de investigación, la mayoría realizados por europeos. En 1932 Lehmann (Ref. 57) estudió el movimiento del agua subterránea en el medio cárstico, y lo relacionó con soluciones. En 1968 Roglic (Ref. 82), aplicó ideas de Lehmann en el estudio de la circulación del agua en el Karst de Yugoslavia.

En años recientes han sido usados los trazadores en varios trabajos para determinar modelos de circulación del agua subterránea, entre ellos están: en -



1961 Zötl (Ref. 109); en 1971 Dubitanski (Ref. 29); en 1972 Milanovic (Ref. 67) y en 1973 Atkinson (Ref. 2). Otros investigadores han estudiado el movimiento del agua en regiones cársticas a través de las influencias geológicas y fisiográficas; como en 1970 por Williams (Ref. 104) en Irlanda; en 1971 en Inglaterra por Patterson (Ref. 75); en la Unión Soviética en 1940 por Zajtsev (Ref. 108); en 1962 por Sokolov (Ref. 85); en 1969 por Maksimovich (Ref. 64) y en 1972 por Babushkin (Ref. 5).

En 1966 Stringfield (Ref. 88) realizó una extensa síntesis de los sistemas cársticos en el sureste de los Estados Unidos. En 1969 Stringfield y LeGrand (Ref. 89) prepararon una revisión sobre hidrología de rocas carbonatadas, con especial referencia a los Estados Unidos, utilizando conceptos obtenidos de otros trabajos. Estudiaron además la relación entre agua dulce y agua salada en cuatro áreas cársticas costeras, demostrando la desigual distribución de permeabilidad en los cauces costeros de estas áreas y la de las zonas costeras arenosas.

En 1974 Stringfield, Le Corand y La Moreaux (Ref. 93) realizaron una comparación entre karst áridos del oeste de Egipto; el Nullabor Plain de Australia; la meseta Kaibab de Arizona y la Península de Yucatán en México con la región cárstica húmeda de Alabama; con el fin de describir más adelante un reporte sobre el desarrollo del karst y sus efectos sobre la permeabilidad y la circulación del agua en rocas carbonatadas con especial referencia a los estados del sureste de los Estados Unidos.

En 1963 Burdon y Papakis (Ref. 19) demostraron la necesidad de entender el movimiento regional de agua subterránea cárstica en su estudio realizado en áreas de Grecia. En la Unión Soviética en 1961 Kolodyasshnaya (Ref. 50) en 1962 Molitvin (Ref. 69); en 1969 Sokolov (Ref. 84); y en 1970 Balkov (Ref. 7) y Vladimirov (Ref. 101), estudiaron la relación entre flujo de corriente y karst.

En 1972 Herak y Stringfield (Ref. 41) y en 1974 Ivanov (Ref. 43), demostraron el control tectónico sobre el movimiento del agua. En la Unión Soviética, se estudiaron los efectos tectónicos en la dinámica de aguas subterráneas, en 1961 por Plotnikov (Ref. 77); en 1962 por Sokolov (Ref. 85); en 1963 por Rodinov (Ref. 80) y en 1974 por Maruashvilli (Ref. 65).

Se han realizado mapas regionales muy útiles, en diversas partes del mundo, como Mijatovic (Ref. 66) en Yugoslavia; Kiraly (Ref. 49) en Francia; Boni y Paratoo (Ref. 13) en Italia y Rodionov (Ref. 79) y Vladimirov (Ref. 101) en la Unión Soviética.

Debe considerarse el enfoque tanto regional como local, como ha sucedido en el estudio de Enslin (Ref. 30) en Transvaal, República de Sudafrica; en el de Komantina (Ref. 52) en las áreas costeras de Yugoslavia y en el de Avias (Ref. 4) en Francia.

En la Unión Soviética, ha sido muy usada la subdivisión de áreas principales de acuerdo con las condiciones de manifestación cárstica, como se muestra en los mapas de Maksimovich (Ref. 61) sobre todo el territorio so-

viético, Gvozdetzky (Ref. 38) en 1952 sobre el Cáucaso, y en 1963 por Rodianov (Ref. 79) sobre la parte europea de la URSS, los Urales y el Cáucaso.

El mapa más general combinando investigaciones espeleológicas recientes es el realizado en 1973 por Chikishev.

Estudios mediante técnicas nuevas utilizando instrumentos especializados (medidores de corriente de pozos profundos, medidores de conductividad, cámaras de televisión adaptadas, etc.), se están llevando a cabo en la Universidad Estatal de Pensilvania, en el Instituto Geológico de Alabama y en el Instituto Geológico de los Estados Unidos; en el Instituto Geológico de Sudafrica; en la Universidad de Montpellier en Francia; en el H.E. Trebisnjica en Yugoslavia y en la Universidad Estatal de Moscú y el Instituto Soviético de Hidrogeología e Ingeniería Geológica en la Unión Soviética.

Están comenzando a aplicarse métodos geofísicos complejos para investigación de terrenos cársticos, especialmente para karst cubiertos. En la Unión Soviética Ogilvy (Ref. 72) y Golóvtsyn (Ref. 35) han aplicado estos métodos geofísicos, intentando a partir de ellos; aplicar las peculiaridades geológicas y estructurales de los macizos cársticos; localizar y determinar la extensión de las cavidades cársticas; descubrir áreas de recarga; y para estudiar las direcciones y cambios de flujo de las aguas cársticas en profundidad, cambios de temperatura y composición química de las aguas.

J. Avias (Ref. 4) en la Universidad de Montpellier está realizando una inves-

tigación usando resistividad y métodos sísmicos para delinear sistemas de disolución en rocas calizas. Está comenzando a usarse fotografía multiespectral para estudiar la descarga submarina de manantiales en Hawaii, Jamaica y Sicilia por la U.S. Geological Survey.

Se han estudiado las descargas marinas concentradas por medio de métodos geofísicos, en 1951 por Dakhnov (Ref. 27); en 1963 por Brashnina (Ref. 15), en 1967 por Melivova y Buachidze (Ref. 17) y en 1971 por Lvova y Popov (Ref. 58).

En la década pasada fueron hechos trabajos en hidrología cárstica usando métodos geoquímicos. Entre los principales tenemos el desarrollado en 1970 en la Península de Yucatán y Florida por Back y Hanshaw (Ref. 6), donde encontraron contraste geoquímico del agua subterránea en ruptura de acuíferos confinantes;

En 1939 Laptev (Ref. 54), ofreció algunas fórmulas para la evaluación cuantitativa de la influencia del agua natural en la disolución de rocas cársticas.

En 1971 Trailkill (Ref. 97) hizo estudios en depósitos carbonatados en las cavernas de Carlsbad y modelos de computación digital para el acuífero del oeste de Kentucky. En 1971 Parizak y White (Ref. 74), determinaron las diferentes permeabilidades y otros parámetros geométricos usando la relación calcio-magnesio para formaciones geológicas en Pennsylvania. En 1969 Bray (Ref. 16) discutió algunos problemas encontrados con métodos estándar de determinación de dureza. En 1971 Bogli (Ref. 11); trabajando en las montañas Jura estimó la ocurrencia de disolución sobre la superficie de la roca, en fisuras y cavernas -

profundas. Otros trabajos importantes relacionados con el fenómeno de disolución están en el de 1963 realizado por Williams (Ref. 104), quien modificó la fórmula de Corbel; en 1966 Pitty (Ref. 76) y en 1962 Gams (Ref. 33) efectuaron estudios teóricos de flujo en rocas cársticas fisuradas. En 1971 Tripet (Ref. 100) realizó modelos de rocas carbonatadas explicando el carácter hidrológico y el movimiento del agua.

En 1972 Babushkin (Ref. 5) describió métodos de modelación matemática y de estimaciones probabilísticas estadísticas y la aplicación de estos métodos para pronosticar el régimen de agua subterránea para condiciones de disturbio.

En 1963 y 1969 Maksimovich (Refs. 63 y 64); en 1971 Jennings (Ref. 45); en 1972 Herak y Stringfield (Ref. 41) y en 1973 Sweeting (Ref. 94) realizaron trabajos con descripciones del total de las formas cársticas encontradas por todas partes del mundo. Han sido también realizados varios artículos sobre las regiones tropicales cársticas, como los desarrollados en 1968 por Birot (Ref. 9); en 1970 por Corbel y Muxart (Ref. 24); en 1954 por Gvozdetski (Ref. 39) y en 1973 por Miotke (Ref. 68).

El uso de métodos de percepción remota ha aumentado grandemente. Quizá los trabajos de Lattman y Parizek (Ref. 55) y el de Trainer y Ellison (Ref. 98) puedan ser considerados los más completos. En 1970 Sonderegger (Ref. 86) hizo las primeras técnicas fotogeológicas para usarse en una serie de reportes sobre la hidrología de terrenos calizos en el norte de Alabama. La percepción remota ha sido también usada para el estudio de áreas de pozos en el sureste de Estados Unidos por Coker (Ref. 22) en 1969; Newton (Ref. 71) en 1973; y Warren y

y Wielchowsky (Ref. 102) en 1973. La percepción remota promete gran ayuda en el estudio de problemas en rocas carbonatadas, tales como depósitos estudiados y manejo de áreas de recarga de agua subterránea para prevenir la contaminación.

Dentro de los estudios geoquímicos más recientes en formaciones cársticas se encuentra el desarrollado en 1977 por Bently (Ref. 8) en el que trata de determinar agua de buena calidad para satisfacer la demanda de agua potable en Clay Country Florida; el realizado por Bogges, Missimer y O'Donnell (Ref. 12) en Florida en el que trata el problema de la intrusión salina basándose en estudios geoquímicos; el de Farchild (Ref. 31) en Daval, Florida; el de Anderson (Ref. 1) en Puerto Rico; el de Gross y Duffy (Ref. 113) estudio geoquímico a base de trazadores.

En 1977 Huntoon (Ref. 42) realizó un estudio en Arizona relacionado con la tectónica. En 1977 Le Febre (Ref. 56) en su artículo sobre el acuífero Rosewell en Nuevo México estudia la evolución del agua subterránea, dividiendo el área de estudio en subsecciones usando valores promedio de las medidas características para describir cada subsección (temperatura, saturación de calcita, oxígeno disuelto, etc.). En 1976 Giusti y Bennet (Ref. 112) realizaron un estudio de los recursos de agua en formaciones calizas en la costa norte de Puerto Rico.

En 1976 Yevjevich (Ref. 110) editó un libro de dos volúmenes de los resultados del Simposio Yugoslavia-Estados Unidos sobre Hidrología Cárstica y Recursos de Agua, realizado en Dubravnik, Yugoslavia en 1975, estos dos volúmenes

contienen 38 escritos, discusión de éstos, e ideas necesarias para investigación, todo distribuido en seis partes de la siguiente forma: Volumen I: (1) Hidrogeología cárstica y (2) Hidrología cárstica; y Volumen II: (3) Tecnología para el desarrollo de recursos de aguas cársticas; (4) Calidad de aguas cársticas, y protección de éstas contra la contaminación; (5) Recursos de aguas cársticas; y (6) Necesidades de investigación en hidrología cárstica y recursos de agua.

### III.1 Resumen de Estudios Desarrollados en la República Mexicana en Formaciones Calcáreas

En 1968 CIEPS realizó un estudio geohidrológico de acuíferos en calizas en el estado de Nuevo León (Ref. 116 ), el cual tenía como objetivos principales determinar lugares para la explotación en calizas; estimar los recursos subterráneos con probabilidades de aprovecharse y recomendar los tipos de obras de captación y conducción que suministran los volúmenes adicionales de agua. Constó de un estudio geológico regional que comprendía fisiografía y geomorfología, -estratigrafía y características geohidrológicas de las formaciones, y tectónica; un estudio geológico detallado; la elaboración de un catálogo de aprovechamientos; un estudio geoquímico y un estudio sobre la geohidrología del lugar que incluía toma de niveles de los pozos y formación de planos de elevaciones piezométricas además de la estimación de los volúmenes medios anuales descargados por manantiales al norte y sur de Monterrey. Se determinó la recarga en la zona a partir del producto de la precipitación, el área de recarga y unos coeficientes de infiltración calculados.

Payne y García (Ref. 111) en su estudio realizado sobre esta: área, concluyen que los campos de pozos que abastecen de agua a la ciudad de Monterrey no tienen fuente de recarga común, estableciéndose que la recarga es prácticamente local.

PLANIMEX Ingenieros Consultores desarrolló un estudio (1977), en esta misma zona, el cual tuvo como objetivo determinar nuevas zonas de aprovechamiento del agua subterránea, así como la determinación de la recarga en los campos de explotación, en este estudio se aceptan dos sistemas principales de acuíferos: uno es el acuífero en aluvi6n y el otro es el acuífero en calizas al que subdividen en dos unidades (cuenca Buenos Aires y cuenca Monterrey). - Considera que existe interconexi6n entre los diferentes campos de pozos constituyendo un sólo sistema.

Otra de las regiones importantes en el país con gran potencial acuífero en - formaciones calizas, es la Península de Yucatán (Fig.1); en la que a diferen - cia del estado de Nuevo León se tiene una gran permeabilidad en toda el área; lo cual se manifiesta por la falta de corrientes superficiales. En esta zona se han realizado estudios geohidrológicos apoyados la mayoría de las veces en la geología y la geoquímica ya que se carece de registros en los aprovecha-- mientos por lo que no existen configuraciones confiables de los niveles, uno de estos estudios es el desarrollado por Juan Manuel Lessér (Ref. 117), su objetivo fue evaluar las condiciones de los depósitos acuíferos y así abastecer racionalmente de agua a la poblaci6n y encontrar alternativas para resolver - el problema de la eliminaci6n de aguas negras, debido a que éstas están contaminando actualmente los acuíferos, pues no se dispone de un sistema de alcan-



tarillado, así toda el agua de deshecho se infiltra, sin sufrir cambio en su com posición, se efectuó un estudio geohidrológico e hidrogeoquímico tendiente a co nocer el funcionamiento de los acuíferos en la Península, se realizaron reconoci mientos geológicos de campo, medición de perfiles de conductividad en pozos y -- cenotes y un censo de aprovechamientos subterráneos. Sin embargo lo más que se se realizó en el estudio fue en el aspecto geoquímico y geológico ya que en cuanto a la geohidrología solo se realizaron unas configuraciones de nivel estático no confiables debido a que no se cuenta con una nivelación topográfica adecuada; por último se hizo la determinación de la recarga planteando un balance geohidrológi co, tomando en cuenta la precipitación, la evapotranspiración, temperatura y - área de estudio.

La SRH y el Plan Nacional Hidráulico (Ref. 115 ) desarrollaron en 1975 un estu- dio sobre Yucatán, en el que se determina en aspectos generales el grado de con taminación que sufre esta región y se estima de acuerdo a las condiciones geoló gicas y topográficas de la región la potencialidad de los acuíferos, en su re-- carga y almacenamiento.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede concluir, que es de importancia aumentar las investigaciones sobre los acuíferos en formaciones calcáreas, debido a su comprobada potencialidad y como se ha dicho; por las extensas áreas existentes en el país, que representan en muchos casos la principal fuente de abastecimiento de agua potable (Nuevo León y Yucatañ), pero que, debido a la imposibilidad (por ahora), de efectuar cuantificaciones exactas, existe una sobreexplotación en algunos de estos acuíferos, lo que ha producido un abatimiento peligroso en sus niveles.

Es evidente que los alcances obtenidos en la actualidad, se refieren más que nada, en los aspectos geológicos y geoquímicos, encontrándose la aplicación de la hidráulica en sus principios haciéndose de importancia el aumento de los estudios a partir del enfoque hidráulico.

Una recomendación sería: llevar durante un período considerable (mínimo 5 años), registros diarios de precipitación y descargas de los acuíferos; así como determinar la variación de los niveles de los pozos, con el fin de realizar correlaciones entre estas tres variables y de ahí poder predecir el comportamiento de los acuíferos.

## BIBLIOGRAFIA

- Custodio, E. y Llamas, M.R. Hidrología Subterránea  
Editorial Omega, S.A.  
Barcelona, 1979.
- Davis, S.N. y De Wiést Hidrogeología  
Editorial Ariel, S.A.  
Barcelona, 1971.
- Pulido, J. Hidrogeología Práctica  
Editorial Urmo, S.A.
- Llamas, M.R. Aplicación de un modelo digi  
López Camacho, B. tal al estudio del flujo de  
las aguas subterráneas en las  
calizas cretácicas de Torre -  
Laguna.  
Estudios Geológicos, vol.XXXI  
pp. 799-810, Instituto Lucas.  
España, 1975.
- Llopis Llado, Noel. Fundamentos de Hidrogeología  
Cárstica.  
Editorial Blume.  
España, 1970.
- Stringfield, V.T. Effects of karst and goeologic  
Rapp, J.R. structure on the circulation  
Anders, R.B. of water and permeability in  
carbonate aquifers.  
Journal of Hydrology, vol. 43  
pp. 313-332. 1979.

Downing, R.A., Pearson, F.J.  
Smith, D.B., Monkhouse, R.A.

The age of groundwater in the  
Lincoln shire limestone, En--  
gland and its relevance to --  
the flow mechanism.  
Journal of Hydrology, vol. 33  
pp 201-216, 1977.

Charleton, Santiago

Algunos criterios útiles en -  
la exploración geohidrológica  
de los acuíferos calcáreos.  
Simposium Internacional sobre  
Planificación de Recursos Hi-  
dráulicos, S.R.H., México.

PLANIMEX, Ingenieros Consultores.

Abastecimiento de agua potable  
en el área metropolitana de -  
Monterrey, N.L., México, 1977.

Ingenieros Consultores y Proyectistas,  
CIEPS.

Estudio Geohidrológico de acuí-  
feros regionales en calizas, -  
Zona Monterrey, N.L., México,  
1968.

Vujica, Yevjevch

Research Needs in Hydrology --  
and Water Resources of Karsti-  
fied Carbonate Terranes.  
George Washington University,  
Washington, Octubre, 1980.

Ingeniería y Sistemas, S.A.

Estudio Geohidrológico del  
Estado de Nuevo León.  
México, 1972.

Knisel, G. Walter

Response of karst aquifers-  
to recharge. Hydrology Papers.  
Colorado State University.  
Fort Collins, Colorado, 1972.

Vujica, Yevjevich

Advanced Approaches to Karst  
Hydrology and Water Resource.  
Karst Hydrology and Water Re-  
sources W.R.P. Fort Collins,-  
Colorado, 1976.

Comisión del Plan Nacional  
Hidráulico

Determinación del funcionamien-  
to geohidrológico de los acuíferos  
de la zona de Monterrey, N.L.  
C.P.N.H., México, 1980.

Chávez Guillén, Rubén

Hidrología subterránea de los -  
acuíferos calizos de la zona de  
Monterrey, N.L.  
S.R.H., México, 1974.

Lesser Illades, Juan Manuel

Estudio hidrológico e hidrogeo-  
químico de la península de Yuca-  
tán.  
S.R.H., México, 1976.

## REFERENCIAS

1. Anderson, Henry R. 1976, Groundwater in the San Juan Metro Politan Area, Puerto Rico: Geological Survey, Water Resources Div. 107 p.
2. Atkinson, T.C., Smith, D.I., Lavis, J.J., and Whitaker, R.J., 1973 - Experiments in tracing underground water in limestones: Jour Hydrology, 19, no. 4.p. 323-349.
3. Avias, Jacques, 1968 - The karst of France: Montpellier, Centre d'Études et de Recherches Hydrogéologiques, 64 p.
4. Avias, Jacques, 1971 - Reflexions sur le role de l'hydrologie et de la paleohydrogéologie dans la genese, le ramaniement et la destruction des gites métalliferes stratiformes en particulier: Univ. Montpellier-Gerga, 6, 11 p.
5. Babushkin, V.D., Lebedinskaya, Z.P., Karshkovky, F.N., Borevsky, B.B., Plotnikov, I.I., 1972. - Forecasting of inflows into mines and water intakes in fissured and karstic rocks, Moscow, Nedra, 196 p.
6. Back, William, and Hanshaw, B.B. 1970 - Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan: Jour Hydrology, 10, no. 4.p. 330-368.
7. Balkov, V.A. 1970 - Influence of karst on streamflow in the European USSR: Leningrad, Gidrometeoizdat, 260 p.
8. Beufley C.B., 1977 - Aquifer Test analyses for the Floridian Aquifer in Flagler, Putnam and St. Johns countries Florida Geological Survey, Water Resources, 57 p.
9. Birot P., Corbel, J. and Muxart, R., 1968 - Morphologie des regions a la Jamaïque et à Puerto Rico (Morphology of limestone regions in Jamaica and Puerto Rico): Centre de recherches et documentation cartographiques et géographiques, Mémoires et documents, 1967, 4,p. 335-392.
10. Black, M., 1938 - The petrology of the sedimentary rocks: London, Allen and Anwin, 383 p.
11. Bogli, Alfred, 1971 - Corrosion by mixing of karst waters in Symposium on the origin and development of caves: Cave Research Group Great Britain. Trans., 13, no. 2. p. 109-114.
12. Bogges D.H., Missimer, T.M., and O'Donnell T.H., 1977 Saline water intrusion related to well construction in Lee County, Florida. Geological Survey, Tallahassee, Fla. Water Resources Div.
13. Boni, C.F., and Paratoo, M., 1969 - Carta idrogeologica dell'alto bacino del Liri. Geologica Romans, 8.

14. Barmkamp, R.A., and Powers, R.W., 1958. Classification of Arabian carbonate rocks: Geol. Soc. Am. Bull., 69, no. p. 1305-1318.
15. Brashnina, I.A. 1973 - On the possibility of studying submarine karst water discharge by the methods of electrical logging: Moscow, News of karstology and speleology, no. 3.
16. Bray, L.G. 1969 - Some notes on the chemical investigation of cave waters: Cave Research Group Great Britain Trans., 11, no. 3, p. 165-174.
17. Buachidza, I.M. and Melivoua, A.M., 1967 - On the problem of ground water discharge in the Black Sea in the region of Gagra: Georgian Politechn. Inst., Lab. of problems of hydrogeology and eng. geology. Treatise no. 3.
18. Burdon, D.J. 1973 - Glossary and multilingual equivalents of karst terms: Rome, FAO-UNESCO, 72 p.
19. Burdon, D.J., and Papakis, Nicolas, 1963 - Handbook of Karst Hydrogeology with special Reference to the Carbonate Aquifers of the Mediterranean Region, Athens, Greece, U.N. Spec. Fund, Karst Groundwater Inv. Inst. Geology and Subsurface Research, 276 p.
20. Cayeux, Lucien, 1935 - Roches carbonatées in Les roches sédimentaires de France: Paris, Masson, 463 p.
21. Chilingar, G.V., Bissel, H.J. and Fairbridge, R.W., 1967 - Carbonate rocks: New York, American Elsevier, 471 p.
22. Coker, A.E. Marshall R., and Thomson, N.S. 1969 - Application of computer processed multispectral data to the discrimination of land collapse (sink-hole) prone areas of Florida, in 6th Internat Symposium on Remote Sensing of Environment Proc. 1: Michigan Univ., Inst. Sci. and Technology, p. 65-77.
23. Commission Française des Phénomènes Karstiques du Comité national de Géographie, 1965 - Vocabulaire français de phénomènes karstiques: Orléans, Comité Nat. Géogr.
24. Corbel, J. and Muxart, R., 1970 - Karsts des zones tropicales humides (karst of tropical humid zones) (with English and German summaries): Zeitschr Geomorphologie, 14, no. 4.
25. Cvijic, J., 1893 - Das Karstphänomen: Geogr. Abhand, A. Penck, 5, no. 3, p. 215-319.
26. Cvijic, J., 1924 - The evolution of lapies, a study in karst physiography: Georg. Rev., no. 14, p. 26-49.
27. Dakhonov, V.N. 1953 - Electrical prospecting of oil and gas fields: M.L. Gostoptechizdat.
28. Davis W.N., 1931 - Origin of Limestone caverns: Geol. Soc. Ame. Bull., 41, no. 3, p. 475-628.

29. Dubliansky, V.N. and Lliukhin, V.V., 1972 - Tracing a water drop in the Crimes caves. Moscow, Izd. Mysl.
30. Enslin, J.F. 1967 - Dolomitic springs in the Transvaal, Republic of South Africa: Mémoires Inter. Assoc. Hydrogeol., Instambul p. 78.
31. Farchild Roy W. 1977, Availability of water in the Floridian aquifer in the southern Duval and northern clay and St. Johns Counties, Florida Geological Survey, Tallahassee, Fla. Water Resources Div. 61 p.
32. Folk, R.L., 1959 - Practical classification of limestones: Am. Assoc. Petr. Geol. Bull., 43, no. 1.p. 1-138.
33. Gams, Ivan, 1962 - Measurements of corrosion intensity in Slovenia and their geomorphological significance: Geogr. Vestnik Ljubjana, 34, p. 3-20.
34. Gams, Ivan, 1973 - Slovene karst terminoloy: (Yugoslavia) Zveza Geogr. Inst. 76 p.
35. Golovtsyn, V. N., Smolnikov, B.N. 1966 - The application of geoelectrical investigation for solving of the principal problems of the mountain Crimea, Kiev, 149 p.
36. Grabau, A.W., 1904 - On the classification of semidentary rocks: Am. Geologist, 33, p. 228-247.
37. Grabau, A.W., 1913 - Principles of stratigraphy: New York, A.G. Seiler, 1185 p.
38. Gvozdetsky, N.A., 1952 - The experience in karst regioning of the Greater Caucasus: Geograph, Col. papers, 1 Geografiz.
39. Gvozdetsky, N. A. 1954 - "Karst", Geografiz.
40. Ham, W.E., 1962 - Classification of carbonate rocks: Am. Assoc. Petr. Geol., Mem. 1, 279 p.
41. Herak, Milan, and Stringfield, V.T., eds., 1972 - Karst: important regions of the northern hemisphere: Amsterdam Elsevier, 551 p.
42. Huntoon Peter W. 1976 - Relationship of tectonic structure to aquifer mechanics in the western gran canyon: Wyoming Univ., Laramie. Water Resources Research Inst.
43. Ivanoy, B.N., 1974 - The influence of the faults upon karst development in various morphologie structures: Papers of kharkov Branch of the Ukrainian Geogr. Society, Issue 11, 1974.
44. Jennings, J.E., 1966 - Building on dolomites in the Transvaal: Civil Engineer in South Africa, 8, no. 2. p. 41-62.
45. Jennings, J.N. 1971 - Karst: Boston, Massachusetts Inst. Technology Press. 252 p.



46. Johnson, J. H., 1951 - An introduction to the study of organic limestone: Colorado School Mines Quart., 46, no. 2. 185 p.
47. Kalesnic, S.V., ed. 1968 - Encyclopaedian dictionary of geographical terms: Moscow, Izd. Soviet Encycl.
48. Kiraly, L., 1969 - Statistical analysis of fractured rocks (Orientation and density) Geol. Rundschau, B. 1. pp. 125-151.
49. Kiraly, L., 1973 - Notice explicative de la carte hydrogeologique du Canton de Neuchatel: Soc. Neuchateloise Sci. Nat. Bull., Sup., 96, 16 p.
50. Kolodyazhnaya, A.A. 1961 - Suntsov, M.A. Ogilvy A.A., Hmelevky, V.K., The origin of ground water of the Northern Urals bauxite deposits Lab. of hydrogeol. problems of F.P. Savarensky treatise. 31.
51. Kolodyazhnaya, A.A. 1970 - Agressiveness of natural waters in karst districts of the European part of the USSR: Moscow, Nauka.
52. Komatina, Miomir, 1965 - A contribution to the solution of the problems of the determination of the division lines of hydrogeologic water and the directions of the flow of subterranean waters in karst: Intern. Assoc. Hydrogeol. Cong., Hannover, 1966.
53. Kruber, A.A., 1915 - Karst regions of the mountain Crimea.
54. Laptev, F.T., 1939 -
55. Lattman, L.H. and Parizek, R.R., 1964 - Relationship between fracture traces and the occurrence of ground water in carbonate rocks: Jour Hydrology, v.2., p. 73-91.
56. Lefebre Vernon 1977 - Chemical dynamics of a confined limestones aquifer: New Mexico State Univ. University Park, Water Resources Div. 263 p.
57. Lehman, O., 1932 - Die Hydrographie des Karstes: Leipzig, Enzykl, die Erdkunde, 15, 212 S.
58. L'vova, E.V. and Popov, V.F. 1971 - The reflection of the deep structure of the western Crimea in its relief.
59. Lykoshin, A.G., 1968 - Karst and hydrotechnical construction: Moscow, Strojizdat, 283 p.
60. Makkaveev, A.A., 1971 - Dictionary on hydrogeology and engineering geology: Moscow, Nedra.
61. Maksimovich, G.A., 1962 - Hydrodynamic zones of karst waters and principal types of subsurface flow: Akad, Nauk SSSR, Spets Voprosy Karstovedeniya , p. 18-31.
62. Maksimovich, G.A., 1962 a - Karst expansion and regioning in the USSR: Perm, Coll, papers Hydrogeology and karstology, issue 1.

63. Maksimovich, G.A., 1963 - The principles of karstology, 1: Perm.
64. Maksimovich, G.A., 1969 - The principles of karstology. 2: Perm, 529 p.
65. Maruashvili, L.I., 1974 - Classification of speleological cycles of the middle and lowest range.
66. Mijatovic. B., 1971 - Hydrogeoloska kartasireg podrucja herceg novi-morinj ski zaliv: Beograd, Zavod za Geoloska, Geofiz Izv.
67. Milanovic, P., 1972 - The methods of exploration of karst underground water flows in Popovd Polje, Yugoslavia 24th. International. Geol. Cong. Montreal Canada. Sect. Hydrogeology, Proc.p. 80-88.
68. Miotke, Franz - Dieter, 1973 - The subsidence of the surface between Mogotes in Puerto Rico east of Arecibo: Caves and karst, 15, no. 1., p. 1-2.
69. Molitvin, P.V., 1962 - The methods of hydrogeological investigations in karst regions of the northern and southern Urals and the Onego-North Dvina Basin divide, in special problems of karstology: Akad, Nauk SSSR Izv Ser. Geol.
70. Monroe, W.H., 1970 - A glossary of karst terminology: US Geol. Survey Water-Supply Paper 1899-K. 26 p.
71. Newton, J.G., Copeland, C.W. and Scarbrough W.L. 1973- Sinkhole problems along proposed route of interstate Highway 459 near Greenwood, Alabama: Alabama Geol. Survey Cir. 83, 63 p.
72. Ogilvy, A.A., 1948 - Karst and its role for coal development of the Podmoscovie coal basin and the ways of its studies: Conf. on Karst, Perm. 1948, Trans., issue 4. p.
73. Ogilvy, A.A., 1951 - The geoelectrical methods of karst study: Moscow, MGU, 161 p.
74. Parizek, R.A., and White, W.B. 1971 - Hydrogeology and geochemistry of folded and faulted rocks of the central Appalachian type and related land-use problems: Penn. State Univ. Coll. Earth and Mineral Sci, Expt. Sta. Circ. 82, 181 p.
75. Patterson, K., 1971- Some considerations concerning percolation waters in the chalk of north Berkshire: Cave Research Group Great Britain Trans., 13 no 4, p. 277-282.
76. Pitty, A.F., 1966- An approach to the study of karst water: Hull Univ. Occasional Paper, Geogr., no. 5.
77. Plotnikov, I.I., and Milovidov, E.D., 1961 - The genesis of the bauxite deposits of the northern Urals: Soviet Geology, no. 7.
78. Rodionov, N.V. 1949.
79. Rodionov, N.V. 1963 - Karst of the European part of the USSR, the Urals and the Caucasus: Moscow, p. 163-174.

80. Rodionov, N.V. 1963 a - Some data of the karst development speed: Akad.
81. Radionov. N.V., and Dicaikov, A.B., 1969 - Karst of the European part of the USSR and Kazakhstan adn the methods of mapping.
82. Roglic, J., 1965.- The depth of fissure circulation of water and the evolution of subterranean cavities in the Dinaric karst: Internat, Speleol Conf. Brno 1964, Problems in speleol, research, p. 25-35.
83. Sander, 1936 - Contributions to the study of depositional fabrics - rhythmically deposited Triassic limestones and dolomites: Tulsa, Oklahoma, Am. Assoc. Petr. Geol. 207 p.
84. Sokolov, A.A., ed. 1969 - Methodical recommendations for studying the regime of surface and ground waters in karst: Leningrad, Hydro meteorologicheskoe Izdateisvo, 150 p.
85. Sokolov, D.S., 1962 - Basic conditions for karst development: Moscow, Gos geolizdat, 322 p.
86. Sonderegger, J.L. 1970 - Photogeologic investigations, pt. C of Hydrology of limestone terranes: Alabama Geol. Survey Bull, 04-C, 27 p.
87. Strakhov, N.M., 1956.
88. Stringfield, V.T., 1966 - Artesian water in Terliary limestone in the south eastern states: US. Geol. Survey Prol. Paper 517, 226 p.
89. Stringfield, V.T. and LeGrand H.E., 1966- Hydrology of limestone terranes in the coastal plain of the southeastern United States: Geol. Soc. Am. Spec. Paper 93, 46 p.
90. Stringfield, V.T., 1969 - Hydrology of carbonate rock terranes, a review with special reference to the United States (Part I) Jour. Hydrology, 8, no 3, p. 349-373.
91. Stringfield, V.T. 1969 - Relation of sea water to fresh water in carbonate rocks in coastal areas with special reference to Florida, U.S.A. and Cephalonia (Kephallinia) Greece: Jour Hydrology 9, no. 4 p. 387-404.
92. Stringfield, V.T., 1971 - Effects of karst features on circulation of water in carbonate rocks in coastal areas: Jour Hydrology 14, no. 2.p, 139-171.
93. Stringfield, V.T., LaMoreaux, P.E., and LeGrand H.E., 1974 - Karst and paleo-hydrology of carbonate rock terranes in semi-arid regions with a comparison to humid karst of Alabama: Alabama Geol. Survey Bull, 105-106p.
94. Sweeting, M.M., 1973 - Karst landforms: New York, Columbia Univ Press, 362 p.
95. / Swinnerton, A.C. 1942 - Hydrology of limestone terranes, in Meinzer, O.E. Hydrology 9: New York, McGraw-Hill, p. 656-677.
96. Theis, C.V. 1936 - Ground water in south central Tennessee: US. Geol. Survey Water Supply Paper 677, 182 p.

97. Thrailkill, John, 1971 - Carbonate deposition in Carlsbad Caverns: Jour Geology, 79, no. 6 p. 683-695.
98. Trainer, F.W. and Ellison, R.L., 1967 - Fracture traces in the Shenandoah Valley, Virginia; Photogramm Eng. 33, no. 2 p. 190-199.
99. Teodorovich, G.I., 1950.
100. Tripet, J.P., 1971.
101. Vladimirov, L.A., 1970 - Water balance of the Greater Caucasus. Tbilisi, Izd. Metsniereba.
102. Warren, W.M. and Wielchowsky, C.C., 1973 - Aerial remote sensing of carbonate terranes in Shelby County. Alabama: Ground Water, 11, no. 6. p. 14-26.
103. Weller, Stuart 1927 - Geology of the Cave-in Rock quadrangle: Kentucky Geol. Survey, ser. 6, 26 p. 1-128.
104. Williams, P.W., 1963 - An initial estimate of the speed of limestone solution in County Clare: Irish Geogr. 4, no. 6 p. 432-444.
105. Williams, P.W., 1970 - Limestone morphology in Ireland, in Stephens, N., and Glassrock, R.E., eds. Irish geographical studies: Belfast, Queen's Univ., p. 105-124.
106. Wray, D.A. 1922 - The Karstiands of western Yugoslavia: Geology
107. Yeujevich. V. 1976 - Vol I y II - Karst Hydrology and Water Resources editado por V. Yeujevich WEP.
108. Zaitsev, I.K., 1940 - The problems of karst study in the USSR. 90 p.
109. Zötl, J., 1961 - Die Hydrographie des nordostalpinen Karstes: Steierische Betr Hydrogeol.: 2, p. 54-183.
110. Land L.F. 1977 - Groundwater resources of Rivera Beach Area. Palm Beach Country, Florida: Geological Survey, Water Resources, Div.
111. Payne, B.R. y García E. - Reporte del Estudio en base a isótopos ambientales, sección de hidrología isotópica OIEA, México, 1974.
112. Grusti, E.V., Bennet, G.D. - Water Resources of the north coast limestone area Puerto Rico: Geological Survey, Fort Bachanam, Puerto Rico 1976; 49 p.
113. Gross G.W.; Hoy R.N.; Duffy Ch. J. - Application of enviromental tritium in the measurement of recharge and aquifer parameters in a semi-arid limestone terrain. Water Resources Research Inst. New Mexico.

114. Knisel G. Walter - 1972 - Response of karst aquifers to recharge: Hydrology papers Colorado State University, Fort Collins, Co.
115. Secretaría de Recursos Hidráulicos.- Plan Nacional Hidráulico - Inventario de aguas subterráneas en la península de Yucatán, 1975.
116. CIEPS Ingenieros Consultores y Proyectistas, Estudio geohidrológico de acuíferos regionales en calizas, zona Monterrey, N.L., México, 1968.
117. Lesser Illades, Juan Manuel, Estudio hidrológico e hidrogeoquímico de la Península de Yucatán, SARH, 1976.
118. Wray - 1922.