



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

28
106

**DETERMINACION DE LAS CONDICIONES GEOHIDROLOGICAS
EN EL VALLE DEL RIO PRESIDIO EN EL ESTADO
DE SINALOA**

Tesis Profesional

**Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL**

p r e s e n t a

JOSE MANUEL JUAREZ NUÑEZ

México, D. F.

1983



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.

INDICE

	PAG.
I INTRODUCCION.	1
1.1 Objetivo.	2
1.2 Localización.	3
1.3 Aspectos Socioeconómicos de la Región.	5
II HIDROLOGIA SUPERFICIAL.	10
2.1 Evaporación Potencial y Temperatura.	21
2.1.1 Evaporación Potencial.	22
2.1.2 Temperatura.	22
2.2 Precipitación.	30
2.3 Esgurrimiento Superficial.	35
2.3.1 Hidrografia.	36
2.3.2 Análisis de los Esgurrimientos.	38
2.3.3 Volúmenes de Agua Subterráneas Drenados por la Corriente Superficial.	43
2.3.4 Capacidad de Almacenamiento en las Márgenes del Río.	43
III GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA.	48
3.1 Geología Regional.	50
3.2 Fisiografía.	51
3.3 Geomorfología.	52
3.4 Estratigrafía.	54
3.4.1 Paleozoico.	54
3.4.2 Mesozoico.	54
3.4.3 Cenozoico.	55
3.5 Tectónica.	60
3.6 Geología Histórica.	61
3.7 Hidrogeología de la Zona.	69

IV	HIDROGEOQUIMICA.	73
4.1	Recolección y Análisis de Muestras de Agua.	84
4.2	Interpretación de Resultados de los Análisis.	88
V	HIDROLOGIA SUBTERRANEA.	93
5.1	Inventario de Captaciones de Agua Subterránea.	119
5.2	Piezometría.	120
5.2.1	Profundidad del Nivel Estático.	120
5.2.2	Elevación del Nivel Estático.	124
5.2.3	Evolución del Nivel Estático.	125
5.3	Hidrometría de las Extracciones de Agua Subterránea.	125
5.4	Pruebas de Bombeo.	126
5.5	Balance de Aguas Subterráneas.	129
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	139
	Referencias Bibliográficas.	144

I INTRODUCCION.

El desarrollo socioeconómico de una región, o de un país, está en gran parte fundamentado en la riqueza de los recursos naturales que posee. Para lograr que tal desarrollo sea sólido y armónico, es indispensable adecuar, en función de necesidades bien definidas, una correcta planeación del aprovechamiento de los recursos naturales existentes, - para lo cual se requiere tener conocimiento de éstos.

El agua, como recurso natural, juega un papel de gran trascendencia al constituir el elemento satisfactor de las necesidades primarias del hombre, siendo a la vez un condicionante fundamental del desarrollo de sus actividades económicas.

Del propósito de planificar adecuadamente el uso y aprovechamiento de este recurso, surge la necesidad elemental de conocer no sólo su cuantía, sino también su distribución.

El agua continental, en cuanto a su forma de ocurrencia, se ha clasificado comúnmente en superficial y subterránea, siendo su cuantía a nivel nacional como se indica en el siguiente cuadro:

Escorrentamiento Superficial en la República Mexicana*:

Vertiente:	Escorrentamiento Anual Promedio. (10^6 m^3)	Pje.
Océano Atlántico.	250,927	60.9 %
Océano Pacífico.	157,148	38.1 %
Interior.	3,944	1.0 %
TOTAL	412,019	100.0 %

Existencia de Agua Subterránea en la República Mexicana*:

Volumen No Renovable (Almac. 0-100m de Prof.).	$110,350 \times 10^6 \text{ m}^3$.
Volumen Renovable (Recarga Media Anual).	$31,000 \times 10^6 \text{ m}^3$.

* Plan Nacional Hidráulico 1981, SARH, CPNH, 1981.

Sin embargo, la distribución geográfica del recurso no es, en general, acorde con la distribución de los centros o áreas de demanda, dando lugar a que mientras en algunas regiones las fuentes de agua son lo suficientemente bastas y abundantes, en otras son insuficientes y escasas para satisfacer las demandas impuestas por las condiciones locales de desarrollo. Tal insuficiencia o escasez suele ser causa frecuente de irracionalidad en la explotación de las aguas tanto de naturaleza superficial como subterránea.

La explotación irracional de corrientes superficiales puede afectar la recarga que de ellas reciben los acuíferos adyacentes, así como disminuir la disponibilidad de agua en sitios subsecuentes; por otra parte, cuando se trate de almacenamientos como los de lagos y lagunas, puede producirse su agotamiento, lo que suele venir aparejado al deterioro progresivo de la calidad del agua. Análogamente, la sobreexplotación sostenida de un acuífero puede provocar el agotamiento irreversible de su almacenaje, el abatimiento gradual del nivel del agua y la intrusión de agua marina en el caso de acuíferos costeros, además de la pérdida de aportación hacia ríos, lagos, manantiales o acuíferos adyacentes.

Por lo tanto, la prevención o control de los problemas hidrológicos señalados debe necesariamente fundamentarse en el manejo racional y adecuado del recurso, para lo cual se requiere del conocimiento pleno de su cantidad, calidad y distribución.

1.1 Objetivo.

Una de las atribuciones de la Geohidrología, en su carácter general, es la de aportar los conocimientos técnicos necesarios para la cuantificación de las aguas subterráneas.

El presente trabajo pretende mostrar en forma práctica el proceso de aplicación de los conceptos de la Geohidrología moderna y de cien--

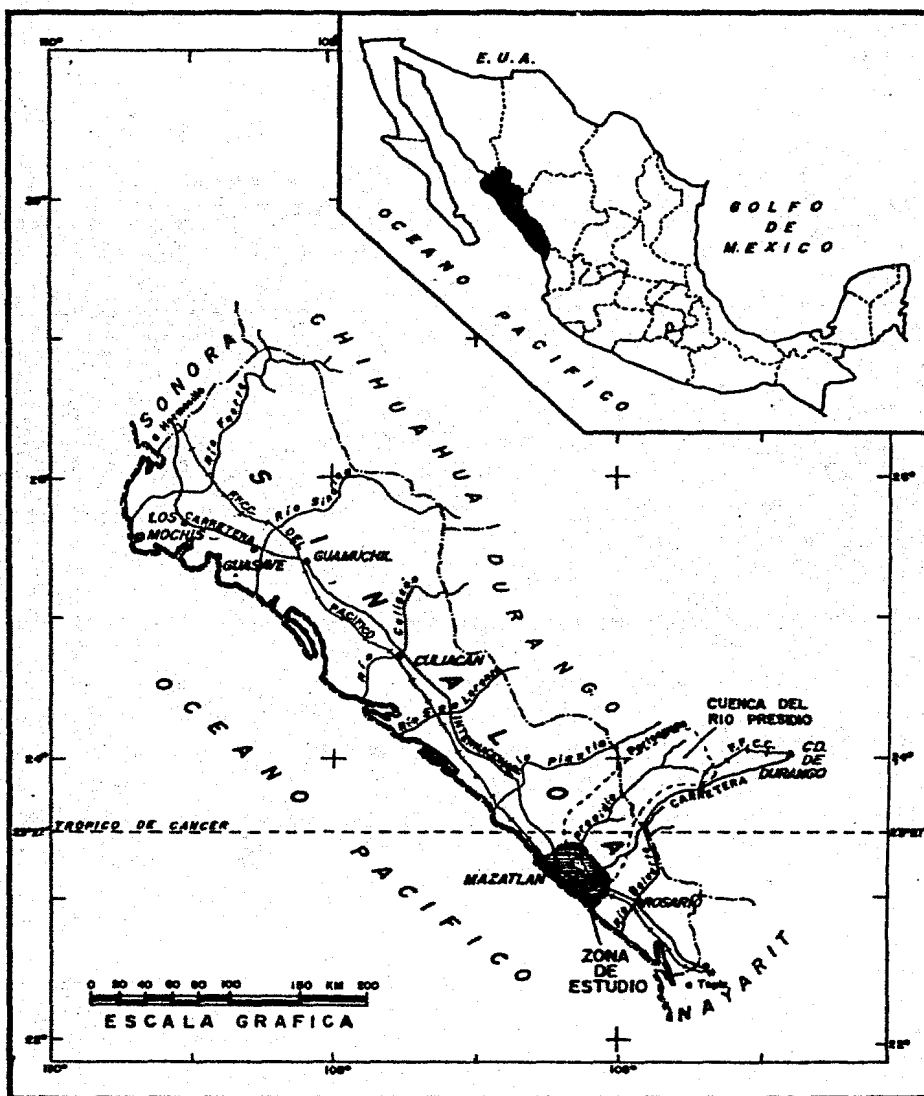
cias afines para la determinación del funcionamiento, operación y potencialidad de un acuífero, así como señalar volúmenes y zonas factibles de explotación.

El elemento que se seleccionó para efectos de aplicación lo constituye el acuífero costero del Valle del Río Presidio (Edo. de Sinaloa), justificándose su elección por el hecho de que se carece de estudios antecedentes al respecto sobre esta zona, se cuenta con abundantes datos de campo de reciente obtención y porque las condiciones de gran demanda de agua, como lo son el abastecimiento del Puerto de Mazatlán y el desarrollo agrícola del Valle del Río Presidio, exigen una cuantiosa extracción de agua subterránea, determinando así una fuerte tendencia a la sobreexplotación del acuífero. Esto representa en sí un problema geohidrológico de interés, más aún si se considera que las condiciones climáticas prevaletientes en esta región no son muy favorables, al ocurrir precipitaciones anuales de baja e irregular magnitud que han llegado a inducir sequías de varios años de duración, aunadas a altas temperaturas que se presentan durante la época cálida del año.

1.2 Localización.

La zona de estudio comprende básicamente la cuenca baja del Río - Presidio, entendiéndose por ésta a la porción de cuenca contenida entre las estribaciones exteriores de la Sierra Madre Occidental y el Océano Pacífico. Geográficamente, se encuentra situada en la parte sur del Estado de Sinaloa y hacia el sector oriente del Puerto de Mazatlán, pudiendo encuadrarse en base a referencias fisiográficas por el Océano - Pacífico al poniente, la Sierra Madre Occidental al oriente, las cuencas de los ríos Quelite y Piaxtla al norte y la del río Saluarte al sur; o bien, en función de coordenadas, por los meridianos $106^{\circ}05'$ y $106^{\circ}25'$ de Longitud W G. y por los paralelos $23^{\circ}00'$ y $23^{\circ}25'$ de Latitud N. Comprende una superficie aproximada de 1000 km^2 y está integrada por parte de los municipios de Mazatlán, Concordia y Rosario. En el plano 1.2 se muestra su localización.

Plano 1.2 LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO



1.3 Aspectos Socioeconómicos de la Región.

Atendiendo a sus características geográficas, el Estado de Sinaloa se puede dividir en: Zona norte, centro y sur, siendo esta última en la que se ubica íntegramente el área objeto del presente trabajo.

El agrupamiento de la población en la zona sur resultó de 328,973 habitantes para 1975, siendo el más bajo en el Estado, ya que sólo representa el 21 % respecto al total, que fué de 1'578,900 haba.

Se estima que la población de la zona sur para 1980 resultará de 385,500 haba*, que comparada con la censada en 1975 (328,973 haba) refleja una tasa de crecimiento de 3.22 %, que es menor a la general en el Estado.

Aun cuando no se obtuvo información específica para la zona de estudio en lo que se refiere a otros indicadores de tipo socioeconómico, se pueden tomar en cuenta los de carácter estatal, ya que para su determinación se incluyeron los datos recopilados en las tres zonas geográficas ya mencionadas. Desde este punto de vista, se puede anotar que la información proveniente del IX Censo General de Población y Vivienda y de la encuesta titulada "Ocupación, Ingresos y Gasto Familiar, Sinaloa 1972", muestra que el comportamiento del empleo y subempleo ha sido como a continuación se describe: La proporción que la población económicamente activa representa respecto a los habitantes entre 12 y 65 años de edad, disminuyó del 48 al 46 % en el periodo de 1970 a 1975, estimándose que tal porcentaje será del 44 % hacia 1980*. De la población económicamente activa, el 78 % tuvo trabajo durante 10 o 12 meses en 1969, pero sólo el 58 % en 1975, lo cual se justifica, ya que la proporción de la población económicamente activa que trabajó a lo sumo 6 meses se incrementó del 20 % en 1969 al 30 % en 1975.

En base a los indicadores anteriores se infiere que la tasa de crecimiento demográfico seguirá siendo elevada y que la polarización

* A la fecha no se dispone de los resultados del X Censo General de Población y Vivienda, 1980.

demográfica (Polos de concentración y dispersión poblacional) continúa rá agravando las ya difíciles situaciones de educación, ocupación, al imentos, vivienda y salud pública en la entidad.

A nivel preescolar, durante el periodo 1970-1975, el municipio de Mazatlán contaba con seis planteles de control estatal, representando el 19.6 % del total en el Estado, además de otros seis planteles de -- control federal; asimismo, se contaba con uno en el municipio de Rosario. El número de planteles mencionados, que corresponden a la zona - sur, resultan insuficientes para preparar a los infantes para su ingreso al ciclo primario.

El servicio de educación primaria en el Estado ha experimentado - una expansión media anual del 4.1 % en la demanda real satisfecha dentro del periodo 1970-1975, entendiéndose por ésta a la población en edad escolar que efectivamente recibió este tipo de enseñanza. El municipio de Mazatlán es uno de los que más concentra planteles de este tipo, ya que junto con Ahome, Guasave, Culiacán y Sinaloa de Leyva tenía 986, representando el 63.3 % de los existentes en el ciclo 1974-1975 - en todo el Estado.

En lo que respecta a enseñanza de nivel medio, se sabe que exis--ten varias escuelas, además de las secundarias tradicionales, que ofrecen otro tipo de enseñanza, como son las secundarias técnicas, acade--mias comerciales, escuelas de idiomas y secundarias tecnológicas agro-pecuarias. En este aspecto, la demanda real satisfecha durante el período 1970-1975 tuvo un incremento del 6.3 % anual.

La educación a nivel de preparatoria se imparte mediante seis es-cuelas en Mazatlán, una en Rosario y una en Escuinapa, perteneciendo - tres de ellas a la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), estando las restantes incorporadas a la misma. A nivel profesional medio, en Mazatlán se cuenta con una escuela de enfermería dependiente de la UAS, así como con una escuela normal dependiente de la Escuela Normal de Sinaloa.

Los estudios a nivel superior se imparten a través de la Universidad Autónoma de Sinaloa y el Instituto Tecnológico Regional de Culiacán, ambos con sede en la Capital del Estado, teniéndose también la Escuela Naval Náutica en Mazatlán.

La salud pública en el Estado está representada por instituciones como la Secretaría de Salubridad y Asistencia, el Instituto Mexicano del Seguro Social, el Instituto de Seguridad Social al Servicio de los Trabajadores del Estado y la Secretaría de la Defensa Nacional, además de hospitales y clínicas privadas, las cuales en conjunto disponen de una cama-hospital por cada 709 habitantes y un médico por cada 2,720 personas.

En lo relativo a vías de comunicación, la región se encuentra ampliamente conectada por todos los servicios que hay para tal fin; de esta manera, las principales vías de comunicación terrestre son la Carretera Internacional, que atravieze toda la región, el ferrocarril del Pacífico y la Carretera Mazatlán-Durango. Para la comunicación interna entre poblados, existen numerosos caminos pavimentados y revestidos, terracerías y brechas a través de los cuales se sacan los insumos generados en cada uno de los municipios.

En lo que respecta a comunicación aérea, se tienen los aeropuertos de Mazatlán y Culiacán, mediante los cuales se cubren vuelos regulares con varias de las poblaciones más importantes del país y del extranjero. Se dispone también de un gran número de pistas de corto alcance distribuidas en la región, las cuales son empleadas principalmente cuando algunas vías terrestres se tornan intransitables durante la época de lluvias.

La zona cuenta también con un puerto de altura localizado en Mazatlán, cuya posición geográfica lo sitúa favorablemente con respecto a las rutas marítimas que conducen a Oriente y a la costa occidental de los Estados Unidos. Sus principales instalaciones son bodegas fiscales y del ferrocarril, ambas con vías de acceso, así como un muelle fiscal.

Además de las vías de comunicación mencionadas, se cuenta con una amplia red de correos, telégrafos, teléfonos, radio, televisión, telex y microondas integradas al sistema nacional de comunicaciones.

La economía sinaloense tradicionalmente ha sido de carácter primario con un alto nivel de ocupación, un sector industrial orientado hacia la transformación de productos agropecuarios y un sector terciario con una alta participación en el producto interno bruto estatal. Las principales actividades económicas en la región son agricultura, ganadería, pesca, comercio, minería e industria.

Dentro de la actividad agrícola se tienen los cultivos de sorgo - escoba, maíz, chile, frijol, cártamo, ajonjolí y algodón como principales y, en menor cantidad, frutales como mango, aguacate, naranjo, guayabo, tamarindo, ciruelo, limonero, cocotero, plátano, habiéndose intensificado últimamente el cultivo del papayo.

En la ganadería se manejan los siguientes tipos de ganado: bovino, porcino, asnal, caballar, caprino, mular y ovino. Esta actividad no ha mostrado un gran desarrollo durante los últimos años, debido principalmente a una serie de problemas tales como falta de pastizales de buena calidad, plagas, abigeato y escasez de agua.

La actividad pesquera se caracteriza por concretarse principalmente a la captura del camarón, pero aun así reviste gran importancia, en especial en los municipios de Mazatlán y Rosario, ya que constituye una fuente importante de trabajo. Otras especies explotadas son la lisa y la corvina, además del pescado fresco en general.

El Estado de Sinaloa es importante desde el punto de vista geológico, puesto que las rocas terciarias y cuaternarias que en él existen, contienen yacimientos de oro, plata, cobre, plomo, fierro y zinc, teniendo como principales plantas de beneficio las de San Ignacio, Pánuco, Concordia y Rosario; sin embargo, la minería en general ha ido decayendo, por lo que se pretende darle un fuerte impulso fundamentado

en un estudio geológico muy serio llevado a cabo por el Instituto de Geología de la UNAM durante 1977, cuyo objetivo primordial fué detectar los sitios de potencial minero elevado con miras a su explotación. Entre los factores que están impidiendo el desarrollo de esta actividad se encuentran la falta de caminos, las malas condiciones de los -- existentes, la deficiente organización y la falta de recursos económicos.

De lo expuesto con anterioridad, resulta imprescindible identificar con precisión la tendencia socioeconómica por zonas, a fin de que se puedan adoptar políticas adecuadas de gobierno basadas en la planeación económica y social, considerándose los cambios en la población y adelantándose a las necesidades y satisfactores que habrán de requerir se al producirse estas modificaciones, tomando en cuenta, además, la - relación que guarden dentro del ámbito nacional.

II HIDROLOGIA SUPERFICIAL .

La Hidrología Superficial constituye una de las grandes ramas de la Hidrología General, que se define como la ciencia que trata de la o currencia, circulación y distribución del agua en La Tierra, de sus propiedades físicas y químicas y de su relación con el medio ambiente. De aquí que la ciencia hidrológica gire en torno al concepto fundamental conocido con el nombre de Ciclo Hidrológico.

El Ciclo Hidrológico.

Se aplica el término de Ciclo Hidrológico, o Ciclo del Agua, al proceso natural cerrado que sigue el agua en La Tierra: aunque rigurosamente se trata de un proceso cíclico, se dice que parte de la evaporación del agua en cualquier elemento que la contenga libremente y que se encuentre en contacto con la atmósfera (mares, lagos, presas, ríos, suelos e, incluso, lluvia y vegetación); una vez incorporada al seno de la atmósfera, se condensa y se precipita sobre la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo, rocío, etc.; así, el agua que ha caído sobre la superficie de la litósfera puede parcialmente escurrir, originando arroyamientos, infiltrarse, dando lugar a recarga de acuíferos, o bien, quedar retenida en los estratos superficiales del suelo, sirviendo de sustento a la cubierta vegetal; finalmente, el ciclo se cierra mediante la tendencia del agua a retornar a la atmósfera o a los océanos.

En el Ciclo Hidrológico pueden distinguirse claramente cuatro fases: Evaporación, Precipitación, Escurrimiento e Infiltración, las que por lo general suelen representarse por las letras E, P, S e I, respectivamente. De la aplicación del Principio de Continuidad al Ciclo Hidrológico, resulta lo que se conoce con el nombre de Ecuación Fundamental de la Hidrología, cuya representación matemática es:

$$P = E + S + I$$

(2.1)

Sin embargo, la simplicidad de la expresión anterior no es sino a parente; la evaluación de sus términos implica una serie de procedi--- mientos analíticos frecuentemente complejos y sujetos a condicionantes o factores limitativos. Enseguida se incluye una descripción sintética sobre cada una de las fases enunciadas, profundizando en aquellos as-- pectos considerados relativamente importantes por su aplicación poste-- rior:

- Evaporación.

Aunque el ciclo hidrológico es un proceso de carácter continuo y permanente, para efectos descriptivos se pueda considerar que comienza por la fase llamada Evaporación.

La evaporación es un fenómeno físico que tiene su origen en cual-- quier superficie líquida o húmeda que se encuentra en contacto con ai-- re no saturado. En la naturaleza, la conversión molecular de agua en - vapor se realiza mediante procesos no adiabáticos en los que la enera-- gía juega un papel fundamental, manteniendo al ciclo en estado dinámi-- co.

La cantidad de energía solar que recibe La Tierra es en promedio un poco mayor de 700 cal/cm²día en las zonas desérticas y menor de 100 cal/cm²día en las regiones polares; pero, sólo un porcentaje de tal e-- nergía está disponible para los procesos de evaporación, dependiendo - de la naturaleza de la superficie donde ésta se efectúe; comparativa-- mente, es de interés mencionar que el calor de vaporización del agua - en su punto de ebullición es de 540 cal/gr bajo condiciones normales - de presión (1.0 atm).

Naturalmente que el fenómeno de Evaporación se verifica de un mo-- do más prominente en la superficie de los océanos, pero existe una for ma muy peculiar de evaporación llamada Transpiración, la cual reviste

un carácter muy significativo. La Transpiración es el proceso mediante el cual los seres vivos, en especial los vegetales, ceden agua a la atmósfera como resultado de sus funciones biológicas.

La combinación de la Evaporación y la Transpiración, conocida como Evapotranspiración, aporta la mayor parte del agua que se precipita en La Tierra.

Respecto a la evaporación del agua subterránea, se ha observado - que a partir de ella no se establece una transferencia directa hacia - la atmósfera, a menos que el nivel freático se encuentre a pocos decímetros de la superficie del suelo, incluso hasta una profundidad de - dos o tres metros, dependiendo de la naturaleza del suelo; sino que el consumo de agua por parte de las plantas (freatofitas) constituye un - medio de descarga del agua subterránea mucho más importante que su volumen de evaporación directa.

El establecimiento de una correlación matemática exacta entre la energía solar y la evapotranspiración, ya que, por principio, éstas se encuentran íntimamente relacionadas, se ve dificultada por una serie - de factores accidentales, como son la turbulencia y humedad del aire, por lo que la evaluación de los volúmenes de agua involucrados en el - proceso evapotranspirativo se efectúa mediante métodos directos e instrumentos de medición que incluyen los evaporímetros, anemómetros y - psicrómetros. Sin embargo, una discusión detallada sobre los diversos procedimientos de cálculo de la evapotranspiración (3) se considera - más allá del alcance de este trabajo.

- Precipitación.

La precipitación es la fase del ciclo hidrológico que se refiere a la meteorización o caída gravitacional del vapor de agua condensado en la atmósfera. Esta caída puede realizarse en forma líquida, como - lluvia, o bien, en forma sólida, como nieve o granizo.

La precipitación es, pues, un fenómeno contrapuesto y a la vez - consecuente al de la evapotranspiración. Su función primordial consiste en distribuir el agua sobre los continentes, originando la existencia de corrientes superficiales, al escurrir; la recarga de acuíferos, al infiltrarse; o bien, el desarrollo de la cubierta vegetal, al ser retenida por la capa superficial del suelo.

Este fenómeno principia con la saturación del vapor de agua contenido en la atmósfera, siendo preciso que se den condiciones atmosféricas favorables, específicamente que se produzcan cambios de presión y temperatura asociados a desplazamientos de masas de aire, por lo que - presión, viento y temperatura son elementos condicionantes de la precipitación.

El vapor de agua, al condensarse en la atmósfera, se va adhiriendo paulatinamente en cantidades pequeñas en torno a partículas diminutas en suspensión, denominadas núcleos de condensación, que generalmente consisten en materia orgánica (polen), cenizas volcánicas y finísimos granos de diversos minerales (arcillas). Los núcleos de condensación adheridos de agua se precipitan cuando alcanzan un peso tal que - vence su capacidad de suspensión en el aire (Ley de Stokes).

Ahora bien, las nubes no son sino auténticas suspensiones coloidales de partículas de agua condensada, cuya estabilidad depende de factores tales como el tamaño de las partículas suspendidas, la naturaleza de los núcleos de condensación, la temperatura y presión del aire y la turbulencia en el interior de la nube.

Los fenómenos meteorológicos que provocan la precipitación son - fundamentalmente tres: 1) la ocurrencia de frentes de masas de aire caliente y húmedo que se desplazan sobre masas de aire frío, encontrándose tal desplazamiento generalmente asociado a movimientos ciclónicos; 2) la convección de aire caliente y húmedo que asciende hacia masas de aire más frío durante la estación cálida del año; este fenómeno conveectivo puede ocurrir directamente, o bien, ser favorecido por corrientes

de aire que actúan en combinación con elementos orográficos; 3) el enfriamiento adiabático de masas de aire caliente y húmedo que se desplazan sobre elevadas barreras montañosas, caracterizándose este fenómeno por ser de influencia eminentemente orográfica.

La precipitación, cuando se presenta en forma de lluvia, nieve o granizo, se mide mediante aparatos que de acuerdo a su tipo de registro se denominan pluviómetros o pluviógrafos; estos últimos se distinguen de los primeros en que a partir de ellos es posible determinar la rapidez de precipitación o precipitación instantánea.

Dimensionalmente, la precipitación es una función de espacio y tiempo cuya medición se hace por medio del concepto denominado Altura de Precipitación (h_p), el cual se define como el volumen de agua que cae sobre una sección o elemento de área (sección del pluviómetro), referido a un cierto periodo de tiempo.

Para evaluar la cantidad de agua llovida sobre una cuenca o zona determinada durante un cierto intervalo de tiempo, es preciso contar con un conjunto de puntos de apoyo, es decir, una serie de registros aportados por estaciones pluviométricas que más o menos se encuentren equilibradamente distribuidas en el área de evaluación. Partiendo de esta base, se pueden aplicar varios procedimientos evaluativos, cada cual con un cierto grado de precisión: 1) Método de la Media Aritmética.- Permite la evaluación de la lluvia en forma sumamente rápida, pero generalmente poco aproximada, ya que puede conceder mucho peso a valores extremos. 2) Método de los Polígonos de Thiessen.- Se basa en el concepto estadístico de la media pesada; es teóricamente más preciso en comparación con el anterior, pero su aplicación requiere de mayor elaboración. 3) Método de las Isoyetas.- Este método se basa en una representación configurativa que se ajusta con mucha aproximación al fenómeno real, por lo que la evaluación a través de él resulta muy precisa; sin embargo, se requiere, además de una elaboración mayor, de la aplicación de un criterio razonable en cuanto al trazo de curvas, caracterizándose por ello sobre los métodos antes mencionados.

- Escurrimiento.

El Escurrimiento es la fase del ciclo hidrológico que se refiere al agua que es drenada por los sistemas de avenamiento.

El agua, al precipitarse y entrar en contacto con el suelo, inicial y parcialmente es interceptada por la cubierta vegetal existente, a la vez que va saturando las capas superficiales del mismo, continuando progresivamente el proceso de infiltración; posteriormente, cuando la precipitación es de tal persistencia o intensidad, escurre a través del suelo, alcanzando la red de drenaje; una vez ahí, el agua puede correr indefinidamente hasta llegar al mar, infiltrarse o evaporarse, aunque buena parte del agua de escurrimiento es producto de previa infiltración. Esto define la existencia de dos tipos básicos de aportación a toda corriente superficial: Escurrimiento Directo y Escurrimiento Base; el primero de ellos tiene su origen inmediato en la precipitación y el último, en la infiltración.

Entre los factores de los que depende directamente el escurrimiento superficial se pueden contar la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia, el tipo de vegetación existente, la permeabilidad y naturaleza del suelo, la extensión y geometría de la cuenca y la profundidad del nivel freático.

El escurrimiento se mide mediante el concepto llamado Caudal, que se define como el volumen de agua que atraviesa la sección transversal de un punto sobre la corriente en la unidad de tiempo, siendo el metro cúbico por segundo la unidad común de medida en el sistema métrico.

La medición del caudal se hace mediante instrumentos y técnicas de aforo; entre éstas, destacan por su aplicatividad los métodos Sección-Velocidad y Sección-Pendiente (4).

El comportamiento del caudal de una corriente puede apreciarse mediante la curva denominada Hidrograma, que es una función de caudal vs

tiempo. El hidrograma constituye un concepto sumamente útil en hidrología, ya que, mediante su análisis, es posible determinar los dos tipos fundamentales de aportación a que se ha hecho referencia en líneas anteriores.

Para efectos de aplicación, será necesario profundizar sobre los aspectos teóricos del análisis de hidrogramas, pero, en virtud de su carácter específico, se tratará en un apartado posterior.

- Infiltración.

La Infiltración es la fase del ciclo hidrológico que se refiere a la percolación del agua de lluvia a través del suelo, pudiendo alcanzar el nivel freático, por lo que de ello se desprende su importancia en relación al estudio de las aguas subterráneas.

La infiltración es, en sí, el proceso natural al que se debe la recarga de los acuíferos; ésta puede tener origen directo en el agua de precipitación, o bien, en el agua que escurre por corrientes o en la que está contenida en lagos, presas, etc.

Para que la infiltración se convierta en recarga, es condición necesaria que los estratos superiores del suelo se encuentren, al menos, en un estado próximo al de saturación, debiéndose vencer lo que se conoce como Deficiencia de Humedad del Suelo, por lo que sólo una parte del agua infiltrada se convierte en recarga.

El esquema de la Fig. 2.a, que muestra la distribución vertical del agua en el subsuelo, permite apreciar dos zonas básicas: la zona de aireación, que se caracteriza porque sus poros se encuentran parcialmente llenos de agua, y la zona de saturación, situada bajo la anterior, donde los poros están totalmente llenos de agua, separándose ambas por en nivel freático.

La zona de aireación o de agua vadosa se divide, a su vez, en --

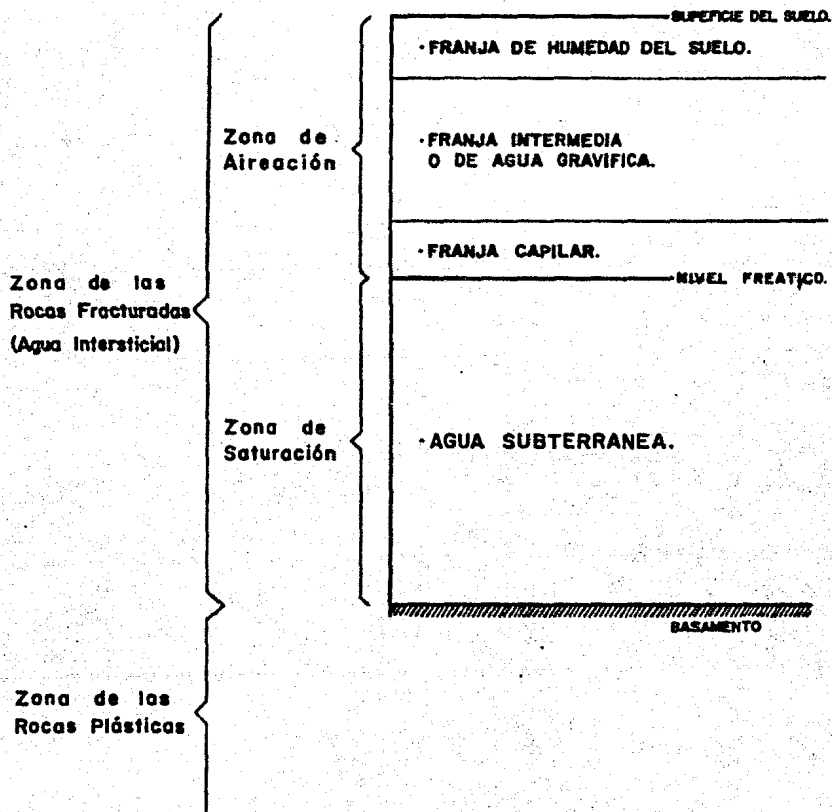


Fig. 2.a. CLASIFICACION DEL AGUA DEL SUBSUELO.

tres franjas cuyos espesores y límites no se encuentran a menudo bien definidos, puesto que son de carácter transicional, al presentar umbrales entre ellas.

La franja de humedad del suelo es la que provee de agua a las raíces de las plantas y su espesor varía en función del tipo de suelo y de vegetación; el agua en esta franja tiende a ser retenida por capilaridad y acción molecular, oponiéndose así a la fuerza de gravedad; sin embargo, parte del agua infiltrada pasa de la franja de humedad a la intermedia, donde es suspendida también por atracción molecular y capilaridad, no realizando función alguna; el espesor de esta franja puede ser muy variable, factor que afecta la recarga de la zona de saturación.

Bajo condiciones de alto contenido de agua en la franja intermedia, una buena cantidad pasa a la franja capilar y posteriormente a la zona de saturación (infiltración eficaz), bajo el nivel freático. El agua en esta última franja tiende a ser retenida mediante la fuerza de capilaridad, que actúa contra la gravedad. El espesor de la franja capilar depende básicamente del tamaño del material en que se encuentra contenida, siendo mayor para granos de tamaño pequeño y viceversa.

El agua contenida en la zona de saturación, que puede, o no, ser de naturaleza acuífera, dependiendo de las características hidrogeológicas del material constitutivo, es a la que con mayor propiedad se denomina Agua Subterránea. El espesor de esta zona es muy variable, en donde la geología local constituye un factor determinante.

Una forma muy significativa de infiltración ocurre a través de las paredes de los cauces de las corrientes superficiales, sólo que se trata de una de las fases de un mecanismo de interacción que obedece a la Ley de Darcy (3). Se han incluido a continuación (Figs. 2.b y 2.c) algunos esquemas representativos que ilustran las condiciones sobresalientes de este aspecto.

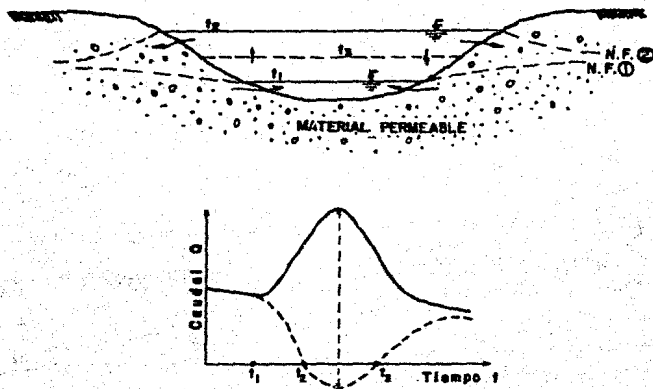


Fig. 2.b. Transferencia de agua entre una corriente superficial y el material acuífero de su subdiveo. En la condición 1, antes de la crecida, el acuífero cede agua a la corriente superficial, la cual actúa como *efluente*. En la condición 2, durante la crecida, la corriente superficial se convierte en *influyente*, al ocurrir infiltración. En el hidrograma, la curva punteada representa la aportación del acuífero a la corriente.

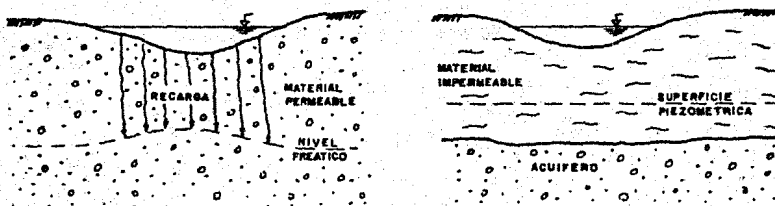


Fig. 2.c. La figura de la izquierda representa una corriente de régimen transitorio. Sólo se presenta transferencia de agua de la corriente hacia el acuífero cuando por ésta transitan volúmenes de escurrimiento. La figura de la derecha representa una condición en la que no existe transferencia de agua debido a la discontinuidad hidráulica entre ambos elementos.

Entre los factores que afectan la infiltración se tienen la humedad y la permeabilidad del suelo y del subsuelo, la cantidad, duración, intensidad y carácter de la precipitación, la morfología y el manto vegetal.

Dentro del estudio de las aguas subterráneas, la infiltración es el factor más importante del ciclo del agua y, a la vez, el de más difícil evaluación, puesto que escapa a mediciones por procedimientos sencillos, aunque los métodos que se han desarrollado para su medición son abundantes y variados, pudiéndose clasificar en directos e indirectos: los primeros permiten evaluar la cantidad de agua infiltrada a través de una superficie determinada, destacando entre ellos los lisímetros, las mediciones del gradiente vertical de humedad del suelo y el apoyado en el estudio de las fluctuaciones de la superficie piezométrica; los métodos indirectos se basan en el conocimiento del resto de los componentes del balance hidrológico.

Estudios realizados en distintas regiones mediante instrumentos y métodos directos, como los lisímetros y las variaciones del nivel piezométrico, han permitido establecer que para periodos prolongados de tiempo, la infiltración tiene un comportamiento lineal en función de la precipitación. Por consiguiente, tal función puede representarse de acuerdo a la ecuación de la recta, que en su expresión general adquiere la forma $y = mx + b$.

Si en un sistema de ejes coordenados se representan la infiltración y la precipitación por las variables I y P , respectivamente, de manera que $I = f(P)$, se tiene entonces que:

$$I = aP - b \quad (2.2)$$

donde a es la pendiente de la recta y b , denominado Umbral Pluviométrico, es la intersección con el eje de las abscisas. El umbral pluviométrico puede definirse entonces como el valor de la máxima precipitación para el cual la infiltración es nula.

La relación anterior tiene validez tanto para alturas anuales medias de precipitación e infiltración medidas en distintos puntos de una cuenca determinada, como para alturas anuales observadas en un punto dado.

Una vez determinados los parámetros a y b para un lugar o zona determinada, esta función permite calcular el valor de la infiltración correspondiente a una precipitación observada.

Ambos parámetros, a y b , dependen de factores hidrogeológicos e hidrometeorológicos, así como de las características de la superficie del suelo: tanto el suelo como el subsuelo desempeñan un papel preponderante en la infiltración por su permeabilidad y grado de saturación al iniciarse la lluvia; la precipitación condiciona el volumen de agua infiltrada en la medida de su cantidad, duración, intensidad y frecuencia; finalmente, la cubierta vegetal, la pendiente y las formas de relieve de la superficie del suelo tienen una influencia determinante en el escurrimiento y la infiltración.

APLICACION A LA ZONA DE ESTUDIO.

En los puntos subsecuentes de este capítulo se tratan los aspectos prácticos o de aplicación de las diversas fases del ciclo hidrológico al Valle del Río Presidio, a excepción del tema 'Infiltración', el cual es implícitamente objeto de un rubro posterior (Cap. V Hidrología Subterránea).

2.1 Evaporación Potencial y Temperatura.

En este apartado se analiza tanto la evaporación potencial como la temperatura prevalecientes en la zona de estudio, dada la afinidad existente entre ambos elementos climáticos. Para ello se han seleccionado las estaciones climatológicas que, de acuerdo a su ubicación, distribución y disponibilidad de información, se consideraron más conve--

nientes para apoyar el análisis (Plano 2.1). A su vez, se ha elegido - un periodo de once años comprendido entre 1966 y 1976 inclusive, con - el objeto de observar el comportamiento de dichos elementos en la re-- gión.

2.1.1 Evaporación Potencial.

A partir de los registros de evaporación mensual en el periodo se leccionado, se elaboraron las tablas 2.1.1 y 2.1.2, en donde están con tenidos los valores de evaporación media mensual y total anual respec-- tivamente, mediante los cuales se trazaron las figuras 2.1.1 a 2.1.3, que muestran gráficas de evaporación mensual promedio y total anual pa-- ra algunas estaciones representativas.

Del material citado se observa que el valor de la evaporación me-- dia mensual tiende a crecer a partir de Enero hasta alcanzar un valor máximo en Mayo, para decrecer luego en forma continua hasta completar el ciclo, adquiriendo un valor mínimo en Diciembre; análogamente, pue-- de apreciarse el comportamiento de la evaporación anual para algunos - puntos de observación durante los años que integran el periodo conside-- rado.

La información anterior permitió trazar las curvas de igual evapo-- ración, en función de las cuales se calculó el volumen promedio anual potencialmente evaporado en la cuenca baja del Río Presidio. Este fué de $975 \times 10^6 \text{ m}^3$ en una superficie de 534 Km^2 . En el plano 2.1 se pre-- senta la configuración de las curvas mencionadas, observándose que la evaporación es decreciente a partir de la línea costera, donde adquie-- re un valor mayor a 1,800 mm/año, hasta la Sierra Madre Occidental, - en cuyas inmediaciones toma un valor de 1,500 mm/año.

2.1.2 Temperatura.

En forma análoga al desarrollo del punto anterior, se elaboraron las tablas 2.1.3 y 2.1.4, que corresponden a temperatura mensual prome--

Plano 2.1 ISOEVAPORACION E ISOTERMAS MEDIAS ANUALES (1966-1976)

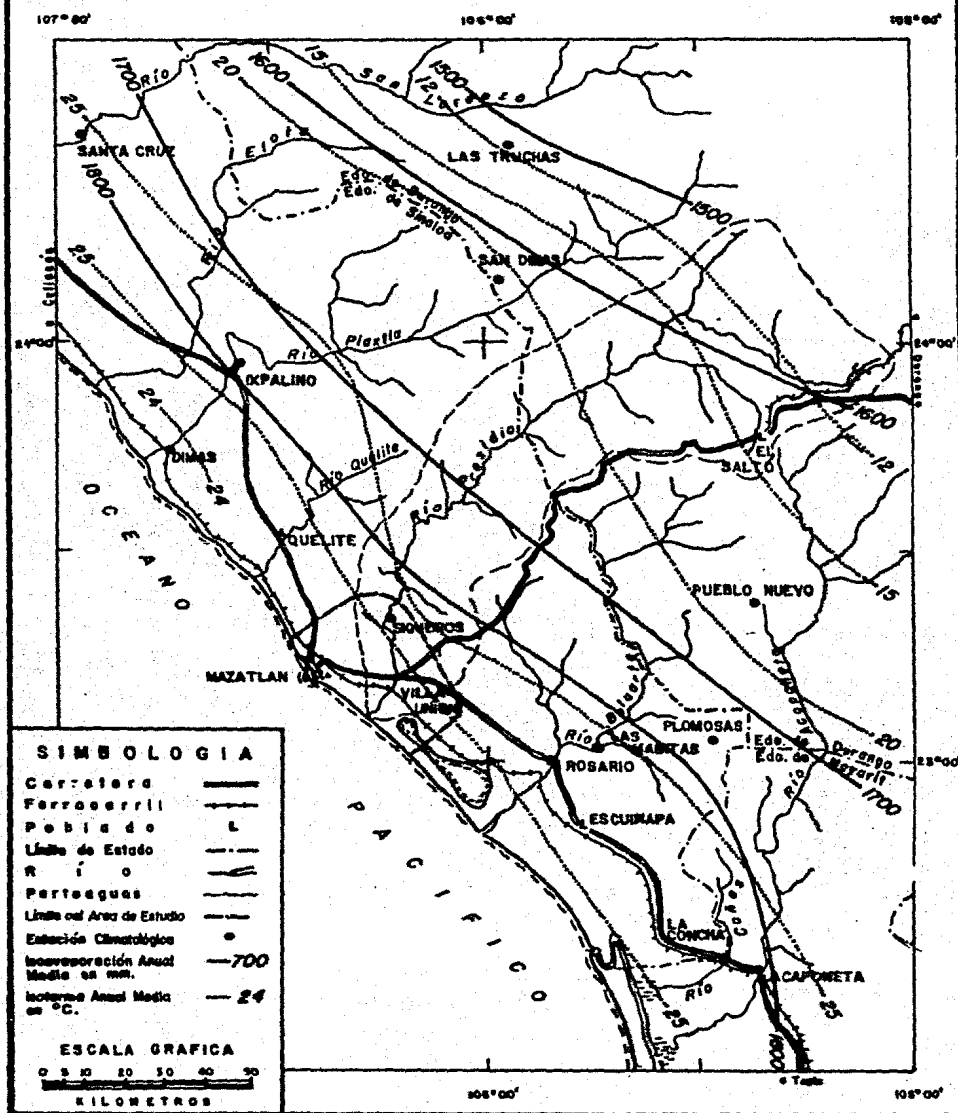


TABLA 2.1.1

EVAPORACION PROMEDIO MENSUAL EN mm
(1966 - 1976)

Estación	Edo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
ACAPONETA	Nay	110.5	131.9	183.4	213.8	245.7	216.2	174.0	156.2	138.9	139.6	126.5	105.7	1,942.4
IXPALINO	Bin	91.7	114.2	164.7	202.8	235.6	206.6	165.1	139.1	129.5	132.6	103.7	82.5	1,768.1
LA CONCHA	Sin	90.0	119.8	181.2	221.9	254.3	223.1	164.2	155.8	132.5	136.5	121.5	86.0	1,886.8
LAS HABITAS	Sin	87.3	114.4	174.2	210.9	246.8	206.6	176.5	157.7	140.4	130.2	103.5	77.0	1,825.7
ROSARIO	Sin	97.4	117.6	169.6	204.6	241.6	210.8	168.8	150.1	129.6	135.8	114.9	96.0	1,836.8
SANTA CRUZ	Sin	110.0	127.8	190.0	224.3	<u>261.8</u>	235.5	177.7	149.8	134.0	147.0	125.6	103.2	1,986.7
PUEBLO NUEVO	Dgo	68.1	87.4	125.2	153.8	163.7	131.4	125.7	122.9	105.3	91.8	76.7	<u>65.8</u>	1,317.8

* Excepto 1966

TABLA 2.1.2

EVAPORACION ANUAL EN mm.

Estación	Periodo Analizado											PROM.
	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	
ACAPONETA	1973.8	1987.0	1977.1	1888.8	1954.4	1908.7	1974.4	1857.4	1950.2	1971.4	1924.5	1,942.5
IXPALINO	1803.8	1869.9	1748.1	1809.0	1804.7	1820.4	1751.8	1674.5	1731.7	1720.6	1716.8	1,768.3
LA CONCHA	1842.8	1846.0	1879.5	1870.1	1820.8	1953.4	1939.2	1855.9	1899.2	1925.9	1923.6	1,886.9
LAS HABITAS	1923.8	1927.4	1793.0	1794.0	1775.3	1778.7	1841.9	1811.4	1883.6	1752.6	1798.4	1,825.4
ROSARIO	1930.3	1914.7	1799.5	1792.2	1915.5	1818.1	1929.9	1748.7	1773.8	1717.5	1876.4	1,836.7
SANTA CRUZ	1993.2	<u>2062.8</u>	1847.0	1953.2	2018.2	2007.8	2017.9	1928.4	1996.8	2017.0	2014.6	<u>1,986.9</u>
PUEBLO NUEVO	- - -	1307.3	<u>1199.4</u>	1296.7	1332.9	1257.3	1310.2	1290.9	1537.6	1331.2	1314.5	<u>1,317.8</u>

ESTACION IXPALINO, SIN.

ALTITUD 300 m.s.n.m.

PERIODO 1966-1976

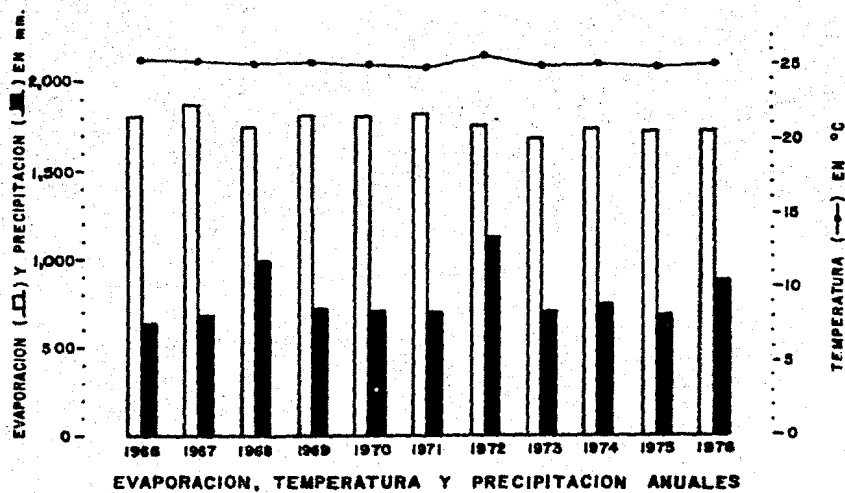
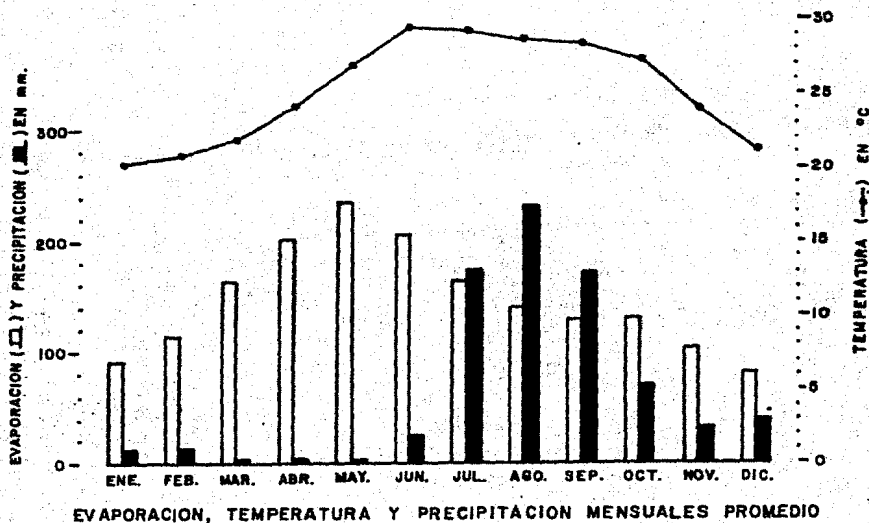
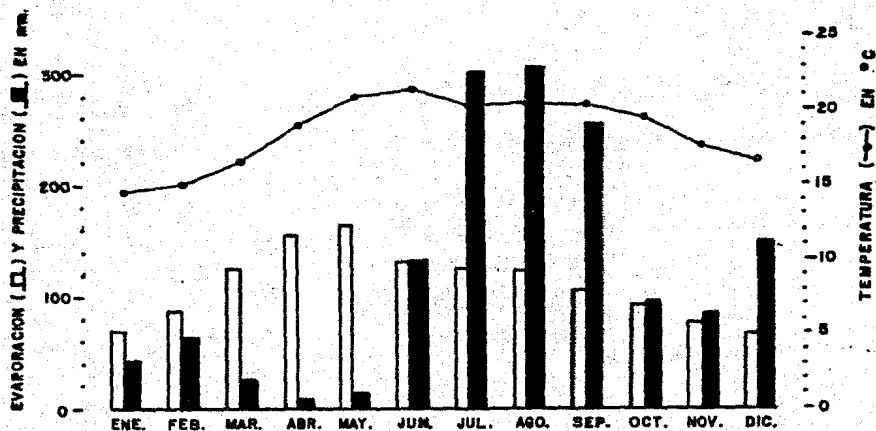


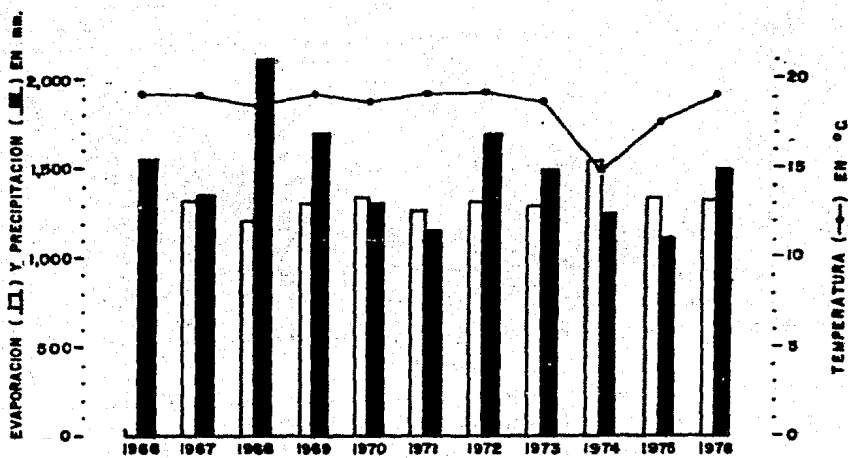
Figura 2.1.1

ESTACION PUEBLO NUEVO, DGO.

ALTITUD 1560 M.S.N.M.
PERIODO 1966-1976



EVAPORACION, TEMPERATURA Y PRECIPITACION MENSUALES PROMEDIO



EVAPORACION, TEMPERATURA Y PRECIPITACION ANUALES

Figura 2.12

ESTACION ROSARIO, SIN.

ALTITUD 27 m.s.n.m.

PERIODO 1966-1976

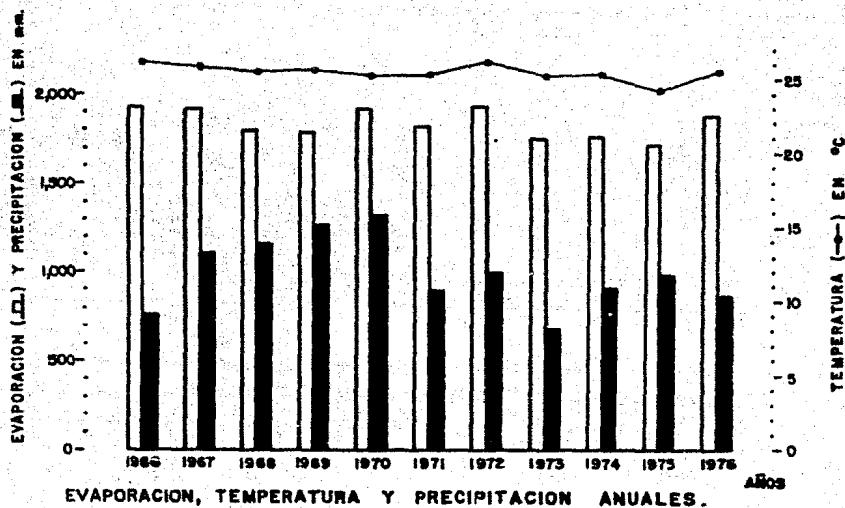
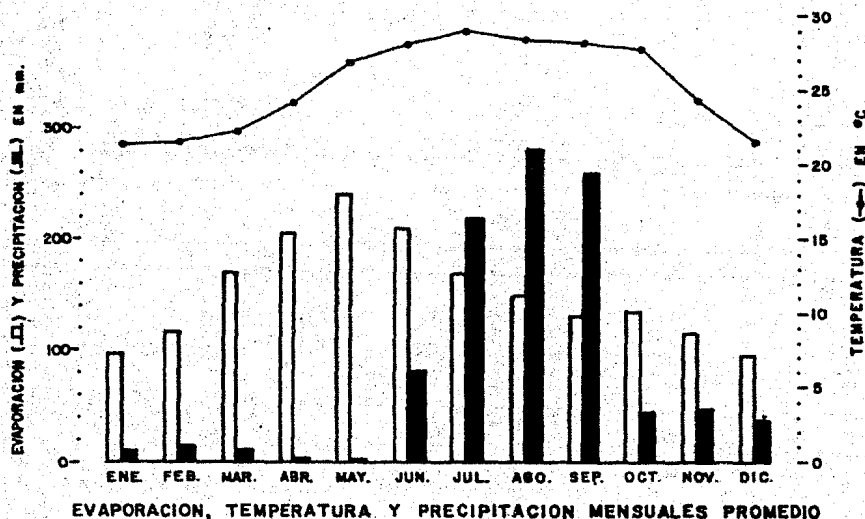


Figura 2.1.3

TABLA 2.1.3

TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL EN °C
(1966 - 1976)

Estación	Edo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
ACAPONETA	Nay	22.1	22.7	23.5	25.4	27.9	29.3	28.9	28.5	28.1	27.9	25.7	22.9	26.1
DIMAS	Sin	18.2	18.2	18.6	20.5	23.3	26.5	28.2	27.9	27.8	26.0	22.7	19.7	23.1
IXPALINO	Sin	20.2	20.8	21.9	24.2	26.9	29.4	<u>29.5</u>	28.6	28.4	27.2	24.0	21.1	25.2
LA CONCHA	Sin	22.0	22.7	23.5	25.0	27.6	29.5	29.2	29.0	28.7	28.3	25.8	23.1	26.2
LAS HABITAS	Sin	20.4	20.9	21.9	23.9	27.0	29.0	28.6	28.2	28.1	27.4	24.6	22.0	25.2
LAS TRUCHAS	Ogo	<u>5.6</u>	6.4	7.8	10.8	12.7	15.2	15.1	15.4	14.5	11.8	8.7	6.4	10.9
PANUCO	Sin	21.0	21.0	22.1	23.8	25.4	26.0	25.6	25.1	24.9	24.4	22.6	21.2	23.6
PLOMOSAS	Sin	19.0	19.4	20.7	22.8	24.6	24.9	23.9	23.8	23.5	22.9	20.9	19.6	22.2
PUEBLO NUEVO	Ogo	14.5	15.0	16.5	19.0	20.8	21.4	20.3	20.5	20.3	19.4	17.6	15.6	18.4
ROSARIO	Sin	21.4	21.5	22.2	24.1	26.9	28.1	28.9	28.4	28.2	27.7	25.3	22.4	25.4
SANTA CRUZ	Sin	20.7	21.4	22.5	24.5	27.1	29.1	29.2	28.2	27.9	27.1	24.3	21.5	25.3
SIQUEROS *	Sin	21.0	21.4	21.6	23.6	25.9	28.8	29.2	28.7	28.6	27.7	24.7	22.0	25.3

* Excepto 1970, 1971 y 1972, así como 1966.

TARLA 2.1.4

TEMPERATURA ANUAL EN °C

Estación	Altitud m.s.n.m.	Periodo Analizado.											Prom.
		1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	
ACAPONETA	190	27.0	26.8	27.0	27.1	26.6	25.7	26.0	25.6	25.6	25.5	24.3	26.1
DIMAS	12	22.9	23.0	23.1	22.9	22.8	22.7	23.9	23.4	24.0	22.9	23.2	23.1
IXPALINO	300	25.4	25.3	25.2	25.3	25.1	24.9	25.7	25.0	25.1	24.9	25.1	25.2
LA CONCHA	180	26.9	26.6	26.4	26.1	26.0	25.4	<u>26.7</u>	26.0	26.0	25.8	26.2	<u>26.2</u>
LAS HABITAS	180	25.4	25.8	25.5	25.7	24.8	24.7	25.7	25.0	24.9	24.8	24.8	25.2
LAS TRUCHAS	2,300	10.5	10.5	<u>10.4</u>	10.7	10.6	10.9	11.4	11.0	11.2	11.4	10.7	<u>10.9</u>
PANUCO	400	22.8	23.1	23.1	23.3	23.5	23.3	23.9	23.7	24.9	24.1	24.1	23.6
PLOMOSES	100	22.1	22.3	21.7	22.1	22.1	22.2	22.6	21.8	22.1	22.3	22.5	22.2
PUEBLO NUEVO	1,580	19.1	19.0	18.4	18.9	18.7	19.2	19.2	18.7	14.7	17.5	19.0	18.4
ROSARIO	27	26.1	25.8	25.5	25.6	25.2	25.2	26.1	25.2	25.3	24.2	25.5	25.4
SANTA CRUZ	2,050	25.8	25.8	25.3	25.5	25.6	25.2	25.5	24.9	24.9	24.8	25.1	25.3
SIQUEROS	55	---	25.2	25.2	25.7	---	---	---	25.1	25.2	25.0	25.4	25.3

Nota Complementaria: La Altitud de la Estación SAN DIMAS es de 800 m.s.n.m.

dio y temperatura anual. Estas tablas sirvieron de base para el trazo de algunas gráficas que representativamente se han incluido en las figuras 2.1.1 a 2.1.3, para ilustrar el comportamiento de la temperatura media mensual durante el periodo de tiempo considerado.

En las gráficas de temperatura media mensual se observa que ésta asciende a partir de Enero, mes en el que es mínima, hasta Junio o Julio, meses en los que invariablemente se presenta la máxima, para luego descender hasta cerrar el ciclo. De las gráficas de temperatura anual se observa que la variación de un año a otro es, por lo general, menor a 1°C para una estación dada.

Se trazaron también las isotermas medias anuales (Plano 2.1), por cuyo método se obtuvo un valor promedio de 24.9°C para la temperatura media anual en la zona de estudio. De la configuración de tales isotermas se aprecia que la temperatura media anual disminuye gradualmente a partir de la línea de costa, en cuyas proximidades adquiere un valor de 25°C , hasta la parte montañosa, donde toma un valor de 12°C .

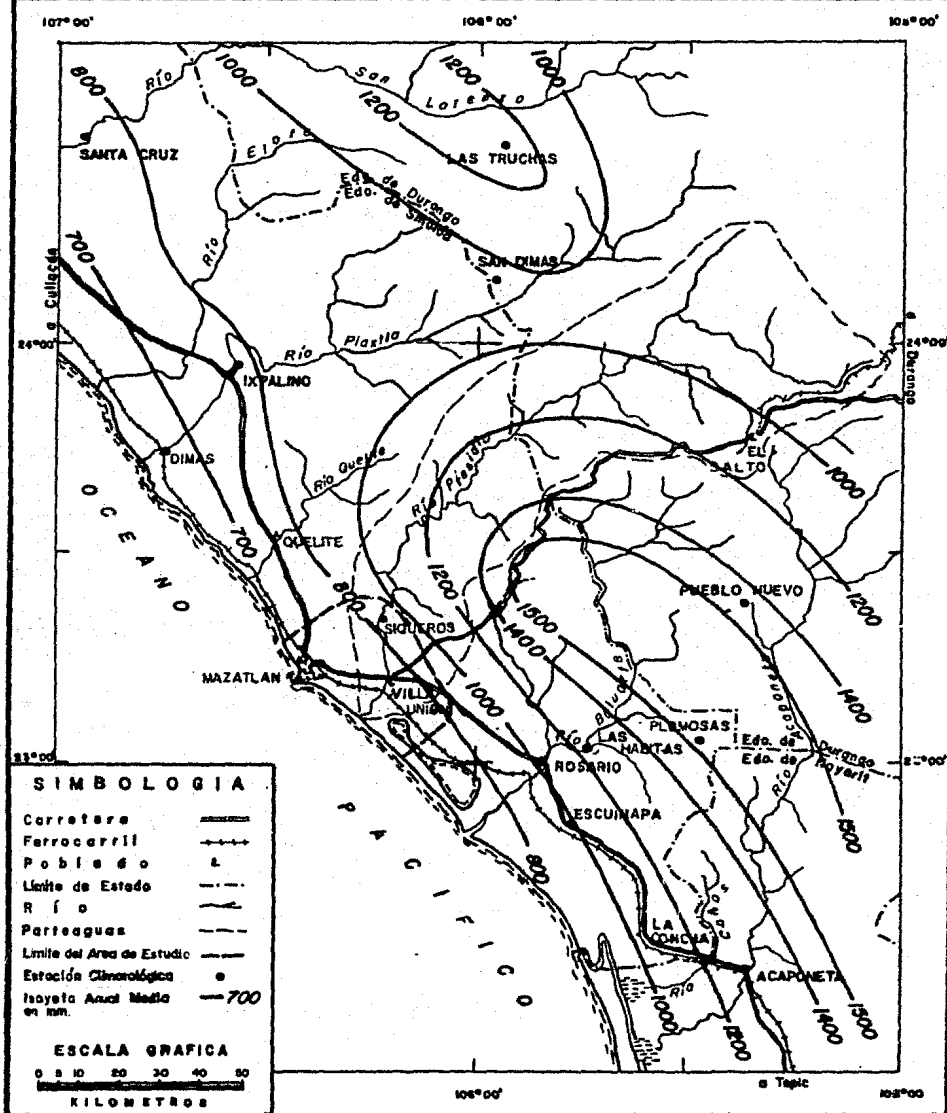
2.2 Precipitación.

El objetivo primordial que persigue el análisis de la precipitación es evaluar la cantidad de agua que cae dentro de un área determinada durante un cierto tiempo, generalmente el promedio anual en una cuenca o porción de ella.

El primer paso dentro de la secuencia metodológica para el análisis de la lluvia, consistió en la selección de estaciones pluviométricas existentes dentro del área de interés o próximas a ella de acuerdo a la disponibilidad y cobertura de sus registros correspondientes a precipitación pluvial mensual; la localización geográfica de tales estaciones se puede apreciar en el plano 2.2.

Asimismo, en función de la información disponible correspondiente

Plano 2.2 ISOYETAS MEDIAS ANUALES (1966-1976)



al conjunto de estaciones consideradas, se procedió a la selección de un periodo de tiempo razonable con objeto de uniformizar el análisis, eligiéndose el lapso comprendido entre 1966 y 1976 inclusive, el cual se ha considerado como suficiente para visualizar el comportamiento - que guarda la lluvia en la región.

A partir de los registros de precipitación mensual, se calcularon los valores de precipitación mensual promedio y precipitación anual para cada estación pluviométrica de acuerdo al periodo considerado, los cuales se encuentran en las tablas 2.2.1 y 2.2.2.

Con objeto de apreciar la variación de la precipitación mensual - promedio, se elaboraron los histogramas respectivos, algunos de los -- cuales se muestran en las figuras 2.1.1 a 2.1.3. Asimismo, en dichas - figuras se adjuntan las gráficas de lluvia anual y su promedio, en las que se observa el comportamiento de la lluvia a través de los años que integran el periodo, detectándose, así, años de precipitación escasa, media y abundante.

De las tablas a las que se hace alusión anteriormente, se observa que los meses de mayor precipitación son Julio, Agosto y Septiembre, - de los que el segundo es el mes en el que con mayor frecuencia se presenta un valor máximo; en los meses restantes la precipitación es esca sa, llegando a ser prácticamente nula en los meses de Marzo, Abril y - Mayo.

Finalmente, para la cuantificación del volumen promedio anual llo vido sobre el Valle del Presidio, se procedió a aplicar el método de - las isoyetas, para lo cual se hizo la configuración de las curvas de i gual precipitación anual promedio sobre el plano de la zona (Plano -- 2.2), notándose que la lluvia adquiere valores crecientes desde 700 mm/año en las proximidades de la costa, hasta 1,500 mm/año en las im ag diaciones de la Sierra Madre Occidental. Este método consiste en inte grar los productos de los elementos de área (S_i) de la zona de evalua ción comprendidos entre dos isoyetas consecutivas (P_i y P_{i+1}) por la -

TABLA 2.2.1

PRECIPITACION PROMEDIO MENSUAL EN mm
(1966 - 1976)

Estación	Edo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
ACAPONETA	Nay	13.7	12.8	9.4	0.7	0.8	125.9	328.2	358.4	283.8	73.4	44.2	47.1	1,298.4
DIMAS	Sin	10.6	12.1	3.3	1.2	1.0	17.3	111.8	178.5	114.1	106.7	25.7	39.8	622.1
IXPALINO	Sin	11.8	14.0	3.9	3.2	2.0	25.6	173.6	231.8	171.6	69.5	31.9	39.9	778.8
LA CONCHA	Sin	11.5	15.7	9.4	0.9	2.1	97.9	284.5	313.8	275.4	53.3	39.0	42.9	1,146.4
LAS HABITAS	Sin	11.6	18.3	12.2	3.4	0.1	96.2	302.0	254.0	273.3	60.1	62.1	42.9	1,136.2
LAS TRUCHAS	Dgo	50.6	41.9	14.7	8.9	28.4	133.5	277.7	268.5	204.7	58.7	46.5	111.1	1,245.2
PANUCO	Sin	14.3	24.4	14.4	3.8	7.6	183.0	412.3	409.7	299.8	105.1	45.4	70.7	1,590.5
PLOMOSAS	Sin	21.0	27.8	18.1	2.5	3.4	192.7	457.8	351.0	256.4	86.9	46.4	71.7	1,535.7
PUEBLO NUEVO	Dgo	41.7	64.2	27.0	7.5	12.6	123.8	300.2	304.1	254.1	95.4	84.7	149.5	1,464.8
ROSARIO	Sin	9.4	13.9	10.6	1.6	0.9	79.5	218.2	278.7	259.7	45.1	47.5	38.2	1,003.3
SAN DIMAS	Dgo	18.1	17.7	13.8	4.2	10.8	105.4	284.2	190.8	158.3	41.5	34.0	46.5	925.3
SANTA CRUZ	Sin	15.5	13.8	4.1	3.5	0.5	26.9	183.0	215.5	167.0	60.2	22.9	34.9	747.8
SIQUEROS *	Sin	7.4	14.3	16.3	0.0	1.3	19.7	179.6	202.9	226.1	62.3	34.6	38.1	802.6

* Excepto 1970, 1971 y 1972, además de 1966.

TABLA 2.2.2

PRECIPITACION ANUAL EN mm.

Estación	Periodo Analizado											PROM.
	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	
ACAPONETA	1288.0	1072.6	1025.1	1453.3	1265.1	1235.9	1571.5	1458.3	1136.3	1207.4	1570.8	1,298.6
DIMAS	397.4	<u>323.7</u>	709.5	723.7	728.8	563.6	1319.5	335.0	778.5	465.0	498.8	<u>622.0</u>
IXPALINO	638.5	681.8	987.5	721.2	710.8	704.9	1125.8	704.7	739.1	682.0	872.2	778.9
LA CONCHA	822.9	1139.9	889.5	1720.6	1070.3	977.6	1285.2	1284.4	998.5	1259.0	1162.2	1,146.4
LAS HABITAS	760.7	1126.4	1521.7	1511.9	1194.8	1121.7	1145.6	835.8	1052.5	1158.3	1070.9	1,136.4
LAS TRUCHAS	1147.5	1070.5	1712.0	1023.5	1213.0	974.5	1426.5	1288.5	1397.5	916.0	1531.0	1,245.5
PANUCCO	1571.4	1370.0	1329.0	1554.0	1385.0	1949.0	1760.0	1558.1	1508.0	1500.0	2012.2	<u>1,590.6</u>
PLOMOSAS	1346.4	1630.6	1572.5	1704.5	1558.3	1499.7	1160.8	1935.8	1514.2	1351.1	1619.5	1,535.8
PUEBLO NUEVO	1528.6	1350.4	<u>2111.1</u>	1697.0	1297.6	1150.8	1683.4	1489.8	1238.9	1096.9	1488.8	1,464.8
ROSARIO	754.5	1105.5	1159.6	1258.3	1422.5	898.6	995.4	686.4	908.3	983.4	865.0	1,003.4
SAN DIMAS	808.7	589.1	1134.6	457.1	1585.9	1181.2	1033.6	1068.3	805.1	728.6	787.2	925.4
SANTA CRUZ	601.2	817.6	976.4	631.6	540.1	742.6	1052.9	472.1	909.7	469.1	1012.8	747.9
SIQUEROS	- - -	566.0	967.0	930.0	- - -	- - -	- - -	646.0	887.0	872.0	701.0	802.7

media aritmética de las isoyetas correspondientes; matemáticamente, el método se representa por la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (P_i + P_{i+1}) S_i \quad (2.3)$$

donde V_p es el volumen de agua llovida sobre la superficie de evaluación en el periodo de referencia de las isoyetas; n es el número de isoyetas configuradas sobre dicha área.

Procediendo del modo señalado se obtuvo que en la cuenca baja del Río Presidio, con una superficie aproximada de 534 Km², el volumen anual promedio llovido resultó de 435 x 10⁶ m³.

2.3 Escurrimiento Superficial.

En virtud del carácter dinámico del ciclo hidrológico, las propiedades físicas del agua y la continuidad del medio natural, frecuentemente ocurre que durante el tránsito continental del agua, cualquier unidad molecular que se encuentre ya sea en la fase de escurrimiento, o ya sea en la fase de infiltración, no se sujeta a ella de una manera rígida y exclusiva, sino que está propensa a efectuar cambios de una fase a otra hasta que se evapora o alcanza el océano. Se puede inferir, entonces, que el agua de escurrimiento y el agua subterránea, regularmente producto de la infiltración ocurrida, guardan entre sí una relación muy estrecha de mutua interacción.

En realidad, el caudal de toda corriente sólo puede ser aportado en forma directa por la precipitación, que da origen al denominado Escurrimiento Directo, o bien, por el agua almacenada en depósitos subterráneos, originando lo que se conoce como Escurrimiento Base. Es precisamente la determinación de este último un aspecto de especial consideración en la evaluación de la potencialidad de acuíferos someros, tal como lo es el caso presente.

2.3.1 Hidrografía.

La zona de estudio se encuentra comprendida en lo que constituye la planicie costera del Río Presidio, cuyo patrón de drenaje se cataloga como de tipo dendrítico (Plano 2.3).

La cuenca del Río Presidio está situada entre las latitudes $23^{\circ}05'N$ y $24^{\circ}15'N$ y las longitudes $105^{\circ}05'WG$ y $106^{\circ}20'WG$; es una cuenca - de forma alargada con un eje mayor igual a 150 Km y uno menor igual a 40 Km. Limita al norte con las cuencas de los ríos Piaxtla y Quelite, al sur con la cuenca del Río Baluarte, al oriente con la cuenca alta del Río San Pedro y al poniente con el Océano Pacífico.

El Río Presidio, conocido también con los nombres de Villa Unión y Mazatlán, nace en la Sierra Madre Occidental a 40 Km al poniente de la Cd. de Durango, a una elevación de 2600 m.s.n.m. El colector principal sigue inicialmente la dirección SE-NW, conociéndosele con el nombre de Arroyo El Jaral.

El arroyo El Jaral recibe primeramente por su margen derecha las aportaciones del arroyo Arenales y 25 Km aguas abajo recibe por su margen izquierda los escurrimientos del arroyo El Salto, el que a su vez incluye entre sus afluentes al arroyo El Dorado.

A partir de la confluencia del arroyo El Salto, se conoce al Río Presidio como Arroyo Ventanas, cambiando, también, la dirección de su trayectoria a NE-SW, sensiblemente paralela a la Sierra Espinazo del - Diablo, la cual le sirve de parteaguas con el Río Piaxtla.

Siguiendo la misma dirección, NE-SW, cruza el límite de los estados de Durango y Sinaloa cerca de la población de Agua Caliente después de un recorrido de 132 Km y un descenso de 2,200 m.

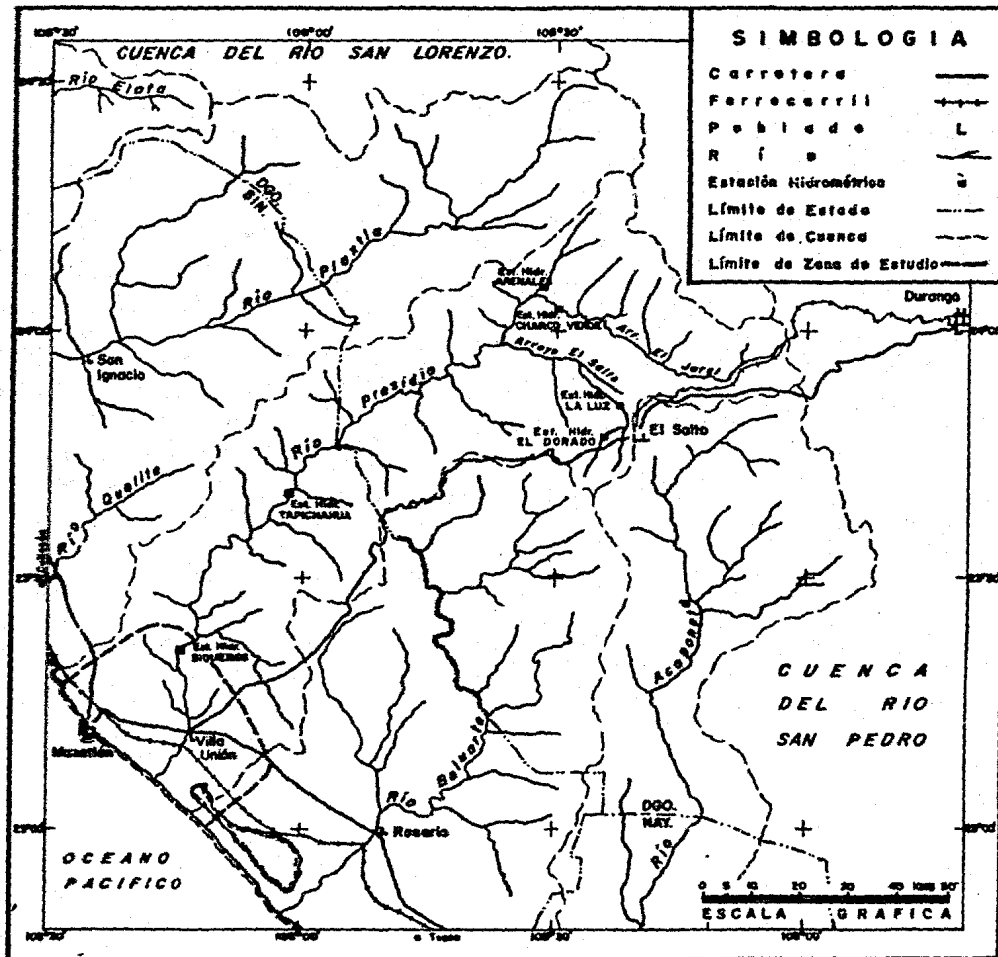
A partir de 30 Km aguas abajo de su cruce con la línea interestatal y ya en la planicie costera, el río recibe el nombre de Presidio,

Plano 2.3 HIDROGRAFIA Y LOCALIZACION DE ESTACIONES HIDROMETRICAS.

DATOS GENERALES DE LAS ESTACIONES HIDROMETRICAS EN LA CUENCA DEL RIO PRESIDIO

ESTACION	CORRIENTE	CUENCA	ESC.	MED.	ANUAL	Q. MEN.	PERIODO	MAXIMOS	Fecha	en %	MINIMOS	Fecha	en %	OP.	OBS.
Chorro Verde.	Arr. El Dorado.	701	50.5	72	1.50	1954-1960	Ag. 14 - 1955	170	Varios	0	C.F.E.	Susp.			
Tapichoban.	Rio Presidio.	3,981	673.0	189	21.3	1955-1968	Sep. 25 - 1960	1,481	May. 14 - 1957	0.15	C.F.E.	Susp.			
Siagueros.	Rio Presidio.	5,814	1,091.0	194	34.6	1955-	Sep. 13 - 1966	7,200	Varios	0.25	S.R.N.				
El Dorado.	Arr. El Dorado.	18	3.75	197	0.19	1954-1960	Jun. 23 - 1959	11.6	Varios	0	C.F.E.	Susp.			
La Luz.	Arr. El Dorado.	140	23.8	170	0.753	1954-1960	En. 13 - 1960	51.9	May. 16 - 1957	0.01	C.F.E.	Susp.			
Arenales.	Arr. Arenales.	92	1.63	17.7	0.052	1955-1960	Jul. 16 - 1960	1.38	Varios	0	C.F.E.	Susp.			

*Excepto 1974 y 1975.



seguramente por su vecindad con algunos puestos avanzados de la época colonial que se conocían con el nombre de Presidios. El Río Presidio - descarga sus aguas en el Océano Pacífico, después de un recorrido total de 215 Km, en un punto localizado a 20 Km al SE del Puerto de Mazatlán, drenando una cuenca de 6,005 Km² de superficie.

La historia de los escurrimientos del Río Mazatlán se ha hecho ag diante seis estaciones de aforo distribuidas en otros tantos puntos so bre la corriente, como se anota en el cuadro del plano 2.3.

2.3.2 Análisis de los Escurrimientos.

El objetivo que pretende el análisis de los escurrimientos consis te en determinar los parámetros que involucra la ecuación general de - recesión o decaimiento del caudal base, los cuales son gobernados por las características hidrogeológicas de la cuenca, para obtener poste-- riormente los volúmenes de escurrimiento base y la capacidad de almace namiento marginal.

Existen múltiples teorías relativas al estudio hidrológico de los escurrimientos que plantean métodos diversos, tanto de tipo analítico como gráfico, para la separación de hidrogramas, pero la que ha tenido mayor aceptación hasta la fecha es la desarrollada por Barnes en 1939.

El hidrograma típico, $Q=f(t)$, que se obtiene después de una tor-- menta o periodo húmedo, si la condición de escurrimiento es libre, es decir, si la cuenca hidrográfica no presenta embalses de regulación u otro tipo de control hacia aguas arriba, tiene forma de campana asimé-- trica en la que se pueden distinguir claramente cuatro fases: 1) Curva de concentración o curva de ascenso; 2) Cresta o pico, punto de caudal máximo relativo; 3) Curva de decrecida o curva descendente y 4) Curva de agotamiento, decaimiento o descarga, que es la expresión de la cir-- culación subterránea por la superficie de la cuenca vertiente, por lo que su estudio es muy importante para la evaluación de las reservas acuíferas o la capacidad de almacenamiento de una cuenca.

Barnes encontró que la ecuación general de decaimiento puede representarse teóricamente por una recta ajustable en la fase de descarga del hidrograma cuando éste se grafica de un modo semilogarítmico, - esto es, el caudal representado en escala logarítmica y el tiempo en - escala aritmética (11).

La ecuación de la curva de recesión se expresa matemáticamente en la forma siguiente:

$$Q_t = Q_0 K_T^t \quad (2.4)$$

en donde:

- Q_0 representa el caudal para el instante en que principia la recesión; generalmente se expresa en m^3/seg ;
- Q_t representa el caudal correspondiente a t unidades de tiempo después de presentado Q_0 , también expresado en m^3/seg ;
- t es cualquier instante de tiempo referido al que corresponde a Q_0 , en días u horas según el caso, y
- K_T es el factor de recesión que caracteriza a la cuenca drenada y se obtiene a partir de la pendiente de la recta ajustada, en $días^{-1}$ u hr^{-1} .

Esta función puede también expresarse de la siguiente forma (Butler, 1957):

$$Q_t = \frac{Q_0}{10^{t/K_2}} \quad (2.5)$$

en donde:

- Q_t , Q_0 y t representan lo definido anteriormente y
- K_2 representa el valor del intervalo de tiempo correspondiente a un ciclo logarítmico en la escala de caudal, acotado por la recta de recesión respectiva.

El volumen de descarga para un intervalo de tiempo dado se obtiene a partir de la integración de la ecuación anterior (2.5), lo cual - conduce a la expresión siguiente:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_t \cdot dt = - \left. \frac{Q_0 \cdot K_2 / 2.3}{10^{t/K_2}} \right]_{t_1}^{t_2} \quad (2.6)$$

donde:

V representa el volumen de escurrimiento base descargado durante el intervalo definido por t_1 y t_2 , que son los límites de integración y representan instantes cualesquiera de un periodo de -recesión, referidos al principio del mismo.

Lo expuesto en este apartado constituye esencialmente el método - de análisis de los escurrimientos superficiales; mediante él se obtuvieron los valores de los volúmenes conceptuales que se definen a continuación:

- Volumen Potencial Total Disponible, V_{tp} .- es el volumen de agua subterránea susceptible de ser descargada durante toda la recesión hasta el agotamiento total del escurrimiento en la corriente, no presentándose algún tipo de recarga. Se obtiene de la ec. 2.6, tomando como límites de integración a $t=0$ y $t=\infty$ (infinito), de lo cual resulta que:

$$V_{tp} = \frac{Q_0 \cdot K_2}{2.3} \quad (2.7)$$

- Volumen de Descarga durante la Recesión, V_d .- se define como el volumen de agua subterránea descargado a la corriente superficial durante un periodo de tiempo igual a la duración real de la recesión (t_R). Por lo tanto, se calcula mediante la ecuación 2.6, integrando desde 0 hasta t_R , lo cual conduce a la expresión siguiente:

$$V_d = \frac{Q_0 \cdot K_2}{2.3} (1 - 10^{-t_R/K_2}) \quad (2.8)$$

- Volumen Remanente, V_R .- con este término se denomina al volumen virtual de agua subterránea que podría ser descargado a partir del instante final del periodo de la recesión real, hasta el agotamiento de la corriente superficial, siempre y cuando no se presente recarga al

guna. Se calcula mediante la integral (2.6) entre los límites t_R e infinito, o bien, mediante la diferencia del Volumen Potencial Total Disponible y el Volumen de Descarga durante la Recesión, esto es:

$$V_R = \frac{Q_0 \cdot K_2}{2.3} (10^{-t_R/K_2}) \quad (2.9)$$

- Recarga entre Periodos de Recesión, R .- es la diferencia entre el Volumen Potencial Total Disponible para un año hidrológico cualquiera (n) y el Volumen Remanente correspondiente al año hidrológico anterior ($n-1$); de esta manera:

$$R_{(n)} = V_{tp(n)} - V_{a(n-1)} \quad (2.10)$$

Con objeto de llevar a cabo el análisis hidrométrico para los años críticos y normales en cuanto a recarga vertical, se hizo primariamente una profundización del apartado 2.2, relativo a precipitación, para lo cual se compararon los valores de precipitación anual con objeto de clasificar años de lluvia escasa, media y abundante de acuerdo a un periodo de tiempo que fué necesario hacer más extenso que el considerado y que comprende de 1963 a 1976 inclusive.

En la tabla 2.3.1 se muestra la clasificación anual de la precipitación, incluyéndose algunos datos estadísticos desprendidos de ella. En esta tabla se puede observar que la precipitación anual tiende a ser baja entre los años de 1964 y 1967 inclusive y media entre 1972 y 1974 inclusive, siendo posible apreciar una tendencia de precipitación alta o extraordinaria para el año de 1968; mientras que para los años restantes, la precipitación anual en el conjunto de estaciones pluviométricas no presentó una tendencia claramente definida.

Una vez determinados los años "secos" o de baja precipitación, 1964-1967, y los años de precipitación media, 1972-1974, se obtuvo la información correspondiente a gastos medios diarios aforados por la estación hidrométrica Siqueros, cuya ubicación se muestra en el plano hidrográfico (Plano 2.3).

TABLA 2.3.1

CLASIFICACION DE LA PRECIPITACION ANUAL
PERIODO 1963 - 1976

ESTACION CLIMATOLOGICA	ALTITUD mnm	T I E M P O															CANTIDAD DE AÑOS DE PRECIPITACION:		
		1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	BAJA	MEDIA	ALTA	
Dimas, Sin.	12	A	A	A	B	B	M	M	M	M	A	B	M	B	B	5	5	4	
Ixpalino, Sin.	300	M	B	M	B	B	A	M	M	M	A	M	M	M	M	3	9	2	
El Salto, Dgo.	2560	M	B	M	M	M	A	M	M	B	M	M	M	B	M	3	10	1	
La Concha, Sin.	180	M	B	B	B	M	B	A	M	M	M	M	M	M	M	4	9	1	
Las Habitas, Sin.	180	-	M	M	B	M	A	A	M	M	M	B	M	M	M	2	9	2	
Pánuco, Sin.	400	M	B	M	M	B	B	M	B	A	M	M	M	M	A	4	8	2	
Plomosas, Sin.	100	-	B	B	B	M	M	M	M	M	B	A	M	B	M	5	7	1	
Pueblo Nuevo, Dgo.	1580	M	B	M	M	B	B	M	B	A	M	M	M	M	A	4	8	2	
Rosario, Sin.	27	-	B	M	B	M	M	M	A	M	M	B	M	M	M	3	9	1	
San Dimas, Dgo.	800	M	B	B	M	B	M	B	A	M	M	M	M	B	M	5	8	1	
CANTIDAD DE	BAJA (B)	0	8	3	6	5	3	1	2	1	1	3	0	4	1				
ESTACIONES CON	MEDIA(M)	6	1	6	4	5	4	7	6	7	7	6	10	6	7				
PRECIPITACION:	ALTA (A)	1	1	1	0	0	3	2	2	2	2	1	0	0	2				

El trazo de los hidrogramas de gastos medios diarios para los periodos de precipitación media y escasa aparece en las figuras 2.3.1 y 2.3.2, determinándose en ellos los parámetros que involucra la ecuación general de la recesión, los cuales aparecen también en la tabla 2.3.2. Debe tenerse en cuenta que los valores obtenidos sólo tienen validez para aquel sector de cuenca definido por el punto de la corriente sobre el que se encuentra instalada la estación de aforo.

2.3.3 Volúmenes de Agua Subterránea drenados por la Corriente Superficial.

Con base en la metodología planteada en el apartado anterior, se determinó el volumen de agua subterránea drenada por el Río Presidio en la estación hidrométrica Siqueros, obteniéndose los valores que aparecen en la tabla 2.3.2 en el renglón denominado Volumen de Descarga durante la Recesión, donde se puede observar que varía de 7.45 a 14.0 x 10⁶ m³, dependiendo tal variación, del tiempo que dura la recesión hasta que se presenta la recarga, así como del volumen almacenado en las márgenes antes de que dé comienzo la recesión.

Debe recalcar que la ubicación de la estación Siqueros sobre el Río Presidio no es la más conveniente para el fin que persigue este tipo de análisis, ya que se encuentra prácticamente donde el valle principia, razón por la cual dicho volumen posiblemente ya se está aprovechando aguas abajo, puesto que es ahí donde se encuentra la mayoría de los aprovechamientos de agua subterránea, además de las estaciones de bombeo que existen a lo largo de la corriente, siendo imposible predecir o evaluar el volumen que se descarga al océano, debido tanto a las extracciones que tienen lugar en el valle, como a la gran diferencia que existe entre los materiales que conforman el cauce del río antes y después de las estaciones de aforo.

2.3.4 Capacidad de Almacenamiento en las Márgenes del Río.

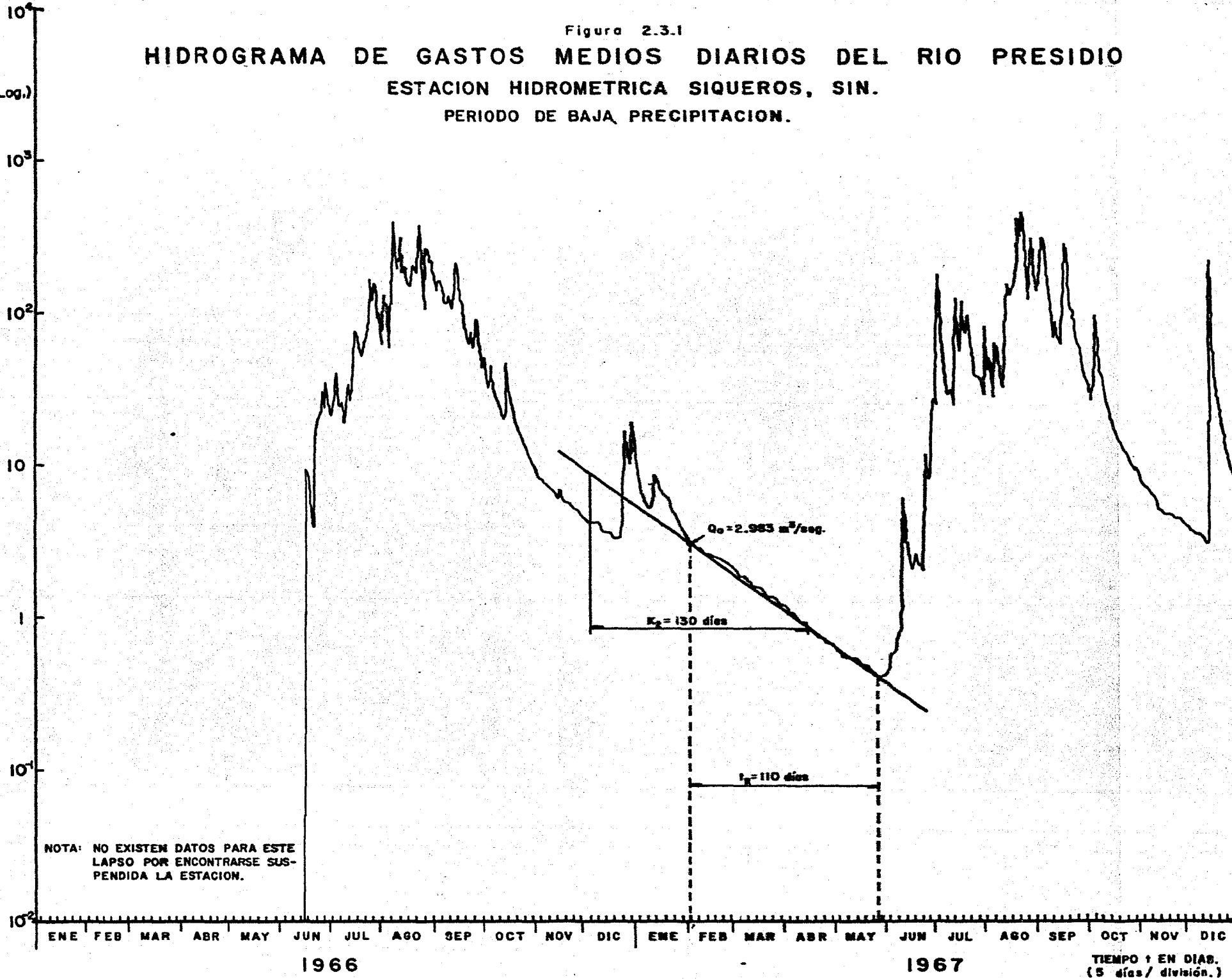
El almacenamiento que tiene lugar en las márgenes del río depende

Figura 2.3.1

HIDROGRAMA DE GASTOS MEDIOS DIARIOS DEL RIO PRESIDIO ESTACION HIDROMETRICA SIQUEROS, SIN. PERIODO DE BAJA PRECIPITACION.

(Esc. Log.)

CAUDAL (Q) en m³/seg.



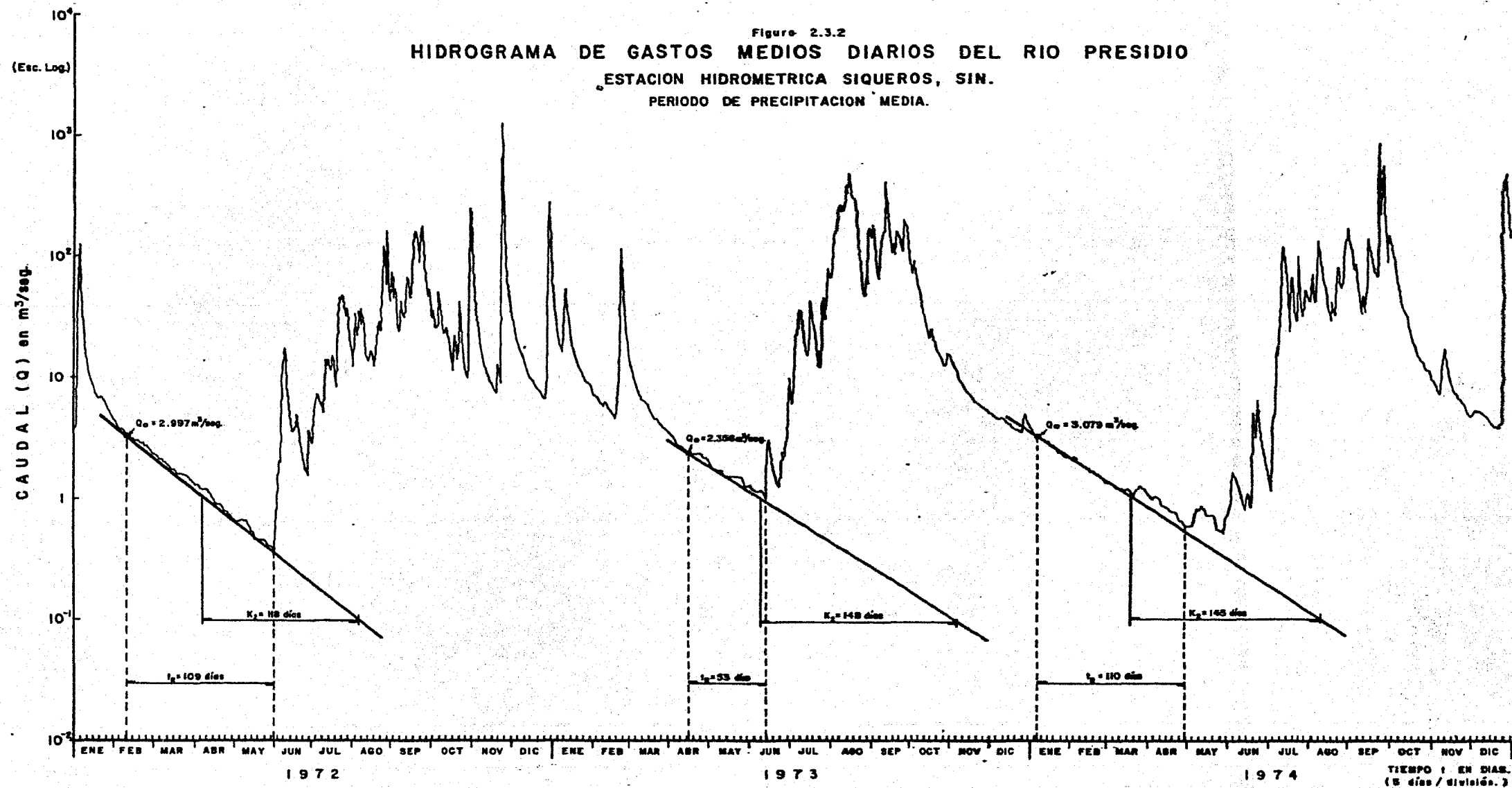


TABLA 2.3.2

RESULTADOS DEL ANALISIS DE HIDROGRAMAS EN LA FASE DE RECESION

CORRIENTE: Río Presidio.

Area de la Cuenca: 6,004 Km².

ESTACION DE AFORO: Siqueros, Sin.

Area Drenada (Est. de Aforo): 5,614 Km².

CARACTERISTICAS DE LA CURVA DE RECESION.	PERIODO DE BAJA PRECIPITACION.				PERIODO DE PRECIPITACION MEDIA.		
	1964	1965	1966	1967	1972	1973	1974
Tiempo de Descarga Total, K_2 (Días).	SUSP.	SUSP.	SUSP.	130	118	148	145
Duración de la Recesión, t_R (Días).	SUSP.	SUSP.	SUSP.	110	109	53	110
Volumen Potencial Total Dis- ponible, V_{tp} (10 ⁶ m ³).	SUSP.	SUSP.	SUSP.	14.6	13.3	13.34	17.0
Volumen de Descarga durante la Recesión, V_d (10 ⁶ m ³).	SUSP.	SUSP.	SUSP.	12.5	11.7	7.45	14.0
Volumen Remanente, V_R (10 ⁶ m ³).	SUSP.	SUSP.	SUSP.	2.1	1.6	5.8	3.0
Recarga entre Periodos de Recesión, R (10 ⁶ m ³).	SUSP.	SUSP.	SUSP.	---	---	11.7	11.0

NOTA: Los aforos en la estación hidrométrica estuvieron suspendidos durante 1964, 1965 y parte de 1966.

fundamentalmente del tipo de material de que estén constituidas, así - como del tiempo que duren los escurrimientos actuando como influentes y saturando dichos materiales.

Del análisis de las curvas de recesión aplicado a los escurrimientos del Río Presidio en la estación hidrométrica Siqueros, se encontró que el Volumen Potencial Disponible, V_{tp} , anotado en la tabla 2.3.2 y definido como el volumen de agua subterránea que podría ser descargado durante toda la recesión si se presentara el agotamiento ininterrumpidamente hasta su totalidad, varía de 13.3 a $17.0 \times 10^6 \text{ m}^3$.

La importancia que guarda tal volumen en relación con el acuífero costero en estudio no es sino restringida, en virtud de que el agua - que pueda almacenar la corriente en sus márgenes aguas arriba de la estación, queda propiamente fuera del valle, que es donde se localiza la mayoría de las captaciones de agua subterráneas, haciéndose nuevamente la aclaración de que posiblemente en su paso aguas abajo de la estación de aforo esté siendo ya aprovechada, sin que pueda determinarse - por extrapolación el posible volumen que se está descargando al mar, - el que para este tipo de análisis es importante conocer con el fin de hacer su intercepción, aprovechándolo mediante extracciones por bombeo.

III GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA.

I Parte.- GEOLOGIA.

Considerando que la Geohidrología se define, en forma breve, como la rama de la Hidrología que trata de la ocurrencia, movimiento y circulación del agua subterránea, se puede afirmar con certeza que la Geología constituye una de las ciencias auxiliares más importantes en que aquélla se apoya.

Es en lo relativo a la exploración del agua subterránea donde la Geología, a través de sus diversas ramas, tiene especial aplicación, - la cual se lleva a cabo mediante reconocimientos de campo. Actualmente, gracias al alto nivel de desarrollo que han alcanzado las técnicas de fotografía aérea, este tipo de reconocimientos, a la vez que aporta resultados satisfactorios, ofrece mayor eficiencia en su cobertura, mayor brevedad en su realización y mayor economía en su costo en comparación con otros métodos de prospección.

La definición de Acuífero, como una unidad geológica que se encuentra saturada de agua y que es capaz de transmitirla o cederla a través de sus espacios intersticiales bajo diferencias pequeñas de carga hidráulica, implica la concurrencia de un par de elementos constitutivos: por una parte, la roca, como elemento portador o matriz, y por otra, el agua; además implica la presencia de dos condiciones determinantes que son la capacidad de almacenamiento y la capacidad de transmisión, las cuales se relacionan respectivamente a los conceptos de Porosidad y Permeabilidad, propiedades inherentes sólo a la matriz rocosa.

Es materia de la Petrografía, que puede definirse como la rama de la Geología que trata del origen, naturaleza y propiedades de las rocas, el clasificar a éstas en función de sus propiedades acuíferas, - permitiendo así limitar la prospección de agua subterránea a aquellas

áreas donde la elección de puntos de explotación puede resultar acertada.

En el cuadro siguiente aparece una clasificación cualitativa acerca de las propiedades acuíferas de algunas rocas:

PROPIEDADES ACUIFERAS DE ALGUNAS ROCAS COMUNES.

P Max.	Max.
E • Gravas bien clasificadas.	• Arcillas blandas.
R • Basalto poroso.	P • Limos y Tobas.
M • Caliza carstificada.	O • Arenas bien clasificadas.
E • Arenas bien clasificadas.	R • Gravas y Arenas mal
A • Gravas y Arenas mal	O • clasificadas.
B clasificadas.	S • Arenisca.
I • Rocas cristalinas	I • Basalto poroso.
L fracturadas.	D • Caliza carstificada.
I • Limos y Tobas.	A • Roca cristalina.
D • Arcillas.	D fracturada.
A • Roca cristalina masiva.	• Roca cristalina masiva.
D Min.	Min.

La Estratigrafía es otra rama de la Geología que tiene especial - ingerencia en la prospección hidrogeológica aplicada a extensas zonas de rocas sedimentarias y volcánicas. Describe el acomodamiento de las diversas capas de roca que han sido depositadas en la parte más superficial de la corteza terrestre y, con apoyo en la Paleontología, señala la edad de formación de éstas. Mediante perfiles estratigráficos, orienta sobre la posición, espesor y continuidad de los horizontes acuíferos y sus capas confinantes.

En conjunción con la Estratigrafía, la Tectónica o Geología Estructural se aplica en la localización de desplazamientos de formaciones acuíferas originados por movimientos tectónicos. Se elaboran estudios estructurales también para la localización de zonas de fracturación en rocas de fácil compacidad. En depósitos no consolidados, el -

desplazamiento vertical de las capas de sedimentos a lo largo de las fallas modifica el movimiento del agua subterránea, por lo que la consideración de este aspecto puede ser indispensable para definir el funcionamiento de este tipo de acuíferos.

La geomorfología es otra de las ramas de la Geología cuya aplicación es esencial en la prospección hidrogeológica, en virtud de que los sedimentos permeables se manifiestan, en mayor o menor grado, de una manera morfológicamente clara.

Sin embargo, a pesar de la gran utilidad que todo reconocimiento geológico puede prestar a la prospección de agua subterránea en un lugar o región determinada, no constituye un método exploratorio en sí, si no se relaciona con las condiciones hidrológicas presentes, puesto que puede ocurrir que regiones geológicamente favorables no lo sean desde el punto de vista hidrológico y viceversa.

En los puntos subsecuentes de esta parte del capítulo se encontrarán expuestos los resultados del reconocimiento geológico aplicado a la cuenca baja del Río Presidio.

3.1 Geología Regional.

En la cuenca baja del Río Presidio existen afloramientos de rocas ígneas, sedimentarias continentales y, en menor proporción, sedimentarias marinas. Con excepción de las rocas sedimentarias continentales, las rocas existentes han sido afectadas por movimientos tectónicos, encontrándose actualmente bajo un intenso proceso de intemperismo y erosión.

Las rocas ígneas aflorantes pueden ser de naturaleza tanto plutónica como volcánica: las primeras consisten en granitos y granodioritas que forman parte de un gran batolito regional cuya edad radiométrica fluctúa entre 40 y 100 millones de años, mientras que las últimas se presentan tanto en derrames lávicos como en brechas y tobas de com-

posición variable formadas durante el periodo terciario.

Por lo que se refiere a las rocas sedimentarias continentales, consisten en conglomerados, areniscas y clásticos de diversos tamaños que forman pies de monte y abanicos aluviales; se tienen también gravas, arenas y arcillas de origen fluvial que forman deltas, bermas y dunas. Estas rocas pertenecen primordialmente al Periodo Cuaternario.

Por otro lado, las rocas sedimentarias marinas datan del Cretácico y se manifiestan por calizas con intercalaciones de margas y lutitas.

Todas estas rocas dan origen a un relieve muy variado: los granitos forman lomeríos, los materiales volcánicos dan origen a las sierras y los depósitos sedimentarios continentales conforman la llanura costera.

3.2 Fisiografía.

Fisiográficamente, la República Mexicana ha sido estudiada por varios autores, entre los que destacan E. Raisz y J. M. Alvarez Jr. por haber precisado divisiones certeras que han sido comúnmente aceptadas.

El área comprendida por el presente trabajo se encuentra ubicada, según la división fisiográfica de Alvarez (1960), dentro de la Provincia de la Llanura Costera de Sinaloa, o bien, de acuerdo al criterio de Raisz, dentro de las Subprovincias de Deltas y Costas de Sinaloa, pertenecientes a la Provincia Fisiográfica de Cordilleras Sepultadas. Ahora bien, la Provincia de la Llanura Costera de Sinaloa tiene forma de cuña, presentando su parte más ancha a la altura de Los Mochis y adelgazándose hacia el sur, rumbo a Mazatlán; guarda una orientación NO-SE y está disectada por grandes ríos que la cruzan transversalmente.

El área objeto del presente estudio está constituida esencialmente por rocas ígneas, entre las cuales se ha abierto paso el río, ero--

sionando y depositando materiales fluviales y terrazas que en general constituyen extensas llanuras.

3.3 Geomorfología.

En el área de estudio se pueden distinguir unidades geomorfológicas consistentes en lomeríos, sierras, mesetas, abanicos aluviales, -cauces fluviales, valles deltaicos, rías, estuarios, lagunas litorales, bermas, manglares, dunas y playas.

- Lomeríos.

En gran parte de la zona se encuentran lomeríos, los cuales se han desarrollado en rocas graníticas y clásticas; presentan formas suaves con alturas máximas de 50 m y son en general de un relieve moderado.

- Sierras.

Las sierras están formadas por rocas volcánicas, presentan pendientes fuertes y formas abruptas e irregulares, localizándose al poniente de la zona y constituyendo las estribaciones de la Sierra Madre Occidental.

- Mesetas.

Las rocas volcánicas que conforman la región en ocasiones presentan sus estructuras primarias poco erosionadas, originando entonces mesetas con leves inclinaciones hacia el poniente y flancos abruptos.

- Abanicos Aluviales.

Entre las partes altas y el valle se han desarrollado algunos abanicos aluviales, los cuales no son de gran importancia puesto que su extensión es reducida y sus formas se confunden con depósitos de talud.

- Cauces Fluviales.

En la zona de estudio solamente se encuentra el cauce del Río Presidio, que cruza la planicie costera en forma prácticamente perpendicular; su cauce llega a medir varios hectómetros de ancho, llegándose a inundar en época de lluvias extraordinarias; en su tercio final -- presenta forma plana y bajo gradiente, ocasionando la divagación del río y la formación de meandros. Se han desarrollado también terrazas

debido a la erosión y depósito que efectúa el río dentro de su cauce.

- Valles Deltaicos.

Hacia ambas márgenes del río se encuentran depósitos deltaicos que conforman un extenso valle. Este tiene forma sensiblemente plana y pendiente suave y sobre él se han desarrollado cierto número de meandros abandonados, los que en ocasiones contienen agua, originando pequeñas lagunas semicirculares de escasa profundidad.

- Rías.

Las rías corresponden a zonas bajas e inundables y se localizan en la desembocadura tanto del río como de los arroyos en el mar o lagunas litorales.

- Estuarios.

El río, al desembocar, da lugar a ensanchamientos en forma de embudo debido a la influencia de las mareas y a las crecientes del mismo.

- Lagunas Litorales.

Las lagunas litorales constituyen rasgos distintivos de la costa de Sinaloa. Son cuerpos de agua aislados del océano por la acumulación de sedimentos terrígenos transportados por los ríos y retrabajados por el mar.

- Bermas.

En la zona costera, fuera de la desembocadura del río, se presenta una serie de bermas o antiguas líneas de costa, las cuales se distinguen mediante el uso de fotografías aéreas, apreciándose franjas alargadas de 50 a 300 m de ancho. En el campo forman leves ondulaciones cuyas partes bajas se encuentran por lo general encharcadas.

- Manglares.

Los manglares son terrenos bajos e inundados cubiertos de vegetación halófila; se localizan a lo largo de los estuarios, esteros y lagunas litorales.

- Dunas.

En las proximidades de la costa se localizan dunas dispuestas en franjas alargadas, su relieve es moderado y presentan una altura variable de 1 a 20 m; algunas de ellas están estabilizadas debido a que se encuentran cubiertas de vegetación; otras, por el contrario, se encuentran desprovistas de vegetación, por lo que se les considera como activas, presentando formas parabólicas y semicirculares.

- Playas.

En la mayor parte de la costa existen playas, las cuales son amplias y de pendiente suave y uniforme.

3.4 Estratigrafía.

La geología base utilizada en el presente trabajo fué tomada del Atlas Geológico Minero del Estado de Sinaloa. Particularizando a la zona en cuestión, en tal obra se distinguen y definen unidades estratigráficas cuyas edades fluctúan del Paleozoico al Reciente (Plano 3.4).

3.4.1 Paleozoico.

- Paleozoico Sedimentario, (Ps). Se designa con este nombre a una secuencia de rocas sedimentarias marinas que presentan un bajo grado de metamorfismo. Entre ellas se encuentran rocas esquistosas, pizarras, cuarcitas y calizas recrystalizadas, las cuales están muy intemperizadas y generalmente cubiertas por una capa de suelo, lo que hace que existan pocos afloramientos de buena calidad. Existen dos tipos principales de rocas: las metasedimentarias, que son las rocas esquistosas propiamente, y las producidas por metamorfismo de contacto, localizadas en las aureolas generadas por los intrusivos que las han afectado. Se ha estimado que esta unidad tiene un espesor de 800 m y aflora principalmente en la costa, hacia el noroeste de la desembocadura del río, aunque tales afloramientos se encuentran diseminados y cubiertos por rocas más nuevas.

- Paleozoico Intrusivo Básico, (Pib). Consiste en rocas plutónicas de composición básica y ultrabásica que se han encontrado intrusionando exclusivamente al Paleozoico sedimentario, por lo cual se han asignado a este mismo periodo. Aflora a 25 Km al norte del Puerto de Mazatlán.

3.4.2 Mesozoico.

- Cretácico, (K). Bajo este título se agrupan rocas esencialmente calcáreas de edad cretácica ya que dentro de esta unidad pueden existir rocas más antiguas, pero, dado el grado de alteración y deformación que presentan, así como sus restringidos afloramientos, su separación es difícil. Se encuentran calizas recristalizadas de color crema y gris, margas, lutitas y arcillas calcáreas, así como calizas arenosas y lodolitas. No presentan estratificación clara y con frecuencia se encuentran muy fracturadas. Sus afloramientos, que se encuentran aislados y prácticamente alineados entre El Mármol, El Quelite y La Noria, es decir, entre los paralelos $23^{\circ}25'$ y $23^{\circ}27'$ de latitud Norte, dan lugar a las partes altas de la zona de lomeríos.

3.4.3 Cenozoico.

Rocas Volcánicas:

- Terciario Inferior Básico, (Tib). Está constituido por derrames lávicos de composición andesítica y areniscas tobáceas, las cuales se encuentran muy alteradas. Generalmente se presenta en forma de lomeríos bajos, ondulantes y fuertemente afallados y fracturados debido a la acción de intrusivos. Su edad no ha sido claramente establecida, sin embargo, mediante observaciones y análisis radiométricos, se cree que pertenece al Terciario Inferior, pero puede remontarse al Cretácico Tardío; se le ha llegado a medir entre 500 y 2000 m de espesor y aflora al oriente del área en estudio.
- Terciario Inferior Volcánico, (Tiv). Está compuesto por lavas y tobas andesíticas, areniscas tobáceas oxidadas, basaltos, dacitas y riolitas con sus respectivas tobas y aglomerados, las cuales se presentan en forma de bloques escarpados, inclinados hacia varias direcciones y generalmente muy erosionados. Se cree que su edad fluctúa entre el Cretácico Tardío y el Terciario Tempranero. Se le han llegado a medir espesores entre 75 y 100 m; aflora en la parte oriente de la zona de estudio.

- Terciario Inferior Acido, (Tia). Está constituido por lavas, tobas, ignimbritas riolíticas y areniscas conglomeráticas que se encuentran alteradas por procesos hidrotermales e intrusionados por diques andesíticos y riolíticos. Sobrayace discordantemente al Terciario Inferior Básico y generalmente se encuentra cubriendo las partes altas de los cerros formando escarpes y cañadas profundas. Se le ha estimado un espesor de 750 m y pertenece al Terciario Inferior Medio, existiendo grandes afloramientos de este tipo de roca en gran parte de la zona.

- Terciario Medio Volcanoclástico, (Tmvc). Bajo este nombre se ha agrupado una serie de areniscas, areniscas tobáceas, conglomerados, aglomerados, tobas y lavas ácidas de las cuales la mayor parte presenta colores rojizo y verdoso y por lo general se encuentran alteradas. Su morfología es irregular, encontrándose tanto relieves angulosos como valles bien desarrollados de pequeño tamaño con un drenaje pinado típico. Descansa discordantemente sobre el Terciario Inferior Acido, llegándose a reportar espesores de 3,500 m, seguramente un poco exagerados dado que las rocas se encuentran afectadas por estructuras como son fallas e inclinaciones. Se le ha considerado del Terciario Medio, es decir, Oligoceno-Mioceno, encontrándose afloramientos aislados de este tipo de material repartidos por toda la región.

- Terciario Superior Acido, (Tsa). Esta unidad está formada por lavas y piroclásticos de composición riolítica, predominando las ignimbritas, las cuales constituyen parte de la Sierra Madre Occidental, principalmente en la zona de mesetas que constituye su parte más alta. Fisiográficamente se distingue de las unidades anteriores por formar grandes mesetas inclinadas ligeramente hacia el poniente. Su contacto inferior es claro y se le ha encontrado yaciendo sobre unidades más antiguas. Por su edad radiométrica, esta unidad ha sido colocada entre la parte superior del Terciario Medio y la inferior del Terciario Superior. Aflora prácticamente en toda la región.

- Terciario Superior Básico, (Tsb). Está compuesta por brechas y derrames lávicos de composición basáltica, andesítica y, en menor proporción, latítica. Debido a que se trata de rocas basálticas jóvenes, se llegan a identificar aparatos volcánicos. En los sitios en los que por erosión las coledas han sido cortadas, se han originado mesetas con bordes abruptos. Descansa discordantemente sobre las rocas volcánicas y volcanoclásticas más antiguas. Su espesor, al igual que el de las otras unidades volcánicas descritas, es muy variable, ya que oscila entre 20 y 120 m. En cuanto a su edad, esta unidad geológica ha sido asignada al Terciario Superior y Cuaternario, aflorando en lugares diseminados por toda el área.

Rocas Sedimentarias:

- Terciario Clástico, (Tc). Está constituido por conglomerados, areniscas, areniscas tobáceas, horizontes delgados de piroclásticos y, en ocasiones, lavas que fueron depositados por procesos fluviales y volcánicos en forma simultánea, dando lugar a zonas bajas o ligeramente onduladas. Estos depósitos fueron controlados por fallas normales y se han reportado espesores entre 1200 y 3500 m. Sobre su edad se conoce poco: se ha correlacionado con la formación Bucarit del Plioceno, aunque en general se considera del Terciario Medio Superior. Aflora principalmente en las márgenes del río, aguas arriba de la planicie costera.
- Cuaternario Pleistoceno Clástico, (Qpc). Consiste en depósitos de pie de monte y abanicos aluviales compuestos por peñascos, matateñas y gujarros de composición variable empaquetados en una matriz arenosa-arcillosa ocasionalmente bien cementada. Origina un relieve de lomeríos de suave pendiente y, dado su origen, su espesor es sumamente variable. En cuanto a su edad, se considera del Pleistoceno por el tipo de relieve que presenta. Sus afloramientos principalmente se extienden hacia los límites entre la planicie costera y las zonas topográficamente altas.

- Cuaternario Pleistoceno Llanura Deltaica, (Qplld). Los grandes ríos que atraviezan el Estado de Sinaloa, entre ellos el Presidio, han dado origen a depósitos deltaicos, de los que los más antiguos se han agrupado dentro de esta unidad, a la cual se consideró del --- Pleistoceno. Su litología está representada por conglomerados, sedimentos arenosos y areno-limosos que presentan una clasificación muy pobre y una estratificación cruzada; también se tienen materiales a arenosos, areno-arcillosos y arcillosos de colores oscuros y con abundante materia orgánica. Forma parte de la llanura costera y presenta un relieve de lomeríos muy suaves que son remanentes de la su perficie preexistente. Esta unidad se encuentra aflorando en ambas márgenes del Río Presidio.
- Cuaternario Reciente Llanura Deltaica, (Qlld). Bajo este título se a grupan a sitios deltaicos originados en épocas recientes por los -- grandes ríos de la región. Están constituidos por conglomerados de cantos ígneos y metamórficos, arenas, limos y arcillas, estos últimos ricos en materia orgánica. Se localizan en las márgenes del río y tienen forma plana, ligeramente inclinada hacia el mar; presentan meandros abandonados que ponen de manifiesto la magnitud de los movimientos laterales del río.
- Cuaternario Reciente Bermas, (Qb). Están formadas por arenas de cuarzo y feldespato de grano fino y medio con fragmentos de conchas. -- Constituyen antiguas líneas de costa y se presentan en forma de lineamientos ondulados, sensiblemente paralelos a la línea actual de costa. En sección transversal, son asimétricas con pendientes pronunciadas en su flanco hacia el mar y pendientes suaves en su flanco hacia el continente.
- Cuaternario Reciente Manglar, (Qm). Están formados por sedimentos saturados y finos (fangos), como limos y arcillas. Fueron depositados en los ambientes de transición, en las regiones hacia el continente de las barreras arenosas, en las zonas bajas protegidas y en las ri as. Se encuentran asociados a bosques de manglar.

- Cuaternario Reciente Dunas Estabilizadas, (Qde). Esta unidad se encuentra formada por arenas bien clasificadas de origen eólico que han sido fijadas por vegetación, o bien, por la acción de aguas circulantes. Se presenta en forma de dunas asimétricas con alturas hasta de 30 m, dentro de las cuales se aprecia estratificación cruzada típica.
- Cuaternario Reciente Llanuras Mixtas de Inundación, (Qllm). Consisten en sedimentos limosos y arcillosos (lodos negros) ricos en materia orgánica, no presentan estructura y se localizan hacia las partes bajas próximas a las desembocaduras de las corrientes superficiales, sujetándose a la acción de las mareas y de las avenidas.
- Cuaternario Reciente Llanuras de Inundación, (Qlli). Con este nombre se designa a los depósitos originados por el río y arroyos actuales dentro de sus cauces de inundación, en donde se encuentran gravas, arenas y arcillas. Las gravas se presentan hacia el lecho de los canales, las arenas en los márgenes de los mismos y hacia la llanura de inundación predominan arenas y arcillas.
- Cuaternario Reciente Dunas Activas, (Qd). Están constituidas por arenas de cuarzo y feldespato de grano medio bien clasificadas y son de origen eólico. Se presentan en forma de cordones más o menos paralelos, los cuales son normales a la dirección del viento. Las dunas son asimétricas y en su superficie presentan ondulaciones secundarias denominadas 'rizaduras'.
- Cuaternario Reciente Playas, (qp). Con este nombre se designa a los sedimentos arenosos de grano fino a medio bien clasificados, de origen marino y compuestos de cuarzo y feldespato. Este tipo de sedimentos se encuentran a lo largo de las costas y son el producto de la acción del oleaje. Las playas existentes en la zona tienen suave pendiente hacia el mar y su ancho varía entre 10 y 40 m, excepto en algunos lugares donde presentan farallones; llegan a tener estratificación delgada y paralela con discordancias angulares.

- Cuaternario Reciente Llanuras de Intermarea, (Qllim). Esta unidad corresponde a las partes bajas, planas e inundables localizadas tie--rra adentro de las lagunas y barreras litorales. Está constituida - por arenas de grano fino y medio, arcillas y ocasionalmente gravas. Prácticamente no contiene materia orgánica y no presenta estructura.

Rocas Intrusivas:

- Intrusivo Acido, (Ia). Esta unidad está determinada por los granitos, granodioritas y monzonitas que forman parte de un gran batolito a--florante en Sonora y Sinaloa cuyos límites no han sido aún defini--dos. Las rocas graníticas son las que más fácilmente se erosionan, lo cual ha permitido el desarrollo de valles más o menos planos con ligeras ondulaciones. Parte de este batolito se encuentra intemper--zado, originando una cubierta de material predominantemente arenoso denominado Tucuruquay y dando lugar a relieves más abruptos en los sitios donde se encuentra fresco. Estas rocas han sido datadas por los métodos de potasio-argón y zircón, determinándose que pertene--cen a dos periodos magmáticos, uno de una edad de 40 millones de a--ños y el otro de una edad más antigua, entre 75 y 100 millones de a--ños; esto quiere decir que pertenecen al Terciario Inferior y al --Cretácico Medio, respectivamente. Sus afloramientos son muy amplios y se encuentran prácticamente en toda el área.
- Intrusivo Básico, (Ib). Consiste en rocas intrusivas que forman cuer--pos menores y diques de composición andesítica dispersamente aflo--rantes en la zona; su cartografía es de difícil elaboración por tra--tarse de cuerpos locales. Son los intrusivos más jóvenes puesto que se encuentran cortando a las rocas volcánicas del Terciario.

3.5 Tectónica.

Los principales rasgos tectónicos observados en la zona de estu--dio corresponden a estructuras tales como plegamientos, fallas y frac--

turas.

Los plegamientos se observan principalmente en las rocas más antiguas, que son las del Paleozoico y Mesozoico. En las rocas mesozoicas las deformaciones son incipientes, mientras que en las paleozoicas presentan intensidades media y alta, produciendo plegamientos anticlinales y sinclinales.

Las rocas volcánicas terciarias presentan también deformaciones originadas por la acción de intrusivos que ocasionalmente han dado lugar a estructuras dómicas. En general, las mayores deformaciones se sucedieron en los periodos más antiguos, reduciendo su intensidad mientras el tiempo avanzaba.

Por lo que respecta a las fallas y fracturas, éstas se han asignado al Terciario y, ocasionalmente, al Cuaternario, pudiéndose apreciar tres sistemas dominantes: uno, con orientación N-NW; otro, que consta de fallas en ángulo recto, guarda orientación NE-NW, y el último, también formado por fallas y fracturas en ángulo recto, con orientación EW-NS. La actitud del primer sistema es paralela a la línea de costa y a menudo consiste en contactos geológicos entre dos tipos de rocas diferentes.

3.6 Geología Histórica.

Durante el Paleozoico se depositaron sedimentos en cuencas marinas, los cuales fueron plegados, afallados e intrusionados. Posteriormente, durante el Mesozoico, se emplazaron algunos derrames lávicos y se formaron rocas carbonatadas marinas, todo lo cual presenta evidencias de metamorfismo de bajo grado. Más tarde, durante el principio del Cenozoico, se inicia una fase magmática expresada por la extrusión de rocas andesíticas, principalmente, a través de fisuras y la formación de pequeños cuerpos de rocas sedimentarias. Esta actividad volcánica se interrumpió por periodos de erosión que dieron origen a la -

formación de conglomerados, la mayor parte de ellos con matriz tobácea. Sobre estas rocas se emplazan lavas ácidas, principalmente riolitas, - ignimbritas, tobas y areniscas conglomeráticas. El siguiente evento co rrespondió a intrusiones de cuerpos graníticos y, posteriormente, a a fallamientos originados por el enfriamiento de intrusivos. En el Ter-- ciario Medio, la región se encontró sujeta a los efectos de erosión e intemperismo, produciendo depósitos de tipo continental con esporádi-- cas extravasaciones volcánicas. Durante el Plioceno y el Pleistoceno - existió actividad volcánica representada por lavas basálticas, las cua les fueron eyectadas a través de aparatos volcánicos. Simultáneamente y continuando hasta el Reciente, los procesos fluviales dan origen a - la llanura costera, la cual se formó por deltas contruidos de sedimen tos terrígenos aportados por los ríos. La acumulación de sedimentos -- fluviales retrabajados por el oleaje, las mareas y las corrientes lito -- rales, originaron estructuras costeras diversas, dando por resultado - el paisaje actual.

II Parte.- HIDROGEOLOGIA.

La Hidrogeología es la parte de la Geología que estudia las diversas unidades y formaciones de las rocas desde el punto de vista de sus propiedades de Porosidad y Permeabilidad*, o más bien, desde el punto de vista de su capacidad para formar acuíferos; constituye un instru--mento de indudable valor en la prospección de agua subterránea, al o--rientar la selección de sitios de emplazamiento de captaciones.

Virtualmente, el agua subterránea puede ocurrir en toda la diversidad de rocas existentes, de modo que un acuífero puede presentarse - en cualquiera de los tres tipos principales de rocas que la Geología - clasifica: ígneas, sedimentarias y metamórficas; en gran medida, el he--cho anterior constituye un factor característico de la naturaleza de - un acuífero determinado y es, a la vez, un factor determinante de su - funcionamiento hidráulico.

El Agua Subterránea en las Rocas Ígneas y Metamórficas.

Las rocas metamórficas comunes, como la pizarra, el esquisto y la filita, y las rocas ígneas intrusivas más frecuentes, como el granito, la diorita y el gabro, suelen llegar a constituir acuíferos de natura--leza idéntica, aunque generalmente de capacidad muy limitada.

Las formaciones geológicas en este tipo de rocas, cuando no se en--cuentran alteradas, presentan siempre una porosidad inferior al 3% y - por lo general casi siempre inferior al 1%. Los escasos poros existen--tes son muy pequeños y por lo general no se encuentran conectados en--tre sí; consecuentemente, su permeabilidad es tan baja que puede ser - considerada como prácticamente nula. Sin embargo, a través de las zo--nas fracturadas o alteradas pueden desarrollarse porosidad y permeabi--lidad considerables.

* Los conceptos de Porosidad y Permeabilidad se encuentran detallada--mente expuestos con posterioridad (Cap. V Hidrología Subterránea).

Los caudales que proporcionan los pozos perforados en este tipo de materiales permiten suponer que la permeabilidad ocasionada por la fracturación de rocas no alteradas varía, en función de la profundidad, entre 10^{-3} y 10 m/día. Microscópicamente, la permeabilidad varía entre cerca de cero, en el caso de las rocas compactas, y varios cientos de metros diarios, en el caso de rocas extraordinariamente alteradas. La permeabilidad global de estas rocas, consideradas en grandes volúmenes, es altamente anisotrópica, debido a la diferencia en la orientación de las fracturas que contienen el agua.

En las regiones sometidas a una fuerte meteorización, los efectos debidos a los agentes erosivos pueden extenderse a profundidades superiores a 100 m; sin embargo, las profundidades más frecuentes hasta las que los efectos son prácticamente apreciables, varían entre 2 y 15 m. La alteración superficial de la roca puede dar lugar a formaciones muy sueltas que alcanzan porosidades superiores al 35% ; por tal motivo, la porosidad suele disminuir muy considerablemente con la profundidad, hasta alcanzar zonas en las que la alteración de las rocas deja de ser apreciable, siendo la porosidad prácticamente nula.

Generalmente, los caudales de explotación que se obtienen de captaciones en estos tipos de roca son, más bien, reducidos, en tal forma que, aún en rocas muy alteradas y bajo condiciones favorables de recarga, son frecuentemente menores a 4 lps, razón por la cual se considera que desde el punto de vista práctico la capacidad acuífera de estas formaciones se encuentra altamente restringida.

En lo que se refiere al grupo de las rocas ígneas extrusivas, las propiedades hidrogeológicas en este tipo de formaciones pueden ser muy diferentes, ya que mientras algunos acuíferos en terrenos basálticos recientes poseen las más altas transmisibilidades conocidas, otros, tales como los contenidos en tobas volcánicas, aunque generalmente poseen porosidades elevadas, tienen permeabilidades muy bajas, o como los que corresponden a diques volcánicos, en los que tanto la porosidad como la permeabilidad son muy bajas.

Aunque la transmisibilidad de algunos basaltos y andesitas suele ser muy elevada, puede ser que la explotación del agua subterránea de sus acuíferos presente grandes dificultades, debido al hecho de que ésta, al fluir libremente hacia los puntos naturales de descarga, puede en muchos casos encontrarse a profundidades demasiado grandes, o incluso, puede llegar a no existir ni siquiera una zona permanente de saturación, por lo que la prospección hidrogeológica en este tipo de terrenos suele estar orientada hacia la búsqueda y localización de niveles y estructuras impermeables que impidan la salida rápida del agua infiltrada en el terreno.

Aunque la porosidad de las rocas ígneas extrusivas pueda ser muy grande, su permeabilidad presenta variaciones muy fuertes de una formación a otra, siempre en función de la disposición estructural del conjunto geológico más que de su propia naturaleza litológica. Entre los principales factores que proporcionan a la andesita y a los basaltos recientes su elevada permeabilidad, se pueden contar las diaclasas originadas por enfriamiento, los túneles de lava, las pequeñas burbujas interconectadas y las grietas originadas por la resistencia a la deformación plástica de las corrientes de lava parcialmente solidificadas. Por otro lado, existe una serie de factores que afectan directamente a la porosidad, como son los efectos de la descomposición y alteración de las rocas por los agentes erosivos.

Las lavas ricas en sílice, como la riolita y la dacita, son más viscosas que las basálticas y andesíticas y tienden a ser expulsadas en forma de flujos más espesos, muy poco fluidos y compactos, o incluso, más comúnmente en forma de piroclastos. La porosidad y la permeabilidad del material piroclástico se relacionan directamente con el tamaño de los clastos, con la uniformidad de su tamaño y con su grado de cementación, de modo que cuando una formación piroclástica se encuentra mal graduada y existe al mismo tiempo abundante material fino, ocurre que aún manteniéndose elevada la porosidad, la permeabilidad es más bien baja.

Tanto la porosidad como la permeabilidad en las rocas ígneas extrusivas tienden a decrecer con el tiempo geológico. Parte de esta disminución se debe a la compactación de las rocas; sin embargo, el relleno de los espacios huecos mediante minerales secundarios parece ser la causa más importante.

El Agua Subterránea en las Rocas Sedimentarias.

Las rocas sedimentarias revisten especial importancia en cuanto al estudio, prospección y explotación del agua subterránea, ya que además de estar ampliamente distribuidas y poseer propiedades acuíferas - excelentes, contienen un porcentaje muy elevado del agua subterránea - existente en los estratos superficiales de la corteza terrestre.

Aunque existe una gran variedad de rocas sedimentarias en cuanto a su composición y origen, se suelen clasificar en formaciones duras o consolidadas y suaves o de materiales no consolidados; entre las rocas consolidadas o cementadas más comunes se cuentan las lutitas, las areniscas, las calizas y las dolomías y entre las no consolidadas destacan los aluviones, el loess y los acarreos glaciares, presentando cada uno de estos tipos de formaciones rocosas tanto propiedades hidrogeológicas como características de funcionamiento hidráulico muy particulares.

Por lo general, las rocas detríticas de grano fino, como las lutitas y las limolitas, poseen porosidades relativamente elevadas, pero - sus permeabilidades son sumamente bajas, por lo que generalmente no forman acuíferos, sino que por el contrario, constituyen barreras confinantes al movimiento del agua. Debido a su gran capacidad de almacenamiento, pueden constituirse en fuentes importantes de recarga, al ceder a través de sus poros cantidades significativas de agua hacia los acuíferos contiguos de material grueso, cuando en ellas se inducen diferencias notables de presión en zonas de explotación intensiva, provocando a su vez compactaciones en sí mismas y asentamientos en el terreno. Cabe señalar que el proceso natural de compactación debido al peso

del material suprayacente no suele aportar a los acuíferos contiguos - cantidades importantes de agua a causa de la lentitud con que se verifica el proceso en sí.

La porosidad de los sedimentos de grano fino decrece con la profundidad a que se encuentran y hasta cierto punto con su edad geológica, aunque se ha comprobado que esto no es del todo preciso ni cierto.

En las areniscas la porosidad es inferior a la de los sedimentos de grano fino y varía comúnmente entre 5 y 30%; la relación de vacíos en una muestra de arenisca es función de la clasificación más o menos homogénea de los granos que la componen, de la forma geométrica de éstos, del tipo de empaquetado y del tipo y grado de cementación, siendo este último factor el de mayor peso. Entre los cementantes más comunes de las areniscas se pueden contar las arcillas, la calcita, la dolomita y el cuarzo. Por otra parte, la permeabilidad suele ser del orden - de 0.001 a 0.5 m/día, dependiendo de su grado de cementación y de su - grado de fracturación: las areniscas parcialmente cementadas, así como las fracturadas, suelen constituir por lo general buenos acuíferos.

Un tipo de acuífero muy especial lo constituyen la caliza y la dolomía, las dos rocas carbonatadas más corrientes, debido a sus propiedades de composición química; estas rocas se originan a partir de una gran variedad de materiales sedimentarios, tales como barros y arenas calcáreas, fragmentos de conchas, masas arrecifales y restos de organismos planctónicos.

Tanto en las calizas como en las dolomías, la porosidad primaria es relativamente alta cuando se trata de formaciones recientes; sin embargo, la permeabilidad suele ser generalmente baja. En el caso de rocas carbonatadas antiguas, aunque pudiéndose haber conservado en ellas una cierta porosidad primaria, puesto que ésta tiende a decrecer con - el tiempo geológico, existen de todas formas otros tipos de porosidad secundaria más importantes desde el punto de vista de la explotación - de las aguas subterráneas. Probablemente, la mayor transmisibilidad de

todas ellas se deba a la presencia de fracturas y grietas en continuo proceso de ensanchamiento por efecto de la disolución por parte del agua a lo largo de los planos de estratificación y zonas de porosidad primaria.

La permeabilidad de las rocas carbonatadas puede variar desde alrededor de 1 mm/día, en el caso de calizas compactas y ricas en minerales de arcilla, hasta varios miles de metros por día, en el caso de brechas calcáreas apenas cementadas. Las rocas carbonatadas provistas de extensos canales o fracturas de disolución (carstificadas) poseen, evidentemente, importantes permeabilidades que son altamente anisotrópicas, lo que dificulta en gran medida el estudio del flujo del agua a través de sí mismas.

Generalmente, la prospección de las aguas subterráneas empieza por el reconocimiento de formaciones geológicas de material no consolidado. Las razones en las que se funda esta preferencia son varias y consisten básicamente en : 1) la mayor facilidad con que se excavan o perforan los pozos; 2) la mayor proximidad de los niveles freáticos a la superficie de los valles que conforman, permitiendo cargas mínimas de bombeo; 3) la existencia de condiciones más favorables para la recarga a partir de lagos y ríos, y 4) la posesión de coeficientes de almacenamiento superiores y permeabilidades más elevadas a las de los restantes materiales geológicos, excepción hecha, para el caso de la permeabilidad, de algunas formaciones de rocas volcánicas recientes y de algunas formaciones de calizas carstificadas.

De acuerdo a su origen, los sedimentos no consolidados pueden corresponder por lo común a aluviones, tills, depósitos glaciares, arenas de duna, depósitos de playa, loess y depósitos lacustres. La porosidad en los depósitos no consolidados varía desde un mínimo aproximado de 20%, en el caso de aluviones gruesos mal clasificados, hasta un 90%, en el caso de fangos y material orgánico desecado; sin embargo, los valores más frecuentes se encuentran comprendidos entre 25 y 65%. En contraste con los valores relativamente uniformes de la porosidad,

la permeabilidad en este tipo de materiales puede oscilar entre una gama de valores muy dispersa: desde menos de 1 mm/día hasta alrededor de 1000 m/día; pero, a pesar de esta amplia gama de variabilidad, es posible tener idea sobre el orden de magnitud a partir del conocimiento del origen geológico de los sedimentos. Tanto la porosidad como la permeabilidad en los depósitos de material no consolidado, dependen de la forma geométrica y de empaquetado de los granos y de su clasificación granulométrica.

3.7 Hidrogeología de la Zona.

En la zona de estudio afloran, desde el punto de vista práctico, rocas tanto permeables como impermeables. Las impermeables corresponden a materiales volcánicos, rocas intrusivas y sedimentos marinos. Las rocas permeables consisten en materiales clásticos continentales, en su mayor parte de origen fluvial, los cuales presentan una permeabilidad variable dependiendo de su textura y clasificación.

Las diferentes unidades geológicas aflorantes fueron clasificadas de acuerdo a su comportamiento hidrogeológico en tres grandes grupos - (Plano 3.7): rocas permeables, las cuales se señalaron con el símbolo 'U1'; rocas poco permeables, marcadas con el símbolo 'U2', y rocas impermeables, las cuales se designaron con el símbolo 'U3'.

En el plano mencionado se marcaron con línea continua los contactos geológicos entre unidades de roca que presentan las mismas características hidrogeológicas; con línea punteada se separaron las zonas -- que difieren tanto geológica como hidrogeológicamente. En el proceso de diferenciación de unidades se respetó el criterio utilizado por el Instituto de Geología de la UNAM (8), habiéndose aumentado el criterio hidrogeológico de acuerdo a los símbolos señalados en el párrafo anterior. Se hace notar que los contactos entre unidades de diferente permeabilidad corresponden a contactos geológicos. A continuación se describen las unidades hidrogeológicas incluidas en el plano 3.7, empezando

do por las de mayor permeabilidad.

- Llanura de inundación, Ql11.-Esta unidad consiste en materiales arenosos y areno-arcillosos de origen fluvial; constituye los lechos y valles de inundación del río y los arroyos. En la parte del río, el material constitutivo se encuentra suelto y presenta buena permeabilidad, principalmente cerca del cauce. Su explotación acuífera actual es baja, debido a que en temporadas extraordinarias de lluvia la zona que ocupan se inunda. En los arroyos secundarios presentan buena permeabilidad, pero se localizan en angostos valles y tienen espesores pobres, por lo cual su importancia geohidrológica es reducida. Esta unidad se señaló con la clave U1.
- Llanura deltaica, Ql1d.-Esta unidad está formada principalmente por arenas y arcillas de origen fluvial depositadas por el río al divergir en la planicie costera antes de desembocar al mar. Sus características texturales y de clasificación son variables, pero en la mayoría de los casos permiten el almacenamiento y el flujo del agua, constituyendo el acuífero de mayor potencialidad en la región. Se designó hidrogeológicamente como U1.
- Playas, Qp.-Se localizan en la mayor parte de la línea de costa; están formadas por arenas de grano fino bien clasificadas y presentan buena permeabilidad, pero se encuentran en contacto con el agua de mar por lo que su explotación es restringida. Se marcaron con el símbolo U1.
- Barmes, Qb.-Son antiguas líneas de costa formadas por arenas de grano fino y medio. Presentan buena permeabilidad, por lo que se señalaron con el símbolo U1. La explotación de volúmenes apreciables de agua dulce en esta unidad queda restringida por su cercanía al mar, puesto que es factible provocar intrusiones de agua salina. Sus mayores afloramientos se localizan en la proximidad de la línea de costa.

- Dunas estabilizadas, Qde.-Están formadas por arenas de grano medio y fino bien clasificadas, depositadas por procesos eólicos. Se encuentran cubiertas por vegetación que las ha estabilizado. Presentan buena permeabilidad por lo que se señalaron con el símbolo U1 en el plano hidrogeológico. Como acuífero dentro de la zona es de poca importancia, ya que sus afloramientos son reducidos y en ocasiones se encuentran en contacto con agua de mar.
- Manglar, Qm.-Cerca de la costa y lagunas litorales se encuentran limos y arcillas saturados (fango) donde se han desarrollado bosques de manglar. Por lo general presentan poca permeabilidad y contienen agua salobre, por lo que su explotación acuífera se considera poco conveniente. Se incluyeron dentro del grupo señalado con el símbolo U2.
- Llanuras de inundación mixtas, Qllm y Qllim.-Corresponden a zonas inundables tanto por crecientes del río como por la acción de las mareas. Se localizan en la proximidad de la línea de costa. Están compuestas por materiales arcillo-arenosos de baja permeabilidad, por lo que se marcaron con el símbolo U2.
- Depósitos de talud y abanicos aluviales, Qpc.-Hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas se tienen depósitos de pie de monte y abanicos aluviales compuestos por areniscas cementadas, así como por gravas y arenas poco consolidadas; dado su origen, presentan una mala clasificación. Su permeabilidad varía de baja a nula, dependiendo del contenido arcilloso y grado de compactación. Se incluyeron dentro del grupo hidrogeológico designado como U2.
- Antiguas llanuras deltaicas, Qplld.-En el valle del Presidio se encuentran depósitos fluviales originados por el río, los cuales son más antiguos a los descritos como Qlld. Están constituidos por arcillas, arenas y gravas poco consolidadas y presentan de baja a nula permeabilidad, incluyéndose dentro del grupo representado por U2.

- Clásticos, Tc.-Consisten en conglomerados, areniscas y areniscas tobáceas que en la mayoría de los casos se encuentran compactados, impidiendo la circulación del agua subterránea, por lo que se consideraron como impermeables y se señalaron con el índice U3.
- Rocas volcánicas, Tsb-Tia-Tiv-Tmcv-Tib.-La mayor parte de las sierras y elevaciones topográficas que circundan al valle están constituidas por rocas volcánicas, que por la semejanza que guardan entre sí en cuanto a características hidrogeológicas, se agruparon bajo el título de rocas volcánicas. Dentro de este paquete se encuentran, entre otras, ignimbritas, riolitas, andesitas, tobas y rocas híbridas, las cuales se presentan casi siempre alteradas y deformadas. Se comportan como impermeables al flujo del agua, habiéndose señalado con el índice U3.
- Rocas intrusivas, Ia.-Consisten en granitos, granodioritas, monzonitas y tonalitas que afloran extensamente en la región. Por su litología no permiten la circulación del agua subterránea, por lo que se consideraron como impermeables y se representaron con el índice U3. Estas rocas dan origen a acumulaciones de arenas producidas por el intemperismo de su parte superficial a las que se denomina Tucuruquay. Estas arenas presentan de regular a buena permeabilidad, pero su reducido espesor y extensión no permiten la formación de alcantaramientos importantes de agua subterránea.

IV H I D R O G E O Q U I M I C A .

La Hidrogeoquímica es la ciencia auxiliar de la Geohidrología que trata de la composición química del agua subterránea y de su relación con las rocas a través de las que circula. Ayuda a determinar en forma integral el funcionamiento de los acuíferos, permitiendo planear su explotación particularmente desde el punto de vista de calidad del agua, que es casi tan importante como su cantidad.

El agua subterránea no es químicamente pura, sino que contiene sales en solución que se derivan de la localización y movimiento anterior del agua y determinan en gran parte su calidad. Los requerimientos en cuanto a calidad de agua que debe cubrir un abastecimiento dependen de su propósito: uso doméstico, uso industrial, riego, abrevadero, etc.; más aún, suelen depender de aplicaciones más específicas, como cuando se trata de agua potable (apta para beber), procesos industriales, enfriamiento, ciertos géneros de cultivo, etc. Por consiguiente, el establecimiento de criterios de calidad requiera de la especificación de mediciones de componentes o parámetros físicos, químicos, biológicos y radiológicos, así como de métodos de análisis de agua.

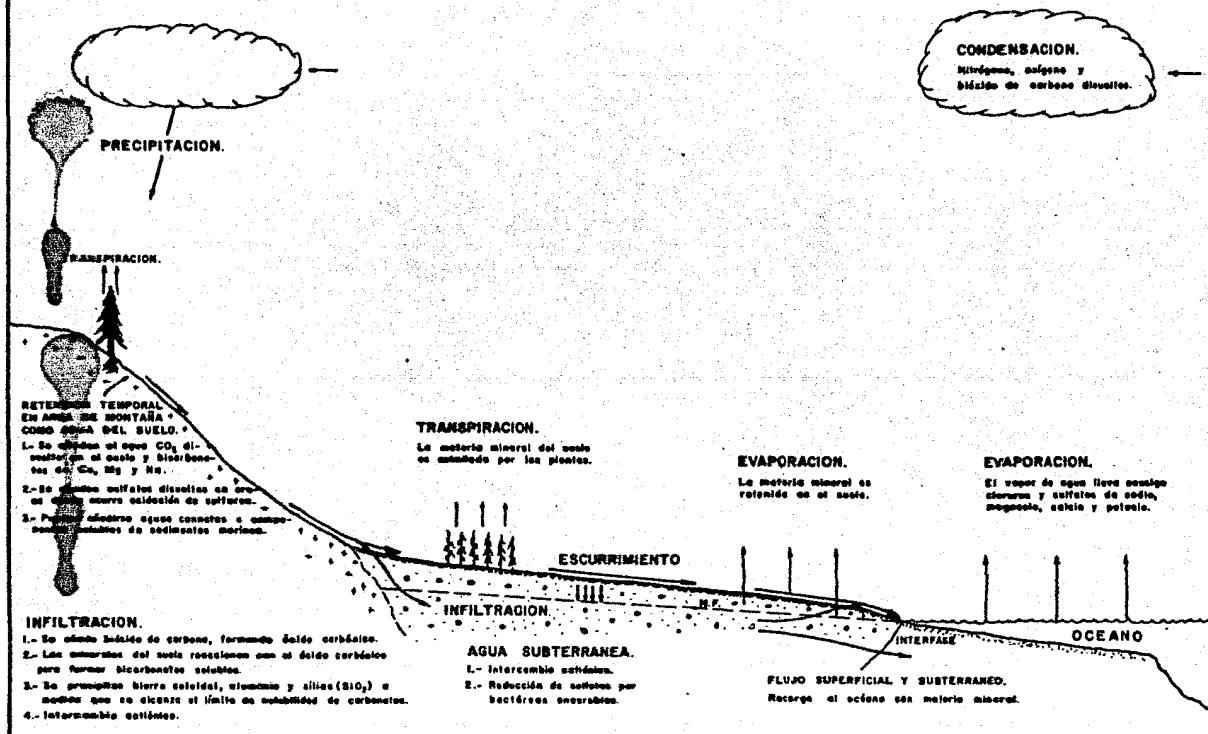
El agua de precipitación que alcanza el suelo contiene sólo pequeñas cantidades de materia mineral disuelta. Una vez en tierra, el agua reacciona con los minerales del suelo y de las rocas que se encuentran en contacto con ella. Los contenidos de sales disueltas reportados en el agua subterránea fluctúan desde 25 mg/l para manantiales en cuarzita hasta más de 300,000 mg/l en salmueras. La concentración de materia mineral disuelta, o salinidad, varía con la superficie específica de los materiales del acuífero, la solubilidad de los minerales y el tiempo de contacto. El tipo y cantidad de materia mineral disuelta depende de la composición química y estructura física de las rocas tanto como de la concentración del ión Hidrógeno (pH) y del potencial de óxido-reducción (Eh) del agua. Por lo regular, las concentraciones de sales disueltas son mayores en las aguas subterráneas que en las aguas superfi

ciales debido a la mayor exposición de materiales solubles en estratos geológicos. Los valores de salinidad tienden a ser máximos donde el movimiento del agua subterránea es mínimo, de ahí que la salinidad generalmente se incrementa con la profundidad. Una secuencia geoquímica común en las aguas subterráneas incluye aguas bicarbonatadas cerca de la superficie del suelo, variando a aguas cloruradas en las partes más profundas de las formaciones. El bicarbonato, regularmente el anión primario en el agua subterránea, se deriva del bióxido de carbono atmosférico y del que se libera por descomposición orgánica en el suelo.

En áreas de recarga por infiltración abundante, la calidad del agua superficial puede tener un efecto marcado en la calidad del agua subterránea. En zonas acuíferas afectadas por actividad magmática, los gases absorbidos suelen incorporar productos minerales disueltos al agua subterránea, como es el caso de los manantiales termales mineralizados. De manera similar, el agua connata se encuentra por lo regular altamente mineralizada debido a que se deriva de agua originalmente atrapada en estratos sedimentarios desde su depositación. Una fuente circunstancial de salinidad que llega a afectar la calidad del agua subterránea la constituye el agua de riego que se percola hacia la zona de saturación; el agua que pasa a través de la zona de raíces en áreas cultivadas, frecuentemente contiene concentraciones de sales varias veces mayores a las que tiene el agua de riego al ser aplicada, incrementos que resultan del proceso de evapotranspiración, el cual tiende a concentrar sales en aguas de drenaje; en suma, materiales solubles del suelo, fertilizantes y absorción selectiva de minerales por parte de las plantas modifican la concentración de sales en el agua que se filtra, en función de factores tales como permeabilidad del suelo, lámina de riego, facilidad de drenaje, cultivo y clima. Otra importante fuente de salinidad del agua subterránea en regiones costeras es el transporte por parte del viento de sales que se originan en la interfase marina agua-aire.

El esquema que presenta la figura 4.a ilustra el ciclo geoquímico del agua, enunciando los principales cambios químicos que ocurren a -

Figura 4.a
GEOQUIMICA DEL AGUA EN EL CICLO HIDROLOGICO.



través de las fases del ciclo hidrológico. Durante la precipitación, - el agua incorpora a sí bióxido de carbono, formando ácido carbónico, - el cual tiene gran poder de disolución y constituye el principal agente de ataque sobre los minerales de las rocas. Por su parte, el agua - de las corrientes superficiales, al tener contacto con los materiales que forman los cauces, así como con los fragmentos de roca transportados por ella, los ataca y disuelve, adquiriendo una composición química de naturaleza similar a tales materiales; sin embargo, la concentración de sales suele ser generalmente baja. Por el contrario, el agua - contenida en los océanos se caracteriza por tener elevadas concentra--ciones de sales disueltas. Estas sales son el producto de la erosión - química efectuada por el agua a través del ciclo hidrológico desde la formación de La Tierra.

Casi todas las aguas subterráneas procedentes de rocas ígneas poseen una excelente calidad debido a la relativa insolubilidad de los - minerales constitutivos. Estas aguas suelen ser cálcico-magnésico-bi--carbonatadas cuando la basicidad predomina en la roca y sódico-bicarbo--natadas cuando la acidez es predominante; en ambos casos el agua pre--senta concentraciones de óxido de silicio relativamente elevadas debido a la abundancia de minerales silicatados en la roca. Las aguas de - mala calidad en este tipo de rocas suelen estar asociadas a fenómenos de termalismo; en estos casos, el agua presenta por lo regular elevado contenido de iones de sodio y cloro.

Las rocas sedimentarias son ordinariamente más solubles que las - rocas ígneas. Su elevada solubilidad, combinada con su gran abundancia en la corteza terrestre, permiten suministrar al agua subterránea una porción mayor de componentes solubles. El sodio y el calcio son los cationes comúnmente añadidos y el carbonato y el sulfato los aniones co--rrespondientes. El cloruro ocurre sólo a un alcance limitado bajo condiciones normales; el nitrato es ocasionalmente un componente natural importante.

Por lo que respecta a las rocas sedimentarias consolidadas, gene--

ralmente existen diferencias muy marcadas en la calidad química de las aguas subterráneas que tienen contacto con ellas. Las aguas procedentes de arcillas contienen por lo común cantidades mayores de hierro y flúor y presentan valores bajos del pH. Las aguas que proceden de calizas poseen porcentajes bajos de contenido de sílice, cantidades significativas de calcio y magnesio, así como valores del pH arriba de 7.0. La calidad química de las aguas procedentes de areniscas es variable - según el tipo de terreno acuífero y la composición mineralógica de los granos y del material cementante.

La calidad química del agua en la mayoría de los depósitos no consolidados suele ser buena. A excepción de las regiones desérticas y de las zonas de intensa explotación, el agua subterránea en las formaciones aluviales procede de la recarga local a través del mismo suelo del valle y de las aportaciones de ríos y acuíferos de valles tributarios. La composición química de estas aguas suele encontrarse determinada - por el tipo de vegetación local, por la naturaleza mineralógica de las rocas que forman las laderas del valle y de los sedimentos que rellenan su fondo y por las condiciones químicas del agua al iniciar la infiltración. En el caso de depósitos de llanuras costeras, las dunas activas están por lo general compuestas por minerales limpios y relativamente inertes que causan sólo modificaciones menores en la composición química del agua infiltrada; como consecuencia, la mayor parte de las aguas procedentes de dunas es de buena calidad, excepto en los lugares donde aguas con alta concentración de sales pueden introducirse a estas formaciones.

En fin, la composición química del agua subterránea constituye un elemento auxiliar muy valioso en la inferencia del funcionamiento general de los acuíferos. Mediante su estudio es posible determinar o confirmar la dirección del flujo y la localización de zonas de recarga, a parte de precisar, aunque parcialmente, su aptitud respecto a la diversidad de usos a los que por lo regular suele destinarse.

Muestreo.

La forma de efectuar estudios de hidrogeoquímica consiste en recolectar muestras de agua en varios puntos de la zona acuífera y analizarlas químicamente con objeto de observar el comportamiento y distribución de su calidad, así como inferir su relación con las condiciones geológicas regionales y el funcionamiento hidráulico del sistema acuífero en estudio.

Con objeto de evitar al máximo deficiencias debidas al proceso de muestreo que pudieran reflejar el carácter químico del agua de una manera infiel, conviene seguir las recomendaciones y cuidados siguientes: 1) El muestreo debe ser representativo de toda el área de estudio, por lo que el número y distribución de los puntos de muestreo deben escogerse en forma tal que la información por obtener sea suficiente para llegar a conclusiones confiables. 2) Con el fin de que las muestras recolectadas sean realmente representativas y que la información necesaria para una correcta interpretación no se pierda, debe cuidarse que a) el recipiente donde se coloque la muestra se enjuague con el agua de la fuente antes de proceder al muestreo, b) el volumen de la muestra sea en cantidad suficiente para efectuar el análisis químico deseado y c) en el caso en que la fuente por muestrear sea un pozo, se requiere que hasta el momento de tomar la muestra, haya transcurrido un tiempo mínimo de dos horas desde el inicio del bombeo, para garantizar que la muestra represente auténticamente el agua del acuífero en el sitio de muestreo. 3) Las determinaciones del pH y la temperatura deben realizarse inmediatamente después de tomar la muestra, evitando con ello que los registros se vean afectados por las variaciones que los valores de tales parámetros experimentan con el tiempo. 4) Se requiere llevar un registro de cada muestra recolectada, la que para su identificación debe ser debidamente etiquetada con los datos pertinentes (fecha, hora, clave del punto de muestreo, pH, temperatura, etc.). 5) Las estaciones de muestreo deben ser fácilmente identificables en campo mediante claves inscritas al pie de la fuente y localizables en gabinete mediante el empleo de planos elaborados para tal fin. 6) Las muestras obtenidas deben ser enviadas inmediatamente al laboratorio para su análisis, con lo cual se evitarán al máximo variaciones en la calidad, -

propiciadas por tener el contenido de la muestra fuera de su medio ambiente original.

Análisis Químicos.

El análisis del agua subterránea tiene por objeto especificar las características de su calidad en los aspectos físico, químico y biológico. El análisis químico de una muestra de agua incluye la determinación de las concentraciones de los componentes inorgánicos presentes, los cuales ocurren generalmente como iones disociados. El análisis también incluye la medición del pH y de la conductividad eléctrica. Se han establecido procedimientos estándar para determinar cada uno de los parámetros incluidos en los análisis de agua.

Tanto la concentración iónica total, o sólidos totales disueltos, como las concentraciones de los diversos iones contenidos en el agua subterránea, se reportan en peso por unidad de volumen, específicamente en miligramos por litro (mg/l), o bien, en partes por millón (ppm), expresiones prácticamente equivalentes. La concentración iónica total puede expresarse en términos de conductividad eléctrica y las concentraciones iónicas particulares en forma de equivalencia química.

Atendiendo al signo de su carga eléctrica, los iones se clasifican en cationes, o iones positivamente cargados, y aniones, o iones con carga negativa. Ambos tipos de iones se combinan y disocian en el agua de acuerdo a relaciones de peso bien definidas, las cuales son fácilmente determinables debido a que el peso equivalente de un catión se combinará exactamente con un peso equivalente de un anión. El peso equivalente de un ion es igual a su peso atómico o molecular dividido entre su carga eléctrica expresada en unidades naturales. Cuando la concentración de un ion se expresa en miligramos por litro y se divide entre su peso equivalente, resulta una concentración equivalente expresada en miliequivalentes por litro (meq/l), unidad que es idénticamente igual a la de equivalentes por millón (epm). Como la suma de catio-

nes debe ser igual a la suma de aniones, bajo la condición de neutralidad eléctrica de la solución, cuando ambas se expresan en términos de equivalencia química, si el análisis químico de varios componentes iónicos indica una diferencia en el balance, puede concluirse que o están presentes otros componentes no determinados o existen errores en el análisis.

Una determinación rápida de los sólidos totales disueltos puede hacerse a través de la conductividad eléctrica, la cual varía con la temperatura, por lo que se ha convenido en definirla para una condición normal de 25°C; un incremento de 1°C aumenta la conductividad en cerca de 2%.

La conductividad eléctrica en el agua no puede ser simplemente referida a los sólidos totales disueltos puesto que el agua natural contiene una variedad de especies tanto iónicas como no disociadas; no obstante, es de fácil medición y conviene como indicación general del contenido de sólidos disueltos. Una regla aproximada para la mayor parte de las aguas naturales cuando la conductividad se encuentra en el rango de 100 a 5,000 $\mu\text{mhos/cm}$, conduce a equivalencias de 1 meq/l de cationes = 100 $\mu\text{mhos/cm}$ y 1 mg/l = 1.36 $\mu\text{mhos/cm}$.

Además de los cationes más comunes en el agua subterránea: Calcio (Ca^{++}), Magnesio (Mg^{++}), Sodio (Na^{+}) y Potasio (K^{+}), y de los aniones correspondientes: Carbonato (CO_3^{--}), Bicarbonato (HCO_3^{-}), Sulfato (SO_4^{--}) y Cloruro (Cl^{-}), un análisis químico puede incluir la determinación de concentraciones de componentes secundarios como Fluoruro (F^{-}), Nitrato (NO_3^{-}), Fosfato (PO_4^{--}), Hierro (Fe^{+++}), Manganeseo (Mn^{++}), Aluminio -- (Al^{+++}), Cobre (Cu^{++}), Zinc (Zn^{++}) y Sílice (SiO_2). La inclusión de las características de Dureza y Alcalinidad resulta muy conveniente.

Métodos de Interpretación.

La interpretación de resultados de análisis químicos de muestras

de agua puede efectuarse mediante: 1) Clasificaciones de aguas, 2) Diagramas de relaciones iónicas y 3) Planos de concentraciones iónicas.

Las clasificaciones de aguas se basan en relaciones iónicas establecidas, lo cual permite agruparlas de acuerdo a la similitud de su composición química y asociarlas en familias. Entre las más aceptadas se tienen las propuestas por Davis y De Wiest, Souline y Chase Palmer.

Davis y De Wiest (9) proponen una clasificación muy simple basada en la concentración de sólidos disueltos:

Clasificación:	Sólidos Totales Disueltos: (mg/l)
Agua Dulce	menos de 1,000.
Agua Salobre	1,000 - 10,000
Agua Salada	10,000 - 100,000
Salmuera	más de 100,000

Por su parte, Souline propone clasificar el carácter químico del agua de acuerdo a la relación de ciertos iones, expresados en unidades de equivalencia química (meq/l o epm), tal como enseguida se indica:

- Aguas Sulfatadas Sódicas, si $(Na - Cl) / SO_4 < 1$.
- Aguas Hidrocarbonatadas Sódicas, si $(Na - Cl) / SO_4 > 1$.
- Aguas Cloruradas Magnesianas, si $(Cl - Na) / Mg < 1$.
- Aguas Cloruradas Cálcicas, si $(Cl - Na) / Ca > 1$.

Palmer propone una clasificación más compleja basada en la salinidad y alcalinidad del agua (16). Finalmente, una cuarta clasificación, de gran interés geológico pero un tanto imprecisa, se basa en el carácter genético de las aguas (9), caracterizándolas a su vez en: marina, meteórica, congénita, metamórfica, volcánica, plutónica y juvenil.

Diagrama de Concentración Iónica.- Es un método de representación por medio de barras, en el cual la altura total es proporcional a la su

ma de aniones o cationes expresada en equivalencia química. Está -- compuesto por dos barras verticales colindantes de igual altura; en una de ellas se representan las concentraciones aniónicas y en la o tra las catiónicas.

Diagrama Triangular de Palmer-Piper.— Este diagrama utiliza un triángulo equilátero dividido en dos triángulos equiláteros inferiores y -- y un rombo central superior; los lados de los dos triángulos y el -- rombo son iguales y se dividen en 100 partes. El triángulo inferior izquierdo se utiliza para representar concentraciones catiónicas ex presadas en porcentajes de equivalencia química, mientras que en el triángulo inferior derecho se representan en forma análoga las con-- centraciones aniónicas encontradas en una muestra. En ambos casos, la representación es por medio de un punto que se proyecta sobre el rombo para obtener en el punto de intersección la representación ca racterística de la muestra (Fig 4.b).

Una de las ventajas de este diagrama es que permite representar -- varias muestras a la vez, facilitando así la comparación de sus ca-- lidades químicas y su caracterización basada en los iones predomi-- nantes.

Diagrama Semilogarítmico de Schoeller.— H. Schoeller propone el empleo de un diagrama semilogarítmico para comparar la calidad química de diversas muestras de agua. El diagrama consiste en una serie de es-- calas logarítmicas y aritméticas verticales, cada una de las cuales se emplea para representar con un punto alguna concentración iónica o característica química de cada muestra de un conjunto. La unión -- de los puntos correspondientes a cada muestra da como resultado un polígono cuyo trazo esté determinado por la calidad de la muestra.

El diagrama de Schoeller, al igual que el de Piper, permite agru-- par diferentes análisis a la vez y en forma simple compararlos, lo cual es de gran utilidad en estudios de hidrogeoquímica. Además, es de fácil elaboración y notable objetividad, por lo que es utilizado

Figura 4.b

DIAGRAMA TRIANGULAR DE PIPER.

Clasificación del agua basada en los porcentajes relativos de los e.p.m. de las concentraciones iónicas.

SÍMBOLOS QUÍMICOS

CATIONES:

Ca - Calcio.

Mg - Magnesio.

Na - Sodio.

K - Potasio.

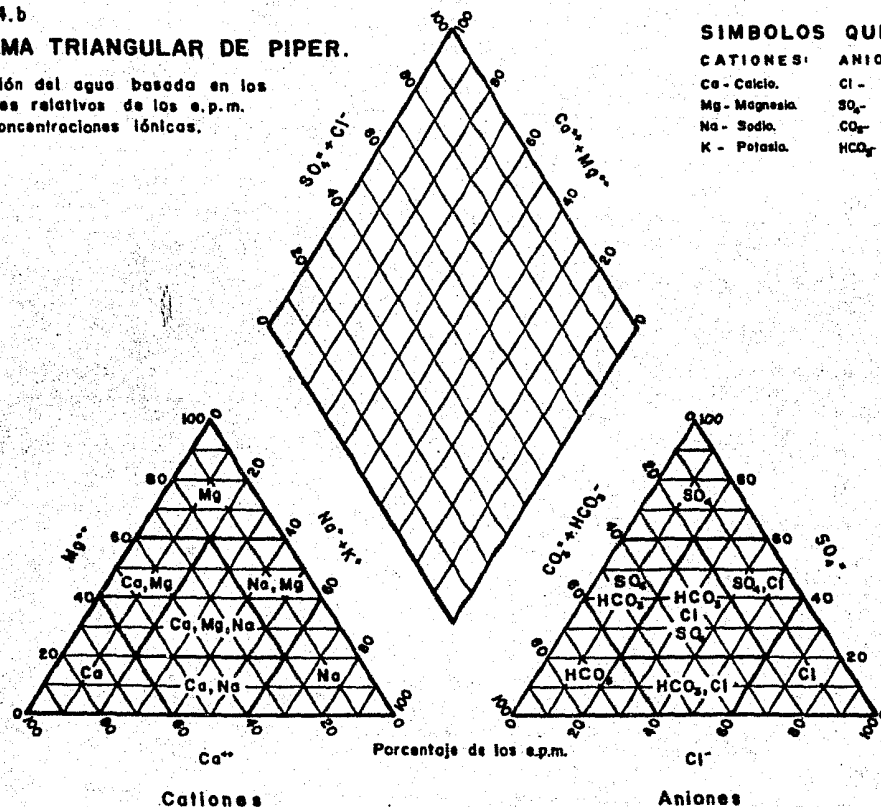
ANIONES:

Cl - Cloruro.

SO₄ - Sulfato.

CO₃ - Carbonato.

HCO₃ - Bicarbonato.



con frecuencia cuando se intenta relacionar la geología regional, - el comportamiento hidráulico del acuífero y la calidad química del agua subterránea.

Los planos de curvas de igual concentración iónica permiten identificar áreas con calidad de agua semejante, así como observar la distribución de las diversas concentraciones de componentes disueltos.

Para tal fin, se requiere disponer de planos en los que se encuentren localizados los puntos de muestreo, así como las corrientes y aprovechamientos de agua superficial existentes, accidentes geológicos, etc. Una vez elaborado el plano, si se dispone de los resultados de los análisis químicos y se tiene conocimiento de las características geológicas regionales, se está en posibilidad de elegir los iones o parámetros que conviene configurar.

La configuración se consigue vaciando sobre el plano los valores muestrales correspondientes al parámetro deseado e infiriendo el trazo de líneas que representen puntos de igual valor.

Este método de interpretación constituye un auxiliar valioso en estudios de hidrogeoquímica, pues además de la facilidad que presenta para hacer inferencias sobre el movimiento del agua subterránea, permite señalar zonas donde la calidad del agua puede significar problema para su aprovechamiento.

4.1 Recolección y Análisis de Muestras de Agua.

Para conocer la composición química del agua subterránea en la zona de estudio, se obtuvo un total de 40 muestras de agua que corresponden a puntos ubicados tanto en el valle del Río Presidio como en los alrededores del Puerto de Mazatlán; de ellas, 16 corresponden a pozos, 23 a norias y una a agua del río. La recolección y análisis químico de las muestras se efectuó en el transcurso de los meses de Mayo a Sep---

tiembre de 1978.

Al momento de obtener cada muestra, se determinaba el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica; enseguida, se procedía a etiquetarse y mandarse al laboratorio para su análisis químico.

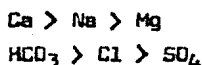
La relación de captaciones muestreadas y los resultados de los análisis químicos se encuentran anotados en la tabla 4.1. Puede observarse que salvo el caso de tres muestras, el resto indica que se trata de agua de buena calidad con bajas concentraciones salinas.

En el cuadro siguiente se presenta el rango de variación de las concentraciones iónicas resultantes, a excepción de las que corresponden a las muestras 26, 28 y 134, las cuales fueron recolectadas al norte de Mazatlán y presentan altas concentraciones salinas:

Concentración Iónica.

Ion:	M í n i m a		M á x i m a		M e d i a	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Calcio	24	1.19	148	7.38	49	2.46
Magnesio	0	0.0	68	5.59	19	1.56
Sodio	0	0.0	129	5.63	47	2.07
Bicarbonato	137	2.24	503	8.24	258	4.23
Cloruro	12	0.33	480	11.50	51	1.45
Sulfato	4	0.08	62	1.29	15	0.31

Se observa que la concentración iónica media expresada en meq/l - conduce a las relaciones siguientes:



que son típicas de aguas que tienen contacto con rocas de origen volcánico o sus productos de erosión.

Tabla 4.1

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICOS DE MUESTRAS DE AGUA

VALLE DEL RIO PRESIDIO, EDO. DE SINALOA

1978

HOJA 1/2

APROV. No.	NOMBRE DEL LUGAR	PROP. m.	TEMP. °C	pH Lab.	C.E. microhm/cm	ALCALINIDAD TOTAL p.p.m.	DUREZA TOTAL p.p.m.	DUREZA CALCIO p.p.m.	DUREZA MAGNESIO p.p.m.	S.T.D. p.p.m.	CATIONES			ANIONES			
											Ca ⁺⁺ p.p.m.	Mg ⁺⁺ p.p.m.	Na ⁺ p.p.m.	HCO ₃ ⁻ p.p.m.	CO ₃ ⁻ p.p.m.	Cl ⁻ p.p.m.	SO ₄ ⁻ p.p.m.
7	EL POZOLE	33.0	27.0	7.60	270	165	140	90	50	312	36	12	30	201	0	19	14
10	EL POZOLE	33.0	27.0	7.55	510	217	225	145	80	440	58	19	34	265	0	39	25
15	EL POZOLE	30.0	26.5	7.58	380	210	165	140	25	403	56	6	44	256	0	23	18
19	EL ZAPOTE	15.0	27.0	7.20	655	228	295	130	165	551	52	40	50	278	0	106	25
21	RCHO. CASTILLO VIEJO	4.2	27.0	7.10	260	135	138	66	72	291	26	17	32	164	0	44	8
26	EL VENADILLO	20.0	26.5	7.28	8400	600	3140	1248	1892	5869	499	459	1329	732	0	2840	10
28	GRANJA ALICIA	12.0	28.0	7.48	4200	465	1800	560	1220	2525	232	296	189	567	0	1233	8
31	WALAND 5	45.0	27.5	7.80	340	189	140	75	65	357	30	15	45	230	0	21	16
34	CHICURAS	29.0	27.0	7.90	335	217	230	135	95	403	54	23	19	265	0	30	12
35	LA ESCUNDIDA	28.0	28.0	7.60	320	195	160	100	60	356	40	14	34	238	0	16	14
36	SAN FRANCISCO	5.0	29.0	7.35	435	225	195	120	75	452	48	18	50	274	0	40	22
38	LOMAS MCATI	4.0	26.5	7.35	300	186	160	90	70	340	36	17	29	227	0	16	15
46	CHICURAS	9.5	26.0	7.42	365	180	180	115	65	330	46	15	19	219	0	19	12
52	WALAND	4.5	27.0	7.70	360	202	180	110	70	369	44	17	29	247	0	21	11
60	ESCAMILLAS	5.0	27.0	7.55	205	180	115	60	55	320	24	13	42	219	0	12	10
87	EL ROBLE	21.0	27.5	7.58	850	267	250	160	90	477	64	21	29	325	0	13	25
88	EL ROBLE	8.0	28.0	7.30	345	183	125	120	5	350	48	1	46	223	0	28	4
92	EL BAJIO	10.0	29.0	7.19	295	150	120	80	40	300	32	9	38	183	0	32	6
97	EL TECOMATE	4.7	28.0	7.48	245	137	120	80	40	251	32	9	22	161	0	17	10
100	EL TECOMATE	6.0	28.0	7.62	285	180	110	65	45	337	26	11	50	219	0	21	10
101	COFRADIA	10.0	28.0	7.49	610	300	220	130	90	578	52	21	26	366	0	48	15

Tabla 4.1

1978

[illegible]

Por lo que respecta a las muestras obtenidas de las captaciones Nos. 26, 28 y 134, sus relaciones iónicas son:

Muestra No.	Relaciones Catiónicas.	Relaciones Aniónicas.
26	Na > Mg > Ca	Cl > HCO ₃ > SO ₄
28	Mg > Ca > Na	Cl > HCO ₃ > SO ₄
134	Mg > Na > Ca	Cl > HCO ₃ > SO ₄

Estas relaciones difieren de las obtenidas para el común de las muestras debido a que tanto la composición química de los materiales que constituyen la zona acuífera de la que se tomaron, como las condiciones de funcionamiento de ésta, son diferentes.

4.2 Interpretación de Resultados de los Análisis.

La figura 4.2 muestra el diagrama triangular de Piper en donde se encuentran vaciadas las concentraciones iónicas resultantes de los análisis químicos efectuados. De su disposición puede inferirse que la mayor parte de las muestras corresponden a familias de aguas de tipo mixto respecto a los cationes y de tipo bicarbonatado por parte de los aniones.

Dentro del carácter mixto del agua, existe un ligero predominio del ion Sodio hacia la parte alta del río, en los alrededores de Siqueros y Cofradía, debido a que se trata de aguas de muy reciente infiltración. Hacia aguas abajo del río, el agua subterránea cambia de mixta sódica a mixta cálcica, debido a que los rellenos fluviales a través de los cuales circula retienen al ion Sodio, disminuyendo su concentración respecto al ion Calcio.

El análisis de las muestras obtenidas al norte de Mazatlán indica que el agua pertenece a la familia magnesiana-sódica-bicarbonatada debido a su contacto con material granular producto de la alteración de rocas ígneas y metamórficas donde la velocidad del flujo subterrá-

Figura 4.2 1/2

DIAGRAMA TRIANGULAR DE PIPER.

Lugar de Muestreo: VALLE DEL RIO
PRESIDIO, SIN.

Fecha de Análisis: AÑO 1978.

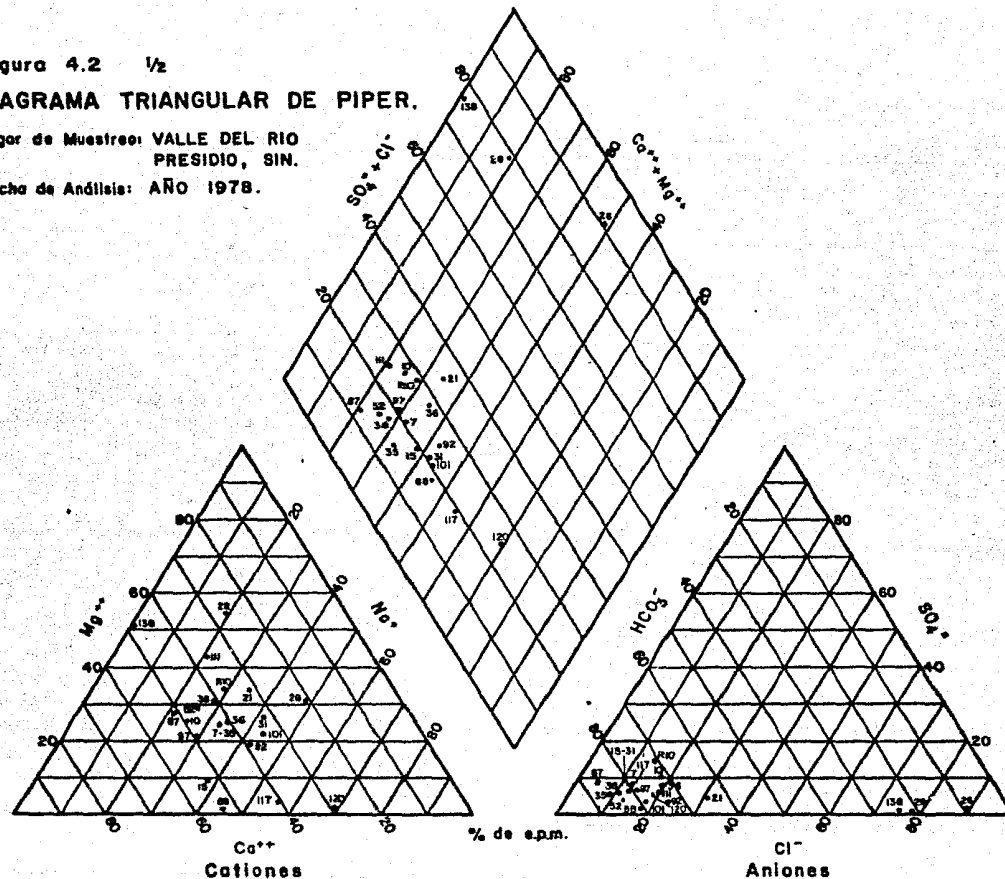
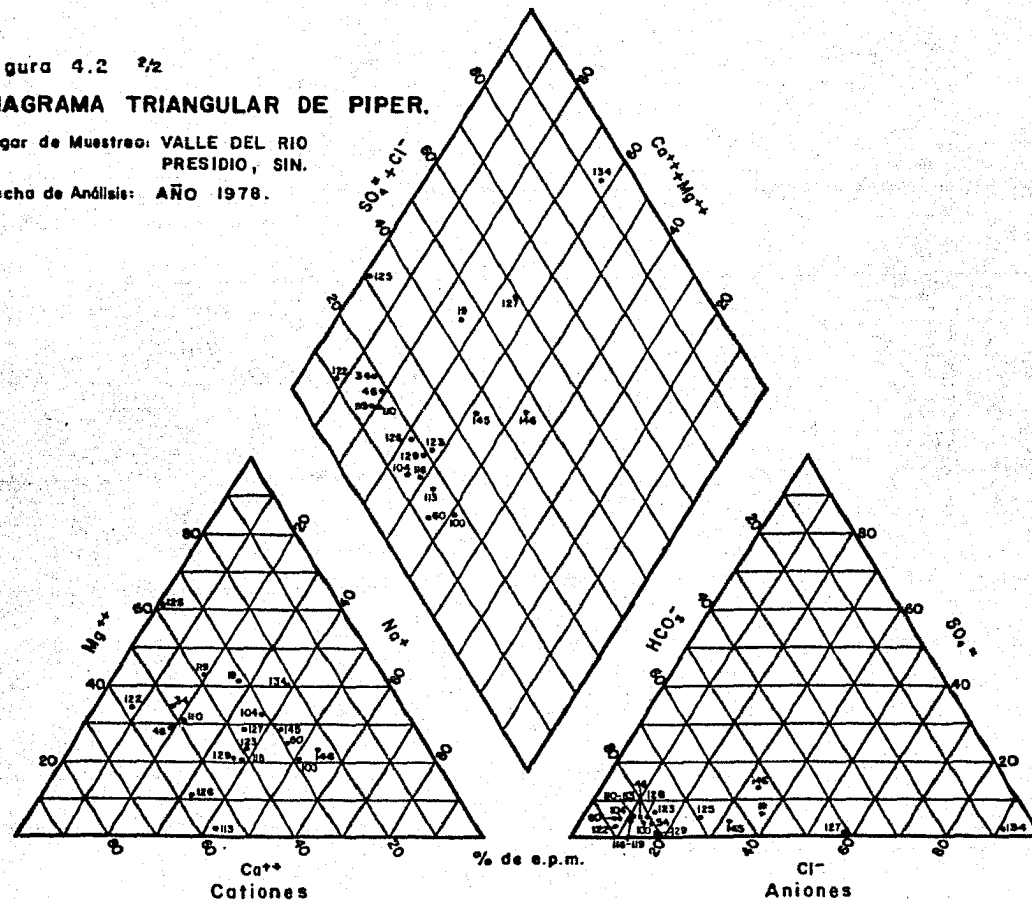


Figura 4.2 2/2

DIAGRAMA TRIANGULAR DE PIPER.

Lugar de Muestreo: VALLE DEL RIO
PRESIDIO, SIN.

Fecha de Análisis: AÑO 1978.



neo es baja, además de estar influenciada por sales de origen marino.

De la medición de la conductividad eléctrica se tiene que existen valores relativamente elevados, del orden de 800 μ mhos/cm, en sitios a lejados del río y valores más bajos, alrededor de 300 μ mhos/cm, en las proximidades del cauce. Esta peculiar distribución se debe a la relación existente entre el río y el acuífero, donde el primero se encuentra aportando agua hacia el segundo, ocasionando que los valores más bajos en la conductividad eléctrica, similares a los que por lo regular presenta el agua superficial, se encuentren en los flancos del cauce y aumenten conforme se alejan del mismo.

De la zona conocida como Isla de la Piedra, localizada en la porción costera al sureste de Mazatlán, se efectuaron análisis de las muestras correspondientes a las captaciones 145 y 146, resultando valores de conductividad de 570 y 990 μ mhos/cm respectivamente, lo cual indica que el agua no está aún influida por el mar, posiblemente por tratarse de norias precariamente explotadas.

Al norte de la Ciudad, en los aprovechamientos 26, 28 y 134, se midieron conductividades de 8,400, 4,200 y 6,200 μ mhos/cm respectivamente, lo que indica elevada salinidad en el agua, debido a que se encuentran en una zona acuífera con condiciones diferentes a las que prevalecen en lo que es propiamente el valle del Río Presidio. Como se menciona en la parte correspondiente a hidrogeología, las rocas aflorantes en los alrededores de los aprovechamientos mencionados se clasificaron como impermeables, encontrándose cubiertas por una delgada capa de material granular producto de su intemperismo en la que se llegan a almacenar pequeñas cantidades de agua subterránea que en algunos casos suele presentar altas concentraciones salinas.

En términos generales, el agua puede considerarse como de buena calidad debido a que los valores de los parámetros analizados se encuentran dentro de las normas establecidas, a excepción de las aguas subterráneas al norte de Mazatlán, ya que su análisis indica que no re-

unen las condiciones químicas de potabilidad, pudiendo su ingestión - ser perjudicial para la salud dado su alto contenido salino.

En cuanto a la aptitud del agua para utilizarse en riego, el resultado del análisis de la mayoría de las muestras indica que se encuentra condicionada por Porcentaje de Sodio Posible. El agua representada por algunas muestras, además del condicionante señalado, se encuentra condicionada por salinidad, haciendo que su aplicación en riego sea aún más restringida. El agua representada por las muestras 117, 120 y 125, no es recomendable para utilizarse en riego, debido al carbonato de sodio residual que contiene, además de los condicionantes anteriormente señalados.

El agua representada por las muestras obtenidas hacia el norte de Mazatlán resultó no recomendable para su uso en agricultura; asimismo, el análisis de las muestras tomadas de Isla de la Piedra indica que en ese lugar el agua se encuentra condicionada tanto por salinidad como - por sodio y elementos tóxicos, lo cual hace que su utilización en riego tampoco sea recomendable.

Por lo que se refiere a intrusión salina, no se advierte la presencia de invasión de agua de mar más allá de la condición naturalmente establecida. Sin embargo, los análisis de las muestras obtenidas - del sitio conocido como Isla de la Piedra, que constituye una barra litoral formada por arenas y arcillas de buena permeabilidad, indican - que el agua más somera es de buena calidad, pero por las condiciones - geohidrológicas locales se deduce que esta agua debe encontrarse lenticularmente dispuesta en espesores muy pequeños, yaciendo por densidad sobre agua de origen marino, de manera que su extracción mediante equipo convencional podría ocasionar la invasión prácticamente inmediata - de las aguas saladas inferiores. Se considera factible extraer volúmenes pequeños de agua de buena calidad sin provocar intrusión salina, - sólo si la profundidad de las obras de captación bajo el nivel freático no excede de aproximadamente 30 cm.

V HIDROLOGIA SUBTERRANEA.

La Hidrología Subterránea o Geohidrología puede definirse como la parte de la Hidrología que trata del estudio del agua subterránea, su ocurrencia, movimiento y circulación en los estratos del subsuelo, así como de los métodos empleados en su cuantificación y explotación.

Entre los aspectos fundamentales que integran la Geohidrología -- pueden citarse: 1) La Teoría del Movimiento del Agua Subterránea, 2) -- La Hidráulica de Pozos y 3) La interpretación de datos piezométricos, que, en conjunción con algunas de las materias tratadas anteriormente, resultan de carácter imprescindible para la resolución de la Ecuación Fundamental de la Geohidrología, la determinación del comportamiento -- de los acuíferos y la evaluación de los recursos de agua subterránea.

Sin embargo, conviene establecer que ante el carácter limitado de este trabajo y la consideración de que se trata de una materia notablemente profunda y compleja, sólo se abordarán en forma somera los aspectos más relevantes de los temas mencionados. Previamente, se expondrán algunas relaciones importantes que, aunque originalmente no pertenecen a la Geohidrología, le son básicas para la formulación de sus teorías.

Tal como ha quedado expuesto al inicio del Capítulo III, se entiende por ACUIFERO a toda formación geológica que se encuentra saturada de agua y que es capaz de transmitirla o cederla significativamente a través de sus espacios intersticiales bajo valores pequeños del gradiente hidráulico. Esto es, una formación geológica puede ser así calificada cuando contenga poros interconectados y saturados de agua lo suficientemente grandes para permitir a través de sí el movimiento de agua hacia las captaciones de manera que éstas puedan extraer un caudal apreciable y sostenido.

Si una formación cede su agua, mas no en cantidades significati--

vas, se le denomina ACUICLUDO, y si no la libera o no la contiene, -- ACUIFUGO. Ambos tipos de formación se comportan como estratos confinantes cuando se encuentran intercalados con mantos acuíferos.

Así, cuando un acuífero se encuentra inmediatamente debajo de la superficie de la zona de saturación del suelo (Nivel Freático) de tal modo que el agua contenida en sus poros se halla sometida únicamente a la presión atmosférica, se dice que se trata de un ACUIFERO LIBRE, y de un ACUIFERO CONFINADO cuando se encuentra yaciendo entre un par de estratos confinantes de modo que la carga hidráulica en cualquiera de sus puntos, denominada Nivel Piezométrico, se encuentra por encima del techo del acuífero y no necesariamente coincide con el nivel freático que podría existir sobre ese punto.

Ahora bien, existen en Geotecnia una serie de relaciones elementales referentes al complejo sólido-agua-aire cuya aplicación se ha hecho extensiva a la Geohidrología, lo que resulta razonable ante las implicaciones conceptuales de todo acuífero como medio necesariamente poroso y permeable. Tales relaciones se enuncian enseguida:

- Porosidad.- A este respecto, es posible apreciar dos tipos de porosidad: Porosidad Total y Porosidad Eficaz.

En una muestra de roca o suelo, se define la porosidad total, n , como la relación porcentual que existe entre el volumen de espacios vacíos, V_v , y el volumen total de la muestra, V_o , que es la suma del volumen de vacíos y el de la fase sólida, V_s . Así:

$$n = \frac{V_v}{V_o} \cdot 100 \quad (5.1)$$

donde $V_o = V_v + V_s \quad (5.2)$

La porosidad eficaz, n , ligada al concepto de agua gravífica*, se de-

* El agua en un material acuífero está contenida en tres formas diferentes: 1) agua de retención, 2) agua capilar y 3) agua gravífica; ade

fine como la relación porcentual entre el volumen de agua gravífica, V_g , y el volumen total de la muestra saturada:

$$n_g = \frac{V_g}{V_o} \cdot 100 \quad (5.3)$$

- Relación de Vacíos.- Se define la relación de vacíos, e , como el cociente del volumen de vacíos entre el volumen de la fase sólida existentes en una muestra de roca, esto es:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (5.4)$$

- Grado de Saturación, s .- Habitualmente se expresa mediante los calificativos de seco, mojado, etc.; se define como la relación porcen---

más, contiene vapor de agua y agua de constitución, que es un elemento intrínseco de la molécula de roca:

Agua de Retención.- Debido a su carácter polar, la molécula de H_2O es atraída y fijada por las irregularidades electrónicas de los cristales. Cierta cantidad de agua es así adsorbida por la roca, conociéndosele como agua de retención o agua de imbibición, cuyas propiedades físicas son muy diferentes. Está integrada, a su vez, por dos tipos de agua: agua higroscópica y agua pelicular.

Agua Higroscópica.- Las partículas de suelo están recubiertas de agua que impregna los microporos o que penetra por los finos canalículos, formando puntos aislados que se mantienen por fuerzas de adsorción, no pudiendo desplazarse más que en estado de vapor.

Agua Pelicular.- El agua pelicular rodea las partículas de suelo y su agua higroscópica con una delgada película de algunas fracciones de micra de espesor. El agua pelicular o de adhesión no puede desplazarse por gravedad, no transmite la presión hidrostática y no puede ser desplazada más que por centrifugación.

Agua Capilar.- Se encuentra retenida por las fuerzas de capilaridad entre los gránulos de la roca. Puede elevarse por encima de la superficie piezométrica y mantenerse en equilibrio en los intersticios de las rocas por acción de la tensión superficial. Transmite la presión hidrostática. Existen dos tipos de agua capilar: el agua capilar aislada o colgada, que no se desplaza bajo la acción de la fuerza de gravedad, por lo que debiera considerarse como agua de retención, y el agua capilar continua o sostenida, que se halla situada en la franja intermedia del suelo y está sujeta a la acción de la gravedad.

Agua Gravífica.- El agua gravífica rellena el espacio que dejan libre los poros o intersticios de la roca. Se le suele llamar también agua de gravedad, agua libre o agua de percolación. Obedece exclusivamente a la fuerza de gravedad. Transmite la presión hidrostática y constituye la parte substancialmente activa del movimiento del agua subterránea.

tual entre el volumen de agua, V_w , contenida en una muestra de roca y el volumen de vacíos de la muestra desecada, por lo que:

$$s = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (5.5)$$

- Contenido de Humedad, w .- Se define como la relación porcentual del peso del agua contenida en una muestra de roca, w_w , respecto al peso de la muestra desecada a 105°C , w_s ; esto es:

$$w = \frac{w_w}{w_s} \quad (5.6)$$

Las proporciones entre volúmenes y entre pesos se relacionan entre sí mediante los conceptos de densidad, ρ , peso específico, γ , y gravedad específica, G .

Con apoyo en las relaciones enunciadas, la Geohidrología ha caracterizado los siguientes conceptos:

- Coeficiente de Rendimiento Específico, S_y .- Se define como el volumen de agua que una unidad de material acuífero saturado libera por acción de la fuerza de gravedad. Se expresa de manera porcentual:

$$S_y = \frac{V_e}{V_o} \cdot 100 \quad (5.7)$$

que para el caso de un material saturado coincide con la porosidad efectiva, n_e .

- Coeficiente de Retención Específica, S_r .- Es la relación porcentual del volumen de agua retenida en una unidad cúbica de material acuífero saturado cuando se somete a la acción de la gravedad:

$$S_r = \frac{V_r}{V_o} \cdot 100 \quad (5.8)$$

donde V_r representa el volumen de agua de retención.

Si se considera que el volumen de vacíos de una muestra puede ocuparse por agua de retención y por agua gravífica ($V_v = V_r + V_g$), se tendrá entonces que para un material poroso, saturado y sujeto a la presión atmosférica, la porosidad total es igual a la suma del rendimiento y la retención específicos; esto es:

$$n = S_y + S_r \quad (5.9)$$

- Coeficiente de Almacenamiento, S.- Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma de material acuífero de sección transversal unitaria cuando la carga piezométrica desciende una unidad. Para acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es coincidente con el rendimiento específico si el drenado es completo. Para acuíferos confinados el coeficiente de almacenamiento no implica el drenaje de la sección de material acuífero mediante la acción de la fuerza gravitatoria, como en el caso de los acuíferos libres, sino que más bien es el resultado de un par de efectos elásticos: la salida del agua lleva consigo un descenso en la presión y el agua que queda en los poros se dilata por distensión elástica, proporcionando así una cierta cantidad de agua; asimismo, la presión hidrostática en el terreno disminuye y las capas suprayacentes, distendidas, gravitan sobre el esqueleto sólido del acuífero, reduciendo el volumen de espacios vacíos y expulsando cierta cantidad de agua. El coeficiente de almacenamiento en mantos acuíferos libres suele variar entre 0.3 y 0.02, mientras que en mantos confinados fluctúa entre 10^{-3} y 10^{-6} .

Teoría Elemental del Movimiento del Agua Subterránea.

El movimiento del agua subterránea obedece a la llamada Ley de Darcy, cuya validez depende de condiciones precisas relativas tanto a las características físicas del medio como al carácter hidráulico del flujo; tales condiciones se puntualizan en la existencia de: 1) un medio homogéneo e isótropo, 2) un substrato horizontal impermeable y 3) un flujo en régimen laminar.

En 1856 H. Darcy estudió en forma experimental el flujo de agua a través de una columna de arena, encontrando que el gasto, Q , que pasa a través de ella es directamente proporcional al área de su sección transversal, A , y a la magnitud de la carga hidráulica, H , e inversamente proporcional a la longitud de la columna, L ; esto es:

$$Q = K A \frac{H}{L} \quad (5.10)$$

expresión matemática que representa el resultado inmediato del experimento original del investigador (3). K es una constante de proporcionalidad, ligada a la naturaleza del material granular. Subsecuentemente, la aplicación de la Primera Ley de la Hidrodinámica ($Q=Av$) condujo a la expresión común de la Ley de Darcy:

$$v = K i \quad (5.11)$$

o bien:

$$v = - K \frac{dh}{dl} \quad (5.11')$$

que es la expresión generalizada de la Ley de Darcy para un flujo unidimensional. En ellas (Ecs. 5.11), v representa la velocidad aparente de flujo, en cuanto a que está referida al área de la sección transversal, ocupada tanto por material sólido como por espacios libres; la derivada cambiada de signo, de la carga hidráulica, h , respecto a la longitud de flujo, l , corresponde al concepto de Gradiente Hidráulico, i ; el signo negativo conviene para que el vector velocidad resulte positivo de acuerdo al sentido del flujo, puesto que la diferencial de la carga hidráulica se decreciente en tal sentido.

En realidad, el agua subterránea circula sólo a través de los poros de la roca; por ende, la sección real de flujo se halla limitada a los espacios libres, es decir, a la porosidad total, n ; así, la velocidad real media, v_m , se expresa como:

$$v_m = \frac{1}{n} K i \quad (5.12)$$

Más aún, puesto que sólo el agua gravífica puede circular a través del material acuífero, el espacio útil para la circulación del agua subterránea se reduce de modo que se ve determinado por la porosidad eficaz, n_g , dando origen a la velocidad real efectiva, v_g :

$$v_g = \frac{1}{n_g} K i \quad (5.12')$$

La constante de proporcionalidad (K) se conoce como Coeficiente de Permeabilidad de Darcy y se define como el volumen de agua gravífica que percola durante la unidad de tiempo a través de una sección unitaria de terreno acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario. Presenta unidades de velocidad (L, T^{-1}). Es función del tamaño de los granos, de la superficie específica de los mismos*, de la porosidad de la roca y de la temperatura del agua.

Se han desarrollado algunas expresiones que pretenden determinar la permeabilidad en función exclusivamente de la granulometría del material, pero se ha comprobado que son en general poco confiables o poco prácticas.

Los valores de permeabilidad en las rocas fluctúan entre 10^2 y 10^{-9} cm/s. La distinción entre rocas permeables e impermeables se ha fijado convencionalmente en 10^{-7} cm/s.

La ley de Darcy ha sido ampliamente verificada y su exactitud es actualmente admitida para la mayoría de los casos de circulación de agua subterránea en medios porosos. Sus límites de aplicación se encuentran determinados por dos tipos de factores de influencia mutua: los relativos al flujo, como son la velocidad, el gradiente hidráulico y el número de Reynolds; y los relativos a las propiedades del medio poroso, como son temperatura, porosidad eficaz y permeabilidad.

Del concepto de Permeabilidad conviene derivar el de Transmisibili

* La superficie específica se refiere al área particular de todos los gránulos existentes en una unidad cúbica de material poroso.

dad, T , involucrando el espesor del horizonte acuífero, b . Así pues, - la Transmisibilidad se define como el caudal de agua que fluye a través de un corta transversal de acuífero de ancho unitario y altura igual al espesor saturado, b , bajo un gradiente hidráulico unitario; matemáticamente, la transmisibilidad se expresa como:

$$T = K b \quad (5.13)$$

adquiriendo T las unidades de una velocidad por una longitud ($L^2 T^{-1}$). Este concepto es de gran utilidad para el estudio del agua subterránea en acuíferos confinados, cuyo caudal se encuentra precisamente determinado por la permeabilidad y el espesor del horizonte acuífero.

Fundamentos de la Hidráulica de Pozos.

La Hidráulica de Pozos se encuentra fundamentada en la ley de Darcy. Estudia el comportamiento del flujo del agua subterránea hacia las obras de captación, particularmente hacia los pozos.

Sirviéndose de la Hidráulica de Pozos, diversos investigadores - han desarrollado técnicas de interpretación de pruebas de bombeo con - objeto de conocer las propiedades hidráulicas de los acuíferos, es decir, los coeficientes de almacenamiento y transmisibilidad, elementos imprescindibles para la resolución de la ecuación fundamental de la Geohidrología, cuya aplicación tiene por objeto la cuantificación de - potenciales acuíferos.

En la Hidráulica de Pozos, como en la Hidráulica General, se distinguen fundamentalmente dos tipos de flujo: establecido y transitorio.

Un flujo de agua subterránea es establecido o independiente del tiempo cuando sus características permanecen invariables de un instante a otro. Con el fin de mantener el estado establecido del flujo, las condiciones específicas a lo largo de las fronteras deben permanecer -

sin variación respecto al tiempo. Si estas condiciones, llamadas condiciones de frontera, no son función del tiempo, el flujo llegará en última instancia a ser establecido aunque inicialmente pueda haberse desarrollado en estado no establecido. Cuando se bombea un gasto constante en un pozo que explota un acuífero de gran extensión, el nivel del agua en el pozo desciende hasta alcanzar prácticamente un valor final en su abatimiento, llegando así a la condición de flujo establecido. - El flujo transitorio, por el contrario, es aquél cuyas características son dependientes del tiempo.

Del principio de continuidad aplicado al flujo del agua a través de un volumen elemental de medio poroso homogéneo e isótropo, en combinación con la ley de Darcy, los fundamentos de la Hidráulica y el principio de los cuerpos elásticos, se desprende que el operador de Laplace aplicado a la carga hidráulica, h , es igual al producto de la relación entre el coeficiente de almacenamiento específico, S_s , y el de permeabilidad, K , por la derivada parcial de la carga hidráulica respecto al tiempo (11), esto es:

$$\nabla^2 h = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.14)$$

En la ecuación anterior:

$$S_s = \rho \, g \, (\alpha + n \, \beta) \quad (5.15)$$

donde: α es el recíproco del módulo grueso de elasticidad del esqueleto intergranular y

β es la compresibilidad del agua.

S_s es el Coeficiente de Almacenamiento Específico y se define como la cantidad de agua que es cedida por una unidad cúbica de acuífero cuando la carga piezométrica desciende una unidad. Como puede apreciarse en la ec. 5.15, S_s es la suma de la compresión del esqueleto intergranular y la expansión del agua.

En el caso especial de un acuífero confinado de espesor b , el coe

eficiente de almacenamiento*, S , se puede expresar como:

$$S = S_g b \quad (5.16)$$

y la transmisibilidad, T , como:

$$T = K b , \quad (5.17)$$

de modo que $S_g/K = S/T$ y

$$\nabla^2 h = S/T \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.18)$$

donde S y T se denominan Constantes de Formación del acuífero confinado.

Las expresiones 5.14 y 5.18 son las ecuaciones generales del flujo transitorio en acuíferos libres y confinados, respectivamente.

Si el flujo es establecido, tanto en acuíferos libres como confinados, la carga hidráulica es por condición, independiente del tiempo; por consiguiente, las expresiones 5.14 y 5.18 se reducen a la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 h = 0 \quad (5.19)$$

La expresión anterior es también aplicable al flujo transitorio - en acuíferos libres, en virtud de que tanto la compresibilidad del esqueleto intergranular como la del agua son de relativa insignificancia comparadas con el efecto del desplazamiento de la superficie libre, el cual afecta el patrón de flujo. Por consiguiente, en la expresión 5.14 si S_g es nulo, también lo será $S_g/K \cdot \partial h/\partial t$.

- Flujo Radial a un Pozo en Régimen Establecido.

Quando se bombea un gasto constante, Q , de un acuífero confinado

* El coeficiente de almacenamiento se definió con anterioridad.

de espesor b cuyas condiciones de frontera son tales que se establece un flujo que presenta simetría radial respecto al eje del pozo, de modo que la carga hidráulica, h , es constante para todos los puntos de cualquier circunferencia de radio r normal y concéntrica a dicho eje (Fig. 5.a), el gasto que pasa a través de cualquier sección cilíndrica de las que determinan tales circunferencias y el espesor del acuífero, es:

$$Q = 2 \pi r b K \frac{dh}{dr} \quad (5.20)$$

Esta ecuación diferencial ordinaria, integrada para la condición de frontera $h = H$ cuando $r = r_e$, conduce a:

$$\int_h^H dh = \frac{Q}{2 \pi K b} \int_r^{r_e} \frac{dr}{r}$$

$$H - h = \frac{Q}{2 \pi K b} \ln \frac{r_e}{r} \quad (5.21)$$

donde la diferencia de la elevación de la superficie piezométrica al inicio y durante el bombeo, $H - h$, se denomina Abatimiento. El abatimiento puede también expresarse en función de la transmisibilidad:

$$H - h = \frac{Q}{2 \pi T} \ln \frac{r_e}{r} \quad (5.21')$$

permitiendo el cálculo de Q ó de T , dado uno u otro.

Análogamente, para el caso de un acuífero libre (Fig 5.b) se tiene que:

$$Q = 2 \pi r h K \frac{dh}{dr} \quad (5.22)$$

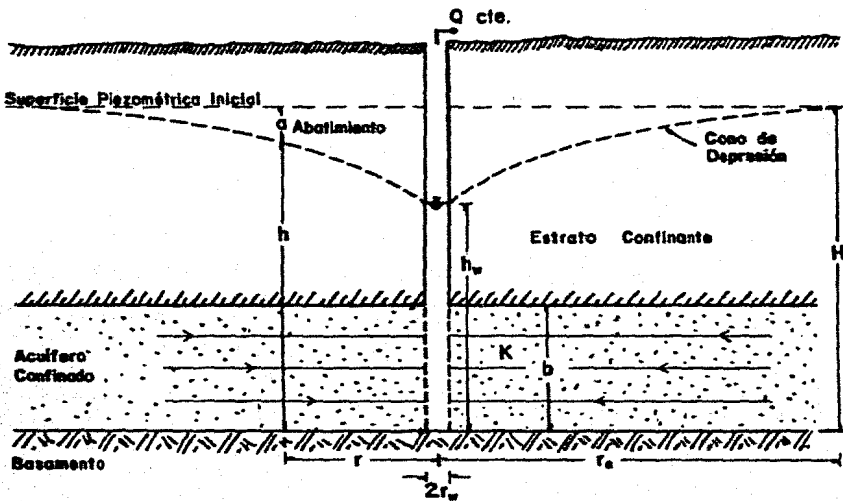
de donde:

$$\int_h^H h \, dh = \frac{Q}{2 \pi K} \int_r^{r_e} \frac{dr}{r}$$

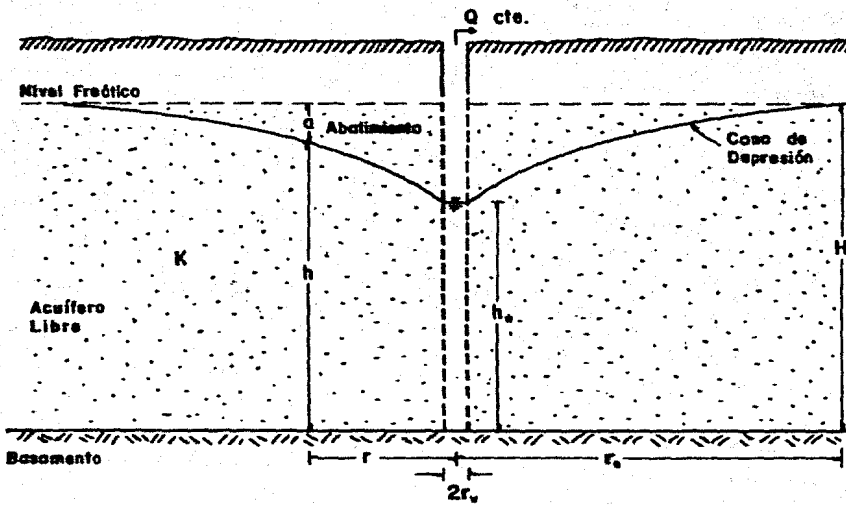
conduce a:

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r_e}{r} \quad (5.23)$$

Figura 5.



a) Flujo radial a un pozo completamente penetrante en un acuífero confinado.



b) Flujo radial a un pozo totalmente penetrante en un acuífero libre.

La ec. 5.23 se obtuvo con apoyo en las hipótesis de Dupuit, las -
 cuales establecen que: 1) el flujo es horizontal, 2) la velocidad es u
 niforme respecto a cualquier línea vertical del acuífero, y 3) la velo-
 cidad en la superficie libre es horizontal, lo cual es prácticamente -
 cierto para pequeños valores de la pendiente de la superficie libre. -
 Por consiguiente, dicha ecuación es imprecisa al describir la curva de
 abatimiento en la proximidad inmediata del pozo, donde la fuerte curva-
 tura de la superficie libre del agua se contrapone a tales hipótesis.

Las ecs. 5.21 y 5.23 no proporcionan información alguna sobre el
 coeficiente de almacenamiento; su aplicación requiere de un par de po-
 zos de observación situados a diferente distancia del pozo de bombeo;
 además, no son aplicables a pozos de bombeo parcialmente penetrantes,
 ni a acuíferos en los que existe semiconfinamiento, sistemas que se --
 presentan a menudo en la práctica.

No obstante que los supuestos en los que se basa la deducción de
 de las ecs. 5.21 y 5.23 representan series restricciones que al pare--
 cer limitan su aplicación en la práctica, las condiciones reales no se
 encuentran tan apartadas de las ideales, de modo que las discrepancias
 entre unas y otras carecen por lo general de significación, dependien-
 do naturalmente de su magnitud.

- Flujo Radial a un Pozo en Régimen Transitorio.

Charles V. Theis fué quien investigó por vez primera este proble-
 ma. Este investigador resolvió en 1935 la ecuación del flujo radial --
 transitorio a un pozo que penetra a un acuífero confinado de extensión
 lateral infinita (Ec. 5.18), la cual puede expresarse en función de r
 como*:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.24)$$

cuya solución para las condiciones de frontera:

 * Se ha conservado la misma notación...

$$\lim_{r \rightarrow \infty} h = h_0 \quad \text{y} \quad \lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{Q}{2\pi T}, \quad \text{cuando } t > 0,$$

y para la condición inicial:

$$h(r, 0) = h_0 \quad \text{cuando } t \leq 0,$$

es:

$$h = h_0 - \frac{Q}{4\pi T} \int_{r^2 S / 4Tt}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (5.25)$$

donde la integral indefinida es función del límite inferior de integración

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (5.26)$$

La integral exponencial de la ec. 5.25, a la que se suele llamar con el nombre de Función de Pozo de u y representar con el símbolo $W(u)$, puede desarrollarse mediante una serie convergente, de modo que el abatimiento ($s = h_0 - h$) puede expresarse como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \right] \quad (5.27)$$

La ecuación de Theis (Ec. 5.25) se basa en hipótesis precisas que representan condiciones raramente concurrentes en la realidad, estrechando así la aplicatividad de tal expresión; sin embargo, se ha utilizado con éxito razonable en la determinación de las constantes S y T de acuíferos sometidos a condiciones reales muy próximas las condiciones hipotéticas. Tales hipótesis incluyen: 1) la completa penetración del acuífero por el pozo, 2) la extensión infinita del acuífero, 3) la homogeneidad e isotropía del medio y 4) la remoción instantánea del agua con el abatimiento de la superficie piezométrica.

Theis desarrolló adicionalmente un método gráfico de superposición para obtener las constantes de formación S y T a partir de pruebas de bombeo, esto es, valores de abatimiento contra tiempo. Su aplicación requiere de un pozo de observación cuya proximidad al de bombeo sea tal, que el nivel piezométrico en el primero se vea apreciablemen-

te afectado por la extracción del gasto Q en el segundo.

Este método se deriva de las ecuaciones 5.26 y 5.27*, cuyo reacomodo, atendiendo a la separación de constantes y variables, conduce a:

$$\log a = \log W(u) + \log \frac{Q}{4\pi T} \quad (5.28)$$

y

$$\log \frac{r^2}{t} = \log u + \log \frac{4T}{S} \quad (5.29)$$

ecuaciones en las que se ha empleado la forma logarítmica debido al amplio rango de fluctuación de las variables. En ambos pares de expresiones:

- a es el abatimiento en el pozo de observación debido a la extracción de un gasto constante en el pozo de bombeo;
- Q es el gasto extraído en el pozo de bombeo;
- T es el coeficiente de transmisibilidad;
- r es la distancia entre el pozo de bombeo y el pozo de observación;
- S es el coeficiente de almacenamiento y
- t es el tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo.

Previamente, mediante la ayuda de la tabla 5.a, se prepara en papel logarítmico una gráfica de valores de $W(u)$ contra valores de u , la que se conoce como curva tipo. Enseguida, en papel logarítmico trasladado de la misma escala cíclica que el anterior, se grafican los valores de a contra los de r^2/t , obtenidos mediante la prueba de bombeo (curva de campo).

Si el gasto es constante, de las expresiones anteriores (Ecs. 5.28 y 5.29) se tiene que $W(u)$ es función de u del mismo modo en que a lo es de r^2/t . Por lo tanto, mientras exista paralelismo entre los ejes - coordenados correspondientes, debe ser posible sobreponer los valores de campo a la curva tipo, procurando lograr un ajuste óptimo entre am-

* Obsérvese la racionalidad de ambas expresiones mediante análisis dimensional.

TABLA 5.a.

Valores de la Función $W(u)$.

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00012	0.000038	0.00
$\times 10^{-1}$	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
$\times 10^{-2}$	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
$\times 10^{-3}$	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
$\times 10^{-4}$	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
$\times 10^{-5}$	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
$\times 10^{-6}$	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
$\times 10^{-7}$	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
$\times 10^{-8}$	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
$\times 10^{-9}$	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
$\times 10^{-10}$	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
$\times 10^{-11}$	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
$\times 10^{-12}$	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
$\times 10^{-13}$	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
$\times 10^{-14}$	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
$\times 10^{-15}$	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

bos. Entonces, la elección de un punto arbitrario, llamado punto de empate, determina en cada gráfica una pareja ordenada cuyos valores, al ser substituidos en las eca. 5.28 y 5.29, permitan obtener la solución del sistema, calculándose así los valores de los parámetros S y T.

Jacob introdujo una simplificación a la solución de Theis, a partir de la cual desarrolló el método que lleva su nombre. De la ecuación 5.27, consideró que para valores pequeños de u ($u \leq 0.01$) los términos de la serie subsiguientes al segundo podrían ser despreciados en razón de su magnitud relativa, quedando tal expresión como:

$$a = \frac{Q}{4\pi T} (\ln u^{-1} - \ln 1.78)$$

que expresada en logaritmos comunes queda como:

$$a = \frac{2.3 Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S} \quad (5.30)$$

Si es el caso en que se cuenta con un pozo de observación y si - tanto los coeficientes S y T como los parámetros Q y r son o se mantienen constantes, el abatimiento, a, será entonces sólo función lineal - del logaritmo del tiempo; de este modo, la ec. 5.30 puede escribirse - como:

$$a = \frac{0.183 Q}{T} \log \frac{2.25 T}{r^2 S} + \frac{0.183 Q}{T} \log t \quad (5.31)$$

Por consiguiente, las parejas de valores de a y t, obtenidas mediante pruebas de bombeo, determinan puntos que graficados en papel semilogarítmico (a vs log t) deben ajustarse a una recta. La pendiente - de la recta, $2.3Q/4\pi T$, igualada al valor numérico de la diferencia - en el abatimiento para un ciclo logarítmico, proporciona el valor de - la transmisibilidad. Enseguida, el coeficiente de almacenamiento puede obtenerse de cualquier punto de la recta y la ecuación 5.31.

De manera similar, el coeficiente de transmisibilidad puede tam-
bién determinarse a partir de pruebas de bombeo realizadas en la fase

de recuperación, la cual principia una vez que se suspende el bombeo. Al respecto, Theis y Wenzel propusieron un método cuyas características son análogas al desarrollado por Jacob, con la salvedad de que no se requiere pozo de observación; de este modo:

$$a' = \frac{2.3 Q}{4\pi T} \log \frac{t}{t'} \quad (5.32)$$

donde: a es el abatimiento en la fase de recuperación;

Q es el gasto de bombeo;

t es el tiempo contado a partir del inicio del bombeo y

t' es el tiempo contado a partir de la suspensión del bombeo.

La ec. 5.32 se representa por una línea recta en papel semilogarítmico, cuya pendiente permite la obtención de T .

Existen algunos factores cuya incidencia invalida frecuentemente las hipótesis en las que se basa la obtención de las expresiones del flujo radial no establecido antes apuntadas, por lo que en tal sentido se requiere de especial atención al interpretar pruebas de bombeo. Tales factores suelen ser por lo común: la recarga procedente de ríos y lagos; la recarga por infiltración vertical; pendientes significativas en la superficie piezométrica y existencia de fronteras impermeables relativamente próximas al pozo de bombeo; pudiendo afectar cada uno de los cuales, de una u otra manera, la forma y dimensiones del 'cono' de depresión formado en torno al pozo.

Piezometría.

La piezometría es la parte de la Geohidrología que se refiere a la superficie real o virtual determinada por las cargas hidráulicas de presión y posición existentes en cada punto de un acuífero. Se basa en la medición periódica y relativamente simultáneas de la posición del nivel estático en diversos puntos (pozos de observación), debiéndose entender por Nivel Estático al nivel que alcanza el agua cuando el pozo

en el que se hace la observación se encuentra libre de efectos inmediatos debidos a bombeo.

La interpretación de información piezométrica es punto de partida en todo estudio cuantitativo de aguas subterráneas. Se apoya en la elaboración de gráficas sumamente útiles, como son: Hidrógrafos de Pozos, planos de Profundidad del Nivel Estático, Elevación del Nivel Estático y Evolución del Nivel Estático.

- Hidrógrafos de Pozos.

El hidrógrafo de un pozo es la representación gráfica del comportamiento de su nivel estático respecto al tiempo. Este tipo de gráfica suele trazarse a partir de lecturas mensuales o bimestrales de la profundidad del nivel del agua, aunque periodos mayores son también frecuentes; cuando una secuencia de observaciones comprende lapsos generalmente mayores a un año, es posible determinar la ocurrencia de recargas y descargas en el acuífero, así como detectar lecturas piezométricas impropias o erróneas.

- Planos de Profundidad del Nivel Estático.

Este tipo de gráfica consiste en el trazo inferido de líneas que representan puntos de igual profundidad del nivel estático. El trazo se efectúa sobre un plano representativo de la zona acuífera a partir de las lecturas obtenidas en algunas de las captaciones existentes; debido a que tales lecturas están referidas a la superficie del terreno, las curvas se ven afectadas por la topografía.

Los planos así obtenidos son de gran ayuda para tener idea de la profundidad mínima a la que deberán perforarse nuevos pozos y, en combinación con el criterio referente al abatimiento específico (abatimiento por unidad de gasto), seleccionar áreas convenientes de explotación desde el punto de vista de costos de bombeo. En el caso particular de acuíferos libres con niveles freáticos someros, sirven para de-

terminar áreas bajo las cuales existen descargas por evaporación.

- Planos de Elevación del Nivel Estático.

La elaboración de este tipo de planos requiere de la nivelación diferencial de los puntos donde se llevan a cabo las observaciones, a fin de contar, si no con la elevación (altura sobre el nivel del mar) de los brocales de los pozos de observación, al menos, con sus cotas - respecto a un plano horizontal de referencia cualquiera. La diferencia entre la cota o elevación de un brocal y la correspondiente profundidad del nivel del agua, proporciona la elevación o cota del nivel estático para el punto en cuestión. Una selección de puntos de observación convenientemente distribuidos permite la inferencia de curvas de igual elevación del nivel estático, llamadas Líneas Equipotenciales, sobre - un plano representativo. Este tipo de gráfica suele también conocerse como Configuración de la Superficie Piezométrica.

Al efectuar la configuración, deben tenerse en cuenta los rasgos geológicos y de hidrología superficial, los cuales afectan frecuentemente la forma de la superficie piezométrica. También, debe considerarse la disposición de los estratos del subsuelo, así como las características constructivas de los pozos de observación, con el objeto de evitar mezclar lecturas pertenecientes a estratos acuíferos diferentes.

Mediante la configuración de la superficie piezométrica se determina la dirección del flujo del agua subterránea, representado mediante Líneas de Corriente, y los valores del gradiente hidráulico que rigen su movimiento, así como zonas de recarga y descarga, efectos de explotación, etc.

Las líneas equipotenciales y las líneas de corriente forman lo - que se conoce como Red de Flujo, la cual es indispensable para la cuantificación del caudal de flujo subterráneo. Tal cuantificación se basa también en la ley de Darcy y en las características hidráulicas del acuífero.

- Planos de Evolución del Nivel Estático.

La elaboración de estos planos parte de la disposición de un conjunto de valores piezométricos obtenidos de la diferencia entre la profundidad del nivel estático al principio y al fin de un periodo de -- tiempo común a todos los puntos de observación (lectura inicial de la Prof. al N. E. menos lectura final). Es claro que diferencias positivas indican recuperación del nivel y negativas, abatimiento; ambos se deben a la acción alterna de carga y descarga de agua en el acuífero.

Los valores así obtenidos permiten la inferencia de curvas de igual evolución del nivel del agua sobre un plano representativo, lo -- cual hace posible la cuantificación del cambio que experimenta un acuífero en su almacenamiento.

Balance de Aguas Subterráneas.

El planteamiento del balance de aguas subterráneas se encuentra -- fundamentado en el Principio de la Conservación de la Materia y está o -- rientado a la determinación del funcionamiento hidráulico de los acuíferos tanto como a la cuantificación de sus recargas.

Existen otros métodos para evaluar la recarga de los acuíferos, -- algunos de ellos basados en la medición directa de la infiltración, pe -- ro tienen por lo regular altos grados de imprecisión, puesto que involucran directamente variables hidrológicas como lluvia, escurrimiento y evaporación, cuyo orden de magnitud es superior al término que se de -- sea cuantificar. La ecuación de balance de aguas subterráneas, por su parte, involucra sólo términos que se encuentran directamente vinculados al sistema y que guardan en cierto modo independencia respecto a -- los fenómenos o eventos hidrológicos que ocurren en superficie.

La Ley de la Conservación de la Materia aplicada a un acuífero se conoce como Balance de Aguas Subterráneas, el cual establece que para

un intervalo de tiempo cualquiera la diferencia entre las entradas y - salidas de agua es igual al cambio en el almacenamiento. La representación matemática de tal enunciado se denomina Ecuación de Balance y la proyección en planta de la parte del acuífero para la que se hace el - planteamiento se designa con el nombre de Área de Balance; el límite - del área de balance circunscribe generalmente a la zona de explotación, pero no suele ser coincidente con las fronteras laterales del acuífero, salvo en aquellos casos en los que por barreras geológicas impermea---bles dicha área se circunscribe.

Las entradas y salidas a las que se refiere el balance se clasifi- can de acuerdo a su naturaleza en: entradas y salidas por flujo subte---rráneo, recarga vertical, descargas a manantiales y corrientes superfi---ciales, bombeo, evapotranspiración (en zonas de nivel freático somero) y demás conceptos casualmente pertinentes, de modo que la ecuación de balance podría expresarse generalmente como:

$$E_h + R - S_h - D - B - E_v = \Delta V \quad (5.33)$$

donde: E_h y S_h representan respectivamente las entradas y salidas por flujo subterráneo;

R es la recarga neta por flujo vertical;

D representa la descarga a manantiales y corrientes su---perficiales en forma de caudal base;

B representa las extracciones por bombeo;

E_v representa la evapotranspiración, que tiene significa---do sólo cuando se trata de acuíferos con nivel freático somero, y

ΔV es el cambio en el almacenamiento.

Evidentemente, estos términos deben ser expresados en unidades de volumen y evaluados para un mismo periodo de tiempo. La ecuación de ba---lance depende del intervalo de tiempo seleccionado y de las condicio---nes climáticas a las que haya estado sometido el acuífero durante ese lapso.

La aplicación de la ecuación de balance a un área acuífera en particular implica un conocimiento previo de algunos datos relativos a - las obras de captación ahí existentes: localización, distribución, lecturas piezométricas periódicas en pozos de observación o piloto, hidrografía y, en lo posible, datos constructivos de las obras de captación ubicadas en el área de balance, específicamente profundidad, ubicación de cedazos y corte litológico. Es necesario conocer también, mediante la ejecución de pruebas de bombeo, los valores de las propiedades hidráulicas del acuífero, así como las dimensiones y las fronteras impermeables de éste, aún las existentes en el interior de la zona de permeabilidad.

- Entradas y Salidas por Flujo Subterráneo, E_h y S_h .

Este par de términos son de idéntica naturaleza. Se evalúan de modo semejante por medio de la configuración piezométrica obtenida para los instantes inicial y final del intervalo seleccionado, considerando el flujo que transita a través de los canales que integran la red de flujo dentro del área de balance.

El flujo subterráneo que pasa entre dos líneas de corriente continuas, las que determinan lo que se conoce como Canal de Flujo, está dado por la ley de Darcy:

$$Q = T \cdot B \cdot i \quad (5.34)$$

donde: Q representa el gasto;

T , la transmisibilidad;

B , la separación entre líneas de corriente, e

i , el gradiente piezométrico en la sección considerada.

Si se integra esta expresión a todos los canales de flujo en la frontera del área de balance, se obtienen los gastos tanto de entrada como de salida para el instante que corresponde a la configuración empleada. Promediando por separado los gastos de entrada y de

salida obtenidos para los instantes inicial y final del intervalo - de tiempo considerado y multiplicando cada promedio por el valor - del intervalo (Δt), se llega a la determinación aproximada de los - volúmenes de entrada y de salida por flujo subterráneo, esto es:

$$E_h = \frac{(Q_E)_o + (Q_E)_f}{2} \Delta t \quad (5.35)$$

y

$$S_h = \frac{(Q_S)_o + (Q_S)_f}{2} \Delta t \quad (5.36)$$

donde Q_E y Q_S representan los gastos de entrada y de salida y los subíndices o y f indican los instantes inicial y final del intervalo o periodo de balance; a su vez:

$$Q_E, Q_S = \sum_{j=1}^{nc} (T_j \cdot B_j \cdot i_j)_{E,S}, \quad (5.34')$$

expresión donde nc representa el número de canales de flujo contenidos en el área de balance.

- Descargas hacia manantiales o corrientes superficiales, D.

La evaluación de este término, cuando tuviere significación, implica la disponibilidad de registros de estaciones de aforo convenientemente emplazadas, particularmente en el caso de corrientes superficiales, para las que se precisa la determinación del gasto base mediante análisis de hidrogramas, como se señaló oportunamente.

- Extracciones por bombeo, B.

La manera idónea de cuantificar este término es mediante los datos proporcionados por los medidores de caudal, que deberían encontrarse instalados en los equipos de bombeo; desafortunadamente, son raros los casos de obras de captación de aguas subterráneas que cuentan con tal dispositivo. Ante tal deficiencia, existe una serie de métodos indirectos que permiten estimar las extracciones por bombeo.

beo. Estos métodos suelen basarse por lo general en el aforo del caudal de operación de cada pozo, así como en información proporcionada por los usuarios: consumo de energía eléctrica o consumo de combustible, según el caso; tiempo de operación del equipo de bombeo; superficie y lámina de riego si es el caso, etc.

La hidrometría de las extracciones de un pozo cualquiera, frecuentemente requiere de precisar su caudal de bombeo. Para este propósito, se han diseñado dispositivos de aforo como los que involucra el Método de la Escuadra o el Método del Orificio (13), aunque en muchas ocasiones basta sólo con disponer de un cronómetro y un recipiente de tamaño adecuado.

- Evapotranspiración, E_v .

La evapotranspiración no tiene significado alguno dentro de la ecuación de balance sino cuando, tratándose de acuíferos libres, -- existen áreas con nivel freático somero. En tal caso, debe determinarse mediante la aplicación del concepto de Evaporación real a las áreas afectadas, el cual esté sujeto a condiciones pertinentes tales como uso y naturaleza del suelo, cubierta vegetal, profundidad del nivel freático, régimen de precipitación, etc.

Ante la dificultad inherente a la determinación de la evaporación real, para cuyo cálculo diversos investigadores (3) han propuesto fórmulas empíricas pero de aplicación restringida, se opta -- comúnmente, a fin de estimar el valor de este término, por considerar la lámina de evaporación potencial media afectada por el coeficiente de almacenamiento y extendida a las áreas en cuestión, dado que por razón conceptual, la evaporación potencial es siempre de mayor valor que la real. Sin embargo, un manejo impropio en la aplicación de este criterio, favorece la incursión de errores de apreciación seriamente significativos que podrían invalidar el balance.

- Cambio en el Almacenamiento, ΔV .

Este término representa la fluctuación volumétrica neta que sufre el almacenaje del acuífero dentro de su área de balance en un intervalo de tiempo dado. Su cálculo se efectúa tomando como base al plano de evolución piezométrica que corresponde al intervalo de balance establecido. El producto del volumen implícito en las líneas de igual evolución piezométrica por el coeficiente de almacenamiento, representa la evolución real del cambio en el almacenamiento, de manera que éste puede calcularse aplicando la expresión siguiente:

$$\Delta V = S \sum_{i=1}^{na} (a_i \cdot h_i) \quad (5.37)$$

donde: S representa el coeficiente de almacenamiento;
 a_i es un elemento de área con evolución piezométrica h_i y
 na es el número de elementos de superficie en que se ha dividido el área de balance.

Cuando no sea posible obtener el valor del coeficiente de almacenamiento mediante pruebas de bombeo, debe recurrirse a la inferencia de su valor en función de los materiales constitutivos del acuífero o, en su defecto, considerarlo como incógnita a despejarse en un sistema simultáneo de ecuaciones de balance.

- Recarga por Flujo Vertical, R.

Este término constituye la incógnita de la ecuación de balance, de manera que su determinación representa la solución del balance. En realidad, la recarga por flujo vertical no puede obtenerse sino a través del balance de aguas subterráneas.

El balance de aguas subterráneas planteado para diversos periodos permite la estimación de la recarga, ofreciendo un punto de apoyo primario para planear la explotación del recurso. Una variable importante de la que depende indirectamente la recarga la constituye el bombeo en cuanto a su magnitud y distribución espacial y temporal. Los efectos -

que ambos aspectos del bombeo tienden a provocar en el acuífero, así - como el comportamiento de éste bajo condiciones de explotación hipotéticas, se estudian mediante técnicas de simulación que involucran modelos matemáticos o analógicos diseñados con esos propósitos. Tales estudios, que la Geohidrología cataloga como Avanzados o De Predicción, requieren por su naturaleza de un acervo muy completo de datos cuya obtención implica periodos de observación generalmente prolongados, así como fases previas de estudio.

5.1 Inventario de Captaciones de Agua Subterránea.

La zona donde se concentra la explotación de agua subterránea se localiza en la porción central de la zona de estudio, en lo que es propiamente el Valle del Río Presidio. Este valle presenta forma alargada, siguiendo el curso del río; es estrecho en la parte alta o inicial y - notablemente más amplio hacia la parte final. Mide aproximadamente 33 Km de longitud y 6 Km de anchura promedio, de modo que tiene una superficie de alrededor de 198 Km².

Para conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea en el valle, se mandó efectuar un inventario mediante recorridos de campo, los cuales se llevaron a cabo durante el lapso comprendido entre Mayo y Octubre de 1978, asignando a cada aprovechamiento una clave para su identificación posterior.

El censo reveló la existencia de 150 obras de captación de agua subterránea, cuya clasificación dió las cifras de: 61 pozos, 88 norias y 1 manantial. Asimismo, del total de aprovechamientos censados, 42 se destinan al uso doméstico, 69 al uso agrícola, 10 al ganadero y 1 al industrial.

Los pozos tienen profundidades que varían entre 8 y 60 m y sus equipos de bombeo tienen diámetros que fluctúan entre 2.54 cm (1") y - 30.4 cm (12"), encontrándose 38 activos y 23 inactivos. Las norias tie

nen profundidades entre 3 y 21 m; 83 se encuentran activas y 5 inactivas.

La explotación de agua subterránea mediante pozos se inició a principios de la década 1950-1960, teniendo recientemente un incremento notable debido a las persistentes sequías que se han presentado en la región. En el plano 5.5 se presenta la ubicación de los aprovechamientos censados.

5.2 Piezometría.

De la información recopilada mediante el censo, se seleccionaron 59 aprovechamientos piloto para la observación periódica de los niveles piezométricos. Como criterios de selección se consideró: 1) que su distribución en el área fuera tal que se cubriera la mayor extensión posible; 2) que no presentaran dificultad para efectuar los sondeos correspondientes; 3) que se conociera el tipo de captación y sus características constructivas y 4) que se escogieran preferiblemente pozos, porque gracias a la mayor profundidad de penetración en el acuífero reflejan con mayor certeza la posición de la superficie piezométrica.

La observación del nivel en los pozos piloto se efectuó para los meses de Mayo, Julio, Septiembre y Noviembre de 1978. Asimismo, con objeto de posibilitar la configuración piezométrica, se corrió la nivelación diferencial de los pozos piloto, de la que se obtuvieron las elevaciones de los brocales referidas al nivel medio del mar. Tanto la elevación de los brocales, como las lecturas de profundidad del nivel estático para los meses señalados, se presentan en la tabla 5.2.

5.2.1 Profundidad del Nivel Estático.

El conocimiento de la distribución de los valores de la profundidad al nivel del agua, es de gran utilidad en la planeación del aprovechamiento del agua subterránea.

NIVELES PIEZOMETRICOS

VALLE DEL RIO PRESIDIO, EDO. DE SINALOA
AÑO 1978

POZO No.	No. de CUADR.	PROF. del POZO m	ALTURA de BROCAL m	ELEVACION del BROCAL m.s.n.m.		MAYO	JULIO	SEPTIEMBRE	NOVIEMBRE
19		15.00	0.90	15.670	P. N. E.	10.10	10.19	8.40	9.12
					ELEV. N. E.	5.570	5.480	7.270	6.550
20		11.00	0.58	11.729	P. N. E.	6.35	6.45	4.49	4.92
					ELEV. N. E.	5.379	5.279	7.239	6.809
21		4.20	0.27	6.488	P. N. E.	3.44	2.75	0.30	0.70
					ELEV. N. E.	3.048	3.738	6.188	5.788
31		45.00	1.03	13.978	P. N. E.	9.76	9.93	9.68	9.68
					ELEV. N. E.	4.218	4.048	4.258	4.298
32		30.00	0.68	13.289	P. N. E.	8.62	8.40	8.07	8.33
					ELEV. N. E.	4.669	4.889	5.219	4.959
34		29.00	0.98	14.754	P. N. E.	7.77	7.62	7.21	7.51
					ELEV. N. E.	6.984	7.134	7.544	7.244
37		60.00	0.00	15.958	P. N. E.	3.22	2.99	2.67	2.75
					ELEV. N. E.	12.738	12.968	13.288	13.208
40		4.50	0.00	16.807	P. N. E.	3.20	2.84	2.51	2.89
					ELEV. N. E.	13.607	13.967	14.297	13.917
41		60.00	-0.10	17.218	P. N. E.	3.40	3.13	2.85	2.95
					ELEV. N. E.	13.818	14.088	14.368	14.268
42		60.00	0.10	17.713	P. N. E.	3.44	3.20	2.98	3.05
					ELEV. N. E.	14.273	14.513	14.733	14.663
44		5.00	1.00	16.285	P. N. E.	3.01	2.85	2.53	2.65
					ELEV. N. E.	13.275	13.435	13.755	13.635
45		60.00	0.00	15.410	P. N. E.	4.03	5.05	4.54	4.52
					ELEV. N. E.	11.380	10.360	10.870	10.890
46		9.50	0.00	15.072	P. N. E.	7.00	7.04	6.59	6.60
					ELEV. N. E.	8.072	8.032	8.482	8.472
53		5.00	0.00	17.686	P. N. E.	3.78	3.33	2.84	3.16
					ELEV. N. E.	13.906	14.356	14.846	14.526
55		4.50	0.14	19.600	P. N. E.	3.75	3.26	3.22	3.68
					ELEV. N. E.	15.850	16.340	16.380	15.920
60		5.00	0.45	19.963	P. N. E.	3.77	3.10	2.56	3.65
					ELEV. N. E.	16.193	16.863	17.003	16.313
62		5.00	0.21	20.420	P. N. E.	3.77	2.97	2.66	3.62
					ELEV. N. E.	16.650	17.450	17.560	16.800
65		3.00	-0.80	20.521	P. N. E.	2.58	1.60	1.60	3.05
					ELEV. N. E.	17.941	18.921	18.921	17.471
68		4.00	0.39	22.605	P. N. E.	3.40	2.58	2.25	3.09
					ELEV. N. E.	19.205	20.025	20.355	19.515
69		4.50	0.00	22.900	P. N. E.	3.28	2.24	2.00	2.92
					ELEV. N. E.	19.620	20.660	20.900	19.980
71		4.50	0.41	22.116	P. N. E.	3.92	2.62	2.59	3.10
					ELEV. N. E.	18.196	19.496	19.526	19.016
75		5.50	0.43	18.804	P. N. E.	3.65	3.03	2.35	3.25
					ELEV. N. E.	15.154	15.774	15.844	15.554

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS:

P. N. E. PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTATICO EN m
REFERIDA AL NIVEL DEL BROCAL.
ELEV. N. E. ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO EN m.s.n.m.
• NIVEL DINAMICO.

Tabla 5.2.

Hoja 1/3

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.
TESIS PROFESIONAL
Manuel Juárez Núñez.

NIVELES PIEZOMETRICOS

VALLE DEL RIO PRESIDIO, EDO. DE SINALOA

AÑO 1978

POZO No.	No. de CUADR.	PROF. del POZO m	ALTURA del BROCAL m	ELEVACION del BROCAL m.s.n.m.		MAYO	JULIO	SEPTIEMBRE	NOVIEMBRE
76		4.00	0.00	15.674	P. N. E.	3.20	2.62	2.36	2.90
					ELEV. N. E.	12.474	13.054	13.314	12.774
83		38.00	0.38	14.270	P. N. E.	4.36	3.87	3.40	3.95
					ELEV. N. E.	9.910	10.400	10.870	10.320
84		44.00	0.10	11.981	P. N. E.	2.37	2.91	2.40	2.56
					ELEV. N. E.	9.611	9.071	9.581	9.421
86		40.00	0.34	11.218	P. N. E.	3.40	2.98	2.54	3.15
					ELEV. N. E.	7.818	8.238	8.678	8.068
87		21.00	2.66	11.293	P. N. E.	17.92*	4.68	3.96	4.03
					ELEV. N. E.	-6.627*	6.613	7.333	7.263
88		8.00	0.15	12.873	P. N. E.	4.30	4.82	4.38	4.38
					ELEV. N. E.	8.573	8.053	8.493	8.493
89		5.00	0.54	14.055	P. N. E.	4.00*	2.98	2.80	2.70
					ELEV. N. E.	10.055	11.075	11.255	11.355
91		40.00	0.30	17.074	P. N. E.	3.14	3.15	2.87	3.15
					ELEV. N. E.	13.934	13.924	14.204	13.924
93		8.00	0.83	14.538	P. N. E.	2.66	3.14	3.06	2.92
					ELEV. N. E.	11.872	11.392	11.472	11.612
95		60.00	1.00	15.100	P. N. E.	2.40	2.93	2.00	2.36
					ELEV. N. E.	12.700	12.170	13.100	12.740
100		6.00	1.35	25.848	P. N. E.	5.04*	3.88	3.56	4.15
					ELEV. N. E.	20.808	21.968	22.288	21.698
102		10.00	0.41	10.771	P. N. E.	5.40	5.50	4.00	4.41
					ELEV. N. E.	5.371	5.271	6.771	6.361
103		65.00	2.00	4.698	P. N. E.	5.44	5.05	3.95	4.55
					ELEV. N. E.	-0.742	-0.352	0.748	0.148
104		6.00	0.00	3.510	P. N. E.	4.37	3.76	2.47	3.60
					ELEV. N. E.	-0.860	-0.250	1.040	-0.090
106		4.50	0.00	2.988	P. N. E.	3.24	2.15	1.07	2.55
					ELEV. N. E.	-0.252	0.838	1.918	0.438
107		60.00	0.10	9.961	P. N. E.	5.25	5.10	4.14	4.66
					ELEV. N. E.	4.711	4.861	5.821	5.301
108		60.00	0.31	10.727	P. N. E.	6.38	6.28	5.54	5.57
					ELEV. N. E.	4.347	4.447	5.187	5.157
110		6.50	0.44	12.690	P. N. E.	4.87	5.15	3.43	3.67
					ELEV. N. E.	7.820	7.540	9.260	9.020
111		6.70	0.26	12.763	P. N. E.	5.66	4.55	3.54	4.00
					ELEV. N. E.	7.103	8.213	9.223	8.763
112		30.00	0.75	14.643	P. N. E.	10.38	9.74	8.57	8.88
					ELEV. N. E.	4.263	4.903	6.073	5.763
113		29.00	1.25	10.012	P. N. E.	5.00*	2.95	1.09	2.04
					ELEV. N. E.	5.012	7.062	8.922	7.972
114		25.00	0.30	9.916	P. N. E.	6.26	6.34	3.99	4.40
					ELEV. N. E.	3.656	3.576	5.926	5.516

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS:

P.N.E. PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTATICO EN m
REFERIDA AL NIVEL DEL BROCAL.

ELEV.N.E. ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO EN m.s.n.m.
* NIVEL DINAMICO.

Tabla 5.2.

Hoja 2/3

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.
TESIS PROFESIONAL
Manuel Juárez Núñez.

NIVELES PIEZOMETRICOS

VALLE DEL RIO PRESIDIO, EDO. DE SINALOA

AÑO 1978

POZO No.	No. de CUADR.	PROF. del POZO m	ALTURA de BROCAL m	ELEVACION del BROCAL m.s.n.m.		M A Y O	J U L I O	S E P T I E M B R E	N O V I E M B R E
116		8.50	0.93	7.072	P. N. E.	5.40	5.40	4.10	4.10
					ELEV. N. E.	1.672	1.672	2.972	2.972
117		50.00	1.06	6.064	P. N. E.	6.08	6.17	5.24	5.06
					ELEV. N. E.	-0.016	-0.106	0.824	1.004
119		60.00	1.01	6.010	P. N. E.	5.34	5.16	3.67	4.07
					ELEV. N. E.	0.670	0.830	2.340	1.940
121		45.00	1.02	4.395	P. N. E.	10.82*	5.41	4.68	4.60
					ELEV. N. E.	-6.425	-1.015	-0.285	-0.205
122		8.00	0.65	6.254	P. N. E.	5.85	5.25	2.80	4.35
					ELEV. N. E.	0.404	1.004	3.454	1.904
125		45.00	1.07	3.517	P. N. E.	5.43	4.70	3.45	4.58
					ELEV. N. E.	-1.913	-1.183	0.067	-0.063
126		30.00	-0.18	5.942	P. N. E.	5.34	4.48	3.30	4.43
					ELEV. N. E.	0.602	1.462	2.642	1.512
127		12.00	0.00	50.106	P. N. E.	10.00	10.26	8.51	9.76
					ELEV. N. E.	40.106	39.846	41.596	40.346
130		10.00	0.53	41.216	P. N. E.	8.00	8.33	8.25	8.05
					ELEV. N. E.	33.216	32.886	32.966	33.166
132		4.50	0.00	10.467	P. N. E.	3.00	2.58	2.19	2.11
					ELEV. N. E.	7.467	7.887	8.277	8.357
133		8.00	0.44	13.880	P. N. E.	2.89	2.70	2.73	2.56
					ELEV. N. E.	10.990	11.180	11.150	11.320
139		10.00	8.38	14.795	P. N. E.	8.00	8.11	8.00	7.76
					ELEV. N. E.	6.795	6.685	6.795	7.035
141		4.40	0.50	17.284	P. N. E.	3.49	3.65	2.50	3.03
					ELEV. N. E.	13.794	13.634	14.784	14.254
142		6.50	0.41	13.565	P. N. E.	4.51	4.81	4.35	4.27
					ELEV. N. E.	9.055	8.755	9.215	9.295
144		5.00	0.75	13.856	P. N. E.	4.00	3.67	3.12	3.43
					ELEV. N. E.	9.856	10.186	10.736	10.426
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				
					P. N. E.				
					ELEV. N. E.				

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS:

P.N.E. PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTATICO EN m
REFERIDA AL NIVEL DEL BROCAL.
ELEV.N.E. ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO EN m.s.n.m.
" NIVEL DINAMICO.

Tabla 5.2.

Hoja 3/3

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.
TESIS PROFESIONAL
Manuel Juárez Méndez.

El plano 5.2.1 ilustra la configuración de la profundidad del nivel estático en el valle del Río Presidio para el mes de Mayo de 1978. De su distribución se tiene que generalmente los menores valores de -- profundidad se presentan en la proximidad del cauce del río y del arroyo que desciende desde el poblado de Malpica, incrementándose hacia -- las partes altas de ambas márgenes. En la margen derecha del río, sobre la parte alta del valle, se presentan profundidades hasta de 3 m, hasta cerca del arroyo alojado entre los poblados de San Francisco y -- Escamillas; a partir de este arroyo hacia el sur, el valor de la profundidad se incrementa hasta tomar un valor de 14 m en el área de pozos de abastecimiento del Puerto de Mazatlán; más hacia el sur, cerca del poblado de Barrón, la profundidad varía de 3 m en la proximidad -- del cauce del río, a 6 m en el pozo No. 108. En la margen izquierda -- del río, sobre la porción norte del valle, la profundidad varía desde 2 m en la proximidad del cauce, a 4 m cerca del poblado de El Roble; -- cerca de Villa Unión, se incrementa desde 4 m en la cercanía del cauce, a 10 m en la parte alta del arroyo que pasa por el mismo poblado; más hacia el sur, cerca del poblado de El Walamo, se tienen profundidades entre 4 y 5 m.

5.2.2 Elevación del Nivel Estático.

A partir de los datos de profundidad del nivel estático y de elevación de brocal de los pozos piloto, se obtuvieron las configuraciones del nivel estático para la diversidad de fechas en que se tomaron lecturas piezométricas. Las configuraciones muestran notable similitud entre sí debido probablemente a la brevedad de los intervalos de observación y a la incipiente explotación del acuífero.

En el plano 5.5* se puede apreciar la configuración del nivel estático para Mayo de 1978. Se observa que la mayor elevación del nivel del agua en el valle, 19 m.s.n.m., se presenta en la parte norte, cerca de Escamillas; el nivel disminuye siguiendo el curso del río hasta

* Originalmente, este plano muestra la red de flujo, la cual necesariamente incluye la configuración del N. E. (líneas equipotenciales).

alcanzar el nivel del mar entre los poblados de Barrón y El Walamo; un poco más al sur, se llegan a presentar elevaciones hasta de 2 m.b.n.m. como lo indica el aprovechamiento No. 15. Al sur del poblado de El Roble se presenta una depresión de los niveles definida por la elevación 8 m.s.n.m.; una segunda depresión se observa en la zona de los pozos de abastecimiento del Fuerte de Mazatlán. Bajo los arroyos que descienden hacia el río entre los poblados de Villa Unión y El Roble, se tienen valores hasta de 12 y 13 m.s.n.m. Finalmente, cerca del poblado de La Urraca, la configuración piezométrica indica una zona de niveles estáticos altos en donde la disposición de las líneas equipotenciales sugiere la existencia de una alimentación al acuífero.

La forma de las líneas equipotenciales no permita establecer con claridad el estado de interacción acuífero-corriente superficial.

5.2.3 Evolución del Nivel Estático.

De la configuración de evolución del nivel estático en el acuífero del valle del Río Presidio para el periodo Mayo-Noviembre de 1978, mostrada en el plano 5.2.2, se observan recuperaciones en el nivel del agua. En la porción norte del valle, sobre la margen derecha del río, se tuvieron recuperaciones entre 0.1 y 0.5 m y entre -0.2 y 0.5 sobre la margen izquierda. En la porción sur, entre Villa Unión y El Walamo, el nivel se recuperó entre 0.8 y 2.0 m. De esta manera se refleja el comportamiento del nivel debido a la recarga que recibió el acuífero en el lapso señalado.

5.3 Hidrometría de las Extracciones de Agua Subterránea.

Para conocer el volumen de agua extraída anualmente en la zona, así como su distribución, se efectuaron aforos en las descargas de las captaciones cuya extracción se consideró significativa. Con ello se obtuvo también información pertinente sobre regímenes de operación, láminas de riego, tipo y superficie de cultivo, etc.

Se encontró que en el valle del Río Presidio la explotación de agua subterránea se efectúa con una capacidad instalada de $2.11 \text{ m}^3/\text{s}$, -ascendiendo la extracción anual a $32.93 \times 10^6 \text{ m}^3$ mediante 61 pozos y -88 norias. De la extracción anual total, $26 \times 10^6 \text{ m}^3$ corresponden a la extracción que se hace para el abastecimiento del Puerto de Mazatlán -mediante 17 pozos ubicados en el área de El Pozole. Los datos hidrométricos obtenidos se presentan en la tabla 5.3.

5.4 Pruebas de Bombeo.

Con el fin de conocer las características hidrodinámicas del acuífero, representadas por los coeficientes de transmisibilidad y de almacenamiento, se efectuaron 12 pruebas de bombeo en otros tantos pozos.

El tiempo de duración de las pruebas dependió de la necesidad de uso del agua por parte de los usuarios de los equipos de bombeo y del comportamiento del nivel del agua durante el desarrollo de cada prueba.

De las pruebas realizadas, 11 se efectuaron en las fases de abatimiento y recuperación y 1 en la fase de recuperación solamente. Los caudales de bombeo variaron entre 8.0 y 65.7 lps.

Las pruebas de bombeo se interpretaron gráficamente mediante la comparación de las soluciones teóricas de la ecuación que gobierna el flujo en medios porosos para diversas condiciones de frontera, penetración del pozo en el acuífero y régimen de flujo, con el comportamiento observado del nivel del agua durante la realización de las pruebas. De esta forma, la variación de los niveles medidos en el propio pozo de bombeo se graficó en papel semilogarítmico.

Del total de pruebas realizadas, 11 fueron interpretables en la fase de abatimiento, 10 en la fase de recuperación y 2 no fueron interpretables (fase de recuperación).

Tabla 5.3
EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA
VALLE DEL RIO PRESIDIO, EDO. DE SINALOA
1978

Hoja 1/2

APROV. No.	CUA- DRO No.	CAUDAL de OPERACION l.p.s.	REGIMEN de OPERACION hr/año	EXTRACCION m³/año	APROV. No.	CUA- DRO No.	CAUDAL de OPERACION l.p.s.	REGIMEN de OPERACION hr/año	EXTRACCION m³/año	APROV. No.	CUA- DRO No.	CAUDAL de OPERACION l.p.s.	REGIMEN de OPERACION hr/año	EXTRACCION m³/año
1		30.3	8,400	916,272.0	26		1.5	2,920	15,768.0	51		11.0	1,080	42,768.0
2		26.0	8,400	786,240.0	27		3.0	2,080	22,464.0	52		10.5	800	30,240.0
3		63.6	8,400	1'923,264.0	28		1.2	730	3,153.6	53		13.1	640	30,182.4
4		55.6	8,400	1'681,344.0	29		1.5	1,095	5,913.0	54		14.2	960	49,075.2
5		50.5	8,400	1'527,120.0	30		46.0	8,400	1'391,040.0	55		12.5	1,008	45,360.0
6		39.8	8,400	1'203,552.0	31		63.5	3,360	768,096.0	56		15.0	1,200	64,800.0
7		76.7	8,400	2'319,408.0	32		33.5	1,800	217,080.0	57		12.0	720	31,104.0
8		43.5	8,400	1'315,440.0	33		31.8	1,920	219,801.0	58		10.0	640	23,040.0
9			INAC.		34		35.0	1,800	226,800.0	59		8.0	960	27,648.0
10		68.6	8,400	2'074,464.0	35		50.5	1,200	218,160.0	60		8.9	672	21,530.9
11		48.0	8,400	1'451,520.0	36		3.5	2,800	35,280.0	61		8.5	720	22,032.0
12		52.0	8,400	1'572,480.0	37		S/E	INAC.		62		12.2	864	37,946.9
13		45.0	8,400	1'360,800.0	38		2.4	840	7,257.6	63		11.5	4,380	181,332.0
14		37.9	8,400	1'146,096.0	39		S/E	INAC.		64		7.8	888	24,935.0
15		30.0	8,400	907,200.0	40		9.0	1,360	44,064.0	65		8.2	672	19,837.4
16		67.8	8,400	2'050,272.0	41		S/E	INAC.		66		10.5	640	24,192.0
17		50.5	8,400	1'527,120.0	42		S/E	INAC.		67		7.9	700	19,908.0
18		58.2	8,400	1'759,968.0	43		7.8	640	17,971.2	68		8.1	512	14,929.9
19		3.8	2,520	34,473.6	44		S/E	INAC.		69		12.1	560	24,393.6
20			INAC.		45		S/E	INAC.		70		3.5	720	9,072.0
21		3.1	250	2,790.0	46		6.7	720	17,366.4	71		8.8	720	22,809.6
22		1.7	547	3,350.2	47		10.0	800	28,800.0	72		7.5	720	19,440.0
23		1.2	92	399.6	48		12.0	720	31,104.0	73		8.0	420	12,096.0
24		2.0	240	1,728.0	49		10.0	840	30,240.0	74		10.3	500	18,540.0
25		6.2	1,600	35,712.0	50		12.0	840	36,288.0	75		13.5	720	34,992.0

Abreviaturas: INAC.- Inactivo.
S/E.- Sin Equipo de Bombeo.

Tabla 5.3
EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA
VALLE DEL RIO PRESIDIO, EDO. DE SINALOA
1978

Hoja 2/2

APROV No.	CUA- DRO No.	CAUDAL de OPERACION l.p.s.	REGIMEN de OPERACION hr/año	EXTRACCION m³/año	APROV No.	CUA- DRO No.	CAUDAL de OPERACION l.p.s.	REGIMEN de OPERACION hr/año	EXTRACCION m³/año	APROV No.	CUA- DRO No.	CAUDAL de OPERACION l.p.s.	REGIMEN de OPERACION hr/año	EXTRACCION m³/año
76		9.0	840	27,216.0	101		4.5	1,825	29,565.0	126		28.2	900	91,368.0
77		7.3	648	17,029.4	102		3.2	600	6,912.0	127		1.0	520	1,872.0
78		S/E	INAC.		103			INAC.		128		1.5	365	1,971.0
79		7.3	840	22,075.2	104		8.4	900	27,216.0	129		2.5	1,460	13,140.0
80		14.2	840	42,940.8	105		5.0	2,190	39,420.0	130		7.5	360	9,720.0
81		8.0	512	14,745.6	106		7.3	720	18,921.6	131		S/E		1,095.0
82			INAC.		107		S/E	INAC.		132		13.0	1,200	56,160.0
83			INAC.		108		S/E	INAC.		133			INAC.	
84			INAC.		109		8.0	400	11,520.0	134		2.0	1,080	7,776.0
85			INAC.		110		6.2	360	8,035.2	135		S/E		8,760.0
86			INAC.		111		S/E		4,380.0	136		3.0	400	4,320.0
87		8.0	2,315	66,672.0	112		S/E	INAC.		137		S/E	INAC.	
88		11.9	2,190	93,819.6	113		30.0	3,430	370,440.0	138		3.2	1,095	12,614.4
89		2.0	1,300	9,360.0	114			INAC.		139		2.0	4,360	31,536.0
90		6.0	5,110	110,376.0	115			INAC.		140		S/E	INAC.	
91			INAC.		116		2.0	905	6,516.0	141		6.7	360	8,683.2
92		3.5	3,780	47,628.0	117		18.8	800	54,144.0	142		S/E	INAC.	
93		7.5	2,190	59,130.0	118		38.0	1,440	196,992.0	143		5.0	2,190	39,420.0
94			INAC.		119		44.8	640	103,219.2	144		4.5	180	2,916.0
95			INAC.		120		45.2	720	117,158.4	145		2.0	730	5,256.0
96		7.0	648	16,329.6	121		32.5	560	65,520.0	146		S/E		7,665.0
97		8.5	560	17,136.0	122		7.0	2,190	55,188.0	147		S/E	INAC.	
98		8.0	720	20,736.0	123		85.0	2,280	697,680.0	148		3.0	1,095	11,826.0
99		7.2	640	16,588.8	124		30.6	1,440	158,630.4	149		10.0	1,080	38,880.0
100		4.0	1,460	21,024.0	125		65.7	640	151,372.8	150		2.0	8,760	63,072.0

Abreviaturas: INAC.- Inactivo.
S/E.- Sin Equipo de Bombeo

Capacidad Instalada: 2.11 m³/seg.
Volumen Anual Extraído: 32,933,555 m³

En las curvas Log.Tiempo vs Abatimiento obtenidas de las pruebas de bombeo, fué posible en la mayoría de los casos definir un tramo recto que permitió la aplicación del método simplificado de C.E. Jacob a la solución de la ecuación general del flujo en medios porosos. Su expresión para observaciones del nivel dinámico en el propio pozo de bombeo tiene la expresión siguiente:

$$T = \frac{0.183 Q}{\Delta s}$$

donde: T es la transmisibilidad en la parte del acuífero donde se encuentra alojado el cedazo, en m^2/s .

Q es el gasto de bombeo, en m^3/s .

Δs es la pendiente de la recta de ajuste, en $m/ciclo$.

En las figuras 5.4.1 y 5.4.2 se ha incluido la interpretación de algunas pruebas de bombeo y en la tabla 5.4 el resumen de resultados de las pruebas efectuadas. El coeficiente de transmisibilidad adquiere valores desde 2.3×10^{-4} hasta $10.5 \times 10^{-2} m^2/s$, con caudales específicos entre 0.57 y 41.85 lps/m.

El inconveniente del método simplificado de Jacob es que no proporciona información alguna sobre el coeficiente de almacenamiento, pero no fué posible ejecutar al menos una prueba en que se dispusiera de pozo de observación. Este parámetro será inferido posteriormente en función de los materiales constitutivos del acuífero.

5.5 Balance de Aguas Subterráneas.

La brevedad del periodo de tiempo programado para la observación de los niveles piezométricos (Mayo-Noviembre de 1978), impidió el planeamiento del balance de aguas subterráneas para un año hidrológico -- completo; sin embargo, ante tal situación, se fijó el balance para el lapso Mayo-Noviembre de 1978, pretendiendo determinar, al menos, el orden de magnitud de la recarga que presumiblemente recibió el acuífero

Lugar: EL VERNILLO DE CHICURAS

Pozo No. 32

Profundidad: 30 m

Cadena de 6.6 a 30 m

Ø Desc.: 15.24 cm

Caudal: 33.5 l/s

Prof. M.E.: 6.68 m

Fecha: 29 NOV 1978

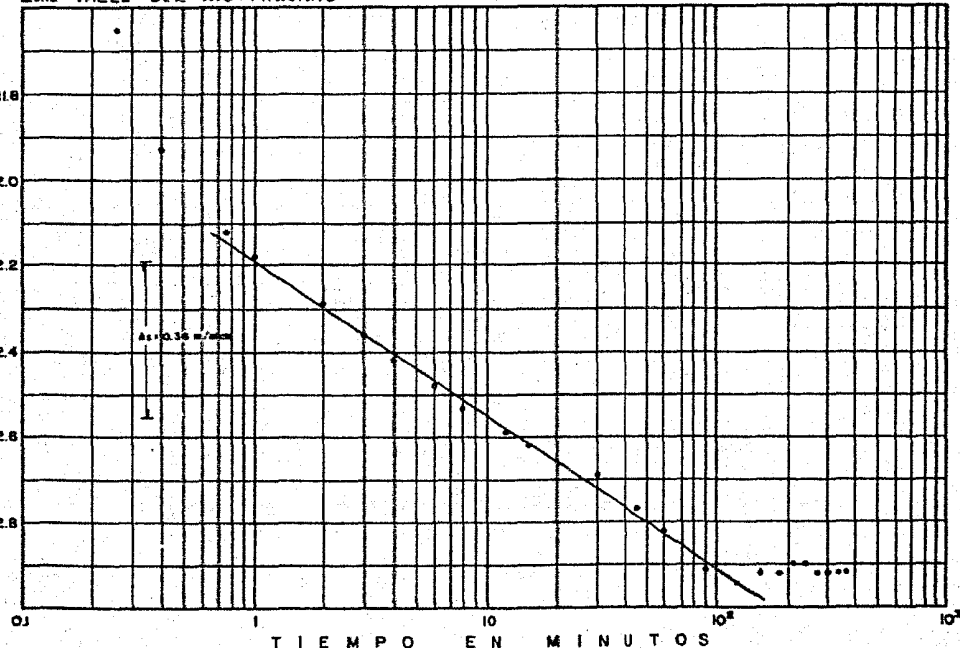
REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

Zona: VALLE DEL RIO PRESIDIO

Estado: SINALOA

TIEMPO ADJUSTADO min.	PROF. NIVEL DEL AGUA m.
0.00	8.68
0.25	11.65
0.50	11.93
0.75	12.12
1.00	12.16
2.00	12.29
3.00	12.36
4.00	12.42
6.00	12.48
8.00	12.53
12.00	12.59
15.00	12.62
30.00	12.69
45.00	12.77
60.00	12.82
90.00	12.91
120.00	12.94
150.00	12.92
180.00	12.92
210.00	12.90
240.00	12.90
270.00	12.92
300.00	12.92
330.00	12.92
360.00	12.92
390.00	
420.00	
450.00	
480.00	
510.00	
540.00	
570.00	
600.00	

PROFUNDIDAD DEL NIVEL DEL AGUA EN METROS



ETAPA DE ABATIMIENTO

$$T = \frac{0.183 Q}{As}$$

$$T = \frac{0.183 \times 33.5 \times 10^{-3}}{0.36}$$

$$T = 1.70 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$$

Figura 5.4.1a

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
TESIS PROFESIONAL
Jedrez Húñez Manuel

Lugar: VAINILLO DE CHICURAS

Pozo No. 32

Profundidad: 30 m

Cedazo de 6.3 a 30 m

Ø Desc.: 15.24 cm

Caudal: 33.5 l.p.s

Prof. N.E.: 8.88 m

Fecha: 29 NOV. 1978.

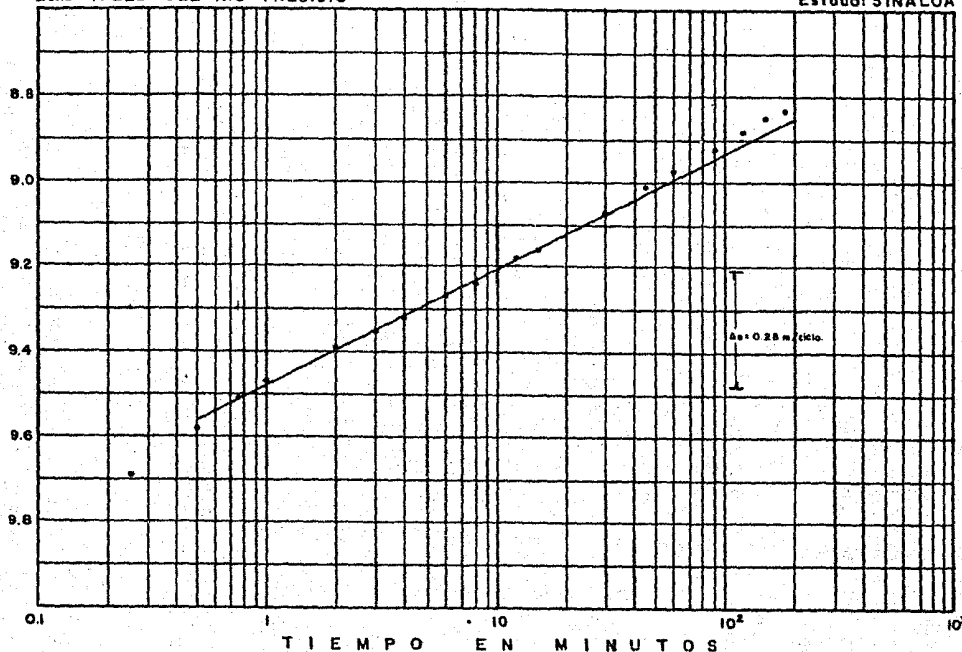
TIEMPO ACUMULADO min	PROP. NIVEL DEL AGUA m
0.00	12.92
0.25	9.69
0.50	9.58
0.75	9.51
1.00	9.47
2.00	9.39
3.00	9.35
4.00	9.32
6.00	9.27
8.00	9.24
12.00	9.18
15.00	9.16
20.00	9.07
45.00	9.01
60.00	8.97
90.00	8.92
120.00	8.88
150.00	8.86
180.00	8.83
210.00	
240.00	
270.00	
300.00	
330.00	
360.00	
390.00	
420.00	
450.00	
480.00	
510.00	
540.00	
570.00	
600.00	

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

Zona: VALLE DEL RIO PRESIDIO

Estado: SINALOA

PROFUNDIDAD DEL NIVEL DEL AGUA EN METROS



ETAPA DE RECUPERACION

$$T = \frac{0.183 Q}{As}$$

$$T = \frac{0.183 \times 33.5 \times 10^{-3}}{0.28}$$

$$T = 2.19 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg.}$$

Figura 5.4.1b

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
TESIS PROFESIONAL
Juarez Núñez Manuel

Lugar: EL VILLA UNION

Pozo No. 118

Profundidad: 40 m

Cedera de 3 a 40 m

Desc: 20.32 cm

Caudal: 45.5 l.p.s

Prof. N.E.: 4.0 m

Fecha: 18 NOV 1978

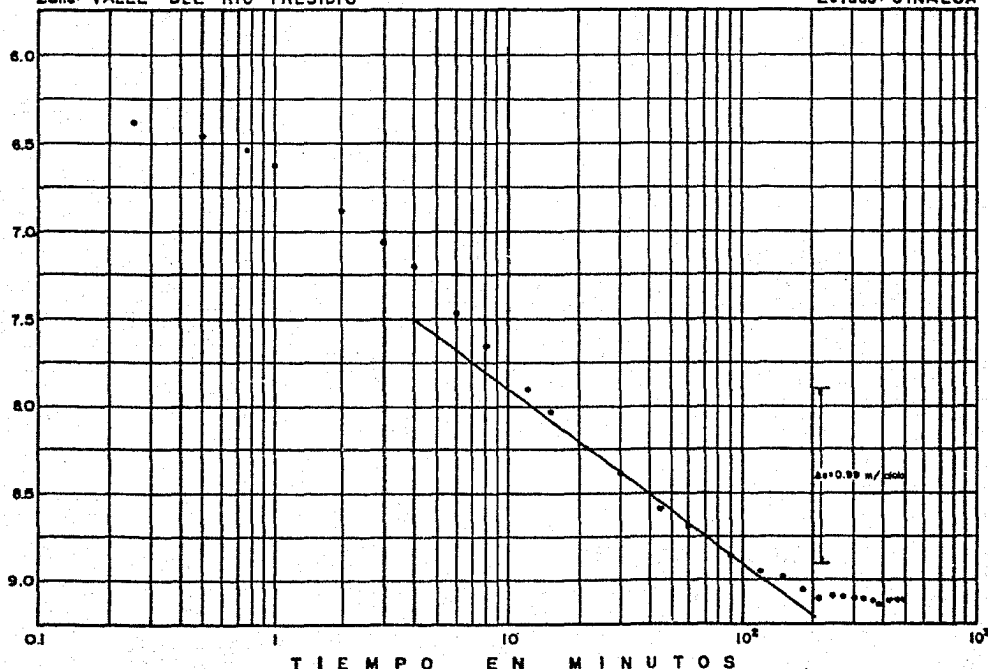
REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

Zona: VALLE DEL RIO PRESIDIO

Estado: SINALOA

TIEMPO ABATIMIENTOS	PROF. NIVEL DEL AGUA
0.00	4.00
0.25	6.38
0.50	6.46
0.75	6.54
1.00	6.63
2.00	6.88
3.00	7.06
4.00	7.20
6.00	7.46
8.00	7.65
12.00	7.90
15.00	8.03
30.00	8.38
45.00	8.56
60.00	8.68
90.00	8.86
120.00	8.93
150.00	8.99
180.00	9.06
210.00	9.11
240.00	9.09
270.00	9.10
300.00	9.11
330.00	9.11
360.00	9.12
390.00	9.14
420.00	9.12
450.00	9.12
480.00	9.12
510.00	
540.00	
570.00	
600.00	

PROFUNDIDAD DEL NIVEL DEL AGUA EN METROS



ETAPA DE ABATIMIENTO

$$T = \frac{0.183Q}{\Delta s}$$

$$T = \frac{0.183 \times 45.5 \times 10^{-3}}{0.99}$$

$$T = 8.41 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$$

Figura 5.4.2a

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.
TESIS PROFESIONAL
Jedrez Núñez Manuel

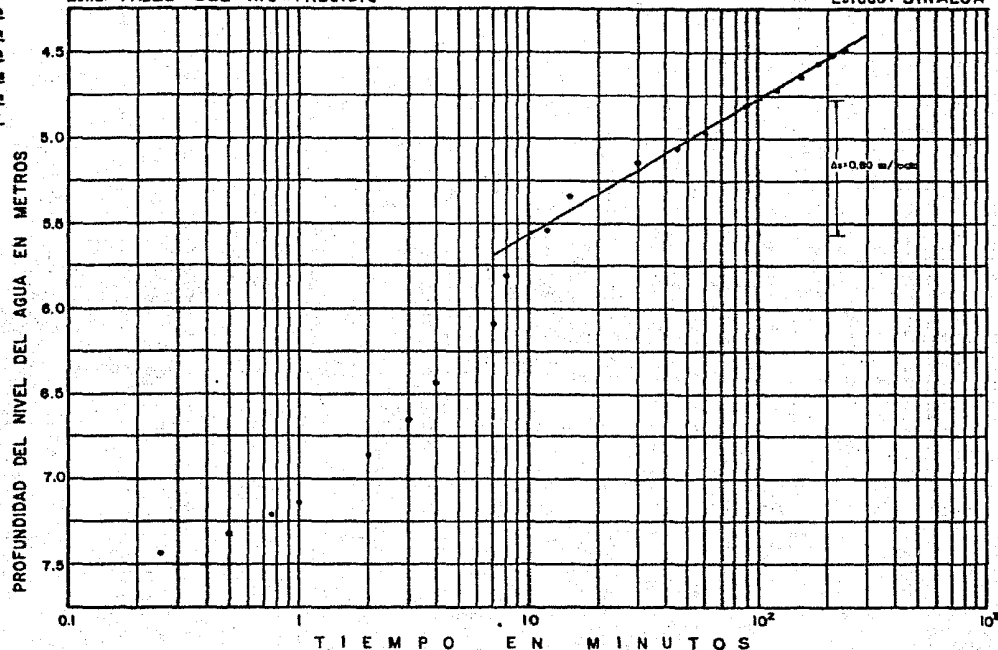
Lugar: EJ. VILLA UNION
 Pozo No. 118
 Profundidad: 40 m
 Cédula de 5 a 40 m
 # Desc.: 20.32 cm
 Caudal: 45.5 LPS
 Prof. N.E.: 4.0 m
 Fecha: 18 NOV. 1978

TIEMPO CORRELADO DEL AGUA S/A.	PROF. NIVEL m.
0.00	9.12
0.25	7.44
0.50	7.32
0.75	7.21
1.00	7.14
2.00	6.86
3.00	6.65
4.00	6.43
5.00	6.09
5.00	5.81
12.00	5.54
15.00	5.34
30.00	5.14
45.00	5.06
60.00	4.97
90.00	4.81
120.00	4.72
150.00	4.64
180.00	4.57
210.00	4.52
240.00	4.49
270.00	
300.00	
330.00	
360.00	
390.00	
420.00	
450.00	
480.00	
510.00	
540.00	
570.00	
600.00	

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

Zona: VALLE DEL RIO PRESIDIO

Estado: SINALOA



ETAPA DE RECUPERACION

$$T = \frac{0.183 Q}{\Delta s}$$

$$T = \frac{0.183 \times 45.5 \times 10^{-3}}{0.80}$$

$$T = 1.04 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$$

Figura 5.4.2b

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
 TESIS PROFESIONAL
 Juárez Núñez Manuel

Tabla 5.4

RESULTADOS DE LA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO
VALLE DEL RIO PRESIDIO, EDO. DE SINALOA
1978

POZO N°	PROFUNDIDAD (m)	DURACION DE LA PRUEBA DE BOMBEO (hrs)		DIAMETRO DE DESCARGA (cm)	PROF. DEL N. ESTATICO (m)	PROF. DEL N. DINAMICO (m)	CAUDAL (l.p.s.)	CAUDAL ESPECIFICO (l.p.s./m)	T _{ABAT.} 10 ⁻³ m ² /seg	T _{REC.} 10 ⁻³ m ² /seg	METODO DE INTERPRETACION
		ABAT.	RECUP.								
31	45.00	7.0	2.5	20.32	10.90	11.62	63.20	41.85	105.00	98.00	Jacob
32	30.00	6.0	3.0	15.24	8.68	12.92	33.50	7.98	17.00	21.90	Jacob
33	30.80	8.0	1.0	25.40	8.48	11.50	31.80	10.60	50.60	106.00	Jacob
34	29.00	8.0	2.0	15.24	7.77	12.20	35.00	7.94	2.90	7.90	Jacob
87	21.00	4.0	2.5	10.16	4.61	18.68	8.00	0.57	0.23	N. I.	Jacob
117	50.00	8.0	3.0	15.24	4.21	15.85	19.40	1.70	4.33	2.45	Jacob
118	40.00	8.0	4.0	20.32	4.00	9.21	45.50	8.99	8.41	10.40	Jacob
119	60.00	6.0	1.5	20.32	2.88	12.95	44.80	4.5	11.60	10.60	Jacob
120	42.00		2.0	20.32	3.26	17.56	45.20			2.39	Jacob
124	20.00	8.0	1.5	15.24	5.46	9.30	30.60	8.14	28.70	29.90	Jacob
125	45.00	6.0	2.5	20.32	4.65	8.52	65.70	17.06	34.40	29.70	Jacob
149	18.00	8.0	1.0	10.16	8.54	14.23	10.00	1.77	0.82	N. I.	Jacob

OBSERVACION: EL CAUDAL ESPECIFICO SE OBTUVO CONSIDERANDO EL ABATIMIENTO REGISTRADO A LOS 180 MINUTOS DESPUES DE INICIAR EL BOMBEO.

del valle durante la época húmeda del año.

La ecuación de balance de aguas subterráneas está representada - por la expresión siguiente:

$$E_h + R - S_h - D - B - E_v = \Delta V$$

la que oportunamente se analizó en la parte teórica de este capítulo. Su aplicación hizo necesario estimar el coeficiente de almacenamiento, así como el de transmisibilidad en el caso de aquellos canales de flujo donde el valor de este parámetro no resultó muy ostensible.

Con el objeto de simplificar la evaluación de la recarga, convino efectuar ciertas consideraciones relativas a la significación que algunos términos de la ecuación de balance tienen en este caso particular:

a).- El volumen de evapotranspiración, aunque no es del todo nulo, se consideró despreciable debido a que el nivel del agua es muy somero sólo en áreas reducidas y a que el balance se establece para la época húmeda del año, esto es, cuando los efectos evaporativos sobre las aguas propiamente subterráneas son un tanto reducidos.

b).- Las extracciones por bombeo para uso agrícola se consideraron también despreciables ante la significativa reducción de estas demandas - durante la época húmeda del año. Por el contrario, el bombeo de agua - para uso doméstico como el que se efectúa para el abastecimiento del Puerto de Mazatlán, no puede ser despreciado.

c).- La descarga del acuífero a manantiales y corrientes superficiales se consideró también como nula, ya que, por una parte, los primeros -- son prácticamente inexistentes y, por otra, si bien no fué posible precisar el mecanismo de interacción acuífero-corriente superficial, es - obvia la tendencia de la corriente (Río Presidio) a comportarse como - influente durante la época húmeda del año.

Estas consideraciones se basaron en un criterio conservador, que debe reflejarse en la ecuación de balance por la inducción de un valor mínimo de la recarga.

Las entradas y salidas por flujo horizontal subterráneo se obtuvieron de la red de flujo correspondiente a los meses de Mayo (Plano - 5.5) y Noviembre de 1978, es decir, al inicio y al final del intervalo de balance, resultando valores de 5.04 y $6.52 \times 10^6 \text{ m}^3$ respectivamente (Tabla 5.5.1).

Las extracciones por bombeo se calcularon en función del caudal de los pozos de abastecimiento de agua del Puerto de Mazatlán y del intervalo de balance, sin considerar variaciones estacionales. Se obtuvo un valor de $13.12 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Tabla 5.5.2).

Finalmente, el cambio en el almacenamiento se calculó a partir de la configuración de evolución del nivel estático correspondiente al intervalo de balance (Plano 5.2), considerando un valor de 0.09 para el coeficiente de almacenaje, que es del orden al que por lo regular presentan los acuíferos libres, como lo es el caso presente. Se obtuvo así un valor de $5.03 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Tabla 5.5.3).

Por lo tanto, substituyendo en la ecuación de balance, expresada en millones de metros cúbicos (10^6 m^3), los valores obtenidos de acuerdo a las condiciones establecidas, se tiene que:

$$5.04 + R - 6.52 - 13.12 = 5.03$$

de donde resulta un valor de $19.63 \times 10^6 \text{ m}^3$ para la recarga vertical - que tuvo lugar en el periodo Mayo - Noviembre de 1978, R, la que procede fundamentalmente de la infiltración del agua de lluvia y muy probablemente del escurrimiento del río.

TABLA 5.5.1

CALCULO DE ENTRADAS Y SALIDAS POR FLUJO HORIZONTAL SUBTERRANEO.

MAYO - NOVIEMBRE DE 1978

CANAL	TRANSMISIBILIDAD 10 ⁻³ m ² /s	GRADIENTE HIDRAULICO 10 ⁻³	ANCHO 10 ³ m	CAUDAL 10 ⁻³ m ³ /s
Entradas (Mayo de 1978):				
E1	14.0	1.82	1.05	26.75
E2	26.2	1.67	1.00	43.75
E3	26.2	2.10	2.30	126.55
E4	14.0	2.00	1.70	47.60
E5	4.7	2.85	2.30	30.81
E6	4.7	1.33	1.40	8.75
Suma.				284.21
Salidas (Mayo de 1978):				
S1	32.5	2.86	2.50	232.38
S2	29.3	1.33	1.30	50.66
S3	19.3	1.54	1.35	40.12
S4	9.4	2.50	1.15	27.02
S5	3.4	2.86	0.40	3.89
S6	10.1	1.08	1.80	19.63
Suma.				373.70
Entradas (Noviembre de 1978):				
E1	14.0	2.00	1.20	33.60
E2	26.2	2.11	1.30	71.87
E3	26.2	3.33	1.90	165.77
E4	14.0	2.86	1.65	60.07
E5	4.7	2.50	2.20	25.85
E6	4.7	1.43	1.10	7.39
Suma.				364.55
Salidas (Noviembre de 1978):				
S1	32.5	3.63	2.25	265.44
S2	29.3	2.11	1.60	98.92
S3	19.3	2.00	1.05	40.53
S4	9.4	2.35	1.45	32.03
S5	3.4	2.86	0.30	2.92
S6	10.1	1.00	2.40	24.24
Suma.				464.08

$$E_h = 1/2 (Q_{E0} + Q_{Ef}) \Delta t \quad y \quad S_h = 1/2 (Q_{S0} + Q_{Sf}) \Delta t :$$

$$E_h = 1/2 (0.284 + 0.364) \text{ m}^3/\text{s} \times 15.552 \times 10^6 \text{ s} = 5.04 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

$$S_h = 1/2 (0.374 + 0.464) \text{ m}^3/\text{s} \times 15.552 \times 10^6 \text{ s} = 6.52 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

TABLA 5.5.2

CALCULO DE LAS EXTRACCIONES POR BOMBEO.

MAYO - NOVIEMBRE DE 1978.

No. de Captaciones (Abastecimiento del Puerto de Mazatlán). .17 Pozos*
 Gasto Total de Operación. 0.844 m³/s.
 Intervalo de Balance (6 meses). 15.552 x 10⁶ s.

* Incluye los Aprove. Nos. 1 - 18, excepto el No. 9 (Tabla 5.3).

$$B = Q_g \cdot \Delta t ; B = 0.844 \text{ m}^3/\text{s} \times 15.552 \times 10^6 \text{ s} = 13.12 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

TABLA 5.5.3

CALCULO DEL CAMBIO EN EL ALMACENAMIENTO.

MAYO - NOVIEMBRE DE 1978.

ELEMENTO DE AREA	AREA	EVOLUCION PIEZOMETRICA	CAMBIO EN EL ALMACENAMIENTO*
	10 ⁶ m ²	m	10 ⁶ m ³
1	1.24	-0.25	-0.028
2	6.80	-0.10	-0.061
3	11.40	0.10	0.103
4	3.72	0.15	0.050
5	25.12	0.30	0.678
6	4.08	0.50	0.184
7	3.78	0.60	0.204
8	0.48	0.80	0.035
9	9.16	0.85	0.701
10	6.66	0.90	0.540
11	10.52	1.20	1.136
12	8.28	1.60	1.192
13	1.80	1.85	0.300
Suma	93.04		5.034

$$\Delta V = S \sum_{i=1}^{na} (a_i \cdot \Delta h_i) ; \Delta V = 5.03 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

*Para S = 0.09

VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

- a) La precipitación media anual varía desde 700mm, en la proximidad de la línea costera, hasta 1,500mm, en las inmediaciones de la Sierra Madre Occidental. La disposición de la Sierra Espinazo del Diablo respecto a la porción de la Sierra Madre Occidental alojada en la vecindad de la zona de estudio, ejerce una influencia notable en la distribución superficial de la lluvia. Es posible diferenciar, aunque no muy claramente, la ocurrencia de un par de periodos de precipitación durante el año: el de Verano, de Junio a Octubre, en el que ocurre entre 73 y 93% de la lluvia anual, y el de Otoño-Invierno, en Noviembre y Diciembre, en el que la precipitación que acontece representa entre 2 y 10% de la anual, correspondiendo los porcentajes complementarios a la lluvia que ocurre en los meses de Enero a Mayo. La incidencia ciclónica es un factor importante que afecta la precipitación en el Verano; las lluvias en Otoño-Invierno se deben al choque de masas de aire cargadas de vapor de agua provenientes de zonas tropicales, con las masas de aire que se desprenden de la corriente fría conocida como «jet», la que por mecanismos aún desconocidos se desplaza hacia los trópicos a finales de Otoño.
- b) El Río Presidio descarga durante la fase de recesión un volumen comprendido entre 7.5 y $14 \times 10^6 \text{ m}^3$ de un volumen potencial disponible que varía entre 14 y $17 \times 10^6 \text{ m}^3$. Estos valores fueron obtenidos mediante el análisis de hidrogramas de gastos medios diarios aforados por la estación hidrométrica Siqueros para los periodos en que, de acuerdo al estudio pluviométrico, la precipitación fué media y escasa. Sin embargo, ante la inexistencia de estaciones de aforo en la proximidad de la desembocadura del río y debido a la ubicación de la citada estación hidrométrica, donde el río inicia su incursión en la planicie costera, tales valores son sólo válidos para aquel sector de cuenca definido por el punto de emplazamiento de la estación y, aunque son necesarios, son a la vez insuficientes pa

ra determinar el funcionamiento del acuífero del valle en cuanto a su relación con la corriente superficial. Esto significa que la insuficiencia de datos hidrométricos no permitió efectuar la determinación del balance hidrológico para el tramo fluvial alojado en la planicie costera.

- c) El acuífero del valle del Río Presidio está constituido por depósitos granulares. Tanto su basamento como sus fronteras laterales -- están constituidas por rocas ígneas generalmente impermeables, pudiendo presentar permeabilidad secundaria por fracturamiento. Estos depósitos pertenecen al Cuaternario y corresponden a la unidad conocida como Llanuras Deltaicas, formada principalmente por sedimentos arenosos, gravosos y arcillosos de origen fluvial, escasamente cementados y elevadamente permeables.
- d) La calidad del agua subterránea en la zona es, en general, buena. De acuerdo a los resultados obtenidos de los análisis químicos, el contenido de Sólidos Totales Disueltos es menor a 1,000 mg/l, a excepción de algunas muestras en las que la concentración iónica total resultó notablemente superior; estas muestras corresponden a captaciones alojadas en la proximidad de la línea litoral. Geoquímicamente, la familia predominante de agua es la sódico-bicarbonatada, lo que indica su contacto con detritos de rocas de origen volcánico y su infiltración reciente.
- e) Mediante el censo de captaciones de agua subterránea se detectó la existencia de 61 pozos, 88 norias y un manantial; de estos 150 aprovechamientos, 42 se destinan al uso doméstico, 69 al uso agrícola, 10 al ganadero y uno al industrial, habiéndose encontrado inactivos los 28 restantes. Los pozos tienen profundidades que varían entre 8 y 60 m, mientras que las norias presentan profundidades entre 3 y 21 m.
- f) La profundidad del nivel estático es en general muy somera, ya -- que varía de 2 a 10 m, adquiriendo los valores menores en la proxi-

midad de ambas márgenes del río, así como de la línea de costa, y - los mayores en las cabeceras del valle. La configuración del nivel estático indica elevaciones entre 19 msnm y 2 mbrnm, presentándose - los valores más elevados también en las cabeceras del valle, lo que sugiere la ocurrencia de alimentaciones al acuífero en estos sitios; en la margen izquierda del río, cerca del poblado de Barrón, la superficie piezométrica se encuentra bajo el nivel del mar; existen, además, un par de conos de depresión del nivel del agua: uno de - ellos, inducido por bombeo permanente, se encuentra situado bajo el campo de pozos que abastecen de agua al Puerto de Mazatlán, y el otro, de menor importancia, se encuentra al sur del poblado de El Rio ble. La forma de las curvas equipotenciales no permitió inferir el estado de la relación hidráulica existente entre el acuífero y el - río. Las observaciones anteriores, tanto las que se refieren a profundidad como a elevación del nivel estático, se basaron en lectu-- ras piezométricas efectuadas en el sistema de pozos piloto durante el mes de Mayo de 1978. Por otra parte, la evolución del nivel está tico para el periodo Mayo-Noviembre de 1978 presenta recuperaciones que en general varían entre 0.0 y 2.0 m, reflejando la recarga que recibió el acuífero en ese lapso.

g) La extracción de agua subterránea en el valle fué de $33 \times 10^6 \text{ m}^3$ para el año de 1978, de la que $26 \times 10^6 \text{ m}^3$ corresponden al abasteci miento del Puerto de Mazatlán.

h) La brevedad del periodo de observaciones piezométricas impidió el planteamiento del balance de aguas subterráneas para un año hidroló gico completo; sin embargo, el balance fué planteado para el inter- valo Mayo-Noviembre de 1978, con el fin de conocer al menos la re-- carga que recibió el acuífero durante la época húmeda de dicho año, resultando un valor de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$. La recarga procede fundamental- mente de la infiltración directa del agua de lluvia, así como de -- los escurrimientos del río, sobre todo durante la época de crecien- tes.

Recomendaciones.

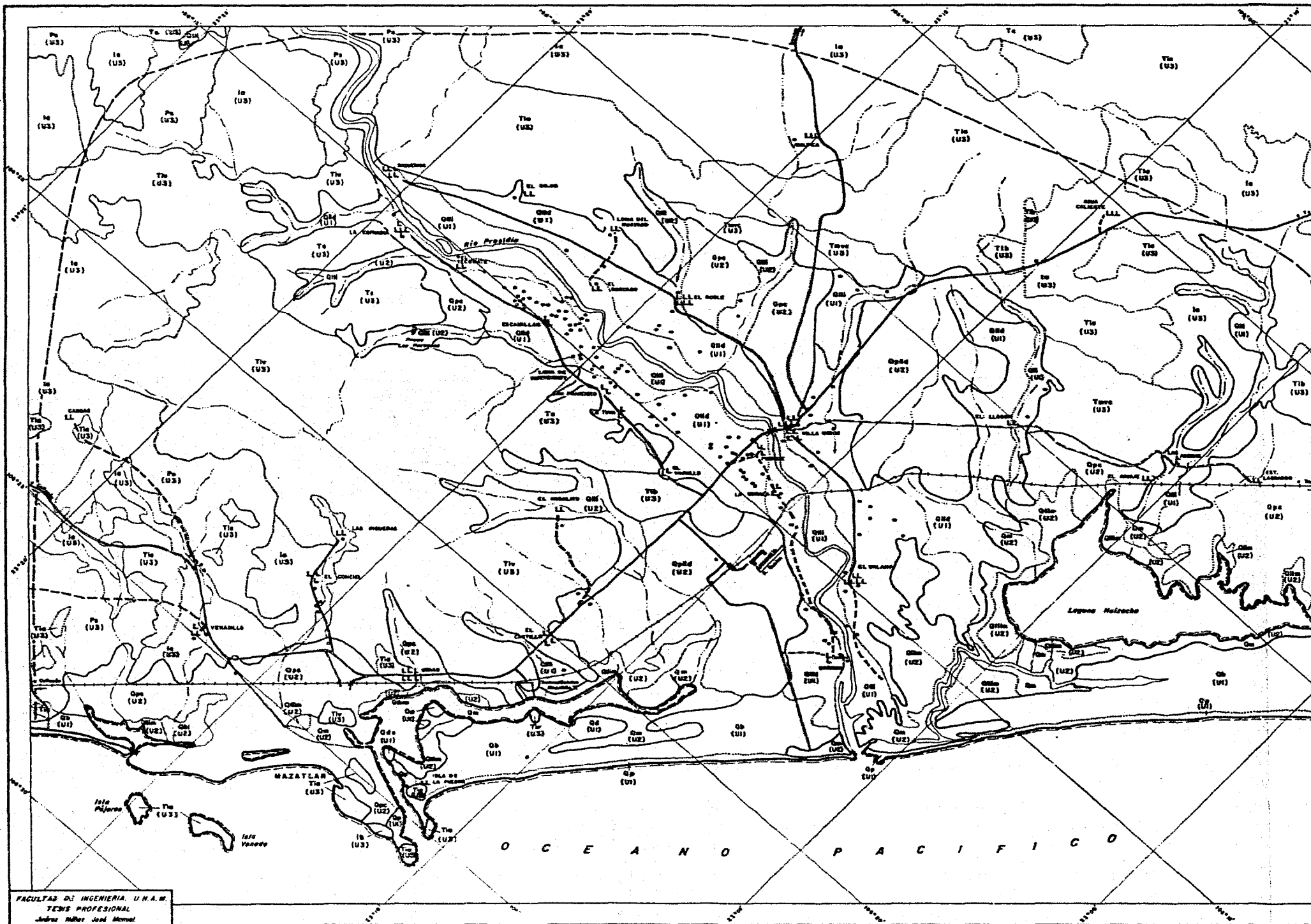
- a) Proseguir la observación sistemática del nivel estático en los pozos propuestos como piloto, con el objeto de llevar el control de la evolución de la superficie piezométrica y apoyar estudios posteriores.
- b) Estudiar la factibilidad de instalar una estación hidrométrica en algún punto del río en la proximidad de su desembocadura (sugestivamente entre Villa Unión y El Malambo). Los registros de aforo que de ahí se obtengan, en conjunción con los que aporta la estación hidrométrica Siqueros, permitirían el planteamiento del balance hidrológico correspondiente al valle del Río Presidio; adicionalmente, sería necesario conocer la hidrometría de las derivaciones del río en el tramo alojado en el valle, hacia unidades de riego establecidas en zonas marginales y unidades piscícolas en lagunas litorales. Sea o no factible la instalación, convendría colocar dos o tres escalas distribuidas en el tramo fluvial del valle de manera que, ligadas a la nivelación del sistema de pozos piloto, apoyen la configuración de la superficie piezométrica.
- c) Realizar estudios geofísicos de prospección o, si es factible, -- perforar pozos exploratorios con el fin de precisar la litología -- del acuífero; algunos de estos pozos podrían servir, a la vez, como puntos de observación en la ejecución de pruebas de bombeo para determinar las propiedades hidráulicas del acuífero.
- d) No debe intensificarse la explotación de agua subterránea en la franja litoral del valle en un ancho de 3 Km, con objeto de evitar inducir la intrusión de agua de mar. En las captaciones ahí existentes se recomienda efectuar un muestreo anual, preferiblemente durante el estiaje, con el fin de conocer la evolución de la calidad del agua mediante análisis químicos.
- e) En caso de ser necesario incrementar la extracción anual de agua

subterránea en el valle y a reserva de lo que estudios posteriores señalen al respecto, no es recomendable hacerlo en una cantidad mayor a $15 \times 10^6 \text{ m}^3$; de otra manera se correría el riesgo de inducir efectos nocivos en el acuífero. Obviamente que los sitios que se elijan para emplazar nuevos pozos o los que se acondicionen para intensificar la extracción, deben ser distintos a los que se refiere el inciso anterior.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. PLAN NACIONAL HIDRAULICO, 1981.
Diversos Autores.
SARH, Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México, 1981.
2. EVALUACION DE ACUIFEROS EN LA ZONA ELOTA-CAÑAS, EDO. DE SINALOA.
Consultores, S. A.
SARH, Dir. Gral. de Grande Irrigación, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas. México, 1976. (Inédito).
3. TRATADO PRACTICO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.
Castany, G.
Ediciones OMEGA. Barcelona, 1971.
4. APPLIED HIDROLOGY.
Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A. & Paulhus, J.L.
McGRAW-HILL Book Co. N.Y., 1949.
5. HIDROLOGIA PARA INGENIEROS.
Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A. & Paulhus, J.L.
McGRAW-HILL Book Co. N.Y., 1975.
6. HIDROLOGIA (Primera Parte).
Springall, R.
UNAM, Instituto de Ingeniería. México, 1970.
7. PRINCIPIOS DE GEOLOGIA Y GEOTECNIA PARA INGENIEROS.
Krynine, F.D. y Judd, W.R.
Ediciones OMEGA. Barcelona, 1961.
8. ATLAS GEOLOGICO-MINERO DEL ESTADO DE SINALOA.
Autores Diversos.
UNAM, Instituto de Geología. México 1977.

9. HIDROGEOLOGIA.
Davis, S.N. y De Wiest, R.
Ediciones ARIEL. Barcelona, 1961.
10. GROUNDWATER HYDROLOGY. (2nd. Ed.)
Todd, D.K.
JOHN WILEY & Sons. N.Y., 1980.
11. GEOHYDROLOGY.
De Wiest, R.
JOHN WILEY & Sons. N.Y., 1965.
12. EL AGUA SUBTERRANEA Y LOS POZOS.
Johnson, Edward E. y Autores Diversos.
JOHNSON DIVISION, INC. Saint Paul, Minn., 1972.
13. ASPECTOS FUNDAMENTALES EN EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRANEA.
Tinajero G., Jaime A.
UNAM, Facultad de Ingeniería. México, 1974. (Tesis Profesional)
14. MECANICA DE SUELOS. (Tomo III)
Juárez B., Eulalio y Rico R., Alfonso.
Editorial LIMUSA, México, 1973.
15. EXPLORACION, EXPLOTACION Y AFROVECHAMIENTO DE RECURSOS HIDRAULICOS
SUBTERRANEOS. (Curso de -)
Autores Diversos.
UNAM, Facultad de Ingeniería, Centro de Educación Continua.
México, 1978. (Apuntes Inéditos)
16. GEOHIDROLOGIA. (Curso de -)
Tinajero G., Jaime A.
UNAM, Facultad de Ingeniería. México, 1977. (Apuntes Inéditos)



EXPLICACION

Qm
 LAMINA DE MENDOTA - PRESENTA LOS MATERIALES ARENOSOS Y MEDIO-ARCILLAS DE ORIGEN FLUVIAL, DE ESTRUCTURA BLOCO Y PRESENTA GENERALMENTE BUNA PERMEABILIDAD.

Qm
 LAMINA MULTICA - PRESENTA GENERALMENTE POR AREAS Y ACILLAS, SE ENCUENTRAN POCO CONSOLIDADOS Y/O CEMENTADOS, PRESENTAN BUNA PERMEABILIDAD Y CONSTITUYEN EL ACUMULO DE AGUA SUBTERRANEA DE LA RED.

Op
 PLANA - CONSTITUYE POR AREAS DE AGUA POR BUNA EN EL CONTACTO CON AGUA DE SAL, POR LO QUE SU EXPLORACION ES REDUCIDA.

Qm
 MENDOTA - PRESENTA POR AREAS DE ANTIGUAS LINEAS DE CONTACTO PRESENTAN BUNA PERMEABILIDAD, DE ESTRUCTURA DE COHESION POR SU CEMENTACION AL AGUA.

Qm
 MANDARIN - EN ESTE TIPO DE ENCUENTRAN LAMAS Y ACILLAS SATURADAS DE AGUA SALADA.

Qm
 BUNA ESTABILIZADA - PRESENTA POR AREAS DE AGUA POCO Y BUNA, PRESENTAN BUNA PERMEABILIDAD.

Qm
 LAMINA DE MENDOTA - PRESENTA POR MATERIALES NO CONSOLIDADOS DE AGUA PERMEABILIDAD, CORRESPONDE A ZONAS DE MANDARIN, BUNA POR CONTACTO CON AGUA DE SAL.

Qm
 DEPOSITOS DE TILO Y MANDARIN ALPINO - CONSTITUYEN EN ALGUNAS ZONAS Y AREAS POCO CONSOLIDADAS, TIENEN BUNA Y BUNA PERMEABILIDAD.

Qm
 ANTIGUA LAMINA MULTICA - CONSTITUYE POR ACILLAS - AREAS Y BUNA, SE ENCUENTRAN POCO CONSOLIDADAS Y PRESENTAN BUNA Y BUNA PERMEABILIDAD.

Qm
 CLASTICO - CONSTITUYE EN CONSOLIDADOS, ARENOSOS Y ARENOSOS TOCAYAS QUE EN LA NATURALEZA DE LOS CAMPOS DE ENCUENTRAN BUNA CONSTITUYEN BUNA SUBTERRANEA.

Qm
 ROCAS VOLCANICAS - PRESENTAN GENERALMENTE BUNA Y BUNA, CON BUNA INTERCALACIONES DE TILO Y BUNA, LAS CUALES SE PRESENTAN CON BUNA ALTA Y BUNA, SE CONSTITUYEN COMO SUBTERRANEA AL AGUA DE AGUA SUBTERRANEA.

Qm
 ROCAS METAMORFICAS - CONSTITUYE POR CALIZAS CON BUNA - BUNA DE METAMORFISMO, PIZARRAS, GRANITOS Y GRANITOS, TIENEN BUNA PERMEABILIDAD.

Qm
 ROCAS METAMORFICAS - PRESENTAN GENERALMENTE BUNA Y BUNA, CON BUNA INTERCALACIONES DE TILO Y BUNA, LAS CUALES SE PRESENTAN CON BUNA ALTA Y BUNA, SE CONSTITUYEN COMO SUBTERRANEA AL AGUA DE AGUA SUBTERRANEA.

CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS

- (U1)**
 ROCAS PERMEABLES
- (U2)**
 ROCAS POCO PERMEABLES
- (U3)**
 ROCAS IMPERMEABLES

SIMBOLOGIA

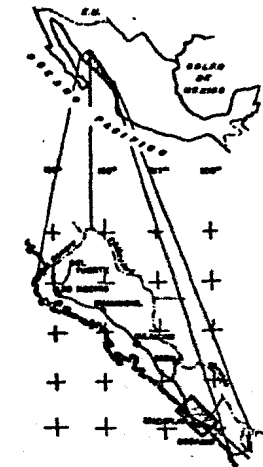
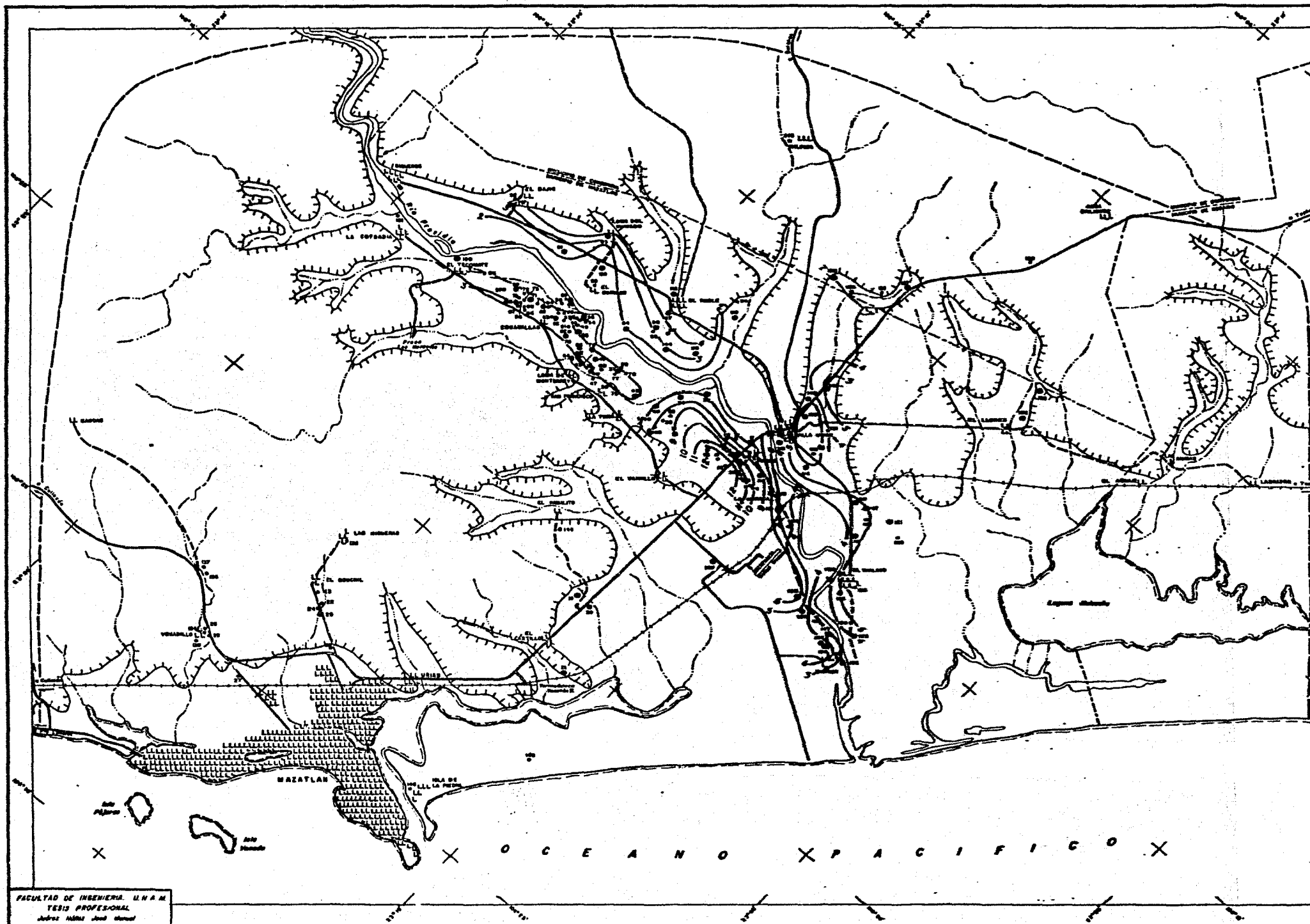
- CONTACTO GEOLOGICO E HIDROGEOLOGICO
- CONTACTO GEOLOGICO
- LIMITE DE ZONA DE ESTUDIO
- P O Z O
- A B D I A
- M A N A T I A L



DETERMINACION DE LAS CONDICIONES GEOGEOLOGICAS EN EL VALLE DEL RIO PRESIDIO, ESTADO DE SINALOA.

PLANO HIDROGEOLOGICO

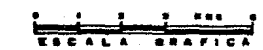
MEX. D.F., 1980, PLANO No. 37



LOCALIZACION

SIMBOLOGIA

CARRETERA	==
TERRACERIA	---
BRICHA	---
VEREDA	---
FERROCARRIL	==
POBLADO	==
CURVA DE NIVEL	---
LIMITE DE ESTADO	---
LIMITE DE MUNICIPIO	---
LIMITE DE ZONA DE ESTUDIO	---
ARROYO	---
PRESA DE ALMACENAMIENTO	---
UNIDAD DE BOMBEO	---
CANAL	---
LASUNA O ESTERO	---
PANTANO	---
MANGLAR	---
ISLOTE	---
LITORAL	---
POZO	---
MORRIA	---
MANANTIAL	---
BAJERIA FILTRANTE	---
POZO PILOTO	---
MORRIA PILOTO	---
FRONTERA SUPERFICIAL	---
CURVA DE NIVEL PROPORCIONADA DEL NIVEL DEL AGUA EN EL	---

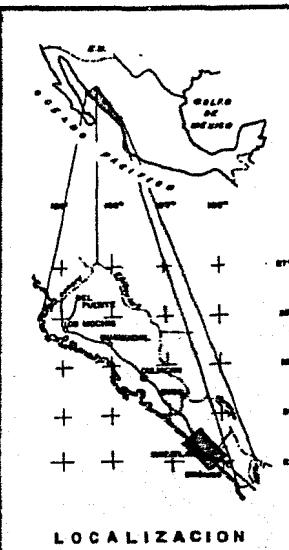
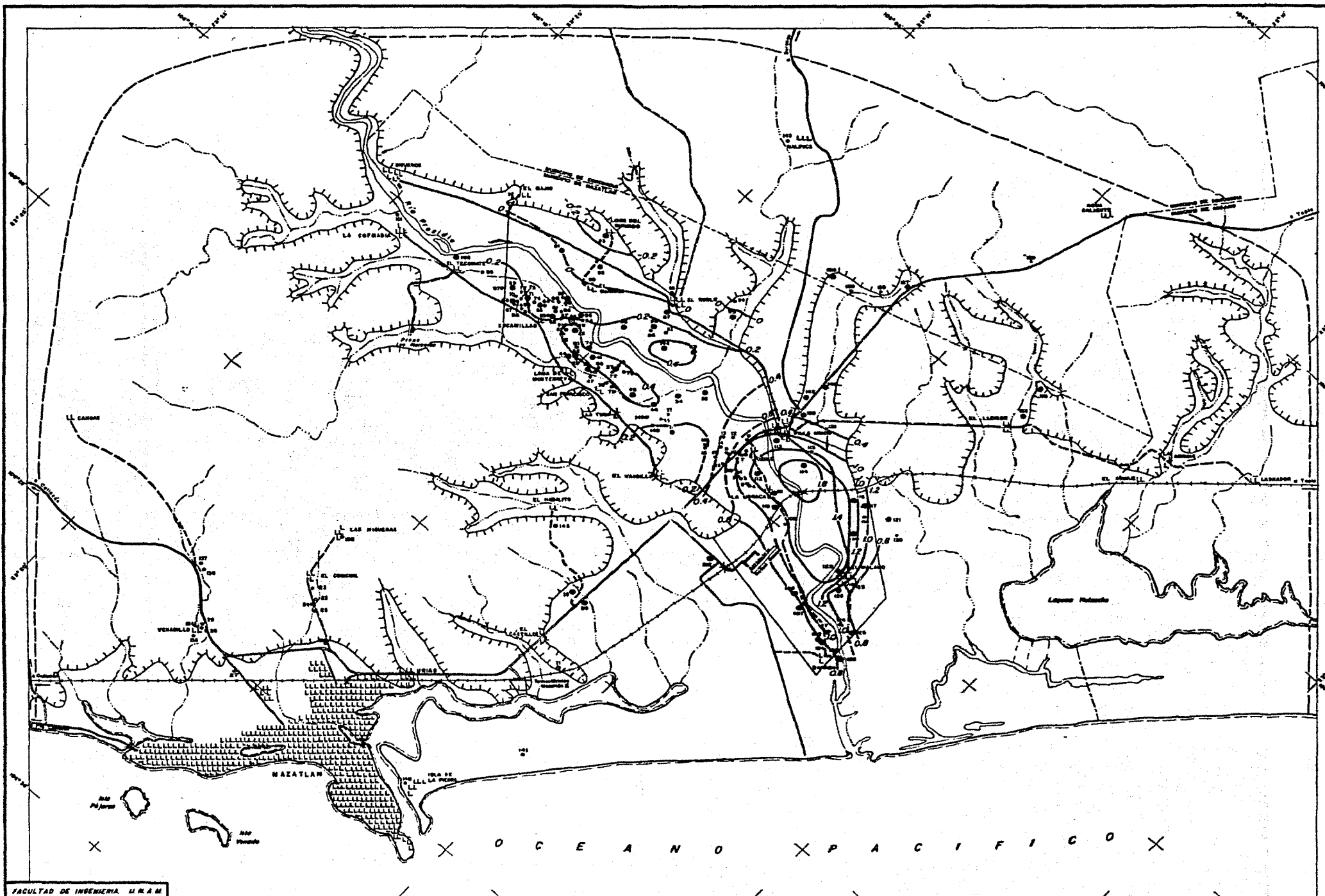


DETERMINACION DE LAS OBRAS DE RECONSTRUCCION EN EL VALLE DEL RIO PISOLO ESTADO DE SINALOA

PROFUNDIDAD DEL NIVEL DEL AGUA MAYO DE 1978

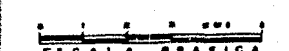
MEX., D.F. 1980 PLANO No. S.2.1

FACULTAD DE INGENIERIA, U.N.A.M.
TESIS PROFESIONAL
Jesús Néstor José Gómez



SIMBOLOGIA

- CARRETERA
- TERRACERIA
- BRECHA
- VEREDA
- FERROCARRIL
- POBLADO
- CURVA DE NIVEL
- LIMITE DE ESTADO
- LIMITE DE MUNICIPIO
- LIMITE DE ZONA DE ESTUDIO
- ARROYO
- PRESA DE ALMACENAMIENTO
- UNIDAD DE BOMBEO
- CANAL
- LAGUNA O ESTERO
- PANTANO
- MANGLAR
- ISLOTE
- LITORAL
- POZO
- MORIA
- MANANTIAL
- GALERIA FILTRANTE
- POZO PILOTO
- MORIA PILOTO
- PROYECTA IMPERMEABLE
- LIMITE DEL AREA DE BALANCE
- CURVA DE IGUAL EVOLUCION DEL NIVEL ESTADICO EN METROS.



DETERMINACION DE LAS CURVAS GEOMORFICAS EN EL VALLE DEL RIO PUEBLO ESTADO DE SINALOA

EVOLUCION DEL NIVEL ESTADICO MAYO-NOVIEMBRE DE 1978

MEX., D.F. 1980 PLANO No. 5.2.2.

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
TESIS PROFESIONAL
Jesús Néstor José Gómez

