

SISTEMA DE BIBLIOTECAS
Instituto de Investigación de Zonas
Desérticas, UASLP



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI

ESCUELA DE INGENIERIA

APUNTES SOBRE GEOHIDROLOGIA

TRABAJO RECEPTACIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

EDUARDO ORTIZ SANCHEZ

SAN LUIS POTOSI, S. L. P.

1984.





DIRECCION

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
ESCUELA DE INGENIERIA
DR. MANUEL NAVA 8 TELEFONO 3 11 86
APARTADO POSTAL 569
SAN LUIS POTOSI, S. L. P., MEXICO

EX-LIBRIS



Junio 16, 1983.

SISTEMA DE
BIBLIOTECAS

U. A. S. L. P.

Al Pasante Sr. Eduardo Ortiz Sánchez.
P R E S E N T E .

En atención a su solicitud relativa me es grato indicar a usted que el H. Consejo Técnico Consultivo de la Escuela de Ingeniería ha designado como Asesor del Trabajo Recreacional que deberá desarrollar en su Exámen Profesional de Ingeniero Civil, al Sr. Ing. Alejandro Bravo Méndez. Así como el Tema Propuesto para el mismo es:

"APUNTES SOBRE GEODHIDROLOGIA".

T E M A R I O:

- I.- INTRODUCCION.
- II.- GENERALIDADES.
- III.- HISTORIA DE LAS AGUAS.
- IV.- ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.
- V.- AGUAS SUBTERRANEAS.
- VI.- REPARTICION DEL AGUA EN EL SUBSUELO.
- VII.- METODOS DE LOCALIZACION DE AGUAS SUBTERRANEAS.

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento -- con lo especificado por la Ley de Profesiones, debe prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar su Exámen Profesional.

A T E N T A M E N T E .

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO".

EL DIRECTOR DE LA ESCUELA.


ING. MAXIMINO TORRES SILVA

I N D I C E

I.- INTRODUCCION	I
II.- GENERALIDADES	4
III.- HISTORIA DE LAS AGUAS	8
A- Ciclo Hidrológico	9
B- Clases de aguas	10
IV.- ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	18
V.- AGUAS SUBTERRANEAS	23
A- Infiltración	24
B- Porosidad	25
C- Permeabilidad	28
D- Percolación	28
E- Capilaridad	29
F- Aguas freáticas	30
VI.- REPARTICION DEL AGUA EN EL SUELO	31
A- Mantos libres en terrenos de poca permeabilidad	33
B- Mantos libres en terrenos de gran permeabilidad	39
C- Mantos cautivos	45
VII.- METODOS DE LOCALIZACION DE AGUAS SUBTERRANEAS.	50
A- Registro eléctrico	51
B- Medidas sísmicas	53
C- Método de resistividad eléctrica	55
D- Método eléctrico de R.C.P. con la 2a. Variante	56
BIBLIOGRAFIA	61

I.- INTRODUCCION

Galaxia. Nombre de un sistema extraterrestre constituido por las estrellas que forman la Vía Láctea, considerada hasta hace algunas decenas de años como constituyente única de todo el Universo, y hoy como uno de los miembros de la numerosísima familia de complejos estelares, formada de infinidad de otras galaxias situadas todas a centenares de millones de años luz de la tierra.

Nuestra galaxia, es decir, la Vía Láctea, ha dado su nombre a las diversas agrupaciones estelares que pueblan el espacio, denominadas también nebulosas utilizando la magnitud como elementos de referencia, los astrónomos han logrado clasificar estos complejos e agrupaciones estelares. Hoy se conocen hasta dos millones de galaxias de magnitud superior a la 18, siendo de magnitud 23 el límite de las reconocibles con los telescopios más potentes. Modernamente se habla de enjambres de Galaxias. Las Galaxias se clasifican por su forma aparente en elipsoidales (17% de las catalogadas), espirales (80%), e irregulares (3%).

Según las teorías modernas sobre la expansión del universo, las galaxias se separan cada vez más de nosotros, fenómeno llamado fuga de las galaxias.

La Astronomía tiene como campo de estudio el impenetrable universo de las estrellas y nebulosas. Se interesa en la distribución y movimientos de la materia en el espacio a la escala celeste. Su interés por la Tierra se limita a los aspectos puramente planetarios de nuestro Globo.

Considerada como hija del Sol, la Tierra puede ser solamente una insignificante mota de pelve en la inmensidad del espacio. Pero la Tierra es también la madre de la vida y el hogar de la Humanidad y en este concepto la consideramos como el más importante de todos los cuerpos celestes. Así, la Tierra constituye un campo especial para la investigación.

Mundo. Conjunto de todas las cosas creadas. Desde siempre — los problemas más importantes que se han planteado acerca del Mun

de han sido los de su origen y finalidad, su duración en el tiempo (¿el Mundo es, o no eterno?) y su finitud o infinitud.

El mundo en que vivimos presenta una variedad infinita de -- fascinantes problemas que excitan nuestra admiración y curiosidad. El investigador científico, como un detective, intenta formular -- estos problemas en términos exactos y, en cuanto es humanamente -- posible, resolverlos a la luz de todos los hechos salientes que -- pueden reunirse mediante la observación y la experiencia. Pregun-- tas tales como ¿Por qué?, ¿Cómo?, ¿Dónde? y ¿Cuándo? le desafían-- a que halle los indicios que puedan conducirle a posibles respues-- tas.

Los planes para explorar el espacio despiertan interés, pero todavía desconocemos muchas cosas acerca del suelo que pisamos. -- Donde quiera que vivamos o viajemos, en las montañas, sobre una -- planicie o en la costa, encontraremos problemas que han intrigado al pensamiento humano a través de los siglos. ¿Qué sostiene a los continentes sobre las amplias cuencas oceánicas?, ¿Qué fuerzas -- han elevado cadenas de montañas tales como el Himalaya y los An-- des?, ¿Qué significan los volcanes y los terremotos?. También de-- seamos saber acerca de historia de los seres vivientes. ¿Qué anti-- güedad tiene la vida sobre la Tierra?, ¿Puede afirmarse que se -- han presentado cambios progresivos en la forma de las plantas y -- los animales a través del tiempo?, ¿Desde cuándo existe el hombre en el escenario terrestre?. La Geología ciencia de la Tierra, auxi-- liada de otras ciencias afines como lo son; la Geomorfología, Pa-- leontología, Mecánica de Suelos, Hidrología, Geoquímica, etc., dan respuesta parcial a algunas de nuestras preguntas. Son cien-- cias que usan todos los conocimientos disponibles en un esfuerzo-- continuo por aprender los secretos que aún posee la Tierra.

"El que busca va a la luz para que quede de manifiesto".

II.- GENERALIDADES

Panorama General de la Tierra.

I.- Forma y Tamaño.

Muchos de los eruditos antiguos consideraban que la tierra - tiene en general, forma esférica, e incluso posiblemente este pensamiento asaltó a algunos hombres prehistóricos cuando vieron proyectada la sombra curva de la tierra sobre la luna llena durante un eclipse. Hoy; nadie duda que la tierra es "redonda"; su curvatura está claramente demostrada en las fotografías tomadas a gran altura.

2.- Divisiones y rasgos principales.

Aire, agua, rocas. La parte de la tierra que conocemos directamente está compuesta de aire(gases), agua(líquido) y rocas(sólidos). El agua y el aire constituyen dos envolturas distintas respecto a la parte sólida de la tierra, ambos elementos transfieren la corteza terrestre de manera continua y en gran escala. La atmósfera (del griego "esfera de vapor") se extiende en cantidades susceptibles de ser detectadas a unos cientos de kms sobre la superficie terrestre, si bien en su parte más distante los gases están extremadamente enrarecidos. Es digno de notar que, más de la mitad de las capas densas se encuentran dentro de una zona que se eleva de 10 a 16 km sobre la superficie de la tierra. Dentro de esta zona interior llamada tropósfera ("esfera de cambios") se suceden todos, los fenómenos meteorológicos.

La envoltura, la hidrósfera ("esfera de agua") no es continua, a pesar de que los océanos cubren las tres cuartas partes de la superficie terrestre y que el agua está ampliamente distribuida en ella, ya sea formando lagos y ríos o penetrando por aberturas y orificios en el subsuelo. Tan grande es el volumen de agua que hay en la Tierra, que si todas las irregularidades del globo fueran niveladas, nuestro planeta quedaría cubierto totalmente --

por una capa líquida de más de 2 km de espesor. El agua, con la ayuda de la atmósfera, ha sido uno de los agentes más poderosos que han contribuido a cambiar la fisonomía terrestre a través de las edades geológicas.

En general, los gases ligeros de la atmósfera están sobre la hidrósfera, que es más densa y que a su vez, está situada por encima de las rocas, las cuales son mucho más densas aún. Existe, sin embargo, una considerable mezcla entre esas tres unidades principales. Grandes cantidades de vapor de agua se elevan y forman las nubes, mientras que enormes cantidades de aire están disueltas en la hidrósfera, tanto el agua como el aire circulan por las fracturas de las rocas. La parte sólida de la tierra recibe la denominación de litósfera ("esfera rocosa"), y la parte externa de la zona se conoce comúnmente con el nombre de corteza.

3.- Fuerzas que actúan sobre la tierra.

Un grupo de estas fuerzas, de origen extraterrestre, y que consideramos como fuerzas externas, incluye el calor del sol y la atracción gravitacional de otros astros, especialmente el sol y la luna. Una de las principales fuerzas internas es la gravedad, sea la atracción de todas las partículas, sólidas, líquidas y gaseosas hacia el centro de la tierra, aunque la fuerza centrífuga de rotación disminuya ligeramente esta influencia gravitacional. Actuando también dentro de la tierra misma se encuentran las reacciones físicas y químicas que dan origen al vulcanismo y a fenómenos conexos, tales como los movimientos de la corteza terrestre en gran escala; y el levantamiento de masas enormes que dan origen a montañas y cordilleras.

4.- Papel de la Energía Solar.

El aire y el agua sobre la tierra reaccionan con los rayos solares y mantienen un sistema circulatorio continuo, en gran es-

cala. Este sistema llamado ciclo hidrológico.

Por lo tanto, la gravedad ayudada por la energía solar transmitida por el aire y el agua tiende continuamente a establecer el equilibrio sobre la superficie de la tierra, nivelando todas las irregularidades.

El punto de estudio siguiente será a partir del enfoque Geohidrológico. Así pues definiendo lo que es la Geohidrología.

Geohidrología.- es una parte de la Geología que estudia el comportamiento de las aguas infiltradas en el terreno, su escurrimiento en el interior de la tierra, con el fin de lograr su aprovechamiento mediante la extracción de la misma para beneficio de la humanidad.

III.- HISTORIA DE LAS AGUAS

Solo recientemente ha podido imponerse la idea de que las aguas de lluvia que se infiltran en el suelo son el origen de las fuentes y de las aguas existentes en la superficie del suelo, a pesar de que ya en la antigüedad filósofos como Séneca pensaron en ello por primera vez.

Bernard Palissy en 1580, en un tratado sobre las aguas y fuentes y Mariette en 1686 en su tratado del movimiento de las aguas, establecen científicamente esta hipótesis, citando numerosas observaciones.

A partir de esa fecha, se ha venido admitiendo progresivamente la idea de la existencia simultánea de las aguas de condensaciones internas en el suelo y de las aguas cautivas o nativas asociadas con las aguas de infiltración.

Prácticamente, el usuario y el hidrólogo sólo deben de tomar en consideración las aguas de origen meteórico, para intentar calcular su importancia en el suelo, en un lugar y en una cuenca dada.

A.- CICLO HIDROLOGICO.

Los rayos del sol que actúan sobre la superficie de las mares y de la Tierra hacen que el agua existente se evapore en gotitas minúsculas de menor densidad que el aire y se elevan verticalmente para formar las nubes.

Las masas de aire frío existentes en los continentes (partes más elevadas) por ser de mayor peso se desplazan hacia las partes bajas para ocupar el lugar del aire caliente provocando a su vez movimiento de grandes masas de nubes, hacia los continentes mismas que al condensarse por estar en contacto con otras masas de aire frío se condensan y se precipitan nuevamente a la superficie de la tierra en forma de nieve, granizo y agua de lluvia.

Los deshielos, la nieve derretida debido a los rayos solares escurren hacia las partes bajas formando arroyos y ríos. El agua-

de lluvia que cae sobre la superficie del terreno inicia igual — proceso que el anterior, escurriendo por las pendientes y forman_ de pequeños arroyos y afluentes de pequeños y grandes ríos, dando lugar esos escurrimientos a la formación de estancamientos, lagos lagunas, etc., y finalmente el agua superficial que concurre a incrementar las aguas del mar.

Cuando los rayos del sol actúan sobre las nieves provocando la evaporación de las mismas y la acción de las plantas al des_ prender vapor de agua contribuyendo a la vez a la formación de nu bes; a este proceso se le llama evatranspiración.

La nieve en las grandes elevaciones, al derretirse se infil_ tra a través de las grietas, o de las raíces de las plantas, o — por la superficie del terreno para integrarse a las aguas subte_ rráneas.

B.- CLASES DE AGUAS.

B.I.- AGUAS METEORICAS.

Se sabe que las precipitaciones atmosféricas condicionan ne- sariamente el grado de aridez de un clima, sino también la canti_ dad manejable de las aguas subterráneas, principalmente en zonas- áridas, donde los factores de evaporación y de escurrimiento de_ penden directamente de la pluviosidad.

a).- medición de las precipitaciones.

La cantidad de agua que cae sobre el suelo se mide por la al tura de la capa de agua que recubriría un suelo supuestamente he_ rizontal sine se produjera ninguna pérdida. Los aparatos de medi_ ción son los pluviómetros, son recipientes con bordes circulares y bicelados, colocados horizontalmente a 1.50m del suelo y al a_ brigo de los vientos fuertes. Conociendo la sección de abertura — del pluviómetro, el agua recogida permite determinar por su volu_ men la altura de agua caída según una unidad de superficie.

II.

Se totaliza durante 24 hrs. y después por mes y por año, para establecer las medidas mensuales y anuales.

Existen igualmente aparatos totalizadores para lluvia, granizo y nieve, instalados en los montes, que suprimen la evaporación y la congelación y están provistos de un recipiente adecuado para poder determinar las mediciones con la máxima de precisión.

b).- Características pluviométricas.

De los datos proporcionados por los pluviómetros se deducen generalmente las características siguientes:

El módulo pluviométrico.

La pluviosidad.

Los coeficientes pluviométricos.

El índice de aridez.

Los desvíos de la media.

Se llama módulo pluviométrico anual (P) ó mensual (H), a la cantidad de agua que cae anual e mensualmente sobre una región dada y expresada en mm.

De ahí se deduce el % de la lluvia anual total caída durante un mes dado, con la fórmula:

$$F = \frac{P}{H} \times 100$$

Este permite conocer para cada región la repartición de estaciones secas y estaciones húmedas y permite también para cada punto de observación establecer comparaciones entre uno y otro.

En las zonas áridas resulta a veces interesante conocer el % de lluvia caída en dos, tres e cuatro días, cuando se emprende un estudio sobre la alimentación de un monte, de una presa, de un río, etc., tomando en cuenta que en zonas áridas muchas de las veces el agua caída en un año puede ser la considerada en los cuatro días mencionados.

La noción de la pluviosidad permite conocer las particularidades y las variaciones cíclicas de un clima.

De acuerdo con las observaciones pluviométricas hechas en varios lugares se elaboran mapas de curvas de igual pluviosidad y al mismo tiempo mapas de curvas de igual temperatura, lo que da una idea sobre la repartición de las lluvias y las zonas de sequía localizada, etc.

Los coeficientes pluviométricos tienen su importancia en el estudio de la infiltración de las aguas. Estas son:

La intensidad de la lluvia (altura del agua en un tiempo dado).

La intensidad máxima para la abertura de un puente, la sección de un canal, el cálculo de una crecida. Noción muy importante porque determina muchas veces el valor de la aridez de un clima. Ya que algunas veces en zonas desérticas las 2/3 e 3/4 partes de una cantidad media anual de lluvia puede caer en ocho días, — permaneciendo el resto del año prácticamente seco.

La altura eficaz, noción primordial en Geohidrología, que determina la altura del agua realmente caída y absorbida por el suelo. Este corresponde, en regiones áridas, a una cantidad media de agua ya que tanto las lluvias fuertes como las débiles prácticamente no se infiltra.

La noción del índice de aridez ha sido propuesto por primera vez por el Geógrafo Martenne cuya fórmula es:

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

En la que P representa el módulo pluviométrico y T la temperatura media anual, se adapta principalmente a los países áridos de tipo mediterráneo.

El Comité Consultivo de la Zona Árida de la UNESCO adoptó — desde 1956 la fórmula de Emberger Francia, que tiende a tomar en cuenta no solamente los factores anteriores, sino igualmente la ecología de la región, sobreentendiendo que la vegetación espontánea representa el elemento biológico más estable en relación con los factores de aridez.

$$I = \frac{100 P}{(M+m)(M-m)}$$

P= módulo pluviométrico anual.

M= promedio de temperaturas del mes más caliente.

m= promedio de temperaturas del mes más frío.

Los desvíos de M y m y sus valores medios permiten dar una idea del factor de evaporación para calcular el índice de aridez - en todos los puestos de observación meteorológica.

B.2.- LOS OCEANOS.

Sólo el hecho de que una superficie tan grande de nuestro planeta esté cubierta de agua, lo hace habitable. Y, en opinión de muchos biólogos marinos, los océanos son la parte de la biosfera más inmediatamente amenazada.

Fue en los océanos, después de las seculares lluvias iniciales, donde la vida empezó a surgir escudada por las aguas de las irresistibles radiaciones del sol. Fue de los océanos de donde surgieron plantas y animales para colonizar la superficie de las tierras del planeta. Y son los océanos los que hoy apertan el vapor de agua que, levantando por el sol, cae después sobre la Tierra, productora de cosechas y sustentadera de la vida. El agua de los océanos constituye el sistema de filtración de nuestro planeta, donde todos los desechos, tanto minerales como biológicos, se disuelven, descomponen y transforman en sustancias mantenedoras de la vida.

Un vasto tanque séptico que devuelve limpia el agua al hombre, a las bestias y a las plantas, por conducto de la evaporación y la precipitación. Es un importante proveedor del oxígeno liberado por su fitoplankton (plantas microscópicas que forman comunidades y pueden ser algas, bacterias, hongos) para beneficio de todas las especies de la Tierra, del aire y del agua.

Los océanos, a través de su movimiento por las corrientes de

agua provenientes de varias regiones, actúan como reguladoras de la vida, en ocasiones como refrigerante y en otras reteniendo el calor, lo que hace habitable nuestra tierra.

B.3.- LAGOS.

Un lago es un cuerpo más o menos grande de agua en estado fijo que ocupa una depresión en la superficie de la Tierra.

El agua puede ser dulce (como en la mayoría de los lagos montañosos) o salada. Los lagos pueden formarse de modos muy diversos algunos de los cuales son: 1) glaciación, tal como la cuencatallada de los Grandes Lagos; 2) diastrofismo, que formó numerosos lagos a lo largo de la falla de San Andrés en California, y 3) estancamiento de líneas naturales de avenamiento por deslizamientos de tierras o por lava. Geológicamente hablando, los lagos tienen una vida corta y pueden destruirse completamente, debido a menudo a la evaporación y la gran cantidad de asolve que recibe.

Corrientes en los lagos. Algunas de las corrientes en los lagos están producidas por circuitos rotacionales, en donde las aguas más frías van al fondo y las más calientes, a la superficie. Este proceso tiende a estabilizar temperaturas en el lago y comúnmente ocurre en primavera y otoño. En regiones tropicales el agua del fondo es más fría que la de la superficie. En regiones polares ocurre lo contrario. En climas moderados, el hielo de los lagos, particularmente de los pequeños, pueden empujar y convertir los depósitos literales en surcos o arrugas irregulares. Los pilares maestros y algunas veces las construcciones (como presas) pueden alterarse y moverse por dicha acción.

B.4.- PRESAS.

Presa.- Conjunto de elementos naturales y obras destinadas para el almacenamiento y control de una corriente.

Las presas se construyen para acopiar agua para usos de la -

comunidad e industrial, para irrigación y para regulación de la corriente; para la generación de energía eléctrica, para canalización de ríos, y para retención de fango e material arrastrado. Una presa que sirva para más de un fin se llama presa múltiple. Una presa de desvío es la que se destina en principio a desviar el agua del río. Las presas también se clasifican según el material de que están construidas. Por lo tanto, hay presas de mampostería de concreto armado, de tierra y enrocamiento. Las presas se construyen muy raramente de acero e de madera. La madera sólo se usa si la presa es temporal, y el acero se emplea ocasionalmente como cara frontal de una presa de roca.

B.5.- RIOS.

La desembocadura e ceno de deyección de un río es aquella parte donde se une con el océano, al mar, un lago u otro río. -- Cualquiera extensión e parte de un río aguas arriba desde la desembocadura puede denominarse tramo.

El caudal de un río es la cantidad de agua que fluye por la sección transversal de un tramo en una unidad de tiempo. Este caudal está directamente relacionado con la geometría del tramo y con sus resistencias friccionales a la corriente. Las últimas se deben a la aspereza del fondo del río, a lo abrupto de sus orillas dentro del área mejada y a las pérdidas de energía causadas por cambios en la forma del prisma de agua en la corriente. La geometría de un tramo es su perfil longitudinal y sus secciones transversales dentro del cauce del río. Se comprende que el declive longitudinal de la superficie del agua de un río y el declive longitudinal de su cauce pueden e no ser idénticos y que es la inclinación del agua la que regula el caudal.

Los ríos modelan sus propios valles-- Los cursos de agua son los constructores de los valles por donde escurren. Cuando una corriente irrumpe fuera de su cauce y fluye a través de una zona --

donde no existe valle alguno, forma rápidamente un surco capaz de contener sus aguas, es decir, se construye su nuevo cauce.

Los ríos están adaptados a sus valles- En muchos aspectos -- los cursos de agua se adaptan a los valles por donde pasan, pero éstos varían extraordinariamente en cuanto a las relaciones que guardan con las corrientes y con lo que les rodea. Corrientes iguales pueden recorrer valles profundos y estrechos, profundos y anchos, de poca profundidad, anchos o estrechos, o bien otros cuyas dimensiones presentan todos los grados intermedios. El tamaño y forma de un valle, no depende exclusivamente del volumen de la corriente que lo ha modelado, existe otro factor a tener en cuenta, y éste es el tiempo empleado. Es obvio, que cuanto más tiempo emplea un curso de agua en la apertura de un valle, mayor es la anchura alcanzada por éste.

Desarrollo de los meandros- Aunque un valle sea de trayectoria casi rectilínea, resulta imposible para la corriente mantenerse también recta. Los vientos dan lugar a remolinos, algunos materiales de las orillas se derrumban y desvían la corriente y otros diversos accidentes tienden a hacerla cada vez más irregular. Una vez desviadas las aguas, éstas golpean contra una de las orillas, siendo proyectadas hacia la opuesta, con lo que se inicia un movimiento en zigzag a lo largo del valle. Entre tales puntos se reduce algo la velocidad del agua, determinando la depositación de partes de los materiales acarreados. La corriente empieza, pues, a excavar en una de las orillas y a sedimentar en la otra, lo que da lugar en definitiva a las curvas denominadas meandros.

Cuando un río evoluciona, su valle pasa a través de las fases de juventud, madurez y vejez, cada una de las cuales tiene -- sus peculiaridades. La edad de un valle no ha de medirse en años, sino según la etapa alcanzada en su evolución.

Valles jóvenes- La fase inicial de un valle, durante el cual éste aún es estrecho y de vertientes empinadas, ha recibido la deno_

minación de etapa juvenil del mismo. Durante esta fase en la que predomina, el terreno abarrancado, el valle no presenta depósitos aluviales llanos • éstos tienen una extensión muy reducida, pues las corrientes son rápidas y arrastran los materiales inmediatamente después de haber sido depositados.

Valles maduros- Cuando los depósitos se hacen continuos de meandro en meandro, el valle está entrando en su madurez. Esta etapa continúa hasta que el valle llega a ser varias veces más ancho que la faja ocupada por los meandros, y casi todas las laderas de sus vertientes presentan una débil inclinación.

Valles viejos- La edad senil comienza en los valles cuando se forman las extensas llanuras de aluvión debidas a las crecidas y sólo quedan algunas laderas escarpadas. De esta fase el valle adquiere tal anchura y una disminución tal de la pendiente de sus laderas, que prácticamente se torna irreconocible como valle.

IV.- ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Las aguas corrientes superficiales constituyen el más poderoso agente entre los que intervienen en la remodelación terrestre, así como en el transporte y depositación de materiales. Este hecho no se destaca a primera vista porque los cambios son lentos y poco espectaculares. Los factores principales que determinan la rapidez de su acción geológica son el caudal del agua y su velocidad.

El origen de las aguas corrientes está en la lluvia cuya distribución es sumamente desigual en las distintas zonas climáticas de la Tierra.

Las aguas de escurrimiento constituyen la parte de más fácil observación y su porcentaje, dentro del total precipitado, depende de multitud de factores y de los más importantes son: la inclinación del terreno sobre el que el agua cae, la porosidad, la topografía, la climatología y la vegetación.

La intensidad de la precipitación es un factor de gran importancia para determinar la cantidad de agua corriente que se produce.

Las características del suelo de disgregación también influye en la cantidad de agua corriente. Si es arcilloso casi toda el agua caída fluye sobre él, mientras que si es de arena o grava, la absorbe en su mayor parte.

La vegetación, es otro factor del que depende también la cantidad de agua corriente, pues ésta es más abundante en las regiones de vegetación esparcida que en los bosques o zonas de hierba densa.

Distribución anual de las precipitaciones. En algunas regiones las lluvias están muy repartidas durante todo el año, y cada uno de los meses; mientras que en otra, existe una gran diferencia entre las estaciones seca y lluviosa.

Las aguas corrientes pueden agruparse en dos clases: Las que se forman inmediatamente con las lluvias y no poseen un recorrido

fije y las que siguen cauces determinados, labrados por su propia actividad. Las primeras se conocen con el nombre de aguas salvajes y las últimas, que forman los ríos y los arroyos, con el nombre de encauzadas. Entre unas y otras, existe una categoría intermedia que reúne algunas de las características de ambas y que está constituida por los torrentes.

Estos se forman por la unión de las aguas caídas sobre el terreno y poseen gran importancia en el modelado de la superficie terrestre. En todo torrente se distinguen tres partes: la cuenca de recepción en forma de embudo, que es donde se recogen las aguas y se inicia su encauzamiento, el canal de desagüe, conducto estrecho y sinuoso por donde aquéllas descienden, y por último, el cono de deyección, ensanchamiento también embudiforme donde se depositan los materiales arrastrados.

El escurrimiento consta de dos partes: el escurrimiento superficial que es la parte que fluye sobre la superficie hacia el río más próximo, y el escurrimiento de las aguas subterráneas que es aquella parte que sigue su curso bajo la superficie del suelo antes de alcanzar un río.

Las corrientes también son importantes porque: (1) constituyen fuentes de abastecimiento seguras y económicas; (2) aunque relativa, puede ser fuente generadora de energía en pequeña escala.

Las aguas en el subsuelo escurren bajo un régimen de flujo laminar, mismo que podemos observar en laboratorio por medio de indicadores de colores que permiten observar las partículas en un movimiento paralelo; de igual forma se desplazan los glaciares durante sus trayectos a través de las grandes corrientes.

Por otra parte, en los escurrimientos en lechos de ríos, aún cuando el escurrimiento es laminar, el agua sufre algunas desviaciones que provocan remolinos lo cual hace que su régimen no sea totalmente laminar, sino un tanto turbulento.

Escurrimiento.- el agua de lluvia que no se infiltra é no se

evapora escurre y alimenta las corrientes de agua. Es ésta fracción de agua de lluvia escurrida la única que puede conocerse con cierto valor en una cuenca considerada.

Pero desde el punto de vista Geohigrológico, hay que considerar que los ríos reciben buena parte de las aguas de infiltración por conexión con mantos acuíferos y manantiales superficiales u ocultos. Pueden también los ríos estar alimentados por escurrimientos subterráneos provenientes de otras cuencas hidrológicas. Este fenómeno es muy frecuente en zonas áridas donde cursos de agua -- con el gasto débil, drenan muchas veces mantos acuíferos de origen lejano.

Coefficiente de escurrimiento.

Esta noción es esencial para los constructores de la obra de ingeniería relacionada con los cursos de agua (presas, puentes, canales, bordes, etc.) porque permite con el conocimiento del módulo pluviométrico prever con bastante aproximación los niveles y los gastos de las avenidas.

$$A = \frac{D}{P}$$

A= escurrimiento.

D= cantidad de agua escurrida en un punto dado.

P= cantidad media de agua caída sobre la cuenca considerada.

Factores de escurrimiento-- Los factores que actúan sobre el escurrimiento son de naturaleza meteorológica, geológica y topográfica.

Es conocido el papel retardador de la vegetación sobre el escurrimiento.

Los factores meteorológicos son: la intensidad y la duración de la lluvia, las condiciones de temperatura y la humedad del aire.

Los factores geológicos son: la permeabilidad y capacidad de retención de agua de los suelos y las rocas tipo (calizas, e rocas igneas fisuradas) y la porosidad (arenas, areniscas, aluviones de grano grueso, etc.).

Los factores topográficos- son la extensión de la superficie de la cuenca y su pendiente media. En las zonas áridas todos estos factores pueden contribuir a reducir a cero el coeficiente de escurrimiento.

V.- AGUAS SUBTERRANEAS

INFILTRACION.

Infiltración- se llamará agua de infiltración la que no ha -
pedido evaporarse ni escurrir. Esta infiltración depende de va -
rios factores, entre los cuales el del suelo es preponderante.

Factores de infiltración:

La naturaleza del suelo interviene en primer lugar, ya que -
sobre un terreno impermeable toda el agua de lluvia escurre, y a -
la inversa, el escurrimiento se vuelve nulo en los suelos muy per -
meables, como por ejemplo, un importante afloramiento de calizas -
agrietadas.

Las tierras vegetales superficiales conservan el agua e la -
transmiten a la roca madre.

La roca madre contiene generalmente mantos acuíferos profun -
dos y se comporta como un receptor permanente. Las tierras vege -
tales se comportan mas bien como una esponja cuyo poder de imbibí -
ción está en función directa de la erosión y de la climatología.

Esta es la razón por la cual las regiones de sustratos com -
pactos e impermeables deben considerarse extremadamente pobres ya
que no tienen una roca madre capaz de hacer el papel de receptor -
tapón y compensar así los déficit de infiltración de los años
secos.

La influencia del clima sobre la infiltración es igualmente -
notable, ya que en las zonas áridas las lluvias fuertes y de cor -
ta duración no tienen tiempo de penetrar lo suficiente en el sue -
lo para alimentar el manto freático e para constituir una, y son -
a menudo retenidas por la evaporación.

En los climas áridos un terreno permeable puede por esta cau -
sa recibir menos agua que en un clima húmedo, a pesar de ser i -
gual la cantidad de agua recibida, el porcentaje de infiltración -
puede variar de 2 a 5% en las zonas áridas, en contraste con el -
30 al 40% en las zonas húmedas, en un terreno de la misma perme -
dad, de ahí la importancia considerable de la evaporación.

La influencia de la vegetación es igualmente preponderante - por su papel de reguladora en su infiltración y atenuadora de los efectos de la evaporación sobre el suelo y de la erosión. Más raro es que la vegetación contribuya a abserver las aguas infiltradas impidiéndoles reunirse con los mantos acuíferos.

Las mediciones de infiltración se efectúan estudiando las variaciones del nivel del agua en los pozos y perforaciones.

El agua subterránea se mueve tan lentamente que sus velocidades se expresan en centímetros por día y en algunos casos en metros por año. Para entender la causa de la lentitud del movimiento debemos estudiar la porosidad y permeabilidad de las rocas.

POROSIDAD.

Porosidad.- se llama porosidad de un terreno su poder absoluto de absorción para el agua. La relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total del terreno, representa la capacidad de retención del agua de ese terreno.

A) Volumen de los espacios vacíos, tipos de intersticios.

Los intersticios que se forman al mismo tiempo que la roca.- Estos son los espacios vacíos producidos por la sedimentación (areniscas, calizas, etc.). Que pueden contener, agua, gas o petróleo, y también los espacios vacíos producidos en las rocas eruptivas por partículas gaseosas que quedaren aprisionadas en la masa en el momento de su enfriamiento, los derrumbes más o menos consolidados, los conos de deyección, las arenas y los conglomerados imperfectamente cementados contienen también intersticios primarios.

Intersticios secundarios, aparecen después de la sedimentación y son producidos por fenómenos tectónicos (fracturas, fisuras, plegamientos, etc.), fenómenos químicos e físicos.

Tolman distingue 6 tipos diferentes de intersticios.

Tipo I- aluviones, arenas de granos uniformes y ángulos re-

dendeados de gran porosidad.

Tipo II- aluviones, arenas de granos desigual, con tendencia al colmataje por los elementos más pequeños, escasa porosidad.

Tipo III- idéntico al primero, con escala diferente, pero -- con granos a su vez porosos.

Tipo IV- idéntico al primero, con granos mas o menos cementados entre sí (conglomerados, areniscas compactas) mediana porosidad.

Tipo V- roca maciza y compacta, fisurada por disolución (ca^lizas) porosidad mediana y grande.

Tipo VI- roca maciza y compacta con fisuras mecánicas (basaltes, cuarcitas, etc.) porosidad media y escasa.

B) Evolución del volumen de los espacios vacíos e intersticios.

El volumen de los espacios vacíos puede tender a aumentar o disminuir según la influencia de varios factores:

Hay un aumento del volumen de los espacios con:

- a) Variaciones de sedimentación.
- b) Migraciones de gas en las lavas.
- c) Deseccación y endurecimiento de los terrenos arcillosos.
- d) Temblores de tierra.
- e) Reacciones químicas como disolución, oxidación, flocculación, etc.

f) Combinaciones de factores químicos y mecánicos a través de grandes variaciones de los climas.

g) La acción de las plantas e de los animales.

Hay disminución de los espacios vacíos con:

- a) Compactación e hundimiento de los aluviones, arenas, etc.
- b) Defloculación de las arcillas.
- c) Derrumbes sucesivos, variaciones de pendiente.
- d) Cementación de las fisuras por aguas carbonatadas.
- e) Influencia de los agentes atmosféricos.

C) Caso de los agregados esféricos.

En este caso el volumen de los espacios vacíos no depende -- del diámetro de los granos, sino exclusivamente del acomodo de ellos.

En la práctica, las formas en que se acomodan los granos no-esféricos, pueden dar porosidades muy variables, pero ninguna tiene jamás la estabilidad máxima, de tal suerte que un terreno de este tipo (aluviones homogéneos, arenas, areniscas, etc.) es siempre poroso y muy permeable.

Una idea más exacta de esta porosidad la da el análisis granulométrico por medio de tamices de malla estandar. Este estudio determina que hay siempre una categoría de partículas que predominan y su porosidad depende directamente de las características -- del diámetro dominante, y aumenta a medida que los agregados son más angulosos e irregulares.

D) Mediciones de la porosidad.

$$P = \frac{W}{V} \times 100$$

V= volumen de la muestra.

W= volumen de los espacios vacíos (volumen del agua que satura la muestra).

E) Valor práctico de la porosidad.

Según Tolman, se considera como débil una porosidad del 5% , media una de 5 a 20% y excelente del 20% en adelante.

Las arenas comunes alcanzan de 40 a 50% y se han encontrado muestras que alcanzan hasta de 80 a 92%, en aluviones arenosos -- muy recientes.

Las calizas, cuando sus afleramientos son extensos y de bastante espesor, tienen una buena porosidad a partir del 3%.

F) Modo de retención del agua por el suelo.

El agua que satura el espacio comprendido entre los granos --

del suelo puede ser de tres clases:

El agua pelicular que llena los microporos de la superficie de los granos.

El agua capilar adherida a los granos por atracción molecular o capilaridad.

El agua de percolación o agua libre, única capaz de escurrir por gravedad.

El poder específico de retención (agua pelicular y capilar) y el de percolación representan la presencia total de absorción del agua, o sea la porosidad de un terreno.

LA PERMEABILIDAD.

La permeabilidad es la propiedad que permite el paso del agua más o menos fácilmente a través de la masa de una roca. Si los poros son demasiado finos, el poder de retención resulta superior al poder de percolación y el terreno es impermeable; ejemplo el limo arcilloso.

En una roca cuyos granos sean como los de arena, (de 0.06 a 2.0mm) o mayores, los espacios abiertos son más anchos que las películas de agua adheridas a los granos. Como la fuerza de atracción molecular no se extiende a través de ellos de manera efectiva el agua que ocupa los centros de las aberturas se mueve libremente por efecto de la gravedad y de otras fuerzas, por lo tanto la roca es permeable. La permeabilidad aumenta a medida que el diámetro de las aberturas es mayor. La grava, cuyas aberturas son muy grandes, es más permeable que la arena y permite el paso de un gran volumen de agua en los pozos.

PERCOLACION.

Percolación.- el flujo lineal a través de espacios interconectados en un material saturado se llama percolación.

El agua penetra en el terreno por infiltración desde la su-

perficie y es arrastrada por la gravedad hacia el nivel de la corriente del valle más cercano. Emerge en el valle y descarga en la corriente.

La percolación depende de tres factores; permeabilidad, pendiente del nivel freático y velocidad. Estos factores se ajustan continuamente entre sí estableciéndose de este modo un estado aproximado de equilibrio tal como sucede en el flujo de una corriente superficial. El agua de las lluvias hace que, la pendiente del nivel freático se incline más y, si la permeabilidad es constante, la velocidad debe entonces aumentar. La velocidad de percolación varía entre 1.5m por día y 1.5m por año.

En una región húmeda el agua subterránea percola debajo de los cerros y emerge en los valles. En una región árida se mueve de manera inversa, alejándose y profundizándose a partir de las áreas situadas bajo las corrientes superficiales.

LA CAPILARIDAD.

La Capilaridad.- es la propiedad que poseen los tubos de dimensiones capilares, de elevar el agua por encima del nivel freático que baña su base. Este fenómeno es provocado por la tensión superficial de la película de agua en el contacto líquido-aire dentro del tubo.

La franja capilar.

En el caso de un suelo que contiene un manto freático y un nivel hidrostático, se denomina franja capilar a la zona a la cual sube el agua por capilaridad por encima del nivel freático propiamente dicho.

Las leyes de la capilaridad dentro de tubos de vidrio se aplican igualmente a los canalículos del suelo.

La altura de ascensión del agua en un tubo capilar depende del diámetro del tubo, del estado de la naturaleza de la pared, de la tensión superficial del líquido y de la fuerza de aspiración.

ción que puede ejercerse en la extremidad del tubo (la rugosidad de las paredes de un canal capilar disminuye la fuerza de ascensión, la tensión superficial depende de la composición y temperatura de las aguas.

El volumen total de agua contenida en un depósito de aguas subterráneas en cualquier área determinada depende de:

- 1- De la porosidad de la roca.
- 2- De la razón según la cual se añade agua por infiltración.
- 3- De la razón según la cual se abandona el agua por evaporación, transpiración, por difusión hacia cursos superiores y por bombeo.

AGUAS FREÁTICAS.

Aguas freáticas- no ofrecen seguridad para aprovechamiento de las mismas por estar sujetas a escurrimiento hacia las partes inferiores pudiendo llegar a agotarse salvo en aquellos casos en que tenga una alimentación fuerte y por otra parte su capacidad de retención dependerá del espesor de la capa que contenga estas aguas y del tipo de materiales que lo constituyen. Por otra parte son aguas que están sujetas a una mayor e más fácil contaminación por su cercanía a la superficie y su ingreso directo de las aguas

VI.- REPARTICION DEL AGUA EN EL SUELO

Muchos conocimientos acerca del agua subterránea se han adquirido lentamente mediante la experiencia de numerosas generaciones que han perforado millares de pozos. Esta experiencia nos enseña que una perforación del terreno generalmente atraviesa primero por una zona de aereación, que es la zona en la cual los espacios abiertos en la roca firme, se encuentran llenos principalmente de aire. A continuación sigue la zona de saturación que es aquella en la cual todas las aberturas están llenas de agua. La superficie superior de la zona de saturación es el nivel freático, también llamado nivel piezométrico. Generalmente el nivel freático se encuentra a unos cuantos metros e decenas de metros de la superficie.

¿Tiene el agua subterránea un límite inferior?

Gran parte de la que se obtiene mediante pozos profundos proviene de profundidades menores de 600 m.

A medida que la profundidad aumenta, la cantidad de agua recuperada disminuye. Los pozos petroleros más profundos han encontrado pequeñas cantidades de agua a profundidades mayores de 6000 m, pero a tales profundidades las aberturas en las rocas son tan pequeñas, que el agua no puede moverse a través de ellas. A unos 16 km de profundidad la presión ejercida por el peso de las rocas superyacentes da lugar a que el material se comprima, cerrando todos los espacios abiertos, y excluyendo por lo tanto al agua. En consecuencia, el agua subterránea queda reducida a una zona más bien sencilla cuyo límite inferior rara vez sobrepasa los 600 m de profundidad.

Zona de Aereación- comprende el agua de percolación, el agua pelicular, el agua de los mantos suspendidos y la franja capilar al contacto con el nivel hidrostático del manto freático.

Zona de saturación- representa un terreno permeable con los intersticios enteramente llenos de agua del manto y estando esta misma agua en movimiento hacia un punto de salida aéreo o subterráneo.

nes natural e artificial.

En esta zona cesa, en principio, el movimiento descendente del agua debido a los efectos de la gravedad, pero obedece a las leyes de escurrimiento de los mantos acuíferos.

El agua del manto freático posee, como característica principal, el poder de ocupar todos los espacios vacíos del suelo, y evoluciona teóricamente entre la superficie del suelo siguiendo sus variaciones de altitud y el nivel de la base impermeable.

Se denomina línea de saturación, nivel hidrostático o nivel piezométrico, el lugar geométrico de los diferentes niveles en los cuales se estabilizaría el agua, si se enterrara en el suelo una serie de tubos, llamados tubos piezométricos, en los cuales naturalmente la franja capilar no juega ningún papel.

El agua de los mantos cautivos es aquella que circula en el suelo hasta que se encuentra aprisionada entre dos o varias capas impermeables.

Otros tipos de agua se presentan como:

Agua de retención, aprisionada en los estrechos canalículos de los limos finos y de las arcillas, no circula, y permanece inexplorable.

El agua nativa contenida en ciertas rocas e incluida bajo la forma de agua salina ó de vapor en el momento de la formación de las rocas.

A.- MANTOS LIBRES EN TERRENOS DE POCA PERMEABILIDAD.

I).- Formas y variaciones.

Un manto freático, capaz de movimiento y de variaciones de espesor en el suelo, puede tomar diferentes formas y tener diferentes gastos, según el tipo de alimentación y la forma e la posición de los puntos de salida.

a) Superficie de equilibrio hidrostático.

Se supone que un manto, limitado por un manantial en el pun_

te de contacto entre los terrenos de poca permeabilidad y los impermeables, posee un punto de salida en ese lugar. Se constata -- que el gasto del manantial es tanto mayor cuanto más elevada es la posición del nivel hidrostático en relación con el nivel del manantial.

Cuanto más bajo se encuentra en el suelo el nivel hidrostático, más se acercará el gasto del manantial a cero, se alcanza entonces la superficie de equilibrio hidrostático.

Sin embargo, en el caso de un manto cuyo nivel impermeable de base tiene una inclinación inversa al sentido de la circulación de las aguas hacia el manantial, no se alcanza jamás la horizontalidad del nivel hidrostático cuando el gasto del manantial es igual a cero. Se debe este fenómeno a las pérdidas de carga en el terreno acuífero.

En el caso inverso el manto se vaciará enteramente y solo el agua de retención permanecerá en el suelo. Por lo tanto no se puede tener una superficie de equilibrio hidrostático.

b) Curvatura del nivel del manto.

En el caso particular de un sustrato horizontal impermeable subyacente a aluviones de poca permeabilidad, y si el terreno es perfectamente homogéneo, la superficie del manto con un plano vertical paralelo a su dirección de ese escurrimiento, es una sección de parábola con cima "M" (el manantial). Esta sección estará tanto más alejada de su eje horizontal cuanto mayor sea el gasto y la pérdida de carga provocada por las pequeñas fisuras e inversamente.

Si los terrenos son de permeabilidades variables, el ángulo de curvatura con la horizontal será tanto más pronunciada, cuanto más débil sea la permeabilidad aún cuando el gasto sea constante.

c) Variaciones del nivel del manto.

Varios factores pueden provocar esas variaciones, la alimentación por infiltración natural e forzada cuando el gasto de ali

mentación es superior al gasto del exutorio y la velocidad del agua en el suelo permanece lenta.

Las variaciones del nivel de base impermeable, en el caso de trabajos de ingeniería civil (canales, túneles, pilotes de puentes, etc.), cuyos cimientos cortan las formaciones permeables e impermeables. Pueden aparecer entonces nuevos exutorios y agotamientos rápidos del manto freático.

En el caso de construcción de una presa pueden subir los niveles freáticos y desaparecer antiguos manantiales por completa modificación de la fisonomía del manto acuífero original.

La erosión y desaparición de bosques disminuye la infiltración y provocan el abatimiento del nivel de los mantos.

d) Modificaciones de la forma teórica del manto.

Una superficie hidrostática, cortada por un plano vertical puede no ser una parábola perfecta, fija o variable.

Un manto freático posee en efecto una verdadera topografía que puede traducirse sobre un plano de curvas isopiezométricas, que reproducen, atenuándolas, las irregularidades topográficas del suelo y de ahí la posibilidad de ver aparecer emergencias en los puntos bajos.

A menudo aparece un combamiento en una superficie piezométrica, llamada intumescencia o al inverse embudo, fenómenos importantes en el estudio de la valoración de un manto.

Formaciones lenticulares impermeables (arcillas), pueden provocar desniveles de la superficie piezométrica con aparición de mantos parcialmente suspendidos. Las fallas pueden provocar idénticos desniveles. Un pozo con su cono de abatimiento modifica de manera más o menos sensible la forma de un manto.

Determinación de la forma de un manto.

En la práctica cualquier estudio de un manto freático exige a la vez la existencia del mayor número posible de pozos o perforaciones y una carta topográfica detallada a gran escala.

Cada vez que sea posible, se determinarán no solamente, la cota del suelo, el nivel del agua, sino también la cota exacta de la base del manto, es decir, del techo de la capa impermeable. De éste modo se determinará el sentido del escurrimiento de un manto su potencia, las intumescencias e los embudos.

Los pozos y perforaciones permiten igualmente auscultar un manto durante su explotación y controlar sus variaciones, especialmente por la observación de pozos testigos.

En la ausencia de pozos y perforaciones en número suficiente y si el terreno es ya bien conocido desde el punto de vista geológico, puede recurrirse a los métodos geofísicos, principalmente al método eléctrico, para reconocer la profundidad del nivel hidrostático.

En regiones áridas, los mantos pueden existir sólo temporalmente e estar a grandes variaciones del nivel.

Todos los recientes estudios de Geohidrología Subterránea demuestran la gran importancia de las perforaciones piezométricas, a veces con registro automático para la supervisión y la explotación racional de los mantos.

2.- Circulación del agua en terrenos de poca permeabilidad.

Modo de circulación.

En tiempos pasados se creía que un manto en terreno permeable sobre un fondo impermeable horizontal y escurriendo hacia un manantial "M" situado sobre el fondo de un valle, comprendía tres zonas:

A.- Zona de difusión y de infiltración entre la superficie del suelo y el nivel hidrostático.

B.- Zona de desbordamiento que debía desaparecer cuando el gasto de "M" tendiera a cero.

C.- Zona de estancamiento donde el manto permanece inmóvil.

Tolman, demuestra por una serie de experimentos de un tanque

con paredes de vidrio conteniendo arena homogénea con una superficie inclinada, que la zona C llamada de estancamiento contribuye en realidad a la alimentación del punto de salida "M".

La zona A sigue siendo la zona de difusión y de infiltración donde el movimiento del agua puede ya tener cierta orientación hacia la salida.

La zona B es la parte activa del manto que tiende a escurrir rápidamente hacia la salida.

La zona C es la parte pasiva del manto, pero que permanece en movimiento por la presión que ejerce sobre ella la parte activa.

Así, en la zona B, el agua se renova constantemente, su altura depende de la importancia de la alimentación del manto y del gasto de la salida y representa la zona de oxidación y escalación.

En la Zona C hay ausencia de aire, el agua no se renova y no existe el fenómeno de oxidación. Se le llama zona de cementación. (Fig. A-I).

3.- Los manantiales y los puntos de agua.

Se denomina manantial o fuente a toda emisión de agua que sale de la tierra con cierta regularidad. Más precisamente, el lugar por el cual se escurre un manto acuífero cuando su nivel tiende a alcanzar una superficie límite de equilibrio hidrostático.

a) Clasificación.

Existe un gran número de clasificaciones de fuentes o manantiales y cada autor de tratados sobre hidrología tiene su propia clasificación.

Los exuberios de afloramiento o fuentes de desbordamiento.

Los exuberios de desbordamiento o fuentes de emergencia.

Las fuentes artesianas.

Las fuentes de filón o diaclasas.

Los exuberios de afloramiento son los que aparecen al contac

te con el aire a favor de un desnivel topográfico o una estructura geológica interna.

La fuente representa muchas veces una fuente de contacto por la formación impermeable (fuente de flanco de colina) llamada -- fuente de gravedad.

Se distinguen principalmente en zona árida:

Las fuentes de altura, de cuesta, de meseta, y de talud, así como las fuentes de cañones recientes.

Exutorios de desbordamiento-- son los que definen una emergencia del manto freático en terrenos de poca permeabilidad.

Un pozo es un exutorio artificial de desbordamiento. La aparición de exutorios de este tipo depende directamente de las fluctuaciones del manto acuífero. Estas fuentes rara vez están situadas en los flancos de las montañas y al contrario, aparecen siempre en las depresiones o fondos de los valles.

b) Gasto de exutorios.

Diversos factores influyen sobre el gasto de las fuentes además de la pluviometría, porosidad, perímetro de alimentación y grado de erosión; se trata principalmente de la capacidad de retención de un terreno, del régimen de circulación en el suelo, etc.

Según Lugeon (Suiza 1928) existen 4 clases principales de capacidad.

Capacidad inagotable que varía en función del módulo pluviométrico (fuentes profundas).

Capacidad agotable-- Función de las variaciones pluviométricas mensuales o anuales y de las precipitaciones (fuentes superficiales).

Capacidad intrasuperficial, función directa de las precipitaciones locales.

Capacidad superficial de retención y de condensación de la vegetación, de valor muy débil.

Un fenómeno particular debe pensarse en evidencia en la zona árida; durante cierto período el manantial es ya no influenciado por las lluvias, ya sea porque escasean en la época seca, o porque se evaporan enteramente o son utilizadas por la vegetación.

Durante este período los manantiales viven únicamente de sus reservas que sólo son realmente alimentadas en el invierno o en la gran estación de lluvias.

B. MANTOS LIBRES EN TERRENO DE GRAN PERMEABILIDAD.

Los principios de infiltración y de circulación del agua de mantos libres en terrenos de gran permeabilidad, son diferentes a los que rigen los mantos de terrenos poco permeables debido a la importancia de los factores de disolución, de oxidación y de erosión interna que dan a las fisuras una estructura muy heterogénea.

I.- Penetración del agua en el suelo.

No es estrictamente vertical, sino función del acomode y de la orientación de las fisuras.

Existen según Daubree las fisuras de enfriamiento. Las fisuras mecánicas posteriores o el conjunto de las dos.

La combinación de todas estas fisuras constituye una continuidad de espacios vacíos abiertos sobre todo en zonas de plegamientos tectónicos y puede dar un enorme sistema de gran circulación de las aguas bajo régimen turbulento.

Zonas de infiltración y de saturación.

La penetración de las aguas, ocurre generalmente bajo un régimen total o parcialmente turbulento o torrencial, pero únicamente por medio de las fallas, fisuras y diaclasas, permaneciendo compacta e impermeable la masa de la roca propiamente dicha.

Las aguas circulan hacia un nivel de base, a veces distante, representado por un terreno impermeable o el fin de la red de fi_

suras.

Estas últimas tienden a hacerse más y más pequeñas y su frecuencia disminuye con la profundidad.

En general, es difícil conocer el origen y el sentido de las fisuras en una misma masa, la naturaleza y la posición del nivel de una base impermeable, y por lo tanto la existencia de pasos y circulaciones ocultas.

En terreno cristalino o volcánico rara vez existe un nivel de base, sino simplemente desaparición progresiva de las fisuras hasta una cierta profundidad.

2.- Geohidrología de los terrenos calcáreos.

a) Alimentación de los mantos.

Esta tiene lugar por las fisuras agrandadas y modificadas -- por oxidación y acción química bajo el efecto del bióxido de carbono (CO₂) del aire.

Las zonas de disolución en la superficie o en la profundidad son constantemente modificadas por las aguas.

Si la caliza no posee originalmente ninguna fisura, hay solamente descalsificación y erosión superficial, con depósitos de arena (dolinas).

En las regiones calcáreas, las cavernas y las dolinas son -- siempre zonas de absorción total de las aguas de escurrimiento débil o nulo y evaporación débil.

Las cavernas son a veces el resultado de hundimientos internos y absorben más bien poca agua de lluvia.

La característica esencial del desplazamiento subterráneo de las aguas, será la profundización progresiva de sus cursos. Esto provoca la ocurrencia de verdaderas redes fósiles internas que no llevan agua mas que después de una fuerte pluviosidad. En ese momento, aparecen en los macizos calcáreos un gran número de fuentes secundarias temporales.

Las calizas no se vuelven marcadamente acuíferas mas que - - cuando esa red de fisuras se vuelve fósil y se hunde bajo el nivel hidrostático actual, y así la red de fisuras internas está totalmente llena de agua.

Todos estos fenómenos permanecen ligados al grado de fisuración del macizo, que depende a su vez del porcentaje en carbonato de calcio (CaCO_3) y de la textura de las calizas e igualmente del poder corrosivo actual de las aguas de infiltración.

b) Forma del manto.

En terrenos calcáreos, solo el piezómetro puede dar una idea exacta de la forma del manto. Dificilmente se encuentra en ellos un pozo hecho a mano. Pero es muy raro que pueda hacerse la cartografía de un manto acuífero en terreno calcáreo.

En las zonas áridas las calizas acuíferas se presentan de manera muy diferente a los mantos en terrenos de aluvión y de poca permeabilidad. Un manto acuífero en calizas puede tener las siguientes características:

Es completamente desconocido de los lugareños cuando no está indicado por alguna fuente y las calizas abastecen frecuentemente de agua a los aluviones del fondo del valle.

Puede ser accesible a distancias muy variables algunas veces grandes, según sea la morfología local de los afloramientos calcáreos.

Es algunas veces función de estructuras, típicamente locales (sinclinales, anticlinales con inversión de relieve, campos de fractura, etc.).

c) Circulación del manto dentro de la caliza.

Esta circulación es idéntica a la que ocurre en las arenas y areniscas cuando las fisuras son pequeñas, la porosidad débil y las fuentes raras y poco abundantes para provocar un vaciamiento demasiado rápido. En caso contrario ocurre una circulación del tipo de torrente intenso.

En las zonas calcáreas las aguas pueden circular con velocidades de algunos metros hasta 15 o 20 km por día y sobre distancias muy grandes.

d) Los exuterios de las regiones calcáreas.

Durante mucho tiempo se creyó que las fuentes o los manantiales en las calizas eran simplemente una manifestación de las corrientes de agua subterránea. Los estudios recientes han probado que las calizas como los terrenos de poca permeabilidad presentan los mismos tipos de exuterios.

Exuterios de afloramiento o de contacto— son los más frecuentes en regiones calcáreas de la zona árida, a menudo cortadas en mesetas sobre una base impermeable.

El gaste de los exuterios es muy variable, dependiendo directamente del régimen de lluvias pudiendo anularse después de una larga sequía.

Por regla general, los exuterios en las calizas tienen un índice de variabilidad mucho más fuerte que los exuterios de los terrenos de poca permeabilidad, debido a la ausencia de escurrimiento retardado, dentro de las grandes fisuras de los terrenos.

Los exuterios de desbordamiento sólo se presentan rara vez, por ejemplo en el caso de una barrera natural a lo largo de una zona afallada, o en el caso de una estructura fragmentada que presenta calizas finamente fisuradas.

Las resurgencias o falsas fuentes son frecuentes en las regiones calcáreas y representan una salida al aire libre, definitiva o temporal de un torrente normalmente subterráneo.

Ejemplo clásico, la fuente de Vaucluse en Francia, cuyo gaste según la estación puede variar de 4 a 150 m³/seg, de ahí que se tome el nombre frecuente de fuente Vauclousiana. Es la mayor que se conoce.

3.- Geohidrología de los terrenos cristalinos y volcánicos.

Aunque la porosidad de estas rocas sean netamente inferior a la de las areniscas y calizas, sus fisuras primarias e secundarias favorecen cierta retención del agua.

a) Tipo de fisura- existen fisuras de origen profundo cuando los movimientos de la corteza terrestre han contribuido a agrietar la superficie de esas rocas, fallarlas, etc.

Las intrusiones magnéticas, siempre más recientes que las rocas encajonantes, favorecen la desorganización de estos terrenos- y al mismo tiempo su receptividad para las aguas subterráneas. -- Las fisuras de origen profundo no presentan jamás una homogeneidad de orientación comparable a la que puede tener en las calizas salvo en pequeña escala, ya que no hay en ellas fisuras correspondientes a los planos de estratificación.

Así mismo en macizos importantes estas fisuras pueden constituir todo un grupo de pequeñas redes muchas veces independientes- entre sí. Bajo el efecto de presión y de aplastamiento, estas fisuras tienden siempre a disminuir a medida que aumenta la profundidad (frecuentemente a partir de 60 u 80m).

Se producen fisuras de origen superficial sin relación aparente con mas fisuras profundas bajo el efecto de los agentes atmosféricos, y de las aguas de escurrimiento, esto ocurre en particular en las zonas de menor resistencia, en la vecindad de fracturas internas bajo los efectos combinados de la erosión y de la oxidación producida por alternancias de agua y de aire en las fisuras.

b) Alimentación y reservas acuíferas.

En los primeros sistemas de fracturas la alimentación y las circulaciones internas, son siempre casi independientes y frecuentemente no existe un nivel hidrostático continuo. Existen simplemente zonas más o menos embevidas de agua, según el grado de erosión, poca relación entre estas zonas y los gastos son variables- y débiles aún en zonas templadas y húmedas.

Los efectos de la erosión • de los movimientos del suelo son aún más sensibles que en las calizas debido a la ausencia de una red de fisuras fósiles y profundas. Cuando se efectúan obras de captación y se llega rápidamente a un importante colmataje de los espacios vacíos y salvo casos particulares, es frecuente el agotamiento estacional de este sistema de fisuras.

En los relieves antiguos las fisuras son más escasas y colmatadas; el volumen de saturación puede ser más regular, pero menos abundante, porque las zonas de fisuras más importantes ha desaparecido tiempo atrás por efecto de la erosión y reemplazada por residuos impermeables provenientes de la oxidación y de un proceso destructivo de larga duración.

Incluso a veces en regiones húmedas y frías, la penetración de las aguas es nula. En consecuencia, es conveniente construir drenes numerosos e importantes, por medio de galerías • conjunto de perforaciones, para poder alcanzar en estas formaciones gastos económicamente utilizables.

c) Los exutorios de las rocas cristalinas.

Estas no son fuentes de desbordamiento (sin intervención de la topografía) ni fuentes de afloramiento (no hay base impermeable).

No todas las fuentes son termominerales ni sacudentes. Dada su débil carga, éstas fuentes encuentran a menudo a su salida obstáculos diversos (arenas, aluviones, derrumbes).

Según líneas de falla en terrenos cristalinos, pueden aparecer algunas aguas provenientes de circulaciones en terrenos sedimentarios vecinos, cuando existe cerca a la zona de falla.

d) Los exutorios de las rocas volcánicas.

Si se trata de derrames volcánicos de poca espesor, la formación eruptiva, según su estructura, puede ser impermeable y conferir carga a los mantos subyacentes, o puede, por el contrario, constituir un excelente nivel acuífero sobre todo si se localizan

los depósitos de cenizas y de escorias que ocupan, por ejemplo, - un valle (cenizas del Valle de México). Por último se debe señalar la notable limpidez de las aguas de esta categoría, invariablemente bien filtradas a su paso por los terrenos de pequeñas filtraciones.

C.- MANTOS CAUTIVOS.

I.- Definiciones y generalidades- cuando una capa permeable y el manto que ella contiene se encuentran recubiertos por una capa de terreno impermeable (o de poca permeabilidad), hay formación y retención de un manto cautivo en esta capa permeable.

La capa impermeable superior es llamada a menudo (capa de carga) ó provocación de carga. Después de cierto recorrido bajo presión, el agua puede a veces manifestarse, ya sea por fuentes escalonadas a lo largo del afloramiento de la formación permeable ya sea a través de rupturas naturales de las zonas en que la capa de provocación de carga se encuentra alterada.

Las obras artificiales (pezes y perforaciones) son manifestaciones del agua al aire libre por liberación de presión.

La característica principal de los mantos cautivos es que al ser alcanzados por una perforación, permite la elevación del nivel estático del agua en un punto situado siempre arriba de la formación acuífera.

El manto es arteciano (nombre tomado de la primera perforación surgente en la provincia de Artes Francia) cuando brota por encima del nivel del suelo; de lo contrario es simplemente ascendente.

Por lo tanto, se denomina perforación arteciana, toda perforación en donde el agua brota como fuente natural en la superficie del suelo, pero ya sea artecianos o ascendentes, estos tipos de mantos acuíferos son cautivos o con carga.

2.- Origen de los mantos cautivos y artesianos.

Existen cuatro condiciones principales que regulan los mantos de agua subterránea a compresión.

1.- El manto acuífero debe estar cubierto en concordancia con una formación impermeable o de escasa permeabilidad y constituir una retención forzada del agua en esta capa acuífera.

2.- Esta formación impermeable debe dejar en afloramiento libre cierta superficie del terreno acuífero que permita la infiltración de las aguas y la alimentación regular del manto.

3.- La zona de alimentación debe encontrarse a una zona superior respecto a los puntos de fuga, a menos que su gasto sea muy débil e inferior al gasto de alimentación.

4.- El punto donde se desea tener agua brotante por perforación, además de tener las 3 condiciones anteriores, debe estar situado a una cota inferior a la del nivel libre del manto en la zona superior de alimentación. En caso contrario se tendrá simplemente agua de ascensión en la perforación.

Los datos fundamentales referentes a las condiciones de carga y de artesianismo de un manto son:

1.- La zona de alimentación debe ser tan elevada como sea posible en relación a la zona de salida a las fuentes naturales.

2.- El terreno de carga debe ser continuo en su impermeabilidad y tener pocas fugas.

3.- El terreno acuífero debe estar lo más alejado posible de la superficie del suelo y las fuentes artesianas deben ser tan escasas y débiles como sea posible.

4.- La porosidad del terreno acuífero debe ser lo más homogénea y elevada posible.

3.- Diversos tipos de mantos cautivos.

La clasificación de los mantos cautivos se inició según el tipo de exuberancia, pero en muchos de ellos no se manifiestan al aire libre. Los Franceses Y Belgas la clasifican conforme al tipo

de condición geohidrológica, considerando:

a).- Mantos que poseen zonas de absorción y exutorios visibles.

Estos son del tipo clásico con la estructura ideal de un sinclinal con reborde débilmente elevado donde aparecen el o los exutorios. Distinguiéndose los siguientes tipos:

Las fuentes de zona de disolución son clásicas de la zona árida; aparecen en un punto bajo de las formaciones sinclinales o monoclinales comportando una zona acuífera cautiva y donde existe una zona de disolución o de oxidación.

En regiones templadas, este tipo de fuentes puede confundirse con fuentes de desbordamiento, tanto más cuanto que una parte del manto es difusa y se extiende en forma de manto freático dentro de los aluviones.

En las rocas fisuradas, sedimentarias o volcánicas, las fisuras pueden contribuir a provocar una cierta carga cuando tienen un punto alto de alimentación y un punto bajo de salida sin fugas en la zona intermedia.

Es también el caso de las aguas termominerales brotantes que habiendo circulado a una gran profundidad reaparezcan en la superficie con una cierta carga. Pero hay casi siempre en este caso un gasto débil y débil presión.

b) Mantos cautivos sin salida aparente.

Estos son mantos debidos a la aproximación de capas impermeables que comprimen el terreno acuífero en profundidad, o una falla que destaca el nivel acuífero haciendo de ella una barrera y oponiéndose a la presencia de una fuente arteciana de fractura, como consecuencia de fenómenos de compresión.

El primer caso se produce cuando ha habido erosión del terreno acuífero, y depósito en discordancia de una formación impermeable.

Estos son mantos donde la reserva se ha acumulado durante —

largos años, y que se han establecido desde el origen del depósito de los terrenos impermeables de carga.

En el segundo caso una capa acuífera puede ser destacada por un fenómeno de hundimiento y encontrarse enteramente aislada de sus prolongaciones bajo el efecto de rechazo debido a la fractura mientras que los labios de las fallas permanecen cerrados e impermeables.

c).- Mantos cautivos sin alimentación aparente.

Esta es una clasificación provisional para los mantos cautivos cuya zona de alimentación no se conoce todavía, ya sea por estar distante, ya porque se desconoce la estructura de las capas profundas.

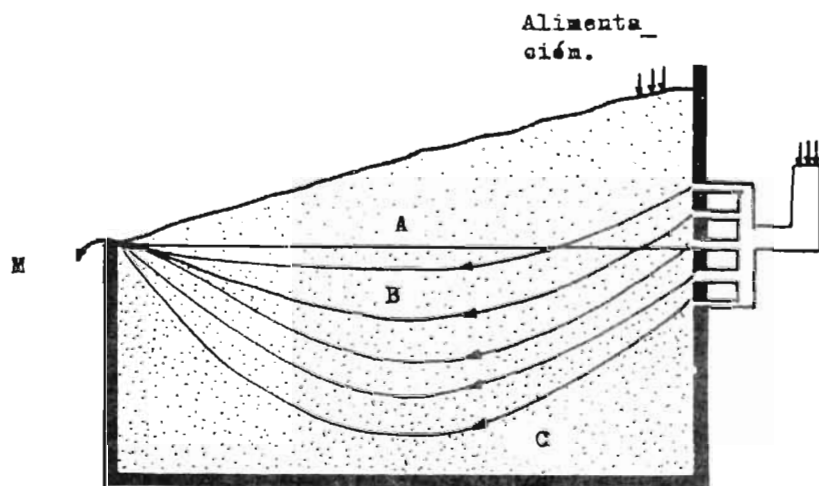


Figura A-I. Esquema de circulación del agua en terrenos de poca permeabilidad.

VII.- METODOS DE LOCALIZACION
DE AGUAS SUBTERRANEAS

A).- REGISTRO ELECTRICO.

En los registros eléctricos se efectúan las medidas en un sondeo sin revestir y relleno de lodo de sondeos, preferiblemente inyectado recientemente. Se hace descender en el sondeo un sistema de electrodos (llamado sonda) pendientes de un cable multiconductor, y las lecturas se registran en una película fotográfica o por otros medios. El propósito básico de este método es obtener la resistencia "in situ" al paso de la corriente eléctrica, la resistividad de las distintas rocas a diferentes profundidades, y además, el potencial eléctrico natural desarrollado en los sondeos.

Las rocas sólo son capaces de transmitir la corriente eléctrica cuando hay en ellas agua absorbida; las rocas secas no tienen conductividad eléctrica. El agua dulce es un mal conductor; por tanto, las arenas y gravas con agua dulce, las calizas compactas y las areniscas muy cementadas con poca porosidad son malos conductores. Por el contrario, la baja resistividad es característica de las arenas y gravas con agua salada y también de pizarras y arcillas, puesto que el agua contenida en sus poros tiene generalmente gran salinidad.

La resistividad se mide en ohmios metro cuadrado por metro de profundidad (m^2/m) lo que supone ohmios multiplicados por metros, u ohmiometro. En el cuadro siguiente se expone en orden creciente la resistividad de distintas sustancias. Así, el cobre es el mejor conductor de las sustancias que aparecen en la lista, mientras que el cuarzo es el peor.

RESISTIVIDAD ELECTRICA DE DISTINTAS SUSTANCIAS

EN OHMIOS / METROS

Cobre - - - - -	10^{-8}
Pirita (sulfuro de hierro S_2Fe) - - -	10^{-6}
Agua salada concentrada - - - - -	2×10^{-2}

Arcilla húmeda, plástica - - - - -	I-3
Lignite e yese - - - - -	IO ³
Petróleo bruto - - - - -	IO ⁴
Calcita e caliza compacta - - - - -	IO ⁷
Cuarzo - - - - -	IO ¹⁰

La curva en zigzag de un registro eléctrico se dibuja - tomando por coordenadas la resistividad y la profundidad. Un técnico experimentado puede interpretar esta curva y deducir de ella los contactos entre las distintas formaciones.

Como la mayoría de los tipos de rocas tienen su curva característica, una larga práctica permitirá al que interprete la curva reconocer realmente y, por tanto, denominar las distintas formaciones. También puede determinar variaciones en el contenido - fluido de las rocas y, como consecuencia, localizar distintos niveles acuíferos para abastecimiento de aguas.

B).- METODOS GEOFISICOS.

Una forma de las investigaciones de campo es la exploración-geofísica, en la que usualmente se toman medidas físicas en la superficie del terreno mediante instrumentos especiales, para obtener información del subsuelo. En sí es una mezcla de Física y Geología, puesto que las medidas físicas se interpretan de acuerdo a las condiciones geológicas del subsuelo.

Uno de los Métodos Eléctricos que en general presenta mayor poder resolutivo en la localización de acuíferos es el de Relaciones de Caída de Potencial, por lo mismo y debido a su gran campo de aplicación, economía y fácil operación, este método está siendo cada día más y más utilizado.

Es bueno hacer notar que la exploración geofísica no elimina la necesidad de perforación mecánica para la localización de las aguas subterráneas; sin embargo su adecuada aplicación se refleja en una reducción de costos en los programas de perforación estimada en un buen tanto por ciento principalmente a causa de la eliminación de perforaciones erróneamente localizadas.

B.I- MEDIDAS SISMICAS.

Este procedimiento se funda en la diferente velocidad de propagación de las ondas vibratorias de tipo sísmico a través de diferentes medios materiales. Las mediciones realizadas sobre diversos medios permiten establecer que esa velocidad de propagación varía entre 150 y 2,500 m/seg en suelos, correspondiendo los valores mayores a mantos de grava muy compactos y las menores a arenas sueltas; los suelos arcillosos tienen valores medios, mayores para las arcillas duras y menores para las suaves. En roca sana los valores fluctúan entre 2,000 y 8,000 m/seg. Como término de comparación se menciona el hecho de que en el agua la velocidad de propagación de éste tipo de onda es del orden de 1,400 m/seg. Escencialmente el método consiste en provocar una explosión en un punto determinado del área a explorar usando una pequeña carga de explosivo, usualmente nitroaménio. Por la zona a explorar se sitúan registradores de ondas (geófonos), separados entre sí de 15 a 30 m. La función de los géofonos es captar la vibración, que se transmite amplificada a un escilógrafo central que marca varias líneas, una para cada géfono. Suponiendo una masa de suelo homogénea que yace sobre la roca basal, unas ondas llegan a los géofonos viajando a través del suelo a una velocidad V_1 ; otras ondas llegan después de cruzar oblicuamente dicho suelo. Hay un ángulo crítico de incidencia respecto a la frontera con la roca basal —

que hace que las ondas ni se reflejen ni se refracten hacia adentro de la roca, sino que las hace viajar paralelamente a dicha frontera, dentro de la roca, con una velocidad V_2 , hasta ser recogidas por los geófonos, después de sufrir nuevas refracciones, para transmitir las al oscilógrafo. El tiempo de recorrido de una onda refractada está determinado por su ángulo crítico, que depende de la naturaleza del suelo y de la roca. Un esquema del dispositivo aparece en la Fig. B.I

Puede construirse una gráfica que relacione la distancia del geófono al punto donde se originó la perturbación, con el tiempo que tarde en registrarse la onda en ese geófono. Como las ondas directas y refractadas comienzan a llegar al geófono en tiempos diferentes bien determinados, puede calcularse de la gráfica los valores típicos de V_1 y V_2 . En los geófonos próximos al punto de la explosión las ondas directas llegan antes; en los alejados llegan primero las refractadas. Hay un punto frontera (el 3 de la Fig B.I), en la cual los dos tipos de onda llegan a la vez. Dibujando los instantes en que el geófono recibe la primera excitación en función del alejamiento del geófono, se obtienen dos rectas. Hasta el punto 3, el primer impulso es de onda directa, en la que el tiempo de excitación es proporcional a la distancia del geófono, de 3 en adelante, la primera excitación es de onda refractada en la que el tiempo es una cierta función, $a+bx$, de la distancia, representando "a" el tiempo constante en que se recorren los dos tramos inclinados hasta y desde la roca basal. Se obtienen así dos rectas que, evidentemente, han de cruzarse en la abscisa del punto 3. Si XI es la abscisa de tal punto, puede demostrarse en la Fig. B.I que:

$$H = \frac{XI}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

Donde H es el espesor del estrato del suelo homogéneo y V_1 y V_2 pueden determinarse de las pendientes de las 2 rectas de la — Fig. B.1.

Los casos prácticos no son tan sencillos como el de arriba — discutido y frecuentemente se hace necesaria una gran experiencia por parte del técnico que ha de interpretar los resultados obtenidos y suele ser necesaria una exploración convencional del suelo para una interpretación más correcta de dichos resultados.

B.2- METODO DE RESISTIVIDAD ELECTRICA.

Este método se basa en el hecho de que los suelos, dependiendo de su naturaleza, presentan una mayor o menor resistividad eléctrica cuando una corriente es inducida a su través. Se ha aplicado para determinar la presencia de estratos de roca en el subsuelo.

La resistividad eléctrica de una zona de suelo puede medirse colocando cuatro electrodos igualmente espaciados en la superficie y alineados; los dos exteriores, conectados en serie a una batería son los electrodos de corriente (medida por un miliamperímetro), en tanto que los interiores se denominan de potencial y están conectados a un potenciómetro que mide la diferencia de potencial de la corriente circulante (Fig. B-2).

Los electrodos de corriente son simples varillas metálicas, con punta afilada, mientras que los de potencial son recipientes porosos llenos de una solución de sulfato de cobre, que al filtrarse al suelo, garantiza un buen contacto eléctrico.

La resistividad se puede calcular a partir de las lecturas — del miliamperímetro I , del potenciómetro V y de la separación entre los electrodos, d , con la fórmula.

$$\rho = 2\pi d \frac{V}{I}$$

El método sirve en primer lugar, para medir las resistividades a diferentes profundidades, en un mismo lugar y, en segundo, para medir la resistividad a una misma profundidad, a lo largo de un perfil. Lo primero se logra aumentando la distancia d , entre electrodos, con lo que se logra que la corriente penetre a mayor profundidad. Lo segundo se logra conservando d constante y desplazando todo el equipo sobre la línea a explorar.

Las mayores resistividades corresponden a rocas duras, siguiendo rocas suaves, gravas compactas, etc., y teniendo los menores los suelos suaves saturados.

B.3- METODO ELECTRICO DE R.C.P. CON LA 2a. VARIANTE.

Los primeros que desarrollaron y aplicaron este método fueron los ingenieros suecos, haciendo las observaciones con dispositivo llamado "Gradiómetro de Resistencias" diseñado por el Dr. Heiland.

El procedimiento general que se sigue para medir la Relación de Caída de Potencial en el subsuelo, es enterrar 6 electrodos, según un alineamiento y un espaciamiento determinados, en forma tal que por 2 de ellos se haga circular una corriente (electrodos de corriente ó E1 y E2) y en otros 3 se mida la caída de potencial (electrodos de potencial ó P1, P2 y Pm), que produce esa corriente al atravesar el subsuelo. Se utiliza corriente continua o casi continua, es decir, campos eléctricos que no produzcan fenómenos de inducción electro-magnética en forma apreciable, y en los cuáles el régimen de circulación de la corriente se efectúa siguiendo la ley de Ohm.

En este método, las mediciones del campo eléctrico se hacen a lo largo de una línea, normal a la línea de tierra Et, en la que la colocación de los electrodos, se va aumentando por etapas sucesivas. (Fig. B-3). Para llevar a efecto la exploración, existen varios arreglos de alineamiento y espaciamiento de los electrodos conocidos como: 1a, 2a y 3a variante; la diferencia en cada arreglo, se basa en la distancia que hay entre los electrodos, ya que la profundidad de la penetración de la corriente es aproximadamente igual al espaciamiento de los electrodos. En nuestro caso se ha aplicado la 2a. variante, por ser la más apropiada y más usada en los fines que se persiguen; A continuación se explicará el procedimiento seguido en el campo al emplear esta variante.

SEGUNDA VARIANTE.- Una vez escogida la equidistancia "A", de acuerdo a la profundidad teórica que se desea alcanzar, el electrodo secundario Pm siempre permanecerá fijo ya que éste es el lugar en exploración. No así los restantes electrodos de potencial ó P1 y P2, cuya separación siempre será igual, ya que éstos se irán recorriendo sobre la línea de estudio en un múltiplo sucesivo de "A", los electrodos de corriente ó E1 y E2 se recorrerán al mismo tiempo que los de potencial, llevando siempre una relación de separación 3A.

Usualmente se le dá a "A" un valor de 2.0m. ya que además de facilitar los desplazamientos sucesivos de electrodos, las distancias que se van explorando se consideran de una dimensión en la que se puede hacer una buena interpretación. De tal manera que las distancias en una estación Xn estudiada, siempre deberá cumplir la relación:

$$X_n = \frac{3nA}{nA}$$

Equipo amplificador, oscilógrafo,
registrador fotográfico y reloj

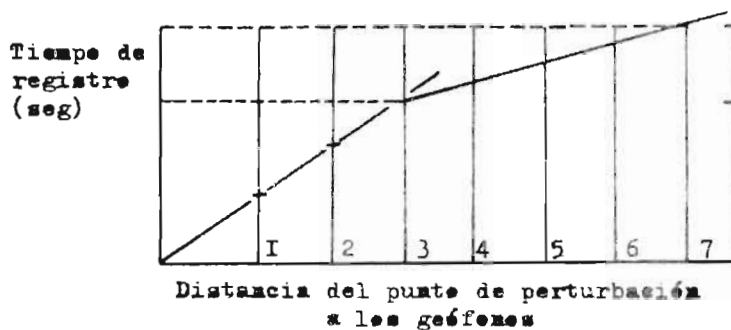
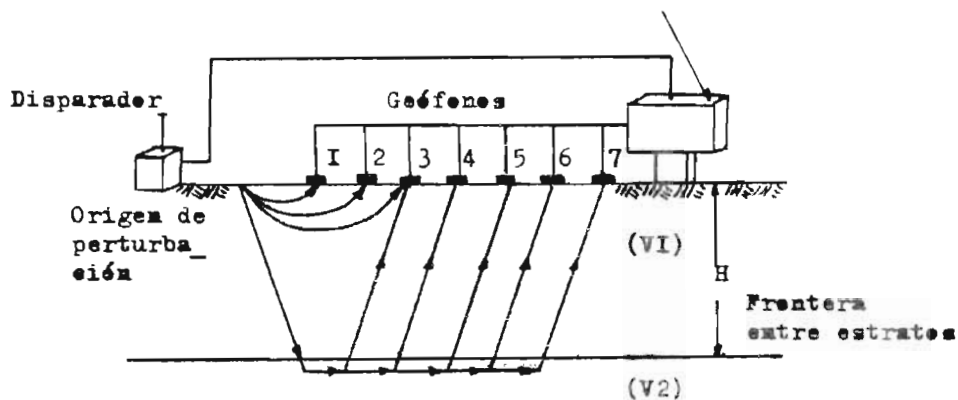


Figura B-I. Esquema del dispositivo para exploración geofísica
por el método sísmico.

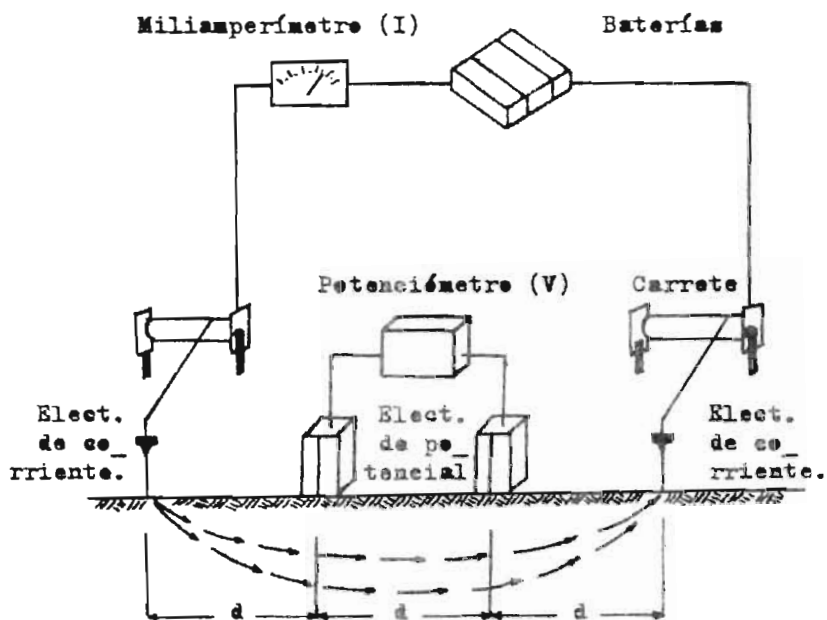


Figura B-2. Esquema del dispositivo para exploración por el método de resistividad eléctrica.

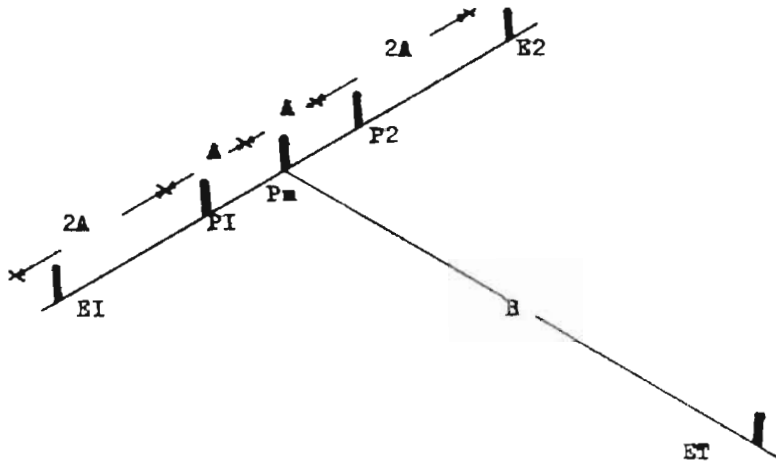


Figura B-3. Arreglo de Electrodes para el método de R.C.P. 2a. Variante.

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

Geología Física.

CHester R. Longwell y Richard F. Flint.

Ed. Limusa Wiley, S.A.

Geología Física.

Arthur Holmes.

Ediciones Omega, S.A.

Principios de Geología y Geotecnia p/ingenieros.

Krynine, Dimitri P.

Barcelona, Ed Omega.

Una Sola Tierra.

Barbara Ward y René Dubes.

Ed. F.C.E.

Elementos de Geología.

E.B. Branssen y W.A. Tarr. Keller.

Ed. Aguilar.