

19
Zejeu



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**UNA NUEVA METODOLOGIA A EMPLEAR EN LA
EVALUACION DE ZONAS DE INFILTRACION
DE AGUA AL SUBSUELO**

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A :

MARIA ELENA VAZQUEZ JAIMES

**Director de Tesis:
Ing. Héctor Luis Macías González**



CIUDAD UNIVERSITARIA

1995

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-061

BRITA. MARIA ELENA VAZQUEZ JAINES
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Héctor Luis Macías González, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geólogo:

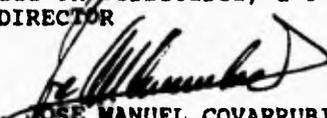
UNA NUEVA METODOLOGIA A EMPLEAR EN LA EVALUACION DE ZONAS DE INFILTRACION DE AGUA AL SUBSUELO

- I INTRODUCCION**
- II EL PAPEL DE LA INFILTRACION DENTRO DEL MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CUENCA**
- III MECANISMOS QUE CONTROLAN EL PROCESO DE INFILTRACION**
- IV DESARROLLO DE LA METODOLOGIA**
- V APLICACION DEL METODO Y SU IMPORTANCIA EN LA PRESERVACION DEL MEDIO AMBIENTE**
- CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**
- PLANOS E ILUSTRACIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 9 de septiembre de 1993.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gggt*



Esta tesis es la cristalización del anhelo de dos personas. A ellos está dirigida.

Con cariño a mis padres.

*Ma Elena Vázquez Jaimes,
Octubre del 95.*

INDICE GENERAL

CONTENIDO	PAG.
RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	iii
CAPITULO I. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Objetivos	4
1.3 Alcances	5
1.4 Organización del trabajo	
CAPITULO II. EL PAPEL DE LA INFILTRACION DENTRO DEL MODELO CONCEPTUAL DE UNA CUENCA	6
2.1 El ciclo hidrológico	7
2.1.1 Determinación de los componentes que conforman el ciclo hidrológico	12
2.1.2 Fenómenos atmosféricos del ciclo hidrológico	12
2.1.2.1 Formación de agua, evaporación y precipitación	15
2.1.2.2 medida de la temperatura del aire y de la humedad atmosférica	17
2.1.2.3 Velocidad y dirección del viento	18
2.1.2.4 Medida de la evaporación y evapotranspiración	18
2.1.2.5 Medida de la precipitación	20
2.1.3 Escurrimiento	24
2.1.3.1 Medida del escurrimiento	25
2.1.4 La intercepción y su determinación	28
2.1. La infiltración	30
2.1.5.1 Medida de la infiltración	32
2.2 Concepto de cuenca	35
2.3 Modelo conceptual de funcionamiento de una cuenca	38
CAPITULO III. MECANISMOS QUE CONTROLAN EL PROCESO DE INFILTRACION	41
3.1 Mecanismos del ciclo hidrológico y su relación con la infiltración	42
3.2 Condiciones naturales de infiltración	45
3.2.1 Naturaleza y composición del medio permeable	45
3.2.2 El relieve y las formas terrestres	48
3.2.3 La vegetación	53
3.2.4 El uso del suelo	55
CAPITULO IV. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA	56
4.1 Introducción a la metodología propuesta	56
4.2 Enfoque sistemático del método	56
4.3 Desarrollo del método	59
4.3.1 Enfoque del método científico	60
4.3.2 Planteamiento y delimitación del problema	60
4.3.3 Reconocimiento de los parámetros del medio permeable y la asignación de pesos relativos	61
4.3.4 Verificación de los parámetros y la determinación de una escala evaluativa	63

CAPITULO V. APLICACION DEL METODO Y SU IMPORTANCIA EN LA PRESERVACION DEL MEDIO AMBIENTE	65
5.1 Generalidades	66
5.1.1 Localización y antecedentes	66
5.1.2 Límites y principales vías de acceso	68
5.2 Geohidrología de la Cuenca de México	68
5.2.1 Geología regional	68
5.2.2 Hidrogeología	71
5.3 Hidrogeología local	76
5.3.1 Geología local	76
5.3.2 Hidrogeología del Parque Ecológico de la Ciudad de México	77
5.4 El impacto de la sobrepoblación en la Ciudad de México sobre los recursos hidrológicos	84
5.5 Estrategia de la metodología	85
5.6 Sección de datos	88
5.6.1 Composición del medio permeable	88
5.6.1.1 Peso relativo y factores evaluativos	88
5.6.2 Fracturamiento	91
5.6.2.1 Peso relativo y factores evaluativos	91
5.6.3 Estructuras volcánicas	95
5.6.3.1 Peso relativo y factores evaluativos	95
5.6.4 Pendiente y forma del terreno	99
5.6.4.1 Peso relativo y factores evaluativos	99
5.6.5 Vegetación y uso del suelo	103
5.6.5.1 Peso relativo y factores evaluativos	103
5.7 Resultados	108
 CONCLUSIONES	 114
 BIBLIOGRAFIA	 119
 PLANOS E ILUSTRACIONES	 I
Análisis Petrográfico	II
Perfil del suelo de una terraza	IV
Análisis granulométricos	V

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	El ciclo hidrológico. Una representación descriptiva	8
Figura 2.	El sistema del Ciclo hidrológico	10
Figura 3.	Capas atmosféricas	14
Figura 4.	El evaporímetro	19
Figura 5.	El pluviógrafo	21
Figura 6.	Método para el cálculo de la precipitación	23
Figura 7.	Partes de un hidrograma	27
Figura 8.	Gráfica que muestra la capacidad de infiltración y el volumen infiltrado	30
Figura 9.	El infiltrómetro	34
Figura 10.	Ejemplo que tiene la intensidad de lluvia al volumen infiltrado	44
Figura 11.	Secuencias hipotéticas de un flujo de lava	47
Figura 12.	Enfoque sistemático del método propuesto	59
Figura 13.	Localización del Parque Ecológico de la Ciudad de México	67
Figura 14.	Geología de la Cuenca de México	70
Figura 15.	Hidrogeología de la Cuenca de México	73
Figura 16.	Plano Geológico del Parque Ecológico de la Ciudad de México	79
Figura 17.	Sección hidrogeológica de la Sierra Guadalupe-Chichinautzin	82
Figura 18.	Variación de la permeabilidad con respecto a la dirección del flujo de una lava	82
Figura 19.	Distribución de los pesos relativos	87
Figura 20.	Rosetas de Fracturamiento, Parque Ecológico de la Ciudad de México	94
Figura 21.	Mapa de alturas, Parque Ecológico de la Ciudad de México	100
Figura 22.	Distribución de la pendiente del terreno, Parque Ecológico de la Ciudad de México	101
Figura 23.	Plano de vegetación, Parque Ecológico de la Ciudad de México	107
Figura 24.	Mapa de capacidades de infiltración, Parque Ecológico de la Ciudad de México	112

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Balance hidrológico global de una cuenca	40
Tabla 2. Formas del relieve terrestre por procesos exógenos	50
Tabla 3. Formas del relieve terrestre por procesos endógenos	52
Tabla 4. Efectos indirectos de la vegetación sobre la erosión	54
Tabla 5. Características del fracturamiento. Parque Ecológico de la Ciudad de México	93
Tabla 6. Resultados Finales de la Capacidad de infiltración del terreno	110

RESUMEN

El valor de la infiltración se obtiene a partir del uso de fórmulas empíricas, de la medida directa con equipos especiales, del empleo de la teoría de la infiltración, y mediante la aplicación de un balance hidrológico. La capacidad de infiltración del terreno se define como la capacidad que tiene la superficie para que el agua la penetre y se dirija hacia el subsuelo. En una cuenca ocurren todos los fenómenos del ciclo hidrológico y el comportamiento del agua se rige por las propiedades físicas que ésta presenta. Desde el punto de vista sistemático, al ciclo hidrológico se le considera como un conjunto de elementos que se relacionan entre sí, de tal forma que el comportamiento de uno de ellos tiene influencia sobre los otros, y sobre todo el conjunto en general. De esta manera, a la infiltración y a la capacidad de infiltración del terreno se le puede estudiar desde este enfoque. Con la idea anterior, se propuso un método de análisis hidrogeológico para diferenciar numéricamente a las zonas de recarga en entornos de diferente capacidad de infiltración. Se asignaron pesos relativos a cada uno de los parámetros del terreno que controlan a los mecanismos de infiltración y posteriormente se ponderaron mediante una calificación que representa su comportamiento hidrogeológico. El método se aplicó en el Parque Ecológico de la Ciudad de México en la Delegación Tlalpan; el cual tiene una superficie de 727.6 hectáreas y se sitúa al sur de la Cuenca de México al nor-oriental del volcán Xitle. En este lugar se seleccionaron 7 áreas hidrogeológicamente representativas en las que se aplicó el método. Se trabajó con los siguientes parámetros o componentes del terreno y sus respectivos pesos relativos: composición litológica 20%, fracturamiento 25%, estructuras 25%, pendiente del terreno 10%, vegetación 5%, y uso del suelo 15%. La escala de evaluación se determinó en un rango de cuatro números naturales (1-4) los cuales se relacionaron con los elementos del ciclo hidrológico de mayor importancia: escurrimiento, evaporación, retención e infiltración. El área de mayor capacidad de infiltración es la número 5, la que obtuvo un valor de 3.50, y se ubica en la porción noreste del Parque. En este lugar la composición litológica, las estructuras y la pendiente del terreno son los parámetros que favorecen más a la infiltración. El área designada con el número 6 presentó el valor más bajo de capacidad de infiltración (1.90); en ella únicamente la pendiente es la que permite que el agua se infiltre, y tanto la composición litológica como el fracturamiento y las estructuras provocan la pérdida del líquido por escurrimiento y retención. Los valores de capacidad de infiltración que se obtuvieron para las restantes áreas 1, 2, 3, 4 y 7 fueron respectivamente: 3.05, 2.95, 3.35, 2.45 y 3.05. Se propone la conservación total del Parque, pero para cualquier uso rigurosamente necesario destinado a futuro se sugiere proteger a las áreas que con este método, obtuvieron mayor capacidad de infiltración. Esta investigación pretende contribuir a sustentar las

políticas que se empleen para los nuevos planes de desarrollo en la Ciudad de México con el fin de disminuir la depredación del medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los presentes agradecimientos van dirigidos a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo. Especialmente al Ingeniero Héctor Luis Macías profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y director de la presente tesis por sus aportaciones, orientación y asesoría en el transcurso de su elaboración; al personal del Instituto de Ecología de la UNAM que participa en el Proyecto de Restauración del Parque Ecológico de la Ciudad de México, cuya dirección dignamente está a cargo el Dr. Jorge Soberón Mainero; al Ingeniero Héctor Legorreta Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos de La Facultad de Ingeniería de la UNAM, por su valioso apoyo en el análisis granulométrico de las muestras de suelo; al Sr. Alberto Herrera Palomo encargado del Laboratorio de Petrología de la Facultad de Ingeniería por sus importantes observaciones en el análisis petrográfico; a los estudiantes del grupo de Geohidrología 94-2 de la Facultad de Ingeniería por su participación en el trabajo de campo, y en general a todos los profesores y compañeros que con sus significativas observaciones ayudaron a cumplir el objetivo final de esta investigación.

Ma. Eiena Vázquez Jaimes
Septiembre de 1995.

■

**CAPITULO
UNO**

I. INTRODUCCION.

1.1 ANTECEDENTES

Los estudios de cuantificación de recursos hidráulicos subterráneos de cuencas en explotación, tienen como objetivo principal determinar la relación volumétrica entre la recarga y la descarga.

Cuando se cuenta con observaciones multianuales del comportamiento de los niveles del agua subterránea y se conocen para los mismos años las extracciones por bombeo de pozos, es posible calcular la recarga para esos años y su distribución en el tiempo. Su distribución en el espacio presenta otros problemas; los balances volumétricos se llevan generalmente a cabo sobre las superficies planas en que se ubican las captaciones de agua subterránea que proporcionan el acceso directo al acuífero, y en las que el monto de la recarga es menor al que ocurre en los bordes y sierras que las limitan y alimentan a profundidad.

Por ejemplo, el valle donde la Ciudad de México se asienta, es una superficie plana cubierta casi en su totalidad por una capa de concreto y de asfalto, en la que están emplazados más de 3000 pozos. Esta capa impide en el valle la infiltración natural de agua al subsuelo y corresponde a las sierras que lo bordean representar sus superficies de recarga.

Es lógico suponer que si la sierras continúan siendo invadidas por la extensión de la mancha urbana, en un futuro no muy lejano, éstas perderán su capacidad de infiltración, al mismo tiempo que se originaría una catástrofe ecológica.

Para conocer la distribución de la recarga en el espacio, se elaboran cartas hidrogeológicas. Se utilizan criterios que se basan en la determinación de parámetros litológicos, estructurales y geomorfológicos. En ellos se recurre a la medición de la densidad del drenaje, a la profundidad de la disección, y a la

orientación preferencial de fracturamiento entre otros. Existen sin embargo, inconvenientes para decir que se cuenta con un método encaminado a determinar en forma específica la distribución espacial de agua que recarga a un acuífero. En el caso descrito, el procedimiento única y exclusivamente se limita a reconocer y delimitar a las unidades de diferente permeabilidad, pero no determina el lugar donde ocurre la mayor infiltración.

Un mecanismo de recarga natural es la infiltración de agua que proviene de las precipitaciones al subsuelo. La cantidad de agua que se infiltra depende de la capacidad de infiltración que tiene el terreno, gobernada a su vez por las características físicas de la superficie. Ambos conceptos: infiltración y capacidad de infiltración del terreno son importantes; su estudio nos da información sobre el comportamiento de la recarga en la que por lo general se le localiza en las partes altas de una cuenca.

Sin embargo, la jerarquización de zonas por capacidades de infiltración, ha sido vista tradicionalmente con un enfoque cualitativo. Precisamente, como se hizo mención, el conocimiento del terreno, la experiencia y por supuesto la apreciación personal, son los elementos que ha utilizado el geólogo para separar las zonas muy permeables de la permeables, de las pocas permeables y de las impermeables. Bajo este contexto, los bordes altos de una cuenca, terrazas, taludes y planicies ubicados fuera de las zonas de balances pueden tener tantas interpretaciones en cuanto a la discriminación del terreno en zonas de diferentes capacidades de infiltración. La divergencia en esas interpretaciones tienen como base dos aspectos fundamentales: las diferentes capacidades de apreciación personal y las diferentes componentes del terreno utilizados en los análisis.

La anterior problemática llevó a plantear un método propuesto por el Ingeniero Héctor L. Macías González, director de este trabajo y a la autora del mismo, para plantear la cuantificación de capacidades de infiltración de agua al subsuelo. Cabe señalar que antes del presente estudio, el método se aplicó en un primer intento, en un tramo del Río Querétaro conocido como "La Cañada", en el cual se requería conocer el lugar dónde ocurre la mayor infiltración y en

donde las condiciones hidrogeológicas habían sido definidas en estudios previos. Una superficie de 440000 m² fue seccionada en once cuadrantes de 40000 m² cada uno. La investigación se realizó con estudiantes del curso de Geohidrología del semestre 93-1 que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Los resultados que se obtuvieron permitieron definir numéricamente áreas con diferente capacidad de infiltración.

Con la idea de retomar investigaciones de este tipo para identificar con bases más sólidas las mejores áreas para la infiltración natural, se pretende resolver en esta tesis uno de los problemas que atañen a las zonas de recarga de la Ciudad de México.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general es llevar a cabo una nueva metodología para evaluar áreas de recarga natural que puedan o no presentar favorable capacidad de infiltración, valiéndose del cuestionamiento y del análisis profundo de las condiciones geológicas presentes para traducir la información de parámetros teóricos a una representación cuantitativa.

Un objetivo específico es aplicar el método propuesto a una porción de la zona sur de recarga que se le conoce como Parque Ecológico de la Ciudad de México ubicado en la Delegación Tlalpan y en donde la UNAM ha llevado a cabo estudios de protección ecológica desde hace 10 años.

1.3 ALCANCES

Un criterio de esta naturaleza como lo es la metodología aquí propuesta, desprovisto del matiz subjetivo, podría ampliar y mejorar la comunicación del hidrogeólogo con otros especialistas acostumbrados a tratamientos cuantitativos y poner a disposición de las autoridades correspondientes, argumentos más sólidos para la reglamentación del uso del suelo.

Se pretende que el método sea una aceptable contribución a los estudios geohidrológicos encaminados al estudio de la infiltración natural.

Como se mencionó anteriormente, en la presente década, el crecimiento de la mancha urbana en valles y cuencas del Territorio Nacional, han cubierto de asfalto o concreto enormes extensiones de terreno por donde se lleva a cabo la infiltración natural del agua de lluvia. Se espera que las contribuciones de esta tesis inicien el sustento de políticas del crecimiento de las ciudades hacia las zonas de terrenos impermeables con el fin de disminuir la depredación del medio ambiente y la escasez de los recursos acuíferos.

1.4 ORGANIZACION DEL TRABAJO

Se expone en primer término una revisión general del ciclo hidrológico, el papel que desempeña la infiltración dentro de este y como uno de los factores principales en el funcionamiento de una cuenca hidrológica. En segundo término, se hace la descripción y el análisis general de los mecanismos que controlan el proceso de infiltración, con la finalidad de tener claridad e introducir los conceptos que se manejarán en la metodología que se desarrollará en el capítulo subsecuente. Por último, se presenta la aplicación del método en el Parque Ecológico de la Ciudad de México y se indican las zonas de mayor capacidad de infiltración.

**CAPITULO
DOS**

II. EL PAPEL DE LA INFILTRACION DENTRO DEL MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CUENCA.

2.1 EL CICLO HIDROLOGICO

Para autores como Stanley y De Wiest (1971) entre otros, el ciclo hidrológico es un proceso continuo de movimiento en el que se involucra la totalidad del agua del planeta; es decir, el agua en sus diferentes estados físicos: líquido, sólido y vapor. Este proceso es la secuencia de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera; su movilidad se debe principalmente a la energía que suministra el sol propiciando la evaporación; y a la gravedad terrestre que origina el movimiento descendente del agua como la caída de lluvia o como corrientes de agua superficial y subterránea. El agua comienza su ciclo con la formación de nubes que a su vez pueden transformarse en precipitación. Esta precipitación cae a la superficie terrestre en forma de lluvia; una vez en la tierra, el agua queda retenida en depósitos naturales y artificiales, temporalmente en el suelo, y escurrirá por los canales hasta llegar a los océanos, o bien, se infiltrará para incorporarse a los niveles de agua subterránea. La evaporación estará presente en los inicios de la precipitación, en los depósitos de agua, en el transcurso de las corrientes; como evapotranspiración en el proceso fotosintético de las plantas y finalmente en los océanos. De esta manera, el ciclo hidrológico constituye un movimiento cíclico el que continua indefinidamente como se observa en la figura 1.

Cabe señalar que esta descripción es muy generalizada y hay que entender que puede existir un ciclo más elaborado que contiene subciclos dentro del mismo. Esto se debe a la gran cantidad de factores que interactúan en la naturaleza que hacen que el movimiento del agua tome diferentes caminos.

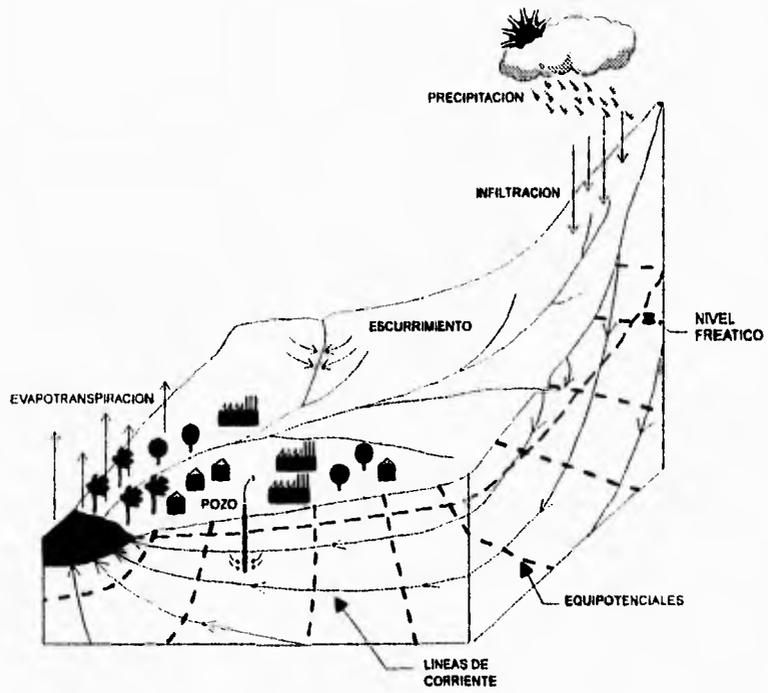


Figura 1. El ciclo hidrológico. Una representación descriptiva.

Stanley y De Wiest (1971) le dan un enfoque más profundo al concepto. Sugieren que se considere al ciclo hidrológico como un sistema complejo e interdependiente de fenómenos migratorios entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. Esta apreciación es correcta, pues al hablar de un sistema se hace referencia a un universo que está formado por ciertos componentes que se relacionan entre sí. Estos componentes son: la precipitación, la evapotranspiración, el escurrimiento, la retención superficial, la infiltración y la circulación del agua subterránea. Por lo tanto, el ciclo hidrológico es un sistema secuencial y dinámico que opera según leyes físicas que controlan el movimiento y el almacenamiento del agua manipulado por fuentes externas como la radiación solar y las fuerzas gravitacionales. En la tierra operan sistemas cerrados y abiertos, que pueden ser tanto globales como locales. Si consideramos al ciclo hidrológico en una escala global, se estará hablando de un sistema cerrado que obedecerá al principio de conservación de masa y su operación dependerá de la retroalimentación de todas o parte de las salidas del sistema. En la figura 2 se presenta el funcionamiento del ciclo hidrológico desde el punto de vista sistemático.

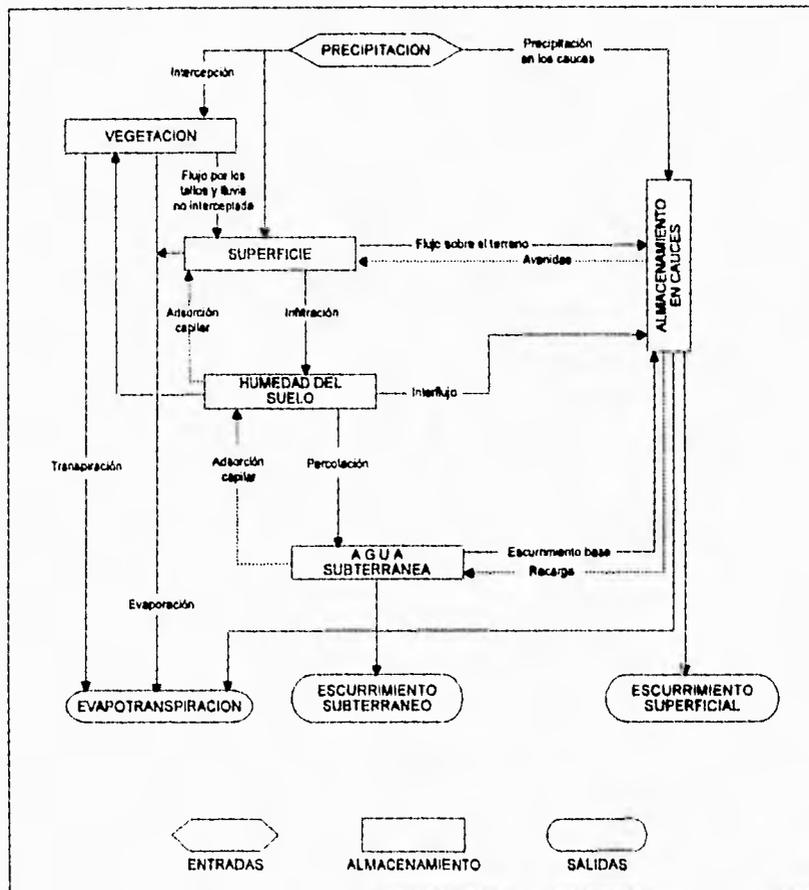


Figura 2. El sistema del Ciclo Hidrológico (Modificado de Campos, 1987).

El sistema hidrológico global tendrá normalmente una simple entrada conocida como precipitación y dos salidas principales: evapotranspiración y escurrimiento. La comunicación se dará por medio de varias transferencias de agua a través del sistema. Si cada componente por sí solo tiene la cualidad de un sistema, se puede definir como un subsistema o considerarlo como un sistema por separado. El ciclo hidrológico global se puede dividir en tres subsistemas: el sistema de agua atmosférica, el sistema de aguas superficiales y el sistema de aguas subterráneas. Chow, 1994, define a un sistema hidrológico como una estructura o volumen en el espacio rodeado por una frontera que acepta entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. La estructura es la totalidad de caminos del flujo a través de los cuales el agua puede pasar como materia prima desde el punto que entra al sistema hasta el punto que lo abandona. La frontera es una superficie continua definida en tres dimensiones y que encierra a la estructura. Un medio de trabajo, como lo es el agua de lluvia, penetra como una entrada, interactúa con la estructura y otros medios y emerge como salida del sistema. Los procesos físicoquímicos y biológicos operan en el medio de trabajo y dentro del sistema. Por lo tanto, el objetivo del análisis de un sistema es estudiar su operación y predecir cuáles son sus salidas. En una cuenca se puede establecer un sistema en donde las entradas y salidas sean variables hidrológicas mensurables, la estructura un conjunto de ecuaciones que las controlan y su expresión esté en función del tiempo, bases necesarias para la representación real mediante un modelo de circulación de agua en la tierra. Las entradas en un sistema de cuenca dependen en cierta medida de las formas de recarga.

2.1.1 DETERMINACION DE LOS COMPONENTES DEL CICLO HIDROLOGICO

En la antigüedad cuando no se tenían pruebas confiables, para explicar ciertos fenómenos relacionados con el agua subterránea, por lo menos ya se tenía conocimiento o una apreciación cercana del origen del vital líquido. En la actualidad se puede saber con mayor exactitud como es el movimiento del agua, y de donde proviene; esto se conoce gracias a la existencia de equipos diseñados para medir las componentes del ciclo hidrológico y al desarrollo de métodos matemáticos.

2.1.2 FENOMENOS ATMOSFERICOS DEL CICLO HIDROLOGICO

La procedencia de todos los estados del agua que circulan en la tierra tienen que ver con fenómenos atmosféricos o meteorológicos activados por una gran fuente externa: el sol.

La meteorología trata la porción atmosférica del ciclo hidrológico y es la ciencia que contempla a todos los fenómenos atmosféricos. Por su parte, la hidrometeorología estudia las fases atmosféricas del ciclo hidrológico, que comprenden a la circulación atmosférica (vientos), a la formación de vapor de agua, a la evapotranspiración, y a la condensación y precipitación.

La atmósfera se considera como la envoltura gaseosa de la tierra y funciona como protector contra las radiaciones procedentes del sol y de otros cuerpos celestes; es la fuente de oxígeno de la vida terrestre y regula la temperatura. La presión debida al peso del aire se le denomina presión atmosférica y es la cantidad de peso que ejerce una columna de mercurio de 760 mm a la latitud de 45° al nivel del mar. Su unidad de medida es la atmósfera. La presión atmosférica dependerá de varios factores, entre ellos la temperatura y la humedad. En atención a sus propiedades térmicas y en relación con la altitud, se ha dividido la atmósfera en diversas zonas o capas, las cuales se muestran en la figura 3. Es importante resaltar que en cada capa la composición del aire suele ser diferente al igual que las condiciones físicas de cada una. Para la hidrología, la composición de la troposfera y de los fenómenos que ahí tienen

lugar son importantes, pues en este primer espacio de la atmósfera se llevan a cabo los fenómenos meteorológicos como la formación de nubes, lluvias y tormentas. La tropósfera es la capa de aire que está en contacto con la superficie terrestre; es muy densa a comparación de las demás y la temperatura del aire desciende verticalmente a razón de unos 6.5°C por cada 1000 m de altura. La altura de la troposfera es de aproximadamente 15 Km, variando este espesor de acuerdo a las zonas ecuatoriales o polares del globo terráqueo. El límite superior de la troposfera lo constituye la tropopausa que constituye la zona de transición de los fenómenos atmosféricos en este lugar cesa la disminución de la temperatura y existe un significativo cambio de presión.

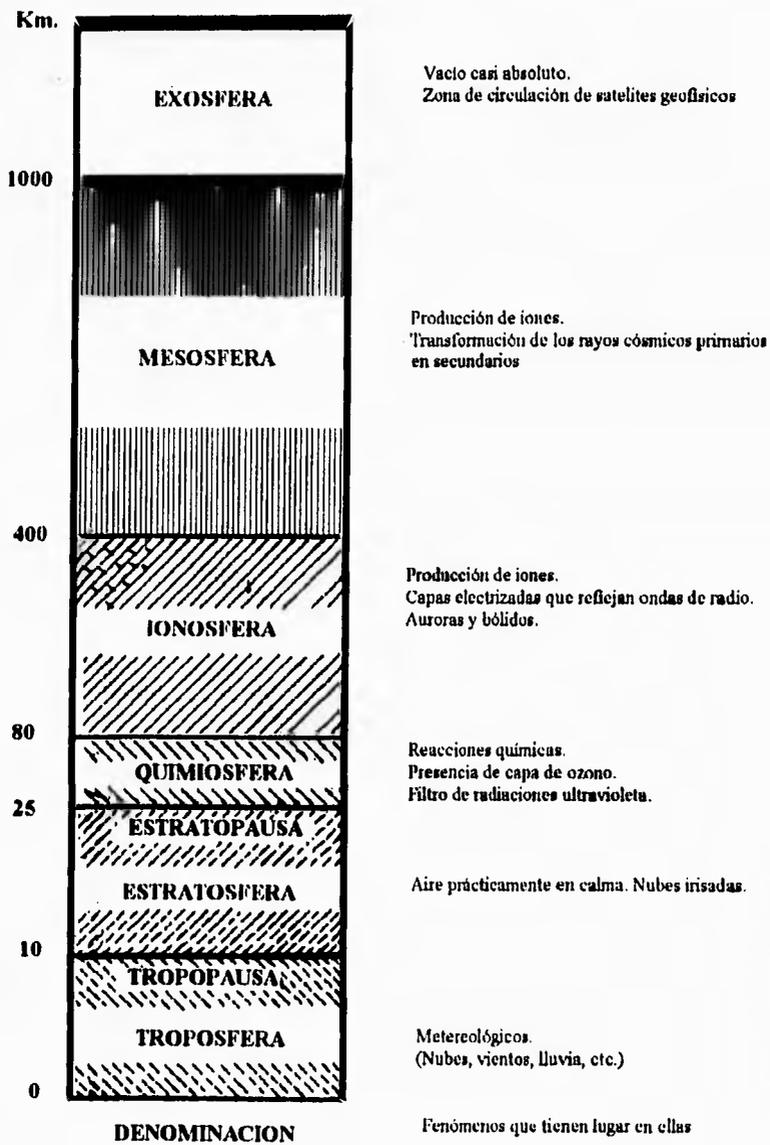


Figura 3. Capas atmosféricas (Donn, 1978)

2.1.2.1 FORMACION DE VAPOR DE AGUA, EVAPORACION Y PRECIPITACION

El vapor de agua se encuentra concentrado en su mayoría en los cinco primeros kilómetros de toda la columna atmosférica; y en su totalidad constituye de 0 al 4% en volumen. El vapor de agua procede de la continua evaporación de los cuerpos de agua, principalmente de los océanos. La evaporación es el paso de una sustancia líquida al estado de vapor y se realiza en la superficie del líquido. Así en una masa de agua a determinada temperatura las moléculas del agua se encuentran en continua agitación y unidas entre sí; algunas de estas moléculas adquieren una velocidad mayor, rompen la barrera de la tensión superficial y escapan a la atmósfera convirtiéndose en partículas de vapor de agua. Para que esto suceda, es decir, para que se produzca y mantenga la evaporación, es necesario que una fuente externa de calor suministre la energía necesaria. Así la temperatura está relacionada con este proceso; si se aumenta la temperatura la energía adicional aumentará la evaporación, implicando con esto un aumento de partículas de agua existentes en el aire; y en este caso se dice que el aire se encuentra saturado. Si el aire contiene más vapor de agua del que tenía inicialmente, se dice que está sobresaturado. Cuanto más caliente está una masa de aire mayor es la cantidad de vapor de agua que puede retener; de lo contrario, cuando una masa de aire se enfría se desprende del vapor sobrante en forma de precipitación. Si la atmósfera está sobresaturada y se le añade más vapor de agua o se disminuye su temperatura el sobrante se condensa y posteriormente precipita. El vapor que se escapa hacia la atmósfera origina una presión llamada presión de vapor que significa el máximo de presión producida por el vapor que escapa de un líquido a una temperatura dada.

Para que comience la primera etapa de precipitación, se deben de presentar de terminadas condiciones; una de ellas es que el aire esté sobre saturado para que ocurra la condensación de las moléculas de vapor de agua en forma de pequeñas gotas. Estas gotas crecerán a medida que aumenta la humedad relativa a un 100% y atraídas por la fuerza de gravedad caerán hacia la tierra. Es importante señalar que antes de iniciarse la condensación, las moléculas de vapor se depositan en superficies o cuerpos apropiados denominados núcleos de condensación formados por partículas de sal y de nitrógeno formando

diferentes compuestos de sulfatos, anhídrido sulfuroso, amonio, cenizas volcánicas y otras partículas sólidas productos de la actividad Industrial de las grandes urbes. Es importante considerar los factores que influyen en la variación de la precipitación, pues de ellos dependerá la disponibilidad de un masa de aire para precipitarse. Uno de estos factores es el orográfico; aquí la presencia de una barrera montañosa provocará fuertes precipitaciones.

Relacionada con el proceso de evaporación es la transpiración. La transpiración es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. La transpiración de las plantas se efectúa a través de las hojas cuando éstas absorben la radiación solar, energía que necesitan para realizar el proceso fotosintético. A la combinación de evaporación y transpiración se les conoce como evapotranspiración.

Al aumentar la velocidad del viento, el agua evaporada es arrastrada ocasionando un suministro relativamente bajo de humedad e impide que las moléculas se reincorporen al líquido; si la temperatura aumenta, también lo hace la evaporación; es decir, la velocidad de evaporación es proporcional a la temperatura. Para una misma temperatura la evaporación que se produce sobre una superficie líquida es mayor que la que ocurre sobre un terreno húmedo, así la evaporación es más irregular en las zonas continentales que en los océanos. De igual modo, varía inversamente con la salinidad, siendo mayor en el agua dulce que en la salada. Según Gerrero L.M (1991), aproximadamente por cada 1% de salinidad en el agua se reduce en 1% la evaporación. Para un suelo húmedo, las moléculas de agua están sometidas a la atracción de las moléculas de la tierra, lo que reduce la evaporación. Es decir, las capas más superficiales del suelo determinan la cantidad de evaporación, pues en un suelo completamente seco ésta no puede llevarse a cabo y en este caso la superficie actuará como un aislante aún estando las capas más profundas saturadas. Otros procesos que afectan a la evaporación son la textura del suelo, en donde intervienen fuerzas capilares que contrarrestan la fuerza de gravedad y causan el ascenso del agua por conductos. El color del suelo modela el proceso por medio de una capacidad reflectora; así los suelos claros reflejan más luz que los oscuros. Con la presencia de vegetación disminuye la evaporación directa del

suelo al crear una capa aislante que lo protege de los rayos solares e impide que el viento arrastre la humedad superficial. En zonas con gran vegetación, la evaporación se lleva a cabo a través de su transpiración.

Existen métodos para cuantificar los anteriores fenómenos atmosféricos con ayuda de instrumentos especiales colocados en una estación meteorológica.

2.1.2.2 MEDIDA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA HUMEDAD ATMOSFERICA

La medida de la temperatura se realiza con termómetros especiales instalados en casetas de madera que se colocan a una determinada distancia del suelo protegidas de la radiación solar y de cualquier otro foco de calor, y con cierta ventilación. En el interior de las casetas están instalados tres tipos de termómetros; el termómetro de máxima que registra la temperatura máxima alcanzada durante un determinado periodo; el termómetro de mínima que se utiliza para registrar la temperatura más baja y la temperatura ambiente. El termógrafo hace el registro automático en una cinta de papel. En la actualidad existen aparatos que registran la temperatura del aire por medio del control remoto de satélites meteorológicos y radiosondas. Se utilizan escalas termométricas en grados fahrenheit y en grados centígrados. Para el análisis de los datos de temperatura se emplean los términos promedio, medio y normal que son promedios aritméticos. La medición de la humedad es uno de los procedimientos instrumentales menos precisos en meteorología debido a su propio diseño. La lectura se realiza en un psicrómetro que consiste de dos termómetros; uno de ellos tiene una funda de muselina empapada de agua. Debido al enfriamiento producido por la evaporación, el termómetro humedecido marca una temperatura menor que la del termómetro que está seco; de esta manera, se genera una diferencia en grados que se conoce como depresión del termómetro húmedo. Las temperaturas del aire y del termómetro húmedo se utilizan para obtener varias expresiones de la humedad. Existen diferentes instrumentos para medir la humedad aunque ellos trabajan por lo regular bajo el mismo principio anterior; entre ellos se encuentran: el higrómetro de cabello, el higrómetro y el higrómetro de punto de rocío.

2.1.2.3 MEDIDA DE LA VELOCIDAD Y DIRECCION DEL VIENTO

El viento es el aire en movimiento y es un factor importante en la evaporación y en la precipitación. La humedad y el calor se transmiten con facilidad hacia este medio, y adopta las condiciones de temperatura y humedad de las superficies con las cuales tiene contacto. Las diferencias térmicas entre el océano y el continente, la fricción de árboles, edificios y otros obstáculos originan variaciones en la dirección y velocidad del viento.

La veleta se utiliza para medir la dirección, y para medir la velocidad se emplea el anemómetro de capas o hélice el cual registra el número de revoluciones debidad a la acción del viento.

2.1.2.4 MEDIDA DE LA EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION

La evaporación se mide con el evaporímetro. Este instrumento está formado por un recipiente de fierro galvanizado en el que se coloca cierta cantidad de agua. Atendiendo a su instalación, pueden ser: enterrados, flotantes y superficiales. El mas común es superficial, como el que se muestra en la figura 4. En este tanque se mide diariamente el cambio de tirante de agua en una regla graduada colocada en un tubo quietador. Los valores obtenidos se deben de corregir sumádoles la altura de precipitación en el tiempo estimado.

Además del cálculo por medición directa, la evaporación se puede calcular por medio de fórmulas empíricas. En las zonas donde la evaporación se lleva a cabo, en cualquier caso, ésta es proporcional al gradiente de presión entre la zona de intercambio y la atmósfera. Esto se conoce como ley de Dalton y a partir de la cual se genera la siguiente expresión de evaporación (Mijares, 1989):

$$Em = c (es - ea) \left[1 + \frac{Vw}{16.09} \right]$$

Donde:

- Em = evaporación mensual en cm.
- Vw = velocidad mensual del viento, medida a 10 m de la superficie, km/h
- c = coeficiente empírico que se obtiene según las dimensiones del depósito de agua: 38 para depósitos pequeños y evaporímetros y 28 para grandes depósitos.
- ea, es = "es" presión de vapor de saturación y "ea" presión de vapor del aire en un momento dado.

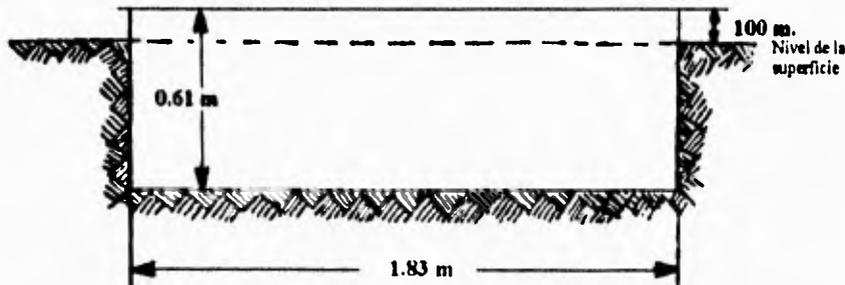


Figura 4. El Evaporímetro (Chaw, 1988)

Existen otros métodos más elaborados para la obtención de estos parámetros. Uno de ellos es en el que se aplica la ecuación de balance como lo expresa la siguiente fórmula (Linsley y Kholer et. al. , 1973):

$$E = (S1 - S2) + I + P - O - Os$$

Donde:

E = evaporación (L)

I = flujo de entrada (L³ / t)

O = caudal de salida (L³ / t)

Os = infiltración subsuperficial (L)

P = Precipitación (L)

S1-S2 = diferencia de almacenamiento

Es importante señalar que la obtención de cada término debe de ser precisa para un buen resultado final.

La determinación de la evapotranspiración se relaciona con el agua que las plantas requieren para su nutrición, es decir, el uso consuntivo. En México se utilizan dos métodos para su obtención; el de Thorntwaite y el de Blaney Criddle. El primero se aplica a estudios preliminares utilizando temperaturas mensuales; y el segundo es aplicable en casos más específicos con datos de temperaturas mensuales, las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la temperatura de siembra, y la zona. Para medir la evapotranspiración en campo se hace uso de evapotransporímetros y de lisímetros cuyo principio se basa en la obtención directa de la percolación.

2.1.2.5 MEDIDA DE LA PRECIPITACION

De la precipitación podemos obtener su altura o intensidad, su distribución en el espacio, su distribución en el tiempo y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Para llevar a cabo esta cuantificación, se hace uso de lecturas en pluviómetros y pluviógrafos instalados en una estación meteorológica, y por otro lado se emplean análisis estadísticos y gráficos para la interpretación de

resultados. Existen varios tipos de pluviómetros, que en general están formados por un recipiente cilíndrico graduado al que descarga un embudo que capta agua de lluvia. Cada milímetro de lluvia se deposita en un centímetro en el recipiente, de este modo se pueden hacer lecturas directas que se llevan a cabo en las primeras horas del día. Los pluviógrafos son similares a los pluviómetros con la diferencia que estos últimos mantienen un registro continuo de precipitación. Este mecanismo está formado por un tambor que gira a una velocidad constante sobre el que se coloca un papel graduado. En el recipiente se pone un dispositivo que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel, como se observa en la fig. 5. El registro que se obtiene se llama pluviograma.

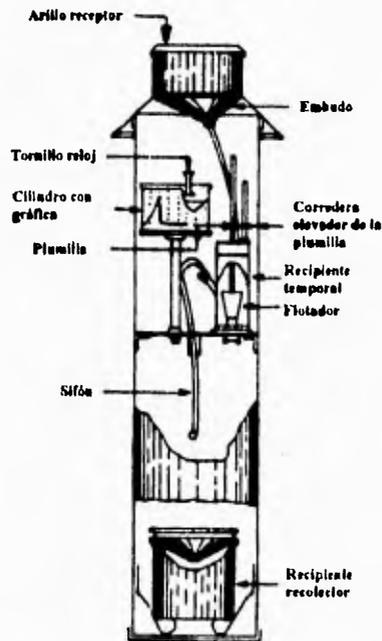


Figura 5. El pluviógrafo (Chaw, 1988)

Las mediciones con estos instrumentos, por defectos del mismo equipo, o debido al ambiente físico donde se colocan están sujetos a diferentes errores que son aleatorios y tienden a compensarse. En la actualidad se utiliza la medición de la precipitación usando radares que trabajan transmitiendo una onda hacia las nubes que posteriormente regresa por reflexión y se registra con la misma antena. También se emplean fotografías de nubes tomadas por satélites para ser interpretadas.

Con la información que se obtiene del pluviograma se construye una gráfica de curva-masa-precipitación, graficando precipitación acumulada contra tiempo y en la que su pendiente para cualquier tiempo representa a la intensidad de lluvia o altura de precipitación por unidad de tiempo. A partir de una curva masa de precipitación es posible dibujar diagramas de barras que representan las variaciones de la altura de precipitación o de su intensidad en intervalos de tiempos seleccionados. Estos diagramas de barras se llaman hietogramas. Para analizar los datos de precipitación, es necesario conocer la lluvia media de una tormenta que ocurre en una cuenca, para lo cual existen tres métodos principales:

a) **Método aritmético.** Se obtiene el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación.

b) **Método de Thiessen.** Supone una variación lineal de la precipitación entre las estaciones y asigna un segmento de área a la estación más cercana; es decir, se registran todas las estaciones pluviométricas en una área y se dibujan líneas que las conectan con otras. Las mediatrices de estas líneas, forman polígonos alrededor de cada estación. Se calcula el área del polígono y se expresa en porcentaje del área total. El promedio ponderado de lluvias para el área total se calcula multiplicando la precipitación en cada estación por su porcentaje de área asignado y se suman estos valores.

c) **Método de Isoyetas.** Consiste en trazar con la información registrada en las estaciones líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas.

Ejemplos de los anteriores métodos se muestran en la figura 6.

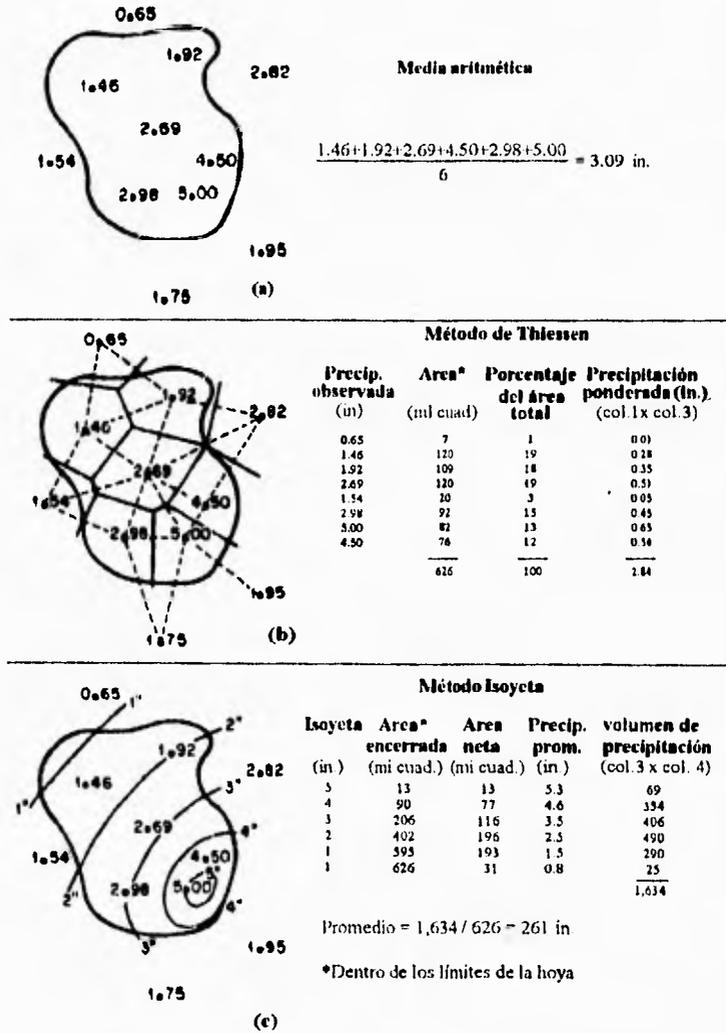


Figura 6. Métodos para el cálculo de la precipitación por (a) método aritmético, (b) método de Thiessen y (c) método de las isoyetas (Linsley, et al., 1977).

2.1.3 ESCURRIMIENTO

El escurrimiento es una componente más del ciclo hidrológico y de mucha importancia para la hidrología superficial, ya que desde el punto de vista de aprovechamiento de los recursos hidráulicos con los que cuenta una región, el escurrimiento ocupa un papel importante en la construcción de obras hidráulicas, como: canales de riego, embalses, agua potable y drenaje.

El escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece como corrientes superficiales, fluye por gravedad en la superficie del terreno, o bien, en el interior del mismo. De acuerdo a la profundidad, en la que se origina el escurrimiento, se divide en: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo. El primero es la parte del escurrimiento que viaja sobre el suelo y después en los cauces; existe otro escurrimiento que fluye directamente sobre el terreno antes de llegar a los canales que se le conoce como "flujo sobre el terreno". El escurrimiento subsuperficial o interflujo es el agua que se infiltra sobre el terreno y se mueve lateralmente en los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes; la otra parte infiltrada llegará a incorporarse a los niveles freáticos y circulará como escurrimiento subterráneo.

Cuando llueve en un área, se inicia en una primera etapa, el proceso de interceptación para después dar inicio al proceso de infiltración, sin embargo, no se descarta la idea de que en una región ambos procesos pueden ocurrir simultáneamente. Al caer la lluvia, el agua escurre directamente sobre el terreno y se deposita en depresiones del suelo que al llenarse, si la intensidad de lluvia es abundante el agua se derramará y fluirá hacia los cauces como flujo superficial.

Al escurrimiento también se le conoce como gasto o caudal de un cauce y comúnmente se expresa en m^3/seg . Al escurrimiento total se le clasifica en escurrimiento directo y escurrimiento base. El escurrimiento directo comprende al flujo sobre el terreno y al escurrimiento superficial; y el escurrimiento base está formado por el escurrimiento subterráneo y el escurrimiento subsuperficial.

El agua en su circulación puede comenzar como escurrimiento superficial y terminar como subterráneo y viceversa. El escurrimiento varía en volumen y en la distribución temporal y espacial de acuerdo a los siguientes factores:

- Clase, intensidad, duración, distribución y trayectoria de las precipitaciones
- factores climáticos
- topografía de la cuenca
- geología de la cuenca
- tipo de suelo
- cubierta vegetal
- red de drenaje
- obras hidráulicas
- prácticas agrícolas
- urbanización

2.1.3.1 MEDIDA DEL ESCURRIMIENTO

Este proceso del ciclo también se cuantifica, existiendo gran variedad de métodos para hacerlo. Con ellos se mide el gasto de un cauce en un punto y en un instante dado. Entre los más comunes se encuentran:

1. Métodos que se basan en la medición de la velocidad y nivel del agua en el área transversal de un río.
2. Métodos que involucran la instalación de aforadores o vertedores en una corriente.

Para medir la elevación del agua en un estación medida por encima de un cero arbitrario de referencia, se utiliza el limnómetro que es una regla graduada colocada en una de las márgenes del cauce. La graduación está calibrada para medirse en metros y en centímetros. En la regla se lee la elevación de la superficie cada determinado tiempo. El limnógrafo es un aparato automático que registran niveles continuamente y consiste de un flotador unido a una pluma;

el movimiento del flotador acciona la pluma sobre una carta de registros giratoria. El registro de niveles contra el tiempo que se obtiene de un limnógrafo se le conoce como limnograma. En actualidad existen registradores a control remoto que trabajan con un sistema de motores los cuales se utilizan para transmitir la información sobre el nivel del agua desde un lado de la corriente hasta un registrador localizado a cierta distancia.

Una de las formas hidráulicas para obtener el gasto que pasa por una sección de corriente es: por medio de:

$$Q = AV$$

En donde:

Q = el gasto en L^3 / t

A = area en L^2

V = velocidad en L / t

La velocidad del flujo de una sección transversal de una corriente tiene una distribución no uniforme, por lo que en su análisis se utilizan velocidades promedio. Esta velocidad se mide por medio de molinetes o correntómetros; estos tienen una hélice que gira impulsada por las corrientes y funciona por medio de un mecanismo eléctrico; la velocidad angular que origina el número de revoluciones por minuto o segundo de la hélice se traduce a la velocidad del agua. Para corrientes demasiado pequeñas o en corrientes montañosas comúnmente se utilizan agentes químicos para determinar la velocidad media en un tramo midiendo el tiempo desde el momento se inyecta cierta cantidad de químico y su llegada hasta un punto localizado aguas abajo.

Una vez que se han obtenido datos de gasto en una corriente con los anteriores métodos, se recurre al análisis de hidrogramas. Un hidrograma es una gráfica en la que se representa el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo, es decir, el gasto que pasa en forma continua y en un periodo determinado por la sección transversal de un río. Las partes que conforman a un hidrograma se presentan en la figura 7. Si se calcula el área bajo el hidrograma se podrá obtener el volumen total de escurrimiento.

En un hidrograma se pueden analizar por separado el escurrimiento superficial y el subterráneo siempre y cuando se conozca la línea de separación entre ellos. En el estudio de hidrogramas se determina el tiempo en el que termina el escurrimiento directo y comienza el escurrimiento subterráneo.

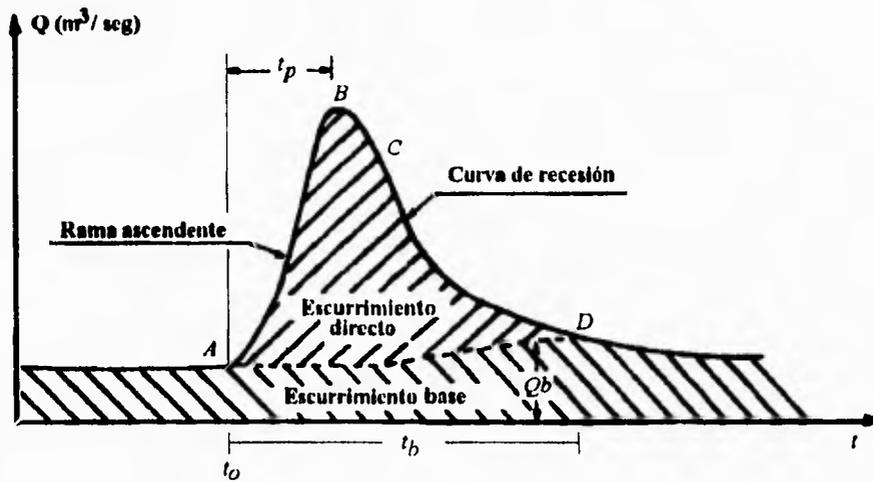


Figura 7. Partes de un hidrograma (Aparicio, 1989). "A" es el punto de levantamiento; "B" se le conoce como pico; "C" como punto de inflexión, "D" como final del escurrimiento directo; " t_p " es tiempo de pico; y " t_b " tiempo base

2.1.4 LA INTERCEPCION Y SU DETERMINACION

Si se desea conocer que cantidad de agua llega finalmente al suelo, después de originarse como agua de lluvia, se debe de estudiar el proceso de Intercepción. La intercepción es el proceso por el cual el agua de lluvia es detenida y retenida por la vegetación y otras estructuras como retención superficial; se pierde por evaporación o por evapotranspiración, y tiempo después, de acuerdo a ciertas condiciones, inicia su escurrimiento.

Los datos de intercepción sirven para estimar los volúmenes del agua que escurren en un determinado tiempo, además de conocer la cantidad de lluvia que no se evaporó después de caer a la superficie. El agua que llega a los hojas de los árboles o cualquier otra planta, posteriormente cae al suelo y al mismo tiempo se evapora. En este instante la cantidad de agua que llega al suelo es igual a la lluvia, menos la evaporación desde la cubierta vegetal. Finalmente la vegetación queda saturada y toda la humedad regresa a la atmósfera por evaporación.. En la gráfica de la figura 12 se puede ver la variación de la intercepción con el tipo de vegetación y la magnitud y duración de la precipitación. La instrumentación para llevar a cabo tales mediciones consta de pluviómetros e interceptómetros. Estos últimos son una especie de pluviómetros dispuestos sobre el terreno bajo la cubierta vegetal; de este modo, para determinar la intercepción de la capa de humus, se hace calculando su contenido de humedad, antes y después de la tormenta.

La medición del flujo por los tallos en los árboles se hace colocando un arco alrededor del tronco desde el cual se recoge y se mide la cantidad de agua que escurre hacia abajo. Para cubiertas vegetales con tallos pequeños y numerosos como los pastos, se instalan dispositivos especiales y sofisticados para su medición.

Como la magnitud de la intercepción varía según las características de la edad, forma y orientación de la cubierta vegetal, entonces, ese valor será distinto al existir diferente tipo de vegetación.

El almacenamiento en depresiones es el proceso por el cual existe un volumen de agua necesario para llenar las depresiones naturales del terreno , por lo general en depresiones ubicadas cotas arriba a las del escurrimiento. El agua de lluvia al caer sobre la superficie terrestre, al infiltrarse, al exceder la capacidad de infiltración del terreno y al no existir una tasa de evaporación considerable, comienza a llenar los huecos y otras depresiones; si el proceso de precipitación continua y los depósitos están completamente llenos, el agua comenzará a escurrir como una capa delgada de agua denominada retención superficial.

La naturaleza y características físicas del drenaje (tamaño, profundidad y área), morfología original, uso y prácticas del terreno, son factores fundamentales que determinan la magnitud del proceso de almacenamiento en depresiones.

2.1.5 INFILTRACION

La infiltración es el movimiento del agua a través de la superficie del suelo en forma descendente gracias a las fuerzas capilares y gravitacionales del medio por donde circula (Aparicio, 1989). A esta definición hay que agregar que la circulación del agua se hace desde la superficie del suelo hacia los mantos acuíferos, o bien, durante el trayecto puede quedar retenida antes de alcanzar el nivel de aguas subterráneas. Es una componente que se considera como la diferencia entre el volumen de agua que llueve, el que se evapora y el que escurre. Existen otros términos relacionados como la capacidad de infiltración, la que R.E. Horton (1940) define como la velocidad máxima en la cual la lluvia puede ser absorbida por un suelo en una condición dada; así, esta velocidad máxima ocurre por unidad de superficie y su relación con la infiltración se da mediante la gráfica de la figura 8.

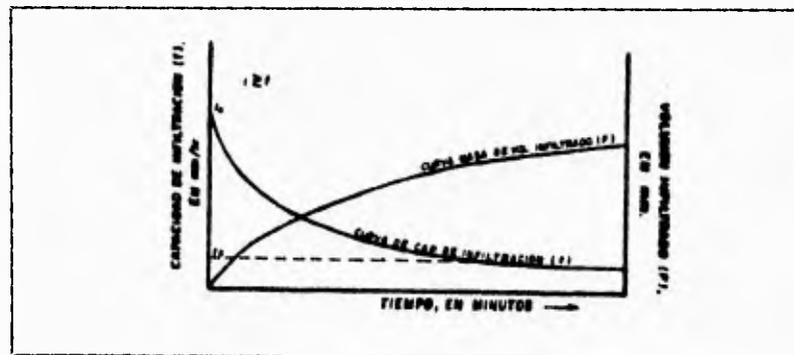


Figura 8. La relación capacidad de infiltración y volumen infiltrado (Campos, 1987)

La percolación esta relacionada a la infiltración; es el agua que se filtra por debajo de la zona de raíces que tiempo después se incorpora a la capa freática cuando ésta está cercana a la superficie.

Durante el proceso de infiltración ocurre lo siguiente: Antes de que el agua de lluvia caiga a la superficie, el suelo está seco en su totalidad; al inicio de la tormenta la infiltración comienza con un valor alto que tiempo después disminuye hasta que las lluvias son continuas, momento en el cual adquiere un valor constante. De esta manera, en un primer instante, la capacidad de infiltración será mayor que la intensidad de lluvia y las fuerzas capilares del suelo serán predominantes, es decir:

$$F = i$$

$$i < f_i$$

i = intensidad de lluvia

f_i = capacidad de infiltración

F = infiltración

Al continuar la lluvia, la humedad del suelo aumenta hasta alcanzar el grado de saturación, momento en el cual se llenan las depresiones del terreno y tiempo después comienza a correr como flujo sobre la superficie; a este instante se le conoce como tiempo de encharcamiento(T_p). Aquí, las fuerzas capilares dejan de predominar, el contenido de humedad aumenta y la capacidad de infiltración disminuye con el tiempo es decir:

$$i > F_i$$

$$t > t_p$$

$$F = F_i$$

t = tiempo transcurrido

t_p = tiempo de encharcamiento

Después de este proceso, la infiltración queda gobernada por la velocidad de entrada del agua a través de la superficie del suelo. Cuando casi todo el suelo

húmedo está saturado a partir de $t = \infty$, la capacidad de infiltración tiende hacia un valor constante y el movimiento del agua se produce por gravedad. Al entrar un periodo en calma, es decir, cuando ocurre que $i < F_i$, el tirante de agua que está sobre la superficie disminuirá por infiltración y otra en menor grado se evaporará. Finalmente cuando hay agua en la superficie, el contenido de humedad de las capas del suelo se difunde.

En conclusión, la infiltración se considera como la secuencia de tres grandes procesos: entrada del agua en la superficie, transmisión a través del suelo y el consumo de la capacidad de almacenamiento.

Los procesos anteriores son afectados por los siguientes factores:

a) Los que dependen de las características del medio permeable como: la extensión, de afloramientos permeables, compactación del suelo, presencia de vegetación, espesor del suelo, presencia de grietas y fracturas, textura y estructura del suelo, humedad inicial, y uso del terreno,

b) los que dependen de las características de los gradientes de presión y gravitacional que se originan en el suelo, éstas modifican y determinan la conductividad hidráulica de cada material y,

c) los que dependen de las características de los fluidos que se infiltran como la turbidez del contenido de sales y la temperatura del líquido.

2.1.5.1 MEDIDA DE LA INFILTRACION

Para medir la infiltración se utilizan métodos analíticos y el uso de medidas directas en el terreno con equipos especiales. El método analítico utiliza la siguiente expresión:

$$F = i - r \quad (\text{Aparicio, 1989}).$$

donde:

F = infiltración medida con respecto al tiempo

i = altura de lluvia

r = lámina de escurrimiento directo

Esto implica primero obtener datos de escurrimiento o precipitación. Aparicio, (op. cit); propone dos criterios que se pueden aplicar para encontrar a la capacidad de infiltración. El primero es el de la capacidad de infiltración media, el que supone que la infiltración es constante durante la tormenta y a la capacidad de infiltración la reconoce como un índice de infiltración media que se calcula al tener registros simultáneos de precipitación y escurrimiento a partir de hietogramas e hidrogramas. El segundo método, es el criterio del coeficiente de escurrimiento, el cual, mediante la obtención de una constante de proporcionalidad relaciona a la lámina de escurrimiento directo con la altura de lluvia acumulada para que se aplique directamente en la ecuación general de la infiltración; se necesita conocer también los gastos de salida y de las precipitaciones, es decir, que las corrientes esten aforadas previamente. En la mayoría de los casos no se cuenta con ese tipo de información, y en este caso, se utilizan las fórmulas empíricas las cuales son expresiones matemáticas que representan a la capacidad de infiltración. La que propone R. E. Horton (1986) es la más conocida y permite calcular el valor de la capacidad de infiltración en mm/hr.

De una manera más compleja que utiliza un respaldo físico fuerte, para cuantificar a la infiltración, es la teoría de la infiltración. Es un planteamiento matemático que define las relaciones precisas de los parámetros que intervienen en este proceso. En este sentido, el desarrollo de la teoría está en función de los gastos de entrada y salida, del contenido de humedad, de la conductividad hidráulica y de las fuerzas capilares cuyas funciones estan estrechamente relacionadas a las características físicas del medio en el que operan.

En la actualidad existen 4 métodos generales para determinar directamente en el campo la capacidad de infiltración en un suelo; son de carácter local, es decir, los resultados son representativos únicamente de áreas muy pequeñas; estos son:

1. Uso de infiltrómetros

2. Análisis de hidrogramas en cuencas pequeñas
3. Análisis de hidrogramas en cuencas grandes
4. Lisímetros.

Los infiltrómetros como se observa en la figura 9, permiten determinar la capacidad de infiltración en pequeñas áreas cerradas añadiéndole artificialmente agua al terreno. Sus mediciones son locales y deben tomarse con reserva los resultados obtenidos. Deben de utilizarse en cuencas pequeñas y homogéneas, de otra manera, el área tiene que ser subdividida en áreas parciales para utilizar los infiltrómetros en cada una de ellas. Existen dos tipos principales: el tipo anular y los de simulación de lluvia. La desventaja de su uso por un lado, como se ha mencionado, sólo es representativo de un área muy pequeña y por el otro, las características de las primeras capas del suelo se alteran al inclinar el infiltrómetro.

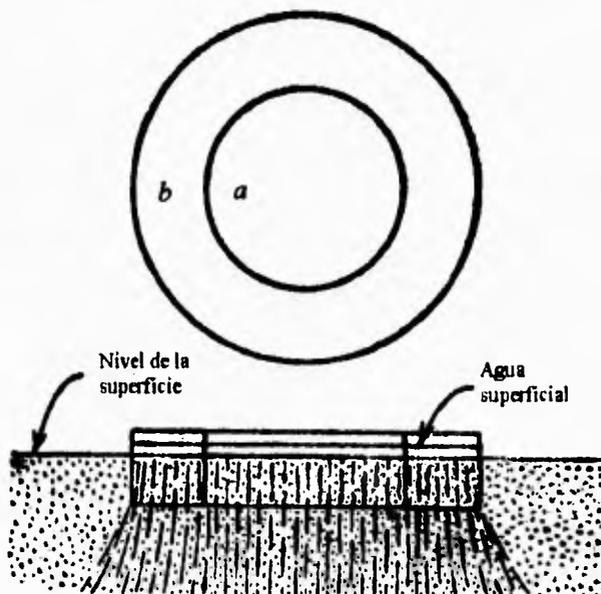


Figura 9. El infiltrómetro (Wisler, 1949).

2.2 CONCEPTO DE CUENCA

En el sistema de una cuenca hidrológica operan los procesos del ciclo hidrológico anteriormente descritos. La hidrología superficial considera a la cuenca hidrológica como un área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, es decir, este lugar físico proporciona todo el flujo de la corriente principal y la de sus tributarios. El escurrimiento que ahí se origina va a descargar a una única salida. Los límites de la cuenca hidrográfica son divisorias topográficas conocidas como parteaguas que es una línea imaginaria que configura el contorno del área de la cuenca, la separa de las adyacentes y distribuye el escurrimiento en todos los cauces. La divisoria corta perpendicularmente a las curvas de nivel y pasa por los puntos de mayor nivel topográfico, nunca corta a un río excepto en la salida de la cuenca. También es válido enfocar esta definición desde el punto de vista geohidrológico. La divisoria de la cuenca es freática es decir, es la unidad estructural que determina un manto acuífero y condiciona a la circulación del agua subterránea. Por lo siguiente esta divisoria se establece principalmente por las características geológicas sin descartar a las topográficas del lugar. En una región ambos límites (divisoria topográfica y freática) no necesariamente coinciden pues pueden no corresponder a las mismas fuentes de alimentación, pero sí, los fenómenos que ocurran en una influirán en el comportamiento de la otra. Las siguientes características definen a una cuenca:

Área de la Cuenca. Es el área plana en proyección horizontal delimitada por su parteaguas. La distribución y la cantidad de drenaje estarán influenciados por este tamaño. Para autores como Campos (1984), en condiciones normales, los caudales de escurrimiento promedio, mínimos y máximos aumentan a medida que decrece el área de la cuenca.

Forma de la Cuenca. Puede ser circular, elíptica o alargada. La forma afecta a la descarga de la corriente principal y a los escurrimientos. Se determina con el coeficiente de compacidad y es la relación entre el perímetro de la cuenca (P_c) y la circunferencia de un círculo con área igual al tamaño (A) de la cuenca en Km^2 . El límite inferior de este coeficiente es 1 y conforme decrece este valor,

indicará una mayor distorción en la forma. Este coeficiente es adimensional y fue definido por H. Greveilius. Su expresión es la siguiente:

$$C_c = P / P_c$$

La relación de elongación (Re) es el cociente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo de una área igual a la cuenca y la de su más grande dimensión a lo largo de una línea recta paralela al cauce principal.

$$R_e = D / L_c$$

Re = la relación de elongación

D = el diámetro de la cuenca

Lc = la longitud de la cuenca

Esta expresión está relacionada con el relieve de la cuenca de forma que los valores cercanos a la unidad son típicos de regiones con relieve bajo.

Hipsometría de la Cuenca. Es la representación de la cuenca por medio de las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes. Esta determinación se considera importante por que el relieve tiene una marcada influencia sobre la respuesta hidrológica.

Pendiente de la Cuenca. Tiene una importante relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y el agua subterránea; además de controlar el tiempo de flujo sobre el terreno y el flujo máximo de avenidas. La pendiente de una cuenca se determina por medio de la siguiente expresión:

$$P_c = L (D / A)$$

Es decir, que la pendiente promedio de la cuenca es igual a la longitud total de curvas de nivel dentro de ella (L), multiplicada por el desnivel constante entre éstas (D), dividido entre el área de la cuenca (A), (Campos, 1984)

Características de la red de drenaje. La red de drenaje define al sistema de cauces por el que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos temporal o permanentemente. Su determinación nos proporciona indicios sobre las condiciones físicas del suelo y de la superficie de la cuenca. Las características que definen a la red de drenaje son:

- **Tipos de corriente,** que pueden ser perennes, intermitentes y efímeros según la constancia de su escurrimiento se relaciona a su vez con las características físicas de la cuenca y con las condiciones climatológicas.

- **Forma del drenaje.** Es el modelo erosional que forma la red de cauces; van a depender de la combinación de los efectos del clima, la naturaleza del terreno, el relieve de la cuenca topográfica y la pendiente.

- **Orden de las corrientes.** Clasifica a las corrientes que existen en la cuenca e indica el grado de su ramificación; para ello existe un criterio que asigna números a las corrientes principales y a sus tributarios. Así, a las corrientes más pequeñas o que no están ramificadas se les asigna el número uno; el orden dos a las corrientes que sólo tienen ramificaciones o tributarios de primer orden; de orden tres aquellas con tributarios de orden dos; dos corrientes de orden 3 forman una de cuatro, y así sucesivamente; de tal manera que la corriente principal será la de mayor orden y será a su vez, un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca.

- **La densidad de corrientes** es el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área y la **densidad de drenaje** es la longitud de corrientes por unidad de área.

2.3 MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CUENCA

El balance hidrológico de una cuenca es una expresión matemática que representa a una ecuación de continuidad cuyos elementos son los aportes o entradas y pérdida o salidas en el sistema. De forma general la ecuación de continuidad se plantea como:

$$E - S = \Delta V$$

donde:

ΔV = cambio de almacenamiento

E = entradas del sistema

S = Salidas del sistema

El valor de cada término se obtiene por procedimientos separados para después sustituirlos en la ecuación general. A simple vista este procedimiento resulta ser muy fácil pero la obtención independiente de sus términos acarrea errores que se reflejan en los resultados finales. En efecto, la medida por caminos empíricos e instrumentos no muy precisos que existen en la evaluación de los fenómenos hidrológicos hacen que la solución del problema sea aproximada y con márgenes de error considerables.

Partiendo de la ecuación general anterior, se establecen balances para aguas superficiales y para aguas subterráneas los que pueden ser de carácter global, a nivel de cuenca, o de una capa acuífera; aplicable a una región previamente determinada en un intervalo de tiempo. Para representar un balance hídrico global, Castany (1975), propone la construcción de una tabla con los elementos principales que lo componen (Tabla 1). Matemáticamente estos se integran a la siguiente ecuación que parte de la ecuación general (Custodio Llamas, 1975):

$$P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} - Q_{ts} - DV = e$$

Donde:

- P = aportación volumétrica
- Q_{se} = caudal superficial entrante
- Q_{te} = caudal subterráneo entrante
- E = evaporación real
- Q_{ss} = caudal superficial saliente
- Q_{ts} = caudal subterráneo saliente
- DV = cambio de almacenamiento
- e = error en el balance

Una zona de recarga es un lugar en donde es factible la entrada de agua; por esta razón a la infiltración se le considera un medio de recarga. Las zonas de recarga se establecen por el líquido que se va a infiltrar, por el material que atraviesa el agua, y por la forma de recarga. En una cuenca cerrada no existe conexión con otras unidades hidrogeológicas lo que significa que no hay salidas subterráneas. Las partes que definen su funcionamiento en la ecuación de balance son la infiltración, la evaporación, el caudal de explotación y el cambio de almacenamiento volumétrico. En una cuenca abierta existe comunicación con otras unidades. En ambas la principal alimentación es por medio del mecanismo de infiltración natural del agua de lluvia, aunque para el segundo caso también existen importantes aportes de otras unidades adyacentes.

Aportes o entradas en mm de altura del agua en millones de m ³ /año	Pérdidas o salidas en mm de altura anual o en millones de m ³ /año
<i>Alimentación directa:</i>	<i>Evapotranspiración real</i>
- Precipitación Total: Lluvia, nieve y hielo, niebla	<i>Flujo o escurrimiento superficial</i>
	<i>Tomas de agua: explotación</i>
<i>Alimentación indirecta o aportes de las otras cuencas hidrológicas</i>	<i>Pérdidas hacia las otras cuencas hidrológicas:</i>
- aguas superficiales	- aguas superficiales
- aguas subterráneas	- aguas subterráneas
Aportes totales	Gastos totales
	<i>Variaciones de las reservas: ±dW</i>
<i>Aportes del periodo anterior: ±dW</i>	<i>Aportes al periodo siguiente: -dW</i>
- aguas superficiales	- aguas superficiales
- aguas subterráneas	- aguas subterráneas

Tabla 1. Balance hídrico global de una cuenca (Modificado de Castany, 1975).

**CAPITULO
TRES**

III. MECANISMOS QUE CONTROLAN EL PROCESO DE INFILTRACION.

3.1 MECANISMOS DEL CICLO HIDROLOGICO Y SU RELACION CON LA INFILTRACION

La infiltración es una componente del ciclo hidrológico, y es a su vez un mecanismo de recarga; entiéndase como mecanismo al conjunto de fenómenos que provocan el movimiento descendente del agua. La infiltración como tal tiene conexión con la precipitación, la intercepción, el escurrimiento y el agua subterránea, procesos que a su vez se relacionan entre sí.

La magnitud y distribución de la precipitación pluvial contribuyen a la disponibilidad tanto del agua que circula y se almacena en la superficie como la del agua subterránea. Al respecto Chávez G. R., (1977) hace mención de esta relación mediante el análisis de datos pluviométricos con fines geohidrológicos, para lo cual obtiene gráficas como las que se muestran en la figura 10 que representan la variación de la precipitación anual con respecto a la recarga en un intervalo de tiempo de varios años. Para un mismo volumen de precipitado y condiciones geológicas idénticas la cantidad de agua infiltrada puede variar ampliamente; pues generalmente, favorecen más a la infiltración las lluvias de baja intensidad y larga duración que los aguaceros torrenciales de corta duración.

Una parte del líquido que suministra a los grandes escurrimientos superficiales proviene del agua de lluvia y del aporte de las salidas subterráneas. El agua circula sobre la superficie favorecida por la pendiente del terreno y por las fuerzas de gravedad; en su trayecto se presentan una serie de parámetros físicos que rigen su movimiento y su distribución; como aquellos que se relacionan con las características de permeabilidad del medio por donde escurre, con la cubierta vegetal, y con las condiciones meteorológicas. Las características que presenta el drenaje de una cuenca, también son reflejo del comportamiento de la infiltración. Así, donde el patrón es inexistente, se espera encontrar una gran capacidad del terreno para que el agua lo atraviese. Aunque

el escurrimiento y la infiltración sean dos procesos diferentes en relación a su actividad y a los métodos para obtener su valor, ambos mantienen una relación entre sí; es decir, si se altera la naturaleza de uno cambia necesariamente la del otro.

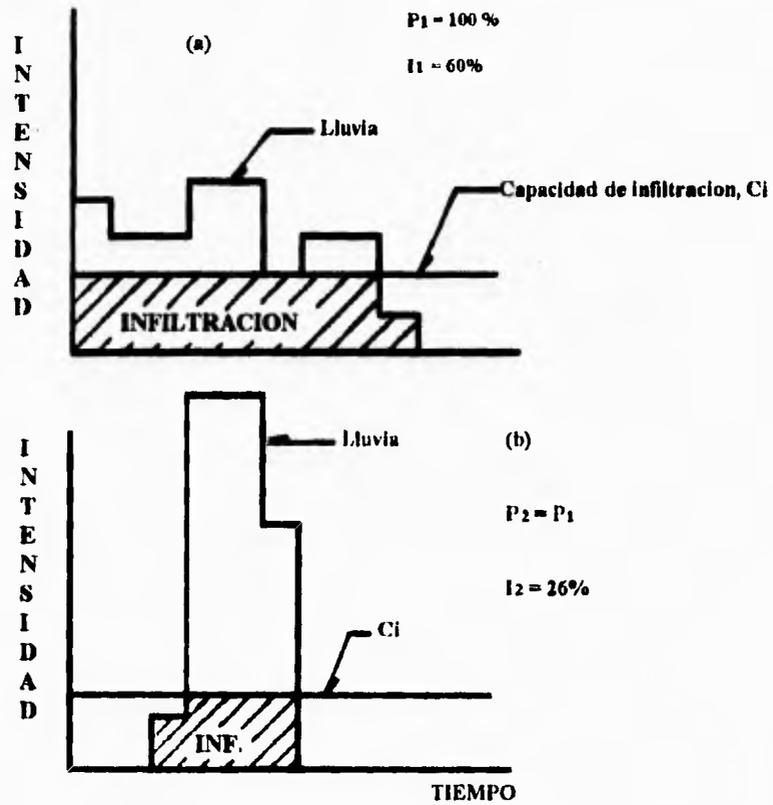


Figura 10.- Ejemplo de la influencia que tiene la intensidad de lluvia al volumen infiltrado (Chávez, 1977).

3.2 CONDICIONES NATURALES DE INFILTRACION

La infiltración está gobernada por las características que presenta el entorno natural donde se lleva a cabo; estas comprenden 4 campos importantes:

1. Condiciones meteorológicas,
2. Características físicas de la superficie del medio permeable,
3. Propiedades químicas del medio permeable, y
4. Propiedades del fluido que se infiltra.

Es importante detallar más en las características que definen físicamente a la superficie del medio permeable, porque es el primer lugar donde el agua de lluvia tiene contacto y en donde las otras características antes mencionadas se presentan. Estas comprenden a la naturaleza del medio superficial (suelo y roca), es decir, al tipo de depósito superficial cuyo origen determina sus propiedades hidráulicas como la porosidad y la permeabilidad; el patrón estructural, las formas y expresiones del relieve, el tipo de vegetación y los diferentes usos del suelo.

3.2.1 NATURALEZA Y COMPOSICION DEL MEDIO PERMEABLE

De acuerdo a la naturaleza y composición del medio existen depósitos consolidados y no consolidados. Las rocas no consolidadas están formadas por materiales sueltos derivados del intemperismo y erosión de rocas preexistentes, y se clasifican de acuerdo al predominio de un tamaño de grano como: rocas clásticas de grano grueso, rocas clásticas de grano medio-fino, y rocas clásticas de grano muy fino. Por su naturaleza constituyen uno de los medios de mayor permeabilidad que se forman al tiempo de su depósito al no existir consolidación entre sus componentes. En este estado, el espacio abierto o poro que dejan entre sí las partículas depende del tamaño, forma, distribución, y

heterogeneidad del depósito, espacios por donde el agua busca viajar hacia zonas más profundas; en este sentido, las condiciones que se presentan en el medio para que el agua penetre, son las siguientes: Que sea de granulometría y distribución homogénea (especialmente si se trata de grano grueso), de alta porosidad con poros interconectados y de elementos a su vez porosos, y por último que el afloramiento en su totalidad esté expuesto a la superficie.

Las rocas consolidadas son rocas densas o compactas de origen (ígneo, sedimentario o metamórfico (granitos, basaltos, tobas, esquistos, calizas, etc.). Por su origen se les considera impermeables, pero por procesos mecánicos y químicos posteriores, adquieren una permeabilidad alta. En la mayoría de los casos este cambio es propiciado por la combinación de los dos procesos, para ello, la influencia del clima y la naturaleza de la roca son importantes. En la naturaleza no existen rocas totalmente impermeables, pero sí de permeabilidades muy bajas como las rocas plutónicas arcillosas y las metamórficas. En general las rocas que fueron formadas debido a la cristalización y consolidación de un magma fundido son muy impermeables; esto se debe a que los escasos poros existentes son muy pequeños y se encuentran cementados. Existe una variante que se da en granitos y cuarcitas que es la capacidad de desarrollar una cubierta de intemperismo formada por arena gruesa con espesores hasta de 150 m, caso que las remite al tipo de depósitos no consolidados. Las rocas metamórficas como el mármol, pizarra, esquistos, gneises y cuarcitas han estado sujetas a diversos episodios tectónicos y a la alteración, lo que le ha producido una fuerte compactación y fracturas rellenas de minerales en descomposición. Las rocas volcánicas en especial, son cristalinas con porosidades muy bajas, pero con permeabilidades altas debido a la presencia de estructuras que se forman al momento del enfriamiento de la lava; estas funcionan como conductos en donde el agua puede circular con facilidad. Algunas de estas estructuras se muestran en la figura 11. También una roca cristalina que originalmente es impermeable puede adquirir elevadas permeabilidades por procesos químicos posteriores. El ataque químico que sufren este tipo de rocas (calizas y dolomías principalmente) provocan un aumento en la porosidad de la roca y más aún generan importantes conductos.

Sin embargo, para que esto suceda, la roca tiene que tener una determinada composición y un agente que provoque el ataque químico para disolverla. Una característica que tienen las rocas asociada con su composición y al ambiente tectónico donde se encuentran, es la respuesta que ésta tiene a los distintos esfuerzos; de tal forma que si se rebasa el límite de resistencia de los materiales se forman fracturas y fallas.

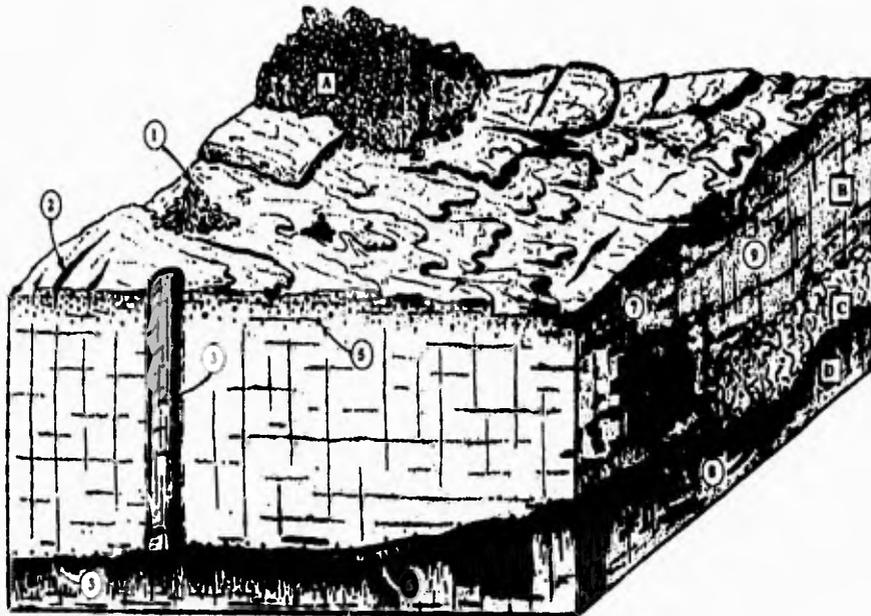


Figura 11. Secuencias hipotéticas de flujos de lava con los diversos factores que originan la permeabilidad y la porosidad de las rocas basálticas. Los factores que originan la porosidad son: 1. Orificios de los conos de fusión; 2. Grietas abiertas sobre pequeñas arrugas; 3. Moldes de árboles; 4. Suelo enterrado; 6 Burbujas; 7. Lentejones de bloques piroclásticos; 8. Depósito eluvial enterrado; 9. Grietas de enfriamiento; A. Flujos de lava "aa" recientes; B. Flujos de lavas pahoehoe recientes; C. Flujo de "aa" antiguo enterrado; D. Flujo de pahoehoe muy antiguo enterrado (Stanley, 1971).

En este caso, las estructuras como las juntas deben estar en su mayoría expuestas a la superficie y tener el espacio necesario para que un volumen significativo de agua las atraviese, a profundidades que le permitan alcanzar a la zona de saturación. La influencia del fallamiento se dá en escalas mayores, al grado de afectar a la superficie freática. En efecto, una falla puede causar el levantamiento del nivel del agua debido al cambio de un acuífero a otro. En este caso, si las zonas de falla son de alta permeabilidad, el gradiente de agua subterránea se atenuará en estas zonas.

3.2.2 EL RELIEVE Y LAS FORMAS TERRESTRES

El relieve de las formas terrestres determina las posibilidades hidrológicas de un territorio, tanto en aguas subterráneas como superficiales (Guerra P., 1980), el mismo autor menciona que la correlación roca-suelo-cubierta vegetal-uso del suelo permite hacer una valorización preliminar del potencial de agua de una región sin necesidad de la gran cantidad de datos estadísticos sobre climatología, edafología y geohidrología. Las formas del relieve terrestre como las considera Hubp (1988), son elementos de la superficie terrestre que se definen por su constitución y características geométricas. Se clasifican por su origen en endógenas (volcanes, derrames de lava, montañas plegadas, etc), en exógenas de productos erosivos y acumulativos (valles, deltas, barrancas, litorales, etc); por sus dimensiones y posición con respecto a un plano horizontal local o regional (positivas o negativas).

El patrón de drenaje de una cuenca es la forma del drenaje que se origina con la distribución de los diferentes escurrimientos. La erosión que le provoca el agua a la roca en su paso, da origen al tipo de drenaje y a otras formas terrestres. Es lógico suponer que la circulación del agua es diferente en superficies inclinadas con respecto a las horizontales por ello, la pendiente cobra gran importancia, pues se espera que el agua escurra por gravedad en pendientes pronunciadas y se deposita en superficies horizontales. La pendiente se determina por el grado de consolidación de las rocas que forman a la superficie inclinada. En los depósitos no consolidados, los materiales permanecen en estado de equilibrio

temporal, conocido como ángulo de reposo, ángulo vertical comprendido entre el plano horizontal y el de inclinación de la superficie. Una partícula alcanza el ángulo de reposo cuando dejan de deslizarse por la pendiente. En materiales finos el ángulo de reposo es menor que en materiales gruesos y dependerá de la cubierta vegetal que reduce el efecto de la gravedad sobre los fragmentos y activa el intemperismo químico. Derrau (1958), menciona que para los materiales no consolidados, las pendientes superiores a 45° son muy raras; el máximo ángulo de reposo es el de las gravas de grano grueso que oscila entre 35° y 42° , mientras que las gravas de grano redondeado son menores a 35° ; en materiales volcánicos como cenizas y lapillis va de 35° a 40° . Esto quiere decir que la forma y tamaño de grano influirán en la magnitud de dicho ángulo al igual que en la humedad y a su vez en el grado de consolidación. A continuación, se muestran las Tablas 2 y 3 que se basan en la clasificación de las formas del relieve terrestre según los procesos endógenos y exógenos que les den origen, propuestas por Hubp (1991), y se agrega las características hidrogeológicas relacionadas.

Tabla 2. Formas del relieve terrestre por procesos exógenos (Modificado de Hubp, 1991).

AGENTES	PROCESOS	FORMAS	COMPORTA- MIENTO HIDROLOGICO
Energía solar, agua, cambios de temperatura y organismos	Intemperismo	costras de intemperismo, suelos con pendientes bajas	depende de la naturaleza de la roca. En general tienden a formar superficies permeables
agua en la superficie	erosión y acumulación fluvial, acumulación deluvial y proluvial	valles, planicie aluvial mantos de pie de monte, conos de eyección, pendientes moderadas	mayor capacidad de infiltración del terreno
agua subterránea y superficial, nieve	movimiento de masa y acumulación coluvial	circos de erosión escarpes, manto coluvial, cono dendrítico, relieve positivo con pendientes altas	el escurrimiento es predominante pero favorable la infiltración al pie de los mantos coluviales
agua subterránea	carsificación	lapiaz, dolinas, uvalas y grutas pendientes moderadas y relieves negativos	infiltración y escurrimientos subterráneos
hielo	erosión glaciar (exoración y acumulación)	circos valles y morrenas, pendientes moderadas y altas relieves negativos	escurrimiento y almacenamiento en depresiones

Tabla 2 (continuación). Formas del relieve terrestre por procesos exógenos (Modificado de Hubp, 1991).

AGENTES	PROCESOS	FORMAS	COMPORTAMIENTO HIDROLOGICO
viento	erosión eolica(deflación y acumulación)	cuencas profundas y depresiones menores, dunas, barjanes, crestas de arena, pendientes moderadas y pronunciadas con relieves positivos y negativos	infiltración y almacenamiento en depresiones
hielo y agua en el subsuelo	termokarst	hidrolacolitos, suelos estructurales, relieves positivos	escurrimiento subterráneo
agua subterránea- hielo-agua superficial -mar	fluvioglaciáricos y fluviomarinos	manto fluvioglaciáricos y planicies deltaicas pendientes bajas y moderadas, relieves positivos	escurrimiento e infiltración
hombre	erosión y acumulación *	minas a cielo abierto, canteras, jales y basureros, pendientes moderadas a bajas	almacenamiento, escurrimiento e infiltración

Tabla 3. Formas del relieve por procesos endógenos (Modificado de Hubp, 1991).

FORMAS	ORIGEN	CARACTERISTICAS	HIDROLOGIA
PLIEGUES	TECTONISMO	RELIEVE POSITIVO Y NEGATIVO	CICLO HIDROLOGICO
GRIETAS FRACTURAS Y FALLAS	ENFRIAMIENTO, EROSION Y TECTONISMO	RELIEVE POSITIVO Y NEGATIVO, ESCARPES Y PATRONES DE DRENAJE	INFILTRACION Y ESCURRIMIENTO
RELIEVE VOLCANICO	VOLCANISMO	FORMAS POSITIVAS Y NEGATIVAS: MALPAIS, DOMOS, CERROS, MONTICULOS, DEPRESIONES	INFILTRACION
INTRUSIONES	MAGMATISMO	RELIEVES POSITIVOS: MONTAÑAS, DOMOS, CERROS	ESCURRIMIENTO

3.2.3 LA VEGETACION

La vegetación juega un papel importante como modificador de la capacidad de infiltración. Todos los materiales que descansan sobre la superficie terrestre tienden a ser ocupados por micro-organismos y plantas que contribuyen al mismo tiempo a la desintegración y descomposición de la roca. Las raíces agrietan o fracturan a la superficie, además de provocar la descomposición de sus minerales. Existe una interacción importante entre organismos y minerales en los procesos de intemperismo físico y químico. Efectivamente, hay casos en donde la presencia de estos protege a la superficie de la roca y por lo tanto, retardan la descomposición, pero también pueden intemperizarla a través de ataques químicos y estimular a otros procesos.

Se ha dicho que la vegetación influye en el proceso de erosión, de tal manera que puede permitir la estabilidad de una pendiente. Aparte de esta influencia, el tamaño y el espesor de la cubierta vegetal, condicionan a los fenómenos de erosión que se presenten. Una cubierta vegetal densa y con especies altas, tendrán diferentes efectos que una baja y poco concentrada. En materiales no consolidados una cubierta vegetal es muy probable que proteja a su superficie de los ataques del intemperismo. Por lo tanto, las posibles grietas o fracturas difícilmente se podrán sellar. En medios consolidados el efecto es inverso; las profundas y gruesas raíces penetran en la roca hasta ocupar el espacio de las fracturas al mismo tiempo que la descomponen para producir rellenos arcillosos. Un ejemplo se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Efectos indirectos de la vegetación sobre la erosión (Modificado de Thormes, 1990).

Factores	Efectos
Flujo por el tallo	Exceso de escurrimiento - incremento de la erosión del suelo
Copas de árboles/ agua de lluvia	Incrementa la energía de las gotas de lluvia - se incrementa la erosión del suelo Intercepta el agua de lluvia y reduce la erosión del suelo
Hojasca/ escurrimiento	Incrementa la infiltración - se reduce la erosión del suelo
Raíces/ escurrimiento superficial	Se endurece el suelo - reduciendo la erosión Se producen canales - se incrementa la erosión del suelo
Materia en descomposición/ temperatura del suelo	Se reducen suelos congeitados - se reduce la erosión del suelo
Sombra de los árboles/ temperatura del suelo	Se conducen al desarrollo de permafrost
Arboles/ viento	Actua como rompevientos - se reduce la erosión del suelo
Sembrados/ viento	Se incrementa la velocidad de arrastre - se incrementa la erosión del suelo
Cubierta de vegetación/ viento	Se reduce la velocidad del viento - decrece el transporte de arenas

3.2.4 EL USO DEL SUELO

El uso del suelo es la actividad que se designa a una porción de tierra. Para planificar una ciudad las autoridades competentes fijan las normas y leyes bajo las cuales se utiliza.

Los diferentes usos alteran y modifican a la naturaleza y a la composición original del terreno. Cambios que tienen que ver mucho con su capacidad de infiltración. Cabe aclarar que no todos eliminan al proceso de infiltración, si no algunas ocasiones lo estimulan. A continuación se presentan los principales usos del suelo.

Uso agrícola. Permite la protección de suelos denudados (principalmente en zonas áridas) y por medio del riego y de la disgregación del suelo por el arado, crea mecanismos de infiltración artificial.

Uso de reserva ecológica. Es el que se destina a la protección del medio ambiente. Conserva las propiedades originales de las rocas permeables y no altera las funciones del ciclo hidrológico.

Uso urbano. Este uso comprende las áreas que se designan para vivienda, servicios públicos como caminos, drenaje, alumbrado, rellenos sanitarios, y comerciales. El desarrollo urbano, día tras día exige mejores condiciones de vida. Comodidades que se traducen en la dotación de servicios públicos, como la pavimentación de terrenos sobre los cuales existirán nuevos polos de desarrollo. La mayoría de las grandes ciudades cuentan con calles pavimentadas en las que propician el estancamiento y circulación del agua; pérdidas irremediables para la infiltración.

Uso industrial. Se refiere a la instalación de fábricas y en general todo lo que tenga que ver con el sector industrial. Este uso además de modificar a las condiciones físicas del terreno, modifica también a las propiedades del líquido a infiltrarse. Como los que producen contaminantes líquidos que más tarde serán introducidos en el subsuelo.

CAPITULO
CUATRO

IV. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA.

4.1 INTRODUCCION A LA METODOLOGIA PROPUESTA

La distribución de la recarga en el espacio puede inferirse de manera muy general de las características del marco litológico, estructural y de la red de flujo. Para determinar en las áreas de recarga el lugar donde el aporte de agua al subsuelo es mayor, suele ser complicado, pues muchas veces se requiere del empleo de métodos muy laboriosos y altamente costosos (uso de infiltrómetros efectivos, por ejemplo). Por lo tanto, se necesita una forma eficaz y más rápida para tal objetivo. Esta necesidad llevó a diseñar un método en el que, una vez delimitadas las zonas de recarga, se encamine a designar y jerarquizar dentro de ellas, a las que cuenten con una mayor capacidad para infiltrar el agua. El método propuesto se compone de 5 partes. La primera es el reconocimiento preliminar de los parámetros que intervienen en la capacidad de infiltración del terreno en el área de estudio, es decir aquellos que de alguna manera son medibles como la densidad, longitud y amplitud de fracturas y el número de estructuras. La segunda parte es la asignación arbitraria del peso relativo que le corresponde a cada parámetro con respecto a la máxima capacidad de infiltración que se puede presentar(100%). Se distribuye de acuerdo al número de parámetros a estudiar. Una tercera es la observación real de la relación parámetro-comportamiento del agua en una superficie específica. La cuarta etapa consiste en la evaluación del comportamiento hidrológico de cada parámetro. En la quinta y última, se aplica el enfoque sistemático para obtener los índices de la capacidad de infiltración del terreno.

4.2 ENFOQUE SISTEMATICO DEL METODO

En fenómenos de múltiples variables en los que se dan un conjunto de relaciones no necesariamente lineales y en donde relaciones y variables cambian con el tiempo, suele ser difícil el planteamiento de los problemas para una pronta y adecuada solución . Una salida a esa complejidad es por medio del

enfoque de sistemas. Para Fuentes (1991), un sistema, es un conjunto de dos o más elementos con las siguientes características:

- Las propiedades y el comportamiento de cada elemento de un conjunto tiene efecto en las propiedades y comportamiento del todo.
- Las propiedades y comportamiento de cada elemento, y la forma que afectan al todo dependen de las propiedades y comportamiento de al menos otro elemento del conjunto.
- Cada subgrupo posible exhibe las características y propiedades anteriores.

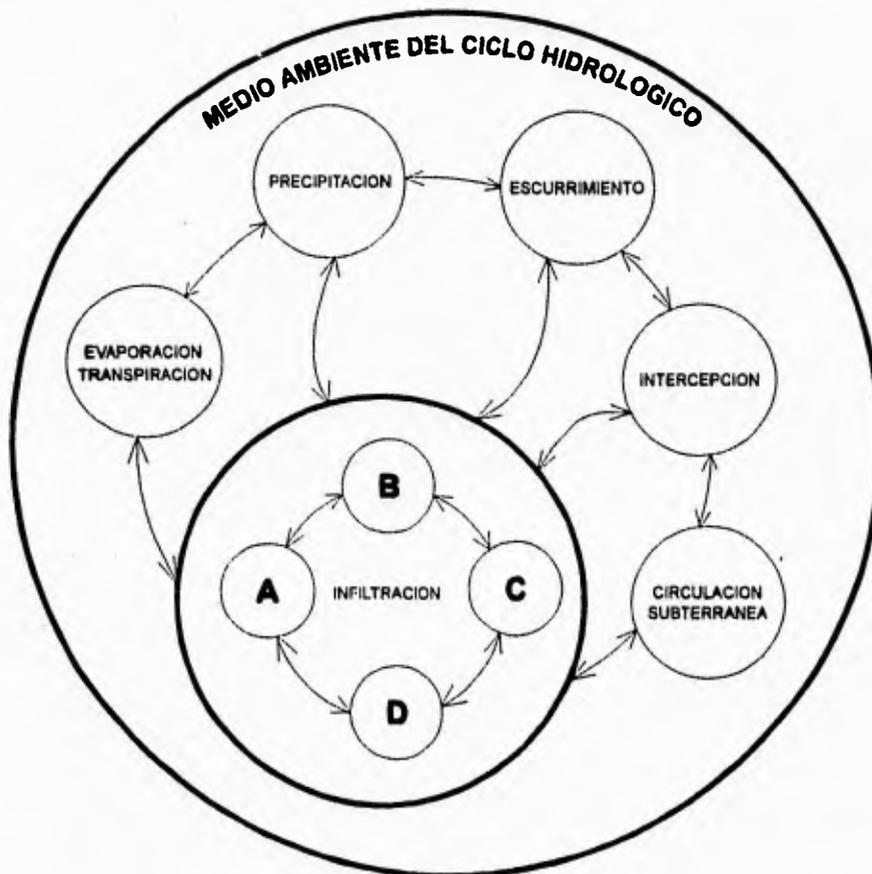
Es decir, un sistema es un conjunto de elementos interconectados que forman una integridad cuya propiedad es ser divisible desde el punto de vista estructural pero indivisible desde el punto de vista funcional, ya que los conjuntos no se pueden dividir.

Una de las formas de estudiar un sistema es por medio de la construcción del modelo conceptual. El modelo conceptual es una representación gráfica, escrita y mental de la estructura del problema a resolver. El procedimiento general que se sugiere para la construcción del modelo conceptual es el siguiente:

- Identificar las partes o componentes del sistema objeto.
- Conocer las características de las partes.
- Establecer el patrón de relaciones entre las partes.
- Reunir esta información y de ahí deducir las propiedades y comportamiento del sistema total.

Se mencionó que el ciclo hidrológico es un sistema cuyos componentes son la evaporación, la evapotranspiración, la precipitación, la retención, la infiltración y la circulación subterránea. Las propiedades de cada elemento afectan al mismo tiempo a todo el comportamiento y circulación del agua en la tierra; motivo por el cual a cada elemento se le puede estudiar como un subsistema aparte, con los mismos principios que el sistema original. Si partimos de que la infiltración es un componente del sistema del ciclo hidrológico, junto con la capacidad de infiltración, se podrán estudiar desde un enfoque sistemático. Si se logra integrar la información de cada parámetro, que caracteriza a la superficie del

medio permeable, entonces ese conjunto definirá las condiciones que presenta el terreno para que el agua se infiltre. El universo del sistema, en este caso, lo forman elementos que intervienen en los mecanismos de infiltración, y el sistema objeto, los que únicamente tienen que ver con las características superficiales del medio permeable. Lo anterior se ejemplifica en la figura 12.



- A** CONDICIONES METEOROLOGICAS
- B** PROPIEDADES DEL MEDIO PERMEABLE
- C** CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL SUBSUELO
- D** CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DEL FLUIDO QUE SE INFILTRA

Figura 12.- Enfoque sistemático del método propuesto

4.3 DESARROLLO DEL METODO.

4.3.1 ENFOQUE DEL METODO CIENTIFICO

El principio del método se basa en el pensamiento sistemático, pero su desarrollo se basa en el método científico. Si se ve al método científico como un procedimiento sistemático de pasos que hay que seguir para establecer una teoría o ley, entonces, éste se incluye en las etapas que forman al modelo conceptual de un sistema.

La geología es una ciencia que constituye un conjunto sistematizado de conocimientos que explican la historia dinámica de la tierra. A las diversas disciplinas que comprende se les considera como ciencias fácticas. Mario Bunge (1973), menciona que para que una ciencia se considere fáctica, es necesario pasar la racionalización de los hechos por medio de la observación, a su objetividad mediante la verificación de las hipótesis planteadas por métodos experimentales. La geohidrología es la ciencia que en su estudio contempla una investigación científica. El estudio de la infiltración, junto con la propuesta de este método se pueden tomar como tal. En consecuencia, los parámetros que aquí se plantean, se analizan como hipótesis (racionalización) que más tarde serán verificables en el campo según su comportamiento hidrológico (experimentación natural); dicho de otra manera, se pretende que la racionalidad del conocimiento mediante un enunciado a comprobar, pase a ser objetiva por medio de su estudio en condiciones naturales.

4.3.2 PLANTEAMIENTO Y DELIMITACION DEL PROBLEMA

Se necesita conocer la capacidad del terreno para infiltrar el agua que proviene de las precipitaciones; se plantea que una forma para lograrlo es estudiando las características físicas del medio permeable, en el que están involucrados parámetros litológicos, estructurales, edafológicos, geomorfológicos y uso del suelo. El problema que se plantea es el de cómo representar en términos

cuantitativos la influencia de las anteriores características sobre su capacidad de infiltración. Es importante recalcar que la problemática no se plantea en términos de conocer el valor del volumen infiltrado, para tal caso, la metodología propuesta queda lejos de tal pretensión. En efecto, con fines de cuantificar volúmenes, de entrada, las variables no serán únicamente las que definen propiedades físicas, sino también las que se obtengan directamente del acuífero por medio de pozos. Adicionalmente, se tendría que contemplar las leyes mecánicas que hacen actuar a las fuerzas capilares y gravitacionales; y el planteamiento de sistemas de ecuaciones, por lo que un método matemático es rigurosamente necesario.

El método propuesto en este trabajo se aplica principalmente a las áreas de recarga, las que generalmente se encuentran en los bordes de las cuencas. Se propone dividir el área de trabajo en superficies de igual magnitud y proporción lo que conlleva a tener un control topográfico preciso e información geológica a semidetalle y detalle.

4.3.3 RECONOCIMIENTO DE LOS PARAMETROS DEL MEDIO PERMEABLE Y LA ASIGNACION DE PESOS RELATIVOS

Una vez que se han delimitado las zonas de recarga, se procede a identificar a los parámetros que, definen a la superficie terrestre y a su capacidad de infiltración, como el tipo de roca, los rasgos estructurales, morfológicos, edafológicos, y de uso del suelo. En seguida se les asigna un peso relativo en porcentaje medido con respecto a las condiciones ideales que debe de presentar una superficie con máxima capacidad de infiltración. Así, a un parámetro se le asigna el porcentaje mayor si en hipótesis se le considera el de mayor influencia en proporcionarle al terreno una alta capacidad de infiltración y el porcentaje restante se distribuye, con el mismo criterio, en los otros parámetros.

Los parámetros que se sugieren tomar en cuenta para esta asignación de pesos relativos son los siguientes

PARAMETRO: LITOLÓGICO.

Ejemplo: La forma y tamaño de grano en depósitos no consolidados.

PARAMETRO: ESTRUCTURAL.

Ejemplo: Características del fracturamiento y de las estructuras en rocas consolidadas.

PARAMETRO: MORFOLOGICO.

Ejemplo: Distribución de la pendiente y formas del terreno.

PARAMETRO: VEGETACION

Ejemplo: Forma y distribución de la vegetación.

PARAMETRO: USO DEL SUELO.

Ejemplo: Número de superficies con determinado uso de suelo.

4.3.4 VERIFICACION DE LOS PARAMETROS Y LA DETERMINACION DE UNA ESCALA EVALUATIVA.

Esta etapa se inicia con el reconocimiento de cada uno de los parámetros en su entorno real. Cada uno junto con su peso relativo se estudia por separado. Consiste en analizar el comportamiento del agua que experimenta al tener contacto con la superficie del terreno estando presente cada uno de ellos; es decir, es la influencia que ejerce la litología, la morfología, la vegetación, etc sobre dicho comportamiento. Una vez que se tiene información de los elementos que definen al medio permeable, el paso siguiente, es evaluar la función de cada parámetro con el fin de ponderar a los pesos relativos y las hipótesis establecidas. Para ello se ha propuesto utilizar una escala de números naturales cuyo valor mínimo se destina a la mayor pérdida de la infiltración, y el máximo a las menores pérdidas. Se entiende como pérdidas de la infiltración a toda el agua que no se infiltra, y se pierde por evaporación, retención y escurrimiento. Los valores intermedios se distribuyen entre las otras pérdidas siguiendo la misma lógica de asignar el valor mayor a la que implique una pérdida más insignificante. Es importante recalcar que esta escala se debe de ajustar a las condiciones naturales del área en estudio, es decir, se establece siempre y cuando se tenga un reconocimiento preliminar, se conozcan las condiciones climatológicas, y se determinen las posibles áreas de recarga. Por ejemplo, una escala propuesta para zonas áridas será diferente para zonas templadas o húmedas.

Si tenemos a cada parámetro identificado con su peso relativo, entonces, con la presencia de un factor que es la calificación del comportamiento hidrológico real del parámetro estudiado tomado de la escala evaluativa, se pondera al peso relativo anteriormente asignado. Lo anterior dará como resultado el índice de la capacidad de infiltración, es decir:

$$I_{fit} = PR \cdot f$$

dónde:

I_{fit} = Índice de la capacidad de infiltración del terreno.

PR = Peso relativo

f = evaluación al comportamiento hidrológico (ponderación del parámetro).

De acuerdo al sistema estructural propuesto hasta la etapa de asignación de los pesos relativos, se han conocido las características de las partes o componentes del sistema objeto. Se sabe que cada parámetro interactúa a su vez con otros elementos, la interacción de estos incide al mismo tiempo en todo el conjunto representado por la capacidad de infiltración.

La suma de los productos del peso relativo y su correspondiente factor, determinarán la magnitud del comportamiento del terreno para favorecer a la infiltración, es decir:

$$\sum_{i=1}^n I_{fit} = PR_i \cdot f_i$$

Finalmente, se obtendrán superficies equivalentes con diferentes valores de f_{it} , y las que se podrán jerarquizar. Es importante mencionar, que los métodos que obtienen capacidades de infiltración por métodos indirectos o directos (pruebas de permeabilidad, empleo de fórmulas matemáticas o modelos teóricos, etc), no quedan excluidos, al contrario muchas veces serán necesarios para reforzar y complementar a esta propuesta.

**CAPITULO
CINCO**

V. APLICACION DEL METODO Y SU IMPORTANCIA EN LA PRESERVACION DEL MEDIO AMBIENTE.

5.1 GENERALIDADES

5.1.1 LOCALIZACION Y ANTECEDENTES

El área de estudio se localiza en la porción suroccidental de la ciudad de México, en el centro sur de la Delegación Tlalpan (Figura 13). Se le reconoce como Parque Ecológico de la Ciudad de México, tiene una superficie de 727.6 hectáreas que en junio de 1989 fueron expropiadas. Anterior a esta fecha la zona comenzó a ser cubierta por asentamientos irregulares, desde familias de escasos recursos económicos (Lomas del Seminario) hasta suntuosas residencias. Con la rápida creación de algunos servicios (vías de comunicación principalmente) y las numerosas ofertas económicas de terrenos para vivienda, se propició la desenfrenada expansión en la zona sur de la ciudad; de tal suerte que, para finales de los ochenta, aproximadamente 1500 hectáreas estaban totalmente habitadas (Cerro del Judío, partes bajas del volcán Xictle y en la periferia del volcán Ajusco). Los efectos de esta expansión generaron problemas de deforestación, destrucción y deterioro del medio ambiente, además de propiciar grandes problemas de contaminación por la falta de drenaje. Ante tal situación, y con la creación del Nuevo Plan de Desarrollo para 1988-1989 en la ciudad de México, donde se declaran el 83.5% del uso de suelo como conservación ecológica en la Delegación Tlalpan, se decomisaron alrededor de 727 hectáreas para formar parte del terreno federal. En 1990 se abre un convenio de cooperación técnica entre la UNAM (Centro de Ecología) y el DDF (Delegación Tlalpan). El convenio se inicia con el proyecto de Restauración Ecológica del Ajusco, en el cual se plantea introducir los elementos florísticos y faunísticos originales, y desarrollar un programa de educación ambiental que propicie la participación ciudadana.

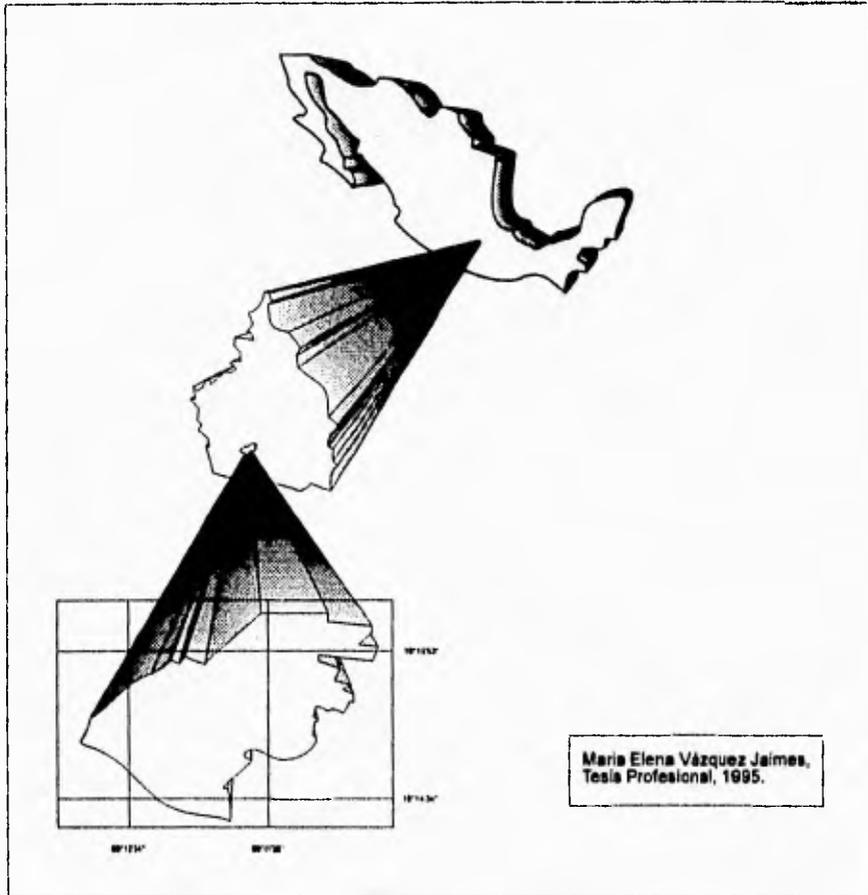


Figura 13.- Localización del Parque Ecológico de la Ciudad de México (área de estudio)

5.1.2 LIMITES Y PRINCIPALES VIAS DE ACCESO

Las principales vías de acceso son por el Circuito del Ajusco (carretera al Ajusco); al norte por la avenida Bella Vista, al oriente por la colonia Tlalpuente y al sur por la vía de ferrocarril México-Cuernavaca. Las colonias colindantes son: Colonia Primavera en el lado poniente, Ampliación el Mirador al norte, Actopa, Tlaimille y Tlalpuente en la porción oriental.

5.2 GEOHIDROLOGIA DE LA CUENCA DE MEXICO

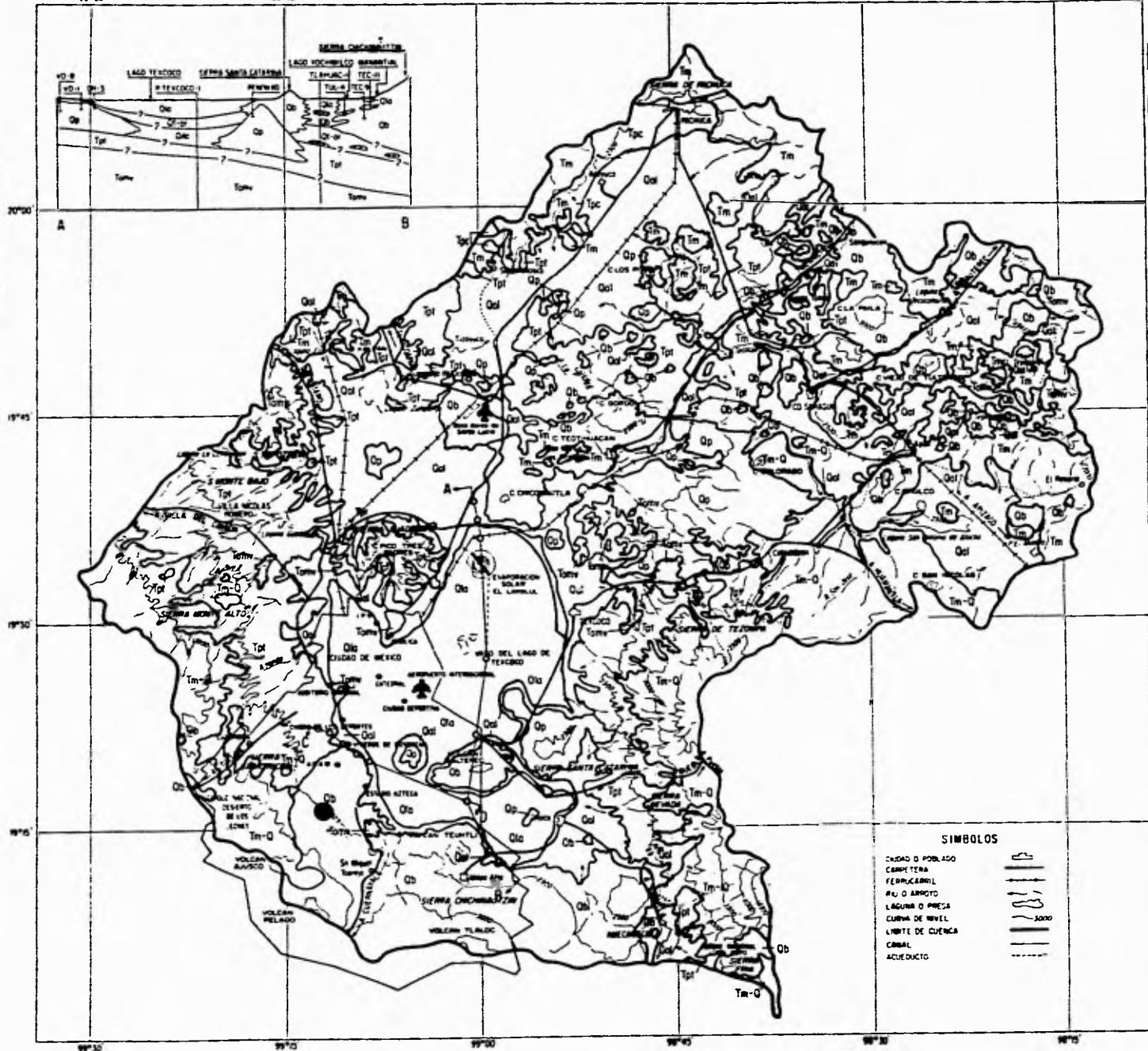
5.2.1 GEOLOGIA REGIONAL

La Cuenca de México ocupa una posición central en la Faja Volcánica Transmexicana, entre los meridianos 98° 40' y 99° 20' longitud oeste; y los paralelos 19°00' y 20°00' latitud norte. Tiene una superficie de 7,700 km² (De Cserna z. et. al., 1988). abarca el 50% del Estado de México, el 26.4% de Hidalgo, el 8.8% de Tlaxcala, y el 1% de Puebla. Queda comprendida en el centro de una gran zona Volcánica cuyos volcanes están distribuidos en tres áreas principales: La primera corresponde al campo volcánico Chichinautzín, la segunda al campo volcánico Tezontepec, y la tercera comprende los volcanes de las partes meridionales del área del vaso de la Cuenca. Desde el punto de vista Geohidrológico, limita al norte con las Cuencas de los ríos Amajac y San Juan Tula; al noroeste con la Cuenca del Río Tecolutia; y al sur con las del Alto Amacuzac y Alto Balsas (DGCOH, 1986).

La forma de la Cuenca es irregular, está alargada de norte a sur. En su eje mayor que va desde la porción suroeste de Xochimilco hasta el norte de Pachuca mide aproximadamente unos 110 km. En su eje menor mide unos 80 km desde el oeste de la Sierra de las Cruces hasta la cima del volcán Iztlacŕhuatl; tiene una altitud promedio de 2240m en el extremo sur y 2390m en el norte. Es del tipo endorréica y forma una extensa altiplanicie lacustre rodeada también por abanicos y llanuras aluviales. Desde el punto de vista fisiográfico, en la zona meridional limital al oeste por la Sierra Nevada y de Río

Frío; al este por la Sierra del Chichinautzin ; y al norte por la Sierra de Chiconautla. En esta zona, las lluvias suelen ser más abundantes y crean una mayor vegetación que en cualquier otra parte de la Cuenca. La zona Septentrional abarca al Sierra de Guadalupe, a las estribaciones de la Sierra de Pachuca. Se distingue por presentar lluvias escasas y vegetación precaria. La zona nororiental tiene elevaciones volcánicas que se extienden en una franja ancha hacia el este ocupando un espacio entre las cumbres de la Sierra de Pachuca y la Sierra de Río Frío. Carece de drenaje y está dotada de un clima semidesértico.

Existe una gran cantidad de información geológica de la Cuenca de México; entre los autores más citados se encuentran: Arellano V.R. 1948; De Cserna Z. et. al.,1974; De Cserna Z., et. al., 1987(1988), y Vázquez y Jaimes,1989. Hasta la fecha no se ha realizado una nomenclatura unificada que defina a las principales unidades litológicas. Sin embargo recientemente se han escrito trabajos en los que se describe mejor la geología de la Cuenca (Figura 14).



- Qia** ARENILLAS Y ARENILLAS CON ESCALONAS, FORMAS A PROPORCIONES DE UN ANCHO DE 10 A 20 METROS Y ALGUNAS DE 30 METROS EN LAS PARTES ALTERNAS POR LOS EFECTOS DE VIENTO Y VIBRACIONES CAUSADAS POR LOS TERREMOTOS DE LA ZONA DE 1907, EN LAS CUALES LA DE MAYOR EXTENSION ES LA QUE SE DA EN LA ZONA DE SIERRA NEGRA.
- Qal** ARENILLAS Y ARENILLAS METALICAS SON DEPOSITOS PRODUcidos DE TIPO DEL NOROCCIDENTE ALGUNAS DE ESTOS SON MAS ANTIGUOS EN GENERAL SU COMPOSICION ES DE TIPO "A" SE AGREGA DE POCO EN LAS ALTURAS EN LOS CERROS CONSTITUYENDO EL TIPO Y DIFERENCIANDOLE LAS SUBTIPOS Y VARIANTES.
- Qb** LIMAS, POCALISTOS Y CERROS DE COMPOSICION METAFERICA Y METAFERICA DE TIPO DEL PLEISTOCENO VENEZUELA EN GENERAL LAS LIMAS Y AGUADONOS SE ENCUENTRAN EN LAS PARTES ALTERNAS Y CERROS DE POCALISTOS SON COMUNES EN LOS CERROS CONSTITUYENDO LAS SIERRAS DE CHICHIMECA Y SIERRA DE GUADALUPE EN LA SIERRA DE TOLUCA Y EN EL ESTADO DE MORELOS CONSTITUYENDO CERROS AL OESTE DE TOLUCA Y POR ENTE DE LA SIERRA DE LOS PITOS.
- Qp** LIMAS, AGUADONOS, POCALISTOS Y TIPOS DE COMPOSICION METAFERICA Y METAFERICA DE TIPO DEL PLEISTOCENO EN GENERAL LAS LIMAS Y AGUADONOS SE ENCUENTRAN EN LAS PARTES ALTERNAS Y CERROS DE POCALISTOS SON COMUNES EN LOS CERROS CONSTITUYENDO LAS SIERRAS DE CHICHIMECA Y SIERRA DE GUADALUPE EN LA SIERRA DE TOLUCA Y EN EL ESTADO DE MORELOS CONSTITUYENDO CERROS AL OESTE DE TOLUCA Y POR ENTE DE LA SIERRA DE LOS PITOS.
- Tm-O** LIMAS, AGUADONOS, POCALISTOS Y TIPOS DE COMPOSICION METAFERICA, METAFERICA Y METAFERICA DE TIPO DEL PLEISTOCENO VENEZUELA EN GENERAL LAS LIMAS Y AGUADONOS SE ENCUENTRAN EN LAS PARTES ALTERNAS Y CERROS DE POCALISTOS SON COMUNES EN LOS CERROS CONSTITUYENDO LAS SIERRAS DE CHICHIMECA Y SIERRA DE GUADALUPE EN LA SIERRA DE TOLUCA Y EN EL ESTADO DE MORELOS CONSTITUYENDO CERROS AL OESTE DE TOLUCA Y POR ENTE DE LA SIERRA DE LOS PITOS.
- Tpi** POCALISTOS, AGUADONOS, TIPOS Y VARIANTES DE POCALISTOS ESPERANZAS METAFERICAS DE TIPO DEL PLEISTOCENO EN GENERAL LAS LIMAS Y AGUADONOS SE ENCUENTRAN EN LAS PARTES ALTERNAS Y CERROS DE POCALISTOS SON COMUNES EN LOS CERROS CONSTITUYENDO LAS SIERRAS DE CHICHIMECA Y SIERRA DE GUADALUPE EN LA SIERRA DE TOLUCA Y EN EL ESTADO DE MORELOS CONSTITUYENDO CERROS AL OESTE DE TOLUCA Y POR ENTE DE LA SIERRA DE LOS PITOS.
- Tm** LIMAS Y TIPOS, CON INTERCALACIONES DE POCALISTOS Y AGUADONOS, DE COMPOSICION METAFERICA Y METAFERICA DE TIPO DEL PLEISTOCENO VENEZUELA EN GENERAL LAS LIMAS Y AGUADONOS SE ENCUENTRAN EN LAS PARTES ALTERNAS Y CERROS DE POCALISTOS SON COMUNES EN LOS CERROS CONSTITUYENDO LAS SIERRAS DE CHICHIMECA Y SIERRA DE GUADALUPE EN LA SIERRA DE TOLUCA Y EN EL ESTADO DE MORELOS CONSTITUYENDO CERROS AL OESTE DE TOLUCA Y POR ENTE DE LA SIERRA DE LOS PITOS.
- Tm-r** LIMAS Y AGUADONOS, POCALISTOS Y TIPOS, DE COMPOSICION METAFERICA, METAFERICA Y METAFERICA DE TIPO DEL PLEISTOCENO VENEZUELA EN GENERAL LAS LIMAS Y AGUADONOS SE ENCUENTRAN EN LAS PARTES ALTERNAS Y CERROS DE POCALISTOS SON COMUNES EN LOS CERROS CONSTITUYENDO LAS SIERRAS DE CHICHIMECA Y SIERRA DE GUADALUPE EN LA SIERRA DE TOLUCA Y EN EL ESTADO DE MORELOS CONSTITUYENDO CERROS AL OESTE DE TOLUCA Y POR ENTE DE LA SIERRA DE LOS PITOS.



SIMBOLOS

Ciudad o poblado	
CARRETERA	
FERRICARRIL	
Rio o arroyo	
LAGUNA O PUESA	
CUENCA DE NIVEL	
LNDRITE DE CUENCA	
CANAL	
ACUEDUCTO	



Figura 14.- Geología de la Cuenca de México (DGCOH, 1986).

5.2.2 HIDROGEOLOGIA

Existe una secuencia de sedimentos marinos Cretácicos posiblemente con más de 1000 m de espesor, constituidos principalmente de calizas areniscas y lutitas que fueron falladas y plegadas durante el Terciario Temprano (Mooser 1961, De Cserna et. al., 1987(1988)). La actividad volcánica que se llevó a cabo de norte a sur en los flancos del graben en el Terciario Medio, formaron las Sierras que limitan al este y al oeste a la Cuenca de México. En el Terciario Medio hasta el Pleistoceno se depositaron sedimentos aluviales y piroclastos en el valle existente. Estos sedimentos clásticos forman la producción acuífera primaria de la ciudad de México y tiene más de 1000 m de espesor. (Vázquez y Jaimes, 1989). Una actividad volcánica intermitente ha continuado hasta el reciente, ha depositado piroclastos de caída libre y flujos de lava, los cuales se encuentran intercalados con depósitos clásticos cerca de los límites del Valle.

La actividad volcánica durante el Oligoceno y Neogeno formó la Sierra que cerró en el extremo norte a la Cuenca de México y al mismo tiempo formó un sistema de drenaje fluvial que drenaba hacia la parte sur. Durante el Pleistoceno Temprano, erupciones basálticas en la parte sur del Valle crearon el sistema montañoso (Sierra Chichinautzin) que causó el cierre de la Cuenca y bloqueó al sistema de drenaje (De Cserna et. al., 1987(1988)). Como resultado de esta clausura, se formaron una serie de lagos someros (de agua dulce y salobre) sobre los que se han depositado una gran cantidad de sedimentos.

De la anterior información se han podido inferir las características hidrogeológicas de las rocas que conforman a la Cuenca de México. A continuación se retoman los trabajos realizados por la DGCOH (1986), y se muestra un bosquejo general de la geohidrología de la Cuenca de México (Figura 15).

Las rocas terciarias más antiguas del sur y centro tienen porosidades y permeabilidades muy bajas por su escaso fracturamiento y estructura masiva; funcionan como basamento que limita inferior y lateralmente a los acuíferos. Estas mismas rocas al norte de la Ciudad de México, tienen permeabilidades

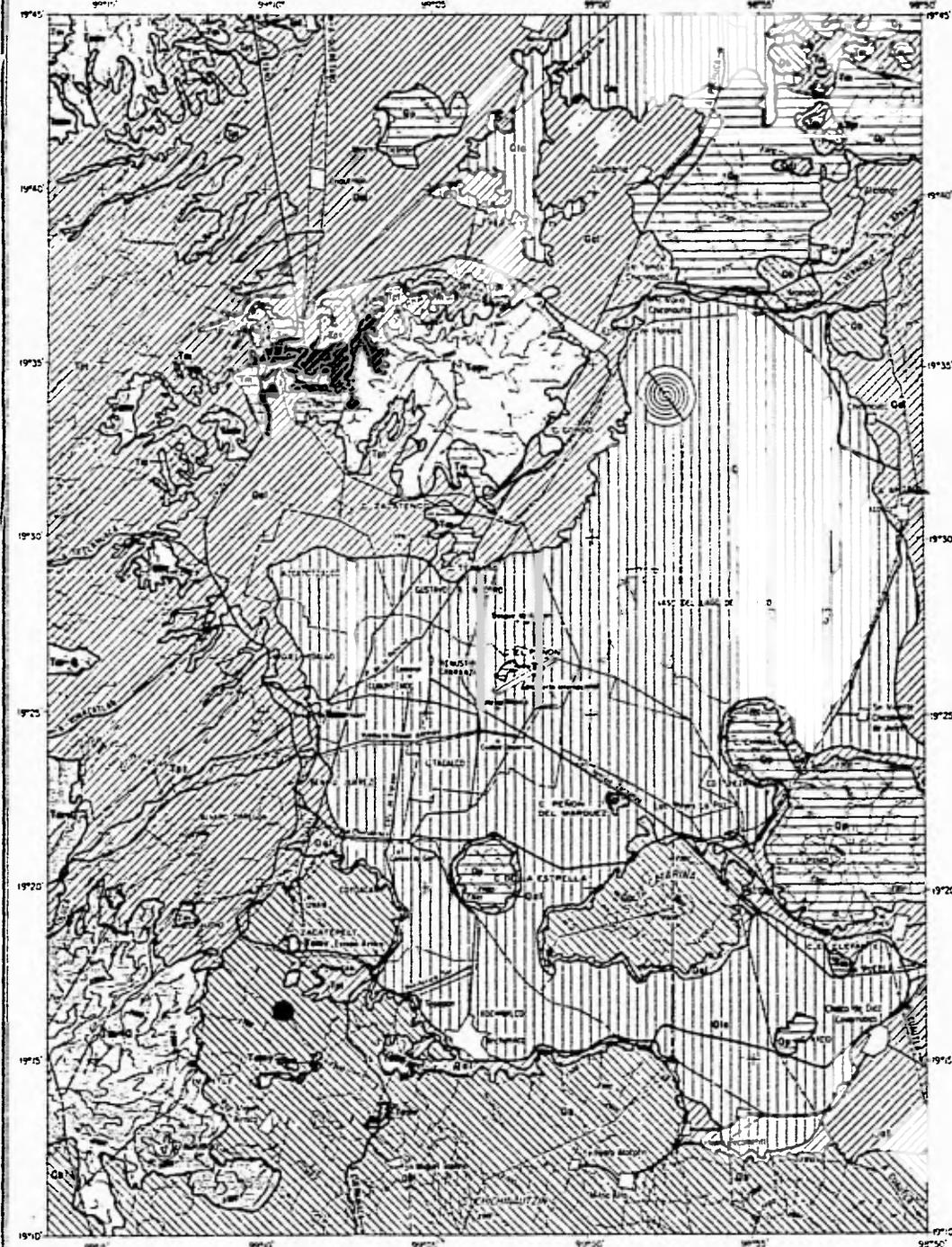
secundarias debido a que están intensamente fracturadas, fracturamiento que se asocia al sistema de fallas Chapala Acambay. Forman importantes acuíferos que se localizan en las inmediaciones de la Sierra de Guadalupe. La posición de este basamento con respecto a la superficie del terreno, varía entre 150 y 700 m. Aflora en las Sierras y se va profundizando hacia las partes bajas del Valle. En la Formación Tarango, la granulometría, fracturamiento y el grado de compactación controlan sus características hidráulicas. Está ampliamente distribuida en las Sierras y en el subsuelo; tiene elevada porosidad y permeabilidad media por lo que se le considera importante zona de recarga y constituye una parte importante del acuífero granular del Valle de México.

Las rocas andesíticas y dacíticas del Terciario Superior que predominan en las Sierras circundantes del Valle, tienen porosidades bajas y permeabilidades medias y altas derivadas de su fracturamiento. Están ampliamente expuestas en las áreas montañosas; aquí la precipitación es muy alta y por lo tanto, también constituye una importante unidad de recarga.

Los derrames basálticos cuaternarios son muy porosos y permeables por su fracturamiento y estructura escorácea. Cubren extensamente a las Sierras Chichinautzin y Santa Catarina, por lo tanto, constituyen excelentes receptores y transmisores de recarga de agua subterránea. También forman grandes acuíferos que se extienden principalmente en la porción sur del Valle.

Las arcillas lacustres se distribuyen ampliamente, tienen elevada porosidad y baja permeabilidad, forman un acuitardo de 300 m de espesor en promedio. Al intercalarse con las rocas volcánicas de la Sierra Chichinautzin propicia la descarga de manantiales y semiconfina a los sistemas acuíferos que suprayace.

PLANO HIDROGEOLOGICO
CUENCA DE MEXICO



Ob ROCAS DE ALTA PERMEABILIDAD- CONSTITUIDAS POR LAS ROCAS BASALTICAS DEL GRUPO CHICHNAUTZIN, CONFORMAN LOS ACUIFEROS DE MAYOR RENDIMIENTO DE LA CUENCA Y LAS ZONAS DE RECARGA MAS IMPORTANTES DE LOS ACUIFEROS DE LA MISMA, AL CAPTAR GRAN PARTE DE LA PRECIPITACION QUE SE SUCEDE EN LAS SIERRAS DE CHICHNAUTZIN Y SANTA CATARINA.

Op ROCAS DE MEDIA A ALTA PERMEABILIDAD- SE INCLUYEN LAS ROCAS DE COMPOSICION BASALTO-ANDESITICA (Op) Y PARTE DE LAS DE COMPOSICION DACITICO-ANDESITICA CONFORMAN ACUIFEROS DE MEDIO A ALTO RENDIMIENTO, EN LAS ZONAS DE LOS CERROS LA ESTRELLA, PERON DEL MARQUEZ, CHICHNAUTZIN Y CHICHNAUTLA, Y EN LAS PORCIONES NORTE, ORIENTE Y PONIENTE DE LA SIERRA DE GUADALUPE. LAS BASALTO-ANDESITICAS DETERMINAN TAMBIEN LAS PRINCIPALES ZONAS DE RECARGA DE LA PORCION CENTRO-ORIENTE DE LA CUENCA, AL CAPTAR IMPORTANTES VOLUMENES DE LA PRECIPITACION QUE SE SUCEDE EN LAS PORCIONES MONTAÑOSAS DE ESA ZONA Y CONDUCLIRLOS A LOS ACUIFEROS QUE ELAS MISMAS ALIMAN Y A LOS DE LAS RESTANTES ZONAS GEOMORFOLOGICAS LAS DE COMPOSICION DACITICO-ANDESITICA, EVIDENCIAN NO CONSTITUIR AMPLIAS ZONAS DE RECARGA DE LOS ACUIFEROS LATERALES

G01 ROCAS DE BAJA A MEDIA PERMEABILIDAD- ESTOS GRADOS DE PERMEABILIDAD LOS PRESENTAN LAS ROCAS DE LA FORMACION TARAMGO Y LOS ALUVIONES, TAMTO ANTIGUOS COMO RECIENTES. CONFORMAN ACUIFEROS DE BAJO A MEDIO RENDIMIENTO, UBICADOS EN LA PORCION PONIENTE DE LA CUENCA Y CENTRO ORIENTE DE LA CUENCA. POR LA GRAN EXTENSION DE LOS AFLORAMIENTOS DE LAS ROCAS DE LA FORMACION TARAMGO EN LA CUENCA Y EN PARTICULAR EN LA PORCION PONIENTE DE LA CUENCA, CAPTAN VOLUMENES NUMEROS DE LA PRECIPITACION QUE SE SUCEDE EN ELLOS, PERO IMPORTANTES PARA LOS ACUIFEROS EXPLOTADOS POR LOS POZOS UBICADOS EN ESA ZONA, LOS ALUVIONES, PRINCIPALMENTE LOS UBICADOS EN LA PERIFERIA DE LAS ZONAS MONTAÑOSAS, CAPTAN TAMBIEN, IMPORTANTES VOLUMENES DE RECARGA.

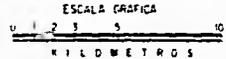
G10 ROCAS DE BAJA PERMEABILIDAD- ESTAS ROCAS ESTAN INTEGRADAS POR LAS ARCILLAS LACUSTRES, CONFORMAN ACUIFEROS Y SEMIACUIFEROS A PARTE DE LOS ACUIFEROS QUE LES SUBYACEN

Tm-0 ROCAS DE NULA A BAJA PERMEABILIDAD- ESTOS GRADOS DE PERMEABILIDAD SE PRESENTAN, POR LO GENERAL, EN LAS ROCAS MAS ANTIGUAS, CON EXCEPCION DE LAS UBICADAS EN EL SUBSIEMPO DE LAS PORCIONES NORTE, ORIENTE Y PONIENTE DE LA SIERRA DE GUADALUPE CONFORMAN EN GENERAL, LAS BARRERAS Y BASAMENTO DE LOS SISTEMAS ACUIFEROS DE LA CUENCA

SIMBOLOS

<p>● CASO O APROXIMADO PERICENTRO</p> <p>○ CASO O APROXIMADO PERIFERIA</p>	<p>○ CASO O APROXIMADO PERIFERIA</p>
---	--

● **Area de estudio**



Zonas de recarga. Se encuentran en las Sierras que limitan al Valle de México por el oriente, por el sur y por el occidente. La Sierra Chichinautzin es la zona de recarga más importante del acuífero principal. Le sigue en importancia la Sierra de las Cruces que se sitúan al oeste de la zona metropolitana. La zona saturada está muy profunda por la alta permeabilidad de las rocas y por lo consiguiente, no existen en ellas numerosas corrientes superficiales y las pocas que hay son intermitentes. Los manantiales que afloran son poco caudalosos. De tal manera que un importante volumen de agua que precipita se infiltra incorporándose subterráneamente a los acuíferos. En el subsuelo de las montañas las trayectorias del agua son muy tortuosas y están determinadas por factores geológicos. Ortega y Farvolden (1989), mediante la construcción de secciones de modelación matemática en una porción de las Sierras Chichinautzin, Las Cruces, y La Sierra Nevada, determinaron lo siguiente: En la Sierra Chichinautzin el 50% de la precipitación se infiltra, en la Sierra de las Cruces el 25% es el que se infiltra y en la Sierra Nevada un 35%. La cantidad de agua que se infiltra en estas zonas dependerá de la disponibilidad del agua, clima, topografía, vegetación y de la conductividad hidráulica de los materiales superficiales. Es importante mencionar que los resultados que se obtuvieron en el estudio que se cita son representativos de las superficies, que se tomaron para las secciones de modelado y que pueden incrementar si se considera a la totalidad del acuífero principal de la Cuenca. En el acuífero principal, al sur de la Cuenca de México se ha calculado la recarga efectiva que está integrada por dos partes: el aporte del acuitardo y la recarga proveniente de otras fuentes, principalmente de la precipitación natural. Este valor se estima alrededor de 16 m³/s (AIC, 1995).

Descarga regional. La descarga del agua subterránea de acuerdo con el estudio de Ortega y Farvolden (op. cit.) para las secciones de modelación que se consideraron, se distribuye como sigue: De lo que precipita en la Sierra Chichinautzin, 40% va a dar al Valle de México, y 60% al Valle de Cuernavaca. En la Sierra de las Cruces, aproximadamente el 70% se dirige hacia el Valle de México y 30% hacia el Valle de Toluca; y en la Sierra Nevada, el 50% va al Valle de México y el 50% al Valle de Puebla. Antes de que comenzara el bombeo en el principal sistema acuífero del Valle de México, cerca del 40% del

total de la descarga de agua subterránea fluyó a través de los acuíferos y arcillas lacustres hacia los lagos. Ahora el intenso bombeo ha invertido el gradiente y el flujo en la parte superior de los depósitos del Valle, está en dirección hacia las zonas de bombeo. La descarga se da a través de la extracción de agua subterránea que para el Distrito federal y Estado de México es de 48.3%; de agua superficial como ríos, manantiales y deshielos y por medio de la evapotranspiración cuyo potencial anual para la zona del Valle es aproximadamente 1,400 mm (AIC, 1995). La descarga al pie de las montañas es a través de manantiales. Esta descarga se debe a la diferencia de conductividades hidráulicas en los materiales y a la distribución de unidades hidroestratigráficas. Se ha reportado la existencia de manantiales desde hace aproximadamente 7000 años. Manantiales como el manantial de Chapultepec, el de Santa Fe, el del Desierto de los Leones, el de Tlalpan, el de Coyoacán, el de Fuentes Brotantes, los de Xochimilco, el manantial de Nativitas, así como numerosos pozos artesianos distribuidos ampliamente en el Valle de México (ej. El Peñón de los Baños).

En la época colonial existieron alrededor de 300 manantiales activos, para 1936 estos sólo representaron la única fuente de abastecimiento municipal de la zona (Durazo y Farvolden, 1989). Ahora, la mayoría de ellos están en explotación por medio de pozos (Xochimilco y Peñón de los Baños), algunos han desaparecido debido a la sobre explotación de los acuíferos la cual no permite la recuperación de los niveles piezométricos antiguos.

En la actualidad algunos trabajos que se han hecho acerca de manantiales los han clasificado como sistema de manantiales, existiendo el sistema Ajusco, el sistema Chichinautzin, el sistema de la Sierra de las Cruces, y el sistema Xochimilco. La mayor concentración de manantiales se localiza en el macizo montañoso de la Sierra de las Cruces y en menor parte en la Sierra Chichinautzin. El resto se localiza en la parte poniente de la Cuenca.

Por último, se ha clasificado al sistema hidrológico de la Cuenca en 5 Zonas Geohidrológicas (DGCOH, 1986), que agrupa a las principales características geológicas e hidrológicas.

5.3 HIDROGEOLOGIA LOCAL

5.3.1 GEOLOGIA LOCAL

El Parque Ecológico de la Ciudad de México se localiza en la pendiente norte de la Sierra Chichinautzin, al noreste del volcán Xitle. Afloran en la superficie escoria volcánica y basaltos fracturados de una serie flujos de lava tipo "aa" de composición andesítica-basáltica; piroclastos en tamaño de bombas y bloques. La erupción del Xitle fue una de la últimas manifestaciones volcánicas cuaternarias que hicieron su aparición hace 2500 años y se le asocia con la Formación Chichinautzin. Definida por Fries (1960) como Grupo Chichinautzin consta de lavas vesiculares masivas o tajadas de composición andesítico basáltica y andesítica principalmente; de grano fino y medio, con abundantes fenocristales de olivino y piroxeno en matriz vítrea y microcristalina. El espesor máximo que se le ha asignado es de 1800m (Vázquez y Jaimes 1989). La Formación es una manifestación del volcanismo monogenético desarrollado durante el Pleistoceno Tardío y Holoceno. Las lavas del volcán Xitle alcanzaron distancias hasta 15 km, abarcando actualmente gran parte de la zona sur de la Ciudad, como San angel, Ciudad Universitaria, Copilco y Poniente de la Avenida Insurgentes.

En la porción sur del Parque aflora una toba de composición traquiandesítica. El posible origen de esta roca queda bajo discusión pero, posiblemente se le pueda atribuir a la actividad del volcán Ajusco de edad Oligoceno Superior-Mioceno (Fries, 1960). Esta unidad forma una elevación alargada de bordes redondeados, y se le encuentra en alternancia horizontal con las anteriores lavas. El contacto entre estas dos está marcado por canales estrechos que se extienden por las altas pendientes. Al pie de las tobas se encuentra una franja de terrazas que se extiende de este a oeste. Se compone de suelos arenosos con más del 40% de finos. El horizonte puede provenir de la erosión de las tobas que se mencionaron y yace cotas más arriba.

En la superficie, las fracturas son escasas y se orientan en varias direcciones, esto puede implicar su origen por enfriamiento. Salvo en algunas zonas

perturbadas, tienen una dirección preferencial SE-NW asociado a la modificación de los originales afloramientos para la construcción de viviendas. Las tobas presentan fracturamiento más intenso. Las fracturas tienen diferentes direcciones; en la superficie presentan longitudes variables entre 1 y 5m en promedio, y de aperturas que también varían entre 1cm a 10 cm.

Los flujos de lava son del tipo "aa" y en algunas partes al noroccidente se logran encontrar lavas entre "pahoehoe" y "aa". Las primeras se disponen en flujos de aproximadamente 2 m de espesor en los cuales se distinguen tres formas diferentes de la roca. La primera, la más superficial, consiste de escoria volcánica de fragmentos subredondeados de alta porosidad. Cubre los primeros centímetros del flujo. Una parte intermedia de 50 cm de espesor en promedio de basalto vesicular, y en la parte inferior escoria volcánica de fragmentos angulosos de color rojo producto de la oxidación de los minerales que contienen hierro. En la superficie coexisten bloques y bombas (de 15 a 30 cm de diámetro mayor) junto con los fragmentos de escoria y megabloques de basalto producto del colapso que se ocasionó en algunos de los techos de los conductos de las lavas.

El paisaje morfológico que impera es el malpais, término que define a una superficie compuesta de relieve positivo y negativo que se forma al enfriarse los flujos de lava y sus estructuras asociadas. La forma y características de estas estructuras se explicarán más adelante.

5.3.2 HIDROGEOLOGIA DEL PARQUE ECOLOGICO DE LA CIUDAD DE MEXICO

El Parque Ecológico de la Ciudad de México se ubica en la zona geohidrológica I (DGCOH., 1986). Las rocas de esta zona tienen alta permeabilidad por lo que en ella se encuentran construídos los pozos de mayor rendimiento. Los espesores del acuífero captado en esta zona varían de 100 m en la porción poniente (Tepepan) a unos 500 m al oriente (Tulyehualco-Santa Catarina-Ayutzingo); estos se incrementan hacia el sur conforme aumenta la altitud.

La profundidad de los niveles estáticos con respecto a la superficie del terreno, varía de 30 a 40 m en la planicie y de 40 a 90 m en el flanco norte de la Sierra Chichinautzin y en la estribaciones de la Sierra de Santa Catarina. Las profundidades se incrementan al aumentar la topografía.

En la Sierra Chichinautzin, los pozos obtienen caudales de 85 a 140 lps y caudales específicos que varían entre 14 y 35 lps/m de abatimiento existiendo algunos con más de 100 lps/m (DGCOH. op. cit.). Con respecto a la calidad del agua subterránea, en la Sierra Chichinautzin se ha observado una excelente calidad de los pozos localizados en las partes más altas, mientras que en las partes más bajas el agua está contaminada con aguas residuales.

En el subsistema de pozos Tlalpan del sistema sur se encuentran emplazados 73 pozos de los cuales, los pozos San Pedro Martir 1 y San Pedro Martir 2 son los más cercanos al área de estudio, también muy próximos se encuentran los manantiales del sistema ajusco emplazados en miembros tobáceos y flujos volcánicos de la Formación Ajusco. Los 9 manantiales que forman a este sistema son: Potrero Chico, La sauceda, Agua Grande, Monte Alegre, El Sauco, Rancho Viejo, Fuentes Brotantes, Peña Pobre y Tulmiac. Estos manantiales pueden ser respuesta a la recarga que ocurre en el extremo norte de la Sierra Chichinautzin, lugar en el que se localiza el Parque Ecológico. Otros pozos cercanos al área de estudio son los de Ciudad Universitaria algunos son de explotación y otros de infiltración inducida. El nivel estático se encuentra a 74 m y el dinámico a 85 m

ESTO
NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

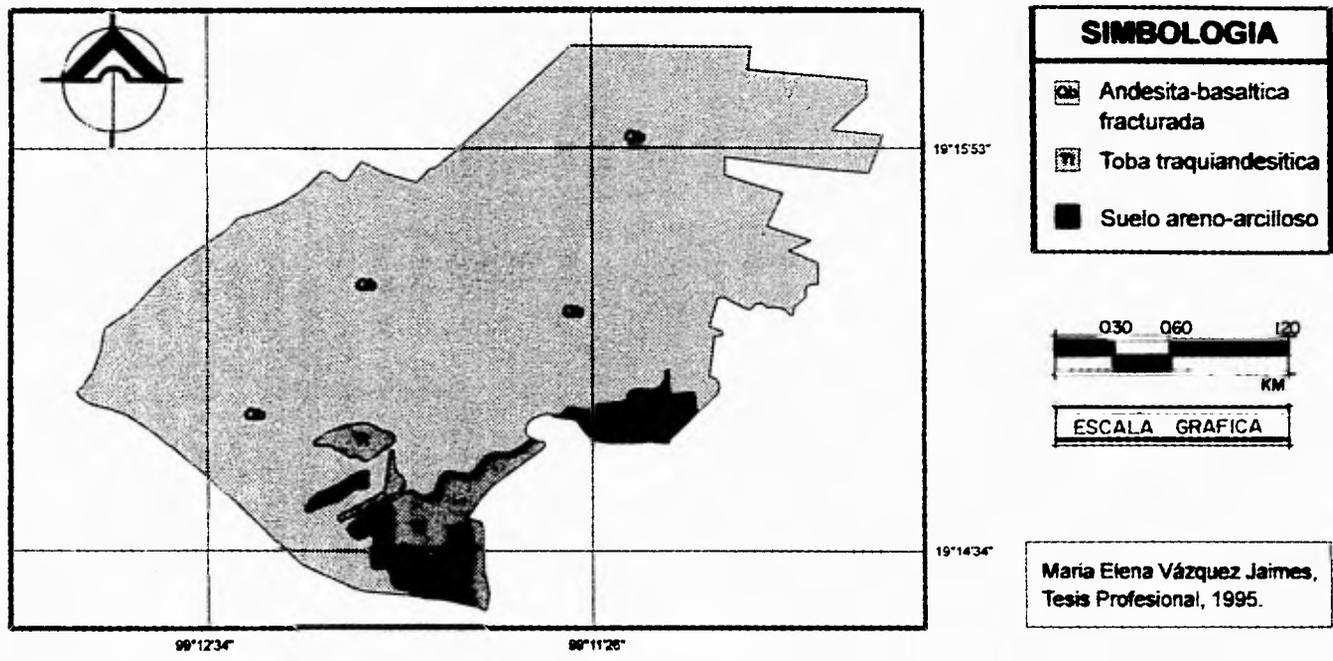


Figura 16.- Plano Geológico del Parque Ecológico de la Ciudad de México.

La temperatura promedio anual en la Sierra de las Cruces es de 11.3°C, y la precipitación promedio anual es de 1440 mm, la evapotranspiración anual es de 640 mm en las partes bajas de la Sierra y de 540 mm en las partes altas; aproximadamente 900 mm de la precipitación se infiltra y se descarga por medio de corrientes perennes y manantiales (Cortes y Farvolden, 1989). Aunque por composición litológica de los materiales permeables de la Sierra de las Cruces difieran de los que se presentan en la Sierra Chichinautzin, los rangos de elevación en la montañas se mantienen al mismo nivel, y por lo tanto, las condiciones de temperatura y precipitación no varían mucho de una unidad a otra. Es válido bajo estas condiciones, hacer una analogía de la dos Sierras para considerarlas importantes zonas de recarga.

El área total del acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México es de 3448 km² considerando al acuífero y al acuífero principal, de las cuales probablemente una tercera parte le corresponda a la superficie de recarga de la Sierra Chichinautzin. Tiene una recarga efectiva de 15.6 m³/s provenientes del aporte del acuífero y de la precipitación pluvial. (AIC, 1995). Como el aporte de las arcillas es de 4.7 m³/s (AIC op. cit.), se espera que 10.9 m³/s corresponda a la recarga proveniente de la infiltración del agua de lluvia. El Parque Ecológico ocupa 727 hectáreas de una extensa zona de recarga (Sierra Chichinautzin). Según el área total del acuífero ocuparía aproximadamente 0.21% de la superficie total.

Las rocas cristalinas tienen una porosidad no mayor al 2%. Los espacios intercristalinos que originan a la porosidad son demasiado pequeños y no se encuentran interconectados, por tal motivo, la permeabilidad primaria de estas rocas es extremadamente pequeña; pero adquieren una permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las rocas cristalinas fracturadas son menos permeables a grandes profundidades. Esto se debe a que las fracturas son más cerradas por la variación vertical y horizontal del esfuerzo, al estar sometidas al peso de las unidades sobreyacentes. Desde el punto de vista geohidrológico, las rocas volcánicas generalmente difieren de la mayoría de las otras rocas cristalinas (plutónicas y metamórficas) porque cuentan con rasgos especiales que les proporcionan una mayor permeabilidad. Cuando el magma sale a la

superficie y fluye como lava, las rocas que se forman por enfriamiento generalmente son muy permeables. En la superficie el rápido enfriamiento y el escape de gas originan juntas y vesículas. También el movimiento y enfriamiento de los flujos de lava, forman una masa sólida de roca que en algunos lugares sobre su superficie presenta bloques de roca encima de una roca más densa. Las lavas en bloques o rocas con material fragmentado en su superficie como lavas "aa" producen rangos de permeabilidad muy elevados sobre todo en lavas recientes. Otra causa que origina una alta permeabilidad en basaltos recientes es la presencia de vesículas de gas, tubos de lava y moldes de troncos. Las rocas que atraviesan la etapa de alteración pueden disminuir su permeabilidad a medida que transcurre el tiempo. La permeabilidad en rocas volcánicas es anisotrópica, pero hay ocasiones donde en la cima de las coladas de lava se desarrolla una elevada permeabilidad y entonces una corriente de agua puede suceder entre dos flujos de lava. En las lavas en bloque o "aa", el flujo de agua generalmente corre paralelamente al flujo de la lava, y por lo tanto, la dirección de la más alta permeabilidad es paralela a la dirección de flujo. Davis (1969), menciona que en un flujo de lava la más alta permeabilidad está en la dirección del flujo. Esto se ilustra en la figura.18.

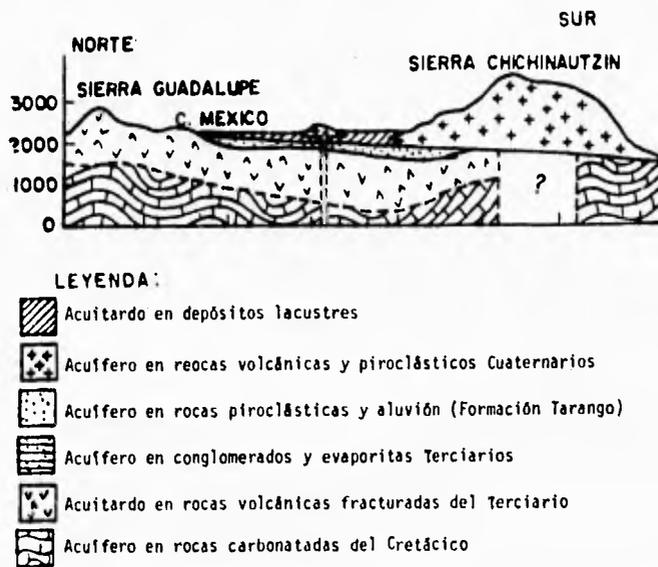


Figura 17.- Sección hidrogeológica de las Sierra Guadalupe-Chichinautzin (Ortega and Farvolden, 1989).

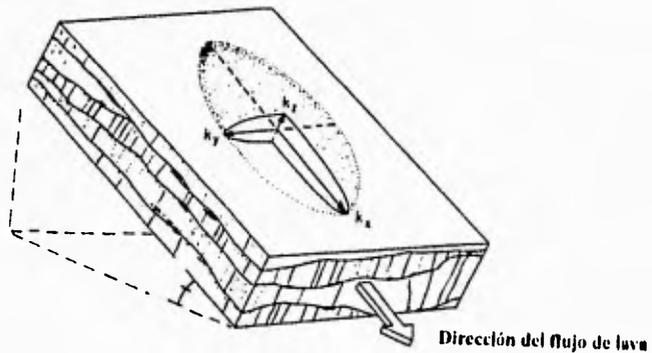


Figura 18.- Variación de la permeabilidad con respecto a la dirección de flujo de una lava (Freeze and Cherry, 1979).

Freeze y Cherry (1979), dan un ejemplo del comportamiento de la permeabilidad en los basaltos de la región de Columbia, U.S. (Columbia River Plate). Esta localidad tiene 550 m de espesor de secuencias basálticas con interestratificaciones de depósitos fluviales. Los basaltos están fracturados, son vesiculares y presenta intemperismo (basaltos brechados) en estos, se localizan importantes acuíferos en los que el flujo regional es horizontal y tienen una elevada permeabilidad.

En conclusión, aunque la porosidad de las rocas volcánicas puede ser a veces muy elevada, su permeabilidad varía mucho y está siempre en función del conjunto de estructuras primarias y secundarias, más que de su propia naturaleza litológica (Davis, 1969). La permeabilidad horizontal de estas rocas se debe en su mayor parte a la presencia de los espacios huecos que suelen existir entre dos coladas de lavas superpuestas, mientras que la permeabilidad vertical se debe al requebrajamiento de la lava y a las fracturas que se forman por contracción. Por lo general la permeabilidad vertical suele ser más pequeña en comparación con la permeabilidad horizontal (Davis op. cit.).

Los piroclastos inalterados poseen permeabilidades directamente relacionadas con el tamaño de los ciastos, con la uniformidad de su tamaño y con su grado de cementación. Cuando la clasificación de los tamaños en una misma unidad es mala y al mismo tiempo hay abundancia de material fino, ocurre que aún manteniéndose la misma porosidad elevada la permeabilidad disminuye. Refiriéndose al área de estudio, ésta es cubierta por flujos de lavas "aa" y se espera tener un comportamiento hidrológico similar a lo dicho en párrafos anteriores.

5.4 EL IMPACTO DE LA SOBREPoblACION EN LA CIUDAD DE MEXICO SOBRE LOS RECURSOS HIDROLOGICOS

La Cuenca de México abarca cinco Estados que colindan con la Ciudad de México incluyendo a la gran metrópoli. Esto significa que se está hablando de una población aproximada de 25 millones de habitantes cuya demanda de agua es dos veces más a lo que se estimó para el año de 1986 (DGCOH, 1986) de recibir un caudal total de unos $35\text{m}^3/\text{s}$, de los cuales el 12.8% proceden de fuentes superficiales, el 87.2% complementario de las fuentes subterráneas. En la actualidad se extraen $7\text{m}^3/\text{s}$ del sistema Lerma, $4\text{m}^3/\text{s}$ del sistema Cutzamala y $1\text{m}^3/\text{s}$ de aprovechamientos superficiales. Del subsuelo se extrae $40\text{m}^3/\text{s}$ y existe una demanda aproximada de 200 litros por habitante al día, lo que hace tener un déficit de $24\text{m}^3/\text{s}$ al año.

El área metropolitana comprende a 16 Delegaciones políticas más 27 municipios conurbados, se espera que la población para el año 2000, considerando la tasa de crecimiento para el D.F sea de 1.5% y 4.3% para el Estado de México llegue a 27.3 millones de habitantes de los cuales 12.7 estarán en el D.F. y 14.6 en el Edo. de México. La reserva territorial para este crecimiento es de 7.981 hectáreas en el D.F y 16.91 en los 17 municipios conurbados. El crecimiento urbano para el área metropolitana de la ciudad ha sido caótico y por lo tanto no hay un equilibrio entre el desarrollo metropolitano y la preservación de los recursos naturales, los que permiten vivir en un espacio mejor. El alto índice demográfico es razón suficiente para explicar la sobre-explotación de los recursos hídricos de la región, lo que conlleva no solo a la escasez y agotamiento del agua, si no a problemas de contaminación y a hundimientos diferenciales del suelo lacustre de la ciudad.

5.5 ESTRATEGIA DE LA METODOLOGIA PROPUESTA

Con la finalidad de evaluar y jerarquizar en las áreas de recarga a las zonas de mayor infiltración de agua de lluvia, mediante el reconocimiento y estudio de las componentes físicas del terreno se siguió la siguiente metodología:

Se realizó un análisis preliminar del área de estudio con apoyo bibliográfico y cartográfico para obtener los pesos relativos y asignarlos a los principales parámetros de acuerdo a lo que se explicó en el capítulo cuatro. Esta distribución se muestra en la figura 19.

Se dividió el total de la superficie en áreas de iguales dimensiones para realizar al interior de ellas un levantamiento geológico a semidetalle y las observaciones hidrológicas precisas. Para la demarcación se llevó un control topográfico a través de fotografías aéreas escala 1:15 000. Se tomaron como linderos algunos rasgos físicos en el campo de fácil reconocimiento (caminos, veredas y construcciones). El trabajo geológico de campo consistió en el reconocimiento, medición y conteo de las estructuras y fracturas presentes, y en el muestreo de las principales unidades litológicas. También registró del tipo de vegetación y uso del suelo. Por último, se observó directamente en la superficie, la actividad del agua de lluvia después de haber transcurrido una tormenta en el periodo de lluvias correspondiente al mes de julio de 1994. Se asignó un escala evaluativa de números naturales del 1 al 4 para poder evaluar el comportamiento hidrológico de cada parámetro. Números que se relacionan a su vez con los 4 principales componentes del ciclo hidrológico: 1 al escurrimiento, 2 y 3 para la evaporación y retención superficial, y 4 para la infiltración. El valor de 2 se relaciona al volumen de agua que se retiene o se evapora y que es muy próximo al volumen que escurre; y el valor de 3 a la cantidad de agua que se pierde muy próxima al volumen total de agua que podría infiltrarse.

De esta manera, se levantaron 7 superficies de las más representativas y de las que se puede esperar un mayor contraste en sus resultados finales. Dentro de estas actividades se llevó a cabo la excavación de un pozo a cielo abierto con la

finalidad de conocer el tipo y espesor del suelo en la zona de terrazas para inferir la permeabilidad en el laboratorio.

Las actividades de gabinete consistieron en reunir toda la información correspondiente a: densidad de fracturamiento; tipo, características y densidad de estructuras volcánicas, tipo y densidad de vegetación, y uso de suelo. Para conocer la distribución de las pendientes y las relaciones topográficas del terreno con los materiales geológicos, se construyó un mapa de pendientes, un mapa geológico, y un mapa geomorfológico. En el laboratorio se realizaron análisis granulométricos de las muestras de suelo para determinar su clasificación e inferir su permeabilidad por métodos indirectos. De 10 muestras representativas de suelo se obtuvo el porcentaje de humedad y se realizó la separación mecánica por medio de tamices con lo cual se tuvieron porcentajes de finos y gruesos. Se contruyeron las correspondientes gráficas para conseguir los diámetros efectivos, el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura de la fracción gruesa para su posterior clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. La última etapa de esta metodología consistió en aplicar el procedimiento que se explicó en el capítulo anterior para obtener la capacidad de infiltración del terreno.

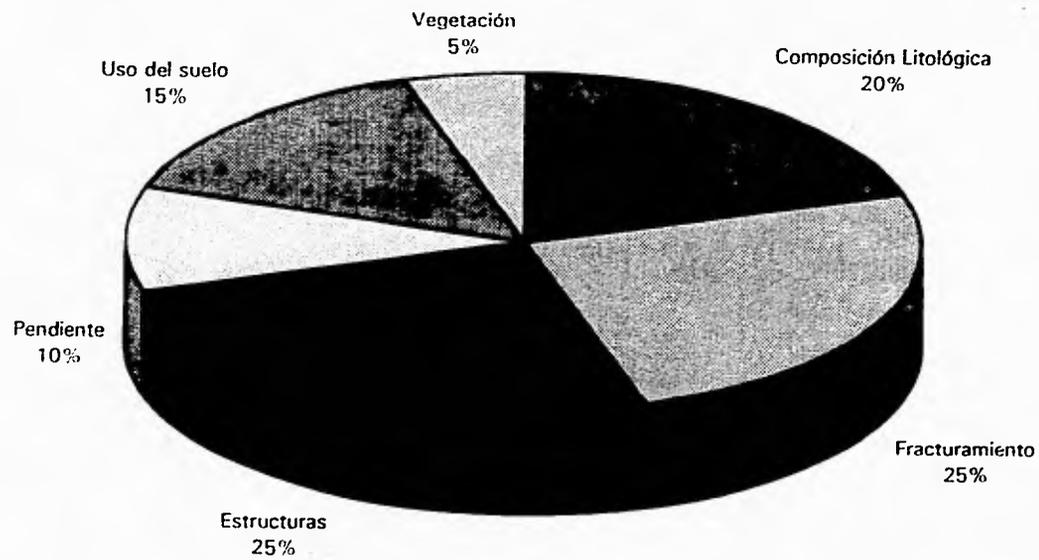


Figura 19.- Distribución de pesos relativos.

5.6 SECCION DE DATOS

Con datos de las estaciones meteorológicas más cercanas (Alvarez Cruz, 1992), como la estación meteorológica del Instituto de Geografía que se encuentra en Ciudad Universitaria (19°20' y 99°11'), y la Estación Ajusco (19°13' y 99°11'), se pudieron inferir los datos principales de precipitación anual, clima y temperatura. El área de estudio se sitúa en la franja comprendida entre la línea de precipitación 800 mm y la 1000 mm; por lo tanto, tiene una precipitación anual aproximada de 1017 mm; tiene una temperatura promedio de 23° en la zona de basaltos y de 20° para la zona de terrazas. Los máximos meses de lluvia son junio y julio, pero las lluvias llegan a durar hasta el mes de septiembre. El clima se considera como templado y subhúmedo con lluvias en verano. La humedad más alta se ha registrado en la zona de terrazas; especialmente estos valores se incrementan en las primeras horas de la mañana.

5.6.1 COMPOSICION DEL MEDIO PERMEABLE

Andesita Basáltica. El 70% del área está cubierta por esta roca. Aflora en la superficie en forma de flujos de lava, principalmente del tipo aa. En la cima del flujo coexisten fragmentos subredondeados de escoria volcánica, bombas y bloques. En la parte intermedia subyace una roca de aspecto masivo y fracturado; y en la parte inferior reaparecen fragmentos angulosos de escoria.

Toba cristalina. Roca que aflora aproximadamente en un 2% de la totalidad del área. Se localiza en el extremo sur ocupando las porciones más altas del Parque Ecológico (2700-2800 m.s.n.m). En la superficie se presenta como una estructura compacta y pseudoestratificada y en algunos lugares, está brechada. Presenta también, un alto grado de fracturamiento y superficies intemperizadas de material arcilloso. Se le clasificó como toba de composición traquiandesítica.

Horizonte de suelo. Esta unidad corresponde a una franja de suelo que se extiende de oriente a poniente al pie de las tobas cristalinas. Al parecer se trata de un suelo reciente que se ha formado por el desgaste de la roca anterior. Por lo tanto, se trata de un suelo reciente. Los dos primeros metros desde la

superficie presentan raíces de diversos tamaños, materia orgánica carbonizada y madrigueras de animales; en los primeros centímetros descansan cenizas volcánicas. Considerando al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, se le clasifica como arena con cantidad apreciable de finos. Para conocer el tipo de finos presentes es necesario llevar a cabo otros procedimientos en el laboratorio.

5.6.1.1 PESO RELATIVO Y FACTORES EVALUATIVOS

La naturaleza litológica del medio superficial, está relacionada directamente con la porosidad primaria de la roca (Freeze, 1979 y Davis, 1971), bajo esta premisa se le asignó un peso relativo arbitrario del 20%.

Area no. 1. Escoria volcánica, rocas masivas de andesita basáltica, bombas y bloques cubren el 100% de la superficie. El agua atraviesa directamente el medio superficial a través de los espacios que existen entre los fragmentos de la escoria volcánica y de los piroclastos, dejando una superficie húmeda sobre la clastos y una saturación en las zonas vesiculares, tiempo después de la lluvia. La infiltración es total e inmediata en donde existen megabloques angulosos de basalto (hasta 5 m. de largo), producto del colapso del techo en una costra de lava. En algunos afloramientos aislados, la rocas están trituradas hasta tamaños de gravas; aquí el agua de lluvia forma superficies de encharcamiento las cuales, una hora después de la tormenta, tienden a desaparecer. Se le asignó una calificación de 3.

Area no. 2. Compuesta principalmente por escoria volcánica mal clasificada, bloques y bombas parcialmente distribuidos, megabloques de andesita basáltica y suelos no originarios de lugar. La variedad de tamaños que tienen estas rocas originan zonas de encharcamiento, sobre todo en lugares donde la roca se ha despedazado para bancos de material y en donde se han colocado suelos de diversos materiales para la instalación de obras públicas. A esta área se le asignó un factor de 3.

Area no. 3. Esta área esta cubierta por: escoria volcánica, bloques de andesita-basáltica, y piroclastos en menor proporción. Las condiciones hidrológicas son similares a las del area no. 1. Son favorables para la infiltración, al estar ausentes suelos procedentes de otro lugar y al no existir sitios donde la roca ha sido fraccionada en tamaños pequeños. Por proporcionar estas características una mayor infiltración al terreno, se le dió la calificación de 4.

Area no. 4. Compuesta por tobas cristalinas principalmente; una franja de suelo de arena con finos de aproximadamente 3 m. de espesor, y en menor proporción, lavas del tipo "aa". Por el grado de compactación e intemperismo de las tobas la porosidad es prácticamente nula. Por lo tanto, el agua que cae de las precipitaciones tiende a escurrir sobre su superficie. El suelo es un importante receptor de los escurrimientos que provienen de la partes altas, pero mantiene una permeabilidad intermedia a baja por ser una arena con gran cantidad de finos. Por las observaciones directas en el campo, el área presenta una elevada humedad después de haber transcurrido una tormenta. En época de lluvias la humedad del ambiente es mayor en las primeras horas que en las horas restantes del día. La lava fluyó por donde la topografía le permitió; de tal forma que se le encuentra bordeando a la toba. Existe una alternancia de afloramientos y el contacto litológico entre estas dos unidades forma un canal estrecho relleno de hojarasca y materia orgánica, cuya función es la de retener temporalmente el agua de lluvia. Por ser las tobas la unidad litológica que mayor se expone, y propiciar el escurrimiento y la retención superficial, se le asignó al area una calificación de 2.

Area no. 5. Predominan andesitas-basálticas vesiculares en bloques, superficies de lava "aa" y material piroclástico. El agua penetra rápidamente por los espacios libres entre los piroclastos y los depósitos no consolidados. Se le asignó un factor evaluativo de 4.

Area no. 6. Predominan suelos de arena con finos, fragmentos de toba, bloques de andesita basáltica y escoria volcánica soldada. Le corresponde un factor evaluativo de 2. Según el estudio granulométrico realizado, el suelo presenta un 60% en promedio de arena uniforme la cual le corresponde un valor

de permeabilidad alto (1.5×10^{-4}) mediante el método indirecto para el cálculo de la permeabilidad por curvas granulométricas de Allen Hazen (Juárez, 1986). Sin embargo, por presentarse una considerable cantidad de finos, hace que la permeabilidad disminuya considerablemente. Aunado a lo anterior, el material consolidado no aflora en la totalidad de la superficie; y por lo tanto, ambos factores limitan a una favorable infiltración de agua al subsuelo.

Area no. 7. Predominan flujos de lava intermedia (aa y pahoehoe), y bloques de andesita basáltica. La mayoría del material litológico está consolidado y no existen particularidades sobre su superficie donde el agua penetre con rapidez, como la existencia de vesículas interconectadas o poros. Por lo tanto, el agua queda retenida momentáneamente para después infiltrarse. Por las anteriores circunstancias se le dió una calificación de 3.

5.6.2 FRACTURAMIENTO

Cada unidad litológica presenta diferente patrón de fracturamiento. En las andesitas basálticas, en la parte masiva de los flujos de lava, las fracturas, están mejor expuestas. La mayoría de estas fracturas son verticales, tienen un promedio de 1.5 cm de apertura, pero algunas llegan a medir hasta 30 cm. Su longitud varía desde unos cuantos centímetros hasta 5 metros. En las tobas el fracturamiento que se presenta es muy intenso con fracturas que llegan a medir hasta 50 centímetros de apertura y 5 metros de longitud.

5.6.2.1 PESO RELATIVO Y FACTORES EVALUATIVOS

Las rocas volcánicas adquieren altas permeabilidades secundarias por el grado de fracturamiento que suelen presentar. Esta razón es suficiente para asignarle a este parámetro un peso relativo del 25%. La tabla 5 contiene la densidad de fracturamiento, la longitud y apertura promedio de las familias de fracturas para cada área; y la figura 20 muestra la dirección preferencial de fracturamiento de aquellas superficies más representativas en el sentido de tener mayor número de fracturas y estar mejor expuestas en la superficie.

Area no. 1.

Presenta una moderada densidad de fracturamiento. La mayoría de la fracturas están expuestas con longitudes promedio entre 30-50 cm y aperturas menores a 1cm. Su calificación es 4

Area no.2.

La densidad de fracturamiento es baja, sólo algunas fracturas se exponen con longitudes entre 30 y 50 cm, y aperturas menores a 1 cm. Su calificación es 2.

Area no. 3

La densidad de fracturamiento es moderada, la mayoría de las fracturas están expuestas con longitudes variables entre los 10 y 20 cm y aperturas entre 0.5 y 1 cm. Su calificación es 3.

Area no. 4

Se presenta una alta densidad de fracturamiento. Las fracturas afloran en longitudes mayores a 1 metro y tienen aperturas variables entre 1 y 10 cm. Su calificación es 4.

Area no. 5

Moderada densidad de fracturamiento, la mayoría de las fracturas se exponen con longitudes variables entre 5 y 10 cm y aperturas menores a 0.5 cm Su calificación es 3.

Area no. 6

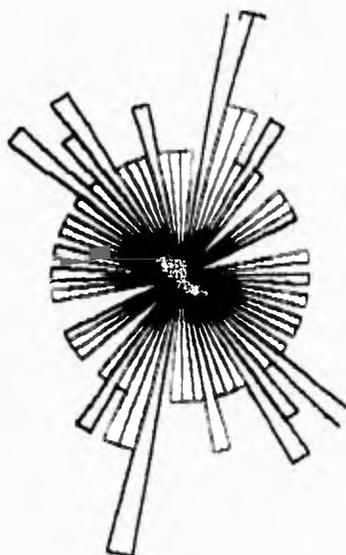
Baja densidad de fracturamiento, muy pocas fracturas se exponen a la superficie con longitudes hasta de 1 metro y aperturas hasta 2 cm. Su calificación es 1.

Area no. 7

Moderada densidad de fracturamiento. La longitud que presentan las fracturas en superficie es de 10 a 150 cm y la apertura es mayor a 1 cm. Su calificación es 3.

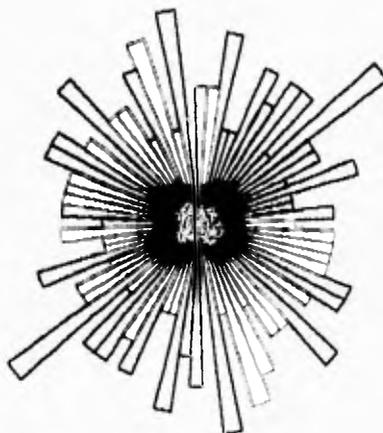
TABLA 5. CARACTERISTICAS DEL FRACTURAMIENTO. PARQUE ECOLOGICO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

NUMERO DE AREA	SUPERFICIE (m²)	TOTAL DE FRACTURAS	LONGITUD PROMEDIO (cm)	APERTURA PROMEDIO (cm)
1	5	11	87	3.00
	3	15	75	0.08
	2	20	15	0.05
	12	23	35.4	0.90
2	5	20	39.4	0.03
	13	9	60	0.10
	2.1	35	75	0.03
	8	25	30	0.04
3	5	10	1	1.50
	8	10	80	0.05
	4	25	25	0.05
4	30	100	180	5.00
	36	110	200	3.00
	25	80	130	6.00
5	1	3	10	0.10
	5	15	8	0.10
	1	3	10	0.20
6	10	25	100	2.00
7	5	10	10	2.00
	8	15	150	3.50
	6	16	30	0.50
	13	18	15	1.00



$n = 39$
 $x = 356.6$ grados
 $s = 41.6$ grados

**ROSETA DE FRACTURAMIENTO
 CORRESPONDIENTE AL AREA DESIGNADA CON EL NUMERO 1.**



$n = 80$
 $x = 359.1$ grados
 $s = 49.4$ grados

**ROSETA DE FRACTURAMIENTO
 CORRESPONDIENTE AL AREA DESIGNADA CON EL NUMERO 4**

Figura 20.- Rosetas de Fracturamiento. Parque Ecológico de la Ciudad de México

5.6.3 ESTRUCTURAS VOLCANICAS

Las estructuras que se presentan en el área de estudio se pueden clasificar en: pequeñas estructuras, grandes estructuras, y megaestructuras. Las pequeñas estructuras consisten en estructuras que son observables y medibles en un afloramiento; cubren superficies menores a 50 m². Las grandes estructuras son aquellas que llegan a medir una superficie menor a 50 m²; y las megaestructuras son las que abarcan superficies mayores a los 50 m² y se reconocen por medio de fotografías aéreas.

5.6.3.1 PESO RELATIVO Y FACTORES EVALUATIVOS

Una roca volcánica adquiere permeabilidades altas por las estructuras primarias que presenta (Davis, 1971; Frezze, 1979). Por lo tanto, se propone asignarle un peso relativo del 25%. A continuación se presentan las estructuras pertenecientes a cada clasificación:

Pequeñas estructuras:

- bandeamiento
- brechamiento
- hoyos de reforestación
- vesículas

Grandes Estructuras:

- montículos de escoria
- flujos de lava
- canales
- depresiones circulares y elípticas
- superficies planas
- tubos de lava
- cuevas de lava

Mega-estructuras:

- frentes de presión
- crestas de presión
- levees
- tumulis

Bandeamiento. El bandeamiento se presenta en la unidad de tobas. Son bandas de minerales y vidrio alternados de manera que, al mismo tiempo forman lentes, proporcionándole a la roca un aspecto lenticular.

Brechamiento. También se presenta en las tobas. Consiste de bloques de roca fragmentados en forma de rompecabezas. Los fragmentos son angulosos y de diversos tamaños. Hay bloques que llegan a medir 1 m de longitud.

Hoyos de reforestación. Son cavidades que se hicieron sobre las superficies horizontales de los flujos de lava y sobre escoria. Estas cavidades son semicirculares, miden aproximadamente 50 cm x 40cm y 25 cm de profundidad. En algunas de ellas, la vegetación ha cubierto su interior y en algunas otras el espacio es libre.

Vesículas. Se presentan en las partes masivas de un flujo de lava. Son semicirculares, algunas de ellas miden 5 cm y otras llegan a medir hasta 10 cm de diámetro.

Estructuras en forma de estalctitas y estalagmitas. Son tubos de lava en los que su interior contienen pilares de basalto a manera de estalactitas y estalagmitas.

Oquedades en el frente de lava. Son espacios que dejan los fragmentos de escoria en un flujo "aa".

Montículos de escoria. Son prominencias topográficas circulares de fragmentos subredondeados de basalto vesicular.

Flujos de lava. flujos de lava "aa", cuyo conjunto forman el paisaje conocido como malpaís.

Canales. Estructuras que se forman entre dos coladas de lava. Son de escoria, piroclastos, y bloques angulosos de basalto.

Dapresiones. Superficies negativas de bloques angulosos de basalto y escoria volcánica. Algunas de ellas son circulares y otras son alargadas.

Superficies Horizontales. Superficies planas de suelo y tezontle.

Tubos de lava. Estructura cilíndrica alargada. Se reconocen en superficie por el orificio circular de alguno de sus extremos.

Cuevas de lava. Superficies convexas de un flujo de lava "aa".

Crestas de presión. Son crestas elongadas de basalto. Forman barreras inclinadas de corteza basáltica.

Levees. Son paredes verticales de corteza basáltica. En el interior existe material no consolidado de material volcánico proveniente del mismo flujo.

Tumulis. Son superficies planas de flujos de lava. En la cima de estos se presentan pequeñas grietas de enfriamiento.

Area no. 1.

No. de estructuras. Se encontraron 173 hoyos de reforestación, 15 depresiones por colapso, canal de bloques y escoria, y 3 crestas de presión.

El agua se almacena momentáneamente en los hoyos de reforestación, segundos más tarde se infiltra sin permitir que el líquido se derrame debido a una posible sobresaturación de la superficie. Aquellas donde la vegetación ocupa el interior de la estructura, el agua no se infiltra al 100% y queda retenida en el tallo y hojas de las plantas (retención superficial). Aproximadamente la mitad de estas depresiones cuentan con bloques angulosos de basalto de granulometría homogénea. En estas superficies el agua penetra en los espacios (aproximadamente de 10 cm) que hay entre los grandes bloques. En las depresiones, donde coexisten bloques de basalto, escoria volcánica, bombas y bloques, la clasificación no es homogénea y por lo tanto, se espera tener una baja porosidad. Ocurre lo mismo en los canales de escoria. Las crestas de presión no tienen un comportamiento hidrológico preciso como estructura por formar sólo una pared de corteza basáltica fracturada, pero se le relaciona en la base de estas crestas, con depósitos de escoria principalmente. Por las anteriores atribuciones se le asignó al área una calificación de 3.

Area no. 2. Existen 175 hoyos de reforestación, 12 depresiones por colapso, 2 crestas de presión, 3 canales de escoria, 5 túneles de lava. Los túneles de lava son muy importantes pues tienen de floramiento más de tres metros de longitud. La calificación que se propuso a las estructuras en este lugar es de 4.

Area no. 3. Se encontraron en la superficie importantes depresiones por colapso, túneles, cuevas, montículos de escoria y flujos de lava con superficies de fragmentos redondeados y granulometría homogénea de escoria. Estos flujos junto con los montículos de escoria cubren un 70% de las estructuras presentes. La calificación que se asignó es de 4.

Area no. 4. Las estructuras más representativas son las pequeñas cañadas que se forman en el contacto de las dos unidades de roca (basaltos y tobas). El brechamiento y la estratificación de las tobas, se observa únicamente en los cortes de la vía del tren. En el suelo de las terrazas existen madrigueras de algunos roedores. De esta manera, salvo las cañadas que se mencionaron anteriormente, el agua difícilmente circula por estas estructuras. Por lo tanto se

descarta la existencia de permeabilidades altas, y entonces se le asignó una calificación de 1.

Area no.5. El mayor número de estructuras son las depresiones de escoria y piroclastos. Los fragmentos son subredondeados y predominan dos tamaños diferentes (10 y 30 cm). A las anteriores estructuras le siguen en número los montículos de escoria de granulometría y forma homogénea. La calificación que se propuso en esta área es de 4.

Area no. 6. Son pocas las estructuras que se encuentran en superficie. Se llegan a distinguir algunos flujos de lava y montículos de escoria. Se asignó una calificación de 1,

Area no. 7. Se encontraron cuevas, tubos de lava, montículos de escoria, flujos de lava con superficies de escoria, crestas de presión y levees. Las cuevas y los flujos de lava son las estructuras más abundantes. El área tiene una calificación de 4.

5.6.4 PENDIENTE Y FORMA DEL TERRENO

5.6.4.1 PESO RELATIVO Y FACTORES EVALUATIVOS

Las pendientes se relacionan directamente con las formas que adquiere el relieve terrestre. La circulación del agua tiene comportamientos diferentes al atravesar terrenos con una pendiente determinada; por lo tanto, la asignación de un peso relativo arbitrario del 10% a este parámetro indicará su influencia en el proceso de infiltración. En las partes más altas y de mayor pendiente el agua desciende por gravedad. Las cimas de los flujos de lava por lo general, son superficies horizontales, aunque los flancos de las mismas tengan pendientes superiores a los 10°. En este caso entre más ancha sea la cima del flujo, mayor será la superficie de depósito para que el agua se infiltre. Las pendientes del Parque se distribuyen en los siguientes rangos (ver figuras 21 y 22): de 0° a 2°, de 3° a 4°, de 5° a 8°, de 9° a 16°, de 17° a 32°, de 33° a 64°, y de 65° a 90°.

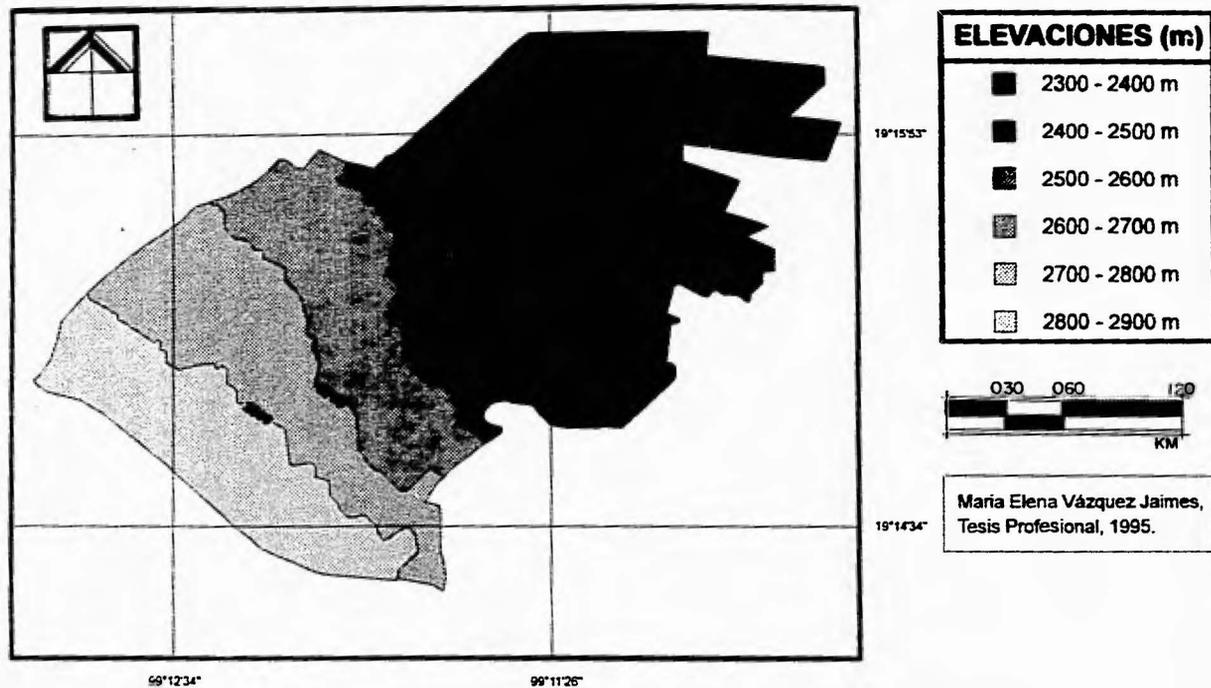


Figura 21.- Mapa de alturas. Parque Ecológico de la Ciudad de México

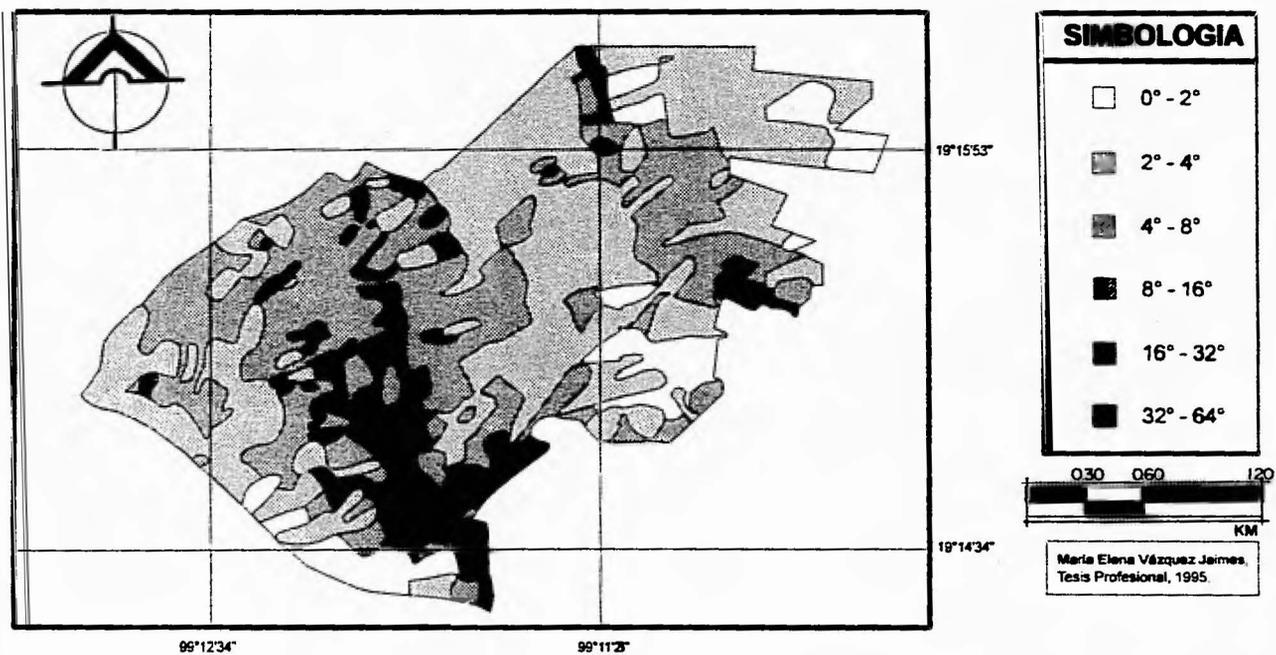


Figura 22.- Distribución de la pendiente del terreno. Parque Ecológico de la Ciudad de México

Las formas del relieve terrestre que caracterizan a la morfología del Parque son las siguientes:

- Malpaís. Paisaje que lo forman depresiones, montículos, canales, superficies escabrosas y flujos de lava.
- Terrazas. Son superficies planas estrechas y alargadas, delimitadas por un cambio brusco de pendiente. Tienen una pendiente aproximada de 7°.
- Cerros de pendientes pronunciadas. Son elevaciones con pendientes mayores a 32° y alturas aproximadas de 80 m.

En seguida se presentan las respectivas calificaciones:

Area no. 1. El paisaje del malpaís es el que predomina. Las pendientes son intermedias, pero llegan a ser en su mayoría entre 8° y 9°. Existen numerosas áreas donde los afloramientos naturales se han destruido y han pasado a formar superficies horizontales. Se le ha asignado una calificación de 3.

Area no. 2. Predominan las pendientes entre 4° y 2°. De la misma manera existen numerosas superficies horizontales donde el agua tiende a depositarse e infiltrarse tiempo después. La calificación que le corresponde es de 4.

Area no. 3. El terreno está compuesto por flujos de lava y montículos de escoria. Predomina una pendiente promedio de 7°. La calificación que le corresponde es de 2.

Area no. 4. Se localizan cerros de tobas con pendientes mayores a 30°. Al pie de estos se extienden terrazas de arena y arcilla con una pendiente menor a 4°. El área cubre principalmente las primeras, es decir, las mayores a 30°, pero la terrazas juegan un papel importante en la captación de los escurrimientos provenientes de las partes más altas. El factor que se le ha asignado es de 1.

Area no. 5. Tiene una pendiente promedio de 4° que corresponde a flujos de lava con cimas horizontales, canales y algunas depresiones mayores a 30m². La calificación que le corresponde es de 4.

Area no. 6. La pendiente que impera es menor a 4° que pertenece a una porción extensa de terrazas. Se le calificó con 4.

Area no. 7. Tiene una pendiente promedio de 7° . Son flujo de lava, superficies escabrosas, canales y depresiones. La calificación es de 3.

5.6.5 VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO

5.6.5.1 PESO RELATIVO Y FACTOR EVALUATIVO

La vegetación altera las características permeables de las rocas. Las raíces agrietan a los terrenos de materiales no consolidados, y en las rocas consolidadas tienden a ocupar el espacio abierto de las fracturas, y en ambas aceleran su proceso de descomposición. También una alta densidad de vegetación puede formar una importante área de retención de agua, retardando el proceso de infiltración. Este parámetro participa en la capacidad de infiltración del terreno con un peso relativo del 5%. El parque cuenta con 3 principales tipos de vegetación: bosque de encinos, zona de tepozanes, zona de sembradíos y pastos. El bosque de encinos tiene árboles de encinos y arbustos de raíces gruesas (variedad cedum o siempre viva); la zona de tepozanes tiene principalmente árboles de tepozanes pero coexisten magueyes, y diversas especies de matorrales y arbustos. A este tipo de vegetación se le identifica como matorral de zonas perturbadas. Por último, en la zona de sembradíos se cultiva maíz de temporal principalmente (Figura 23).

El uso del suelo es un parámetro que ha modificado en gran parte a la naturaleza permeable de las rocas. En condiciones naturales, es decir, antes de la invasión de predios y de la construcción de obras públicas. El medio superficial contaba con las condiciones necesarias para que el agua de lluvia se

infiltrara casi en un 90% . Esto lo demuestra la alta densidad de estructuras y fracturas en porciones que aun quedan intactas. Por tal motivo, se piensa que el uso del suelo tiene un peso relativo del 15%; por considerarse zona "protegida" es importante en la capacidad de infiltración del terreno. Los principales usos del suelo que se le han destinado al Parque Ecológico en orden de importancia son los siguientes:

- **Uso de conservación ecológica**, aunque en los planos oficiales el uso se indica como uso de forestal restringido (carta del uso de suelo de la Delegación Tlalpan, 1986)
- **Uso habitacional** (predios abandonados, casas habitación y residencias desocupadas, residencias de uso restringido).
- **Uso de servicios públicos** (vías de comunicación, tendidos eléctricos, líneas telefónicas, viveros y áreas de recreación).
- **Uso destinado a la construcción de obras públicas** (2 tanques de almacenamiento de agua y tuberías para agua).
- **Uso destinado a la extracción de recursos naturales** (canteras)
- **Uso destinado a las actividades agrícolas** (parcelas de maíz).
- **Uso Urbano** (tiraderos de basura y desechos sólidos de construcción).
- **Uso industrial** (1 planta de cemento).

Los correspondientes factores evaluativos se presentan a continuación:

El mayor impacto del uso del suelo es aquel que cambia completamente la estructura y composición del terreno, en el sentido de desfavorecer a su capacidad de infiltración. En el caso de la vegetación, se piensa que un área cubierta por bosques de encinos y plantas asociadas no perjudica a su

capacidad de infiltración debido al grosor considerable de sus raíces y al estar sobre terrenos de basalto recientes los cuales son resistentes al intemperismo de estas plantas y generan poco suelo. En un área perturbada la variedad de especies que cubren a la roca es mayor, y también se ha desarrollado un espesor más grande de suelo. Estas características originan una disminución en la capacidad de infiltración del terreno.

Area no. 1. Vegetación predominante: árboles de tepozanes, matorral de zona perturbada, magueyes y otras cactáceas. Se le dió una calificación de 2.

Uso de suelo: aproximadamente $2/4$ de la superficie es por uso habitacional de predios abandonados, $1/4$ de obras públicas (vías de acceso y líneas eléctricas) y el resto por tuberías. Se le dió la calificación de 2.

Area no. 2. La vegetación consiste de tepozanes, matorrales de zonas perturbadas, magueyes y otras cactáceas, además de pasto incipiente sobre suelos que no son originarios. Existen grupos de encinos en porciones separadas. la calificación propuesta fue de 3.

Uso de suelo. Principalmente es el uso destinado a la construcción de obras públicas como lo es la construcción de 2 tanques de almacenamiento; uno con capacidad de 50 millones de litros y otro de menor capacidad. Canales y tuberías comunican a estos dos depósitos. Esta obra ocupa aproximadamente $3/4$ partes del área, el resto está destinado al uso de obras públicas como caminos y la instalación de un vivero y de una cantera. Se le dió una calificación de 2.

Area no. 3. Tipo de vegetación: Bosque de encinos y arbustos asociados (Cedum), con algunos tepozanes y matorrales de zonas perturbadas. La calificación que se le asignó fue de 3.

Uso de suelo. $3/4$ a uso habitacional restringido y el resto se destina a caminos y veredas. La calificación que se le asignó fue de 3.

Area no. 4. Vegetación. Árboles de encinos, pasto y hojarazca. La calificación que se le asignó fue de 2.

Uso del suelo. 3/4 se destina al uso de conservación ecológica y el resto a caminos, vías y veredas. La calificación que se le asignó fue de 4.

Area no. 5. Vegetación compuesta de árboles de encino, matorrales asociados al bosque de encinos (Cedum), algunos tepozanes y plantas asociados a esta especie. Se puede decir que es una vegetación mixta por lo tanto se le da una calificación de 2.

Uso del suelo. 2/4 partes se destinan al uso de conservación, 1/4 al uso de caminos y veredas, y el resto al residencial actualmente sin uso. Le corresponde un factor evaluativo de 3.

Area no. 6. Vegetación. Se compone principalmente de pastos y maíz y algunos árboles de encinos. Su factor evaluativo es de 3.

Uso del suelo. El principal uso del suelo es destinado al uso agrícola, habitacional restringido y de recreación. Por lo tanto, se le asignó una calificación de 3.

Area no. 7. Vegetación. Esta cubierta por un bosque de encinos y sus plantas asociadas. Algunos tepozanes la cubren en forma parcial. La calificación que se le asignó fue de 2.

Uso del suelo. Principalmente se destina al uso de conservación ecológica, pero influyen en los límites del parque los asentamientos del área de Tlalmille, pues se han instalado depósitos de basura adentro de la superficie confiscada. La calificación que se le asignó fue de 2.

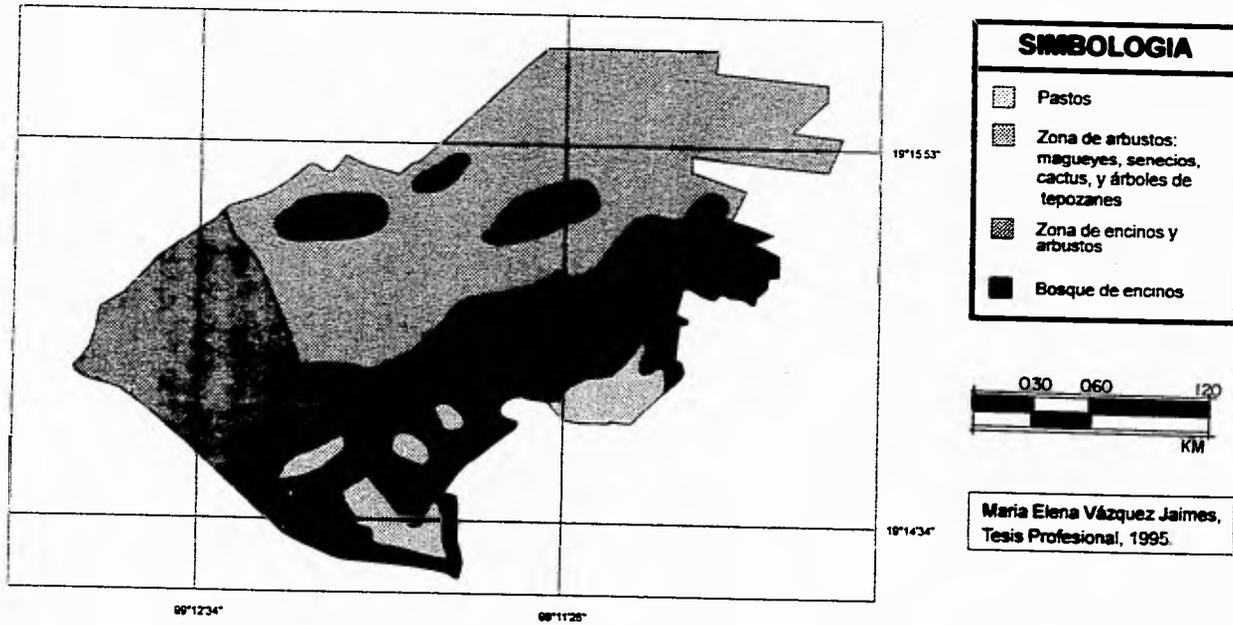


Figura 23.- Plano de vegetación. Parque Ecológico de la Ciudad de México

5.7 RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron para áreas de igual tamaño (225 m X 435 m) son los siguientes:

Area número 1. El fracturamiento de la roca es el parámetro que favorece más a la infiltración. El tipo de vegetación y el uso del suelo propician que el agua de lluvia no logre infiltrarse y se pierda por otros procesos. La capacidad de infiltración del terreno en esta superficie es de 3.05.

Area número 2. La pendiente del terreno y las estructuras que existen son los parámetros que más favorecen a la infiltración, pero las condiciones del fracturamiento y del uso del suelo eliminan una posible capacidad alta de infiltración cuyo valor es de 2.95.

Area número 3. Las estructuras y La composición litológica (tipo de roca) contribuyen a que el agua se infiltre, y también aunque en menor grado, los parámetros correspondientes al fracturamiento y uso del suelo. La pendiente es el único factor en importancia que desfavorece al proceso. La capacidad de infiltración para esta superficie es de 3.35.

Area número 4. El fracturamiento es el parámetro de mayor importancia que propicia una alta infiltración y en menor grado el uso del suelo, pero, tanto la composición litológica como las estructuras disminuyen a la capacidad de infiltración la que tiene un valor de 2.45.

Area número 5. La composición litológica y las estructuras le proporcionan un valor alto a la capacidad de infiltración. El fracturamiento y la pendiente del terreno también influyen en el valor en menor grado. La vegetación es el parámetro que perjudica a la infiltración de tal manera que logra disminuir el resultado final. La capacidad de infiltración del terreno es de 3.50.

Area número 6. El uso del suelo es el parámetro que está favoreciendo a la infiltración y en menor grado la vegetación y la pendiente; pero las características de las fracturas, estructuras y composición litológica hacen que la capacidad de infiltración adquiera un valor bajo de 1.90.

Area número 7. Las estructuras favorecen a la infiltración. La composición litológica y el fracturamiento contribuyen a que la capacidad de infiltración sea alta. El uso del suelo y la pendiente disminuyen un posible valor alto de la capacidad de infiltración la cual tiene un valor de 3.05.

La tabla 6 contiene los parámetros que se estudiaron en cada área y sus respectivos pesos relativos. En ella se anota el posible comportamiento hidrogeológico y su correspondiente evaluación para la posterior aplicación del método y la obtención final de la capacidad de infiltración. Del mismo modo, en la figura 24 se representa la localización de cada área estudiada y su respectivo valor.

TABLA 6. RESULTADOS FINALES DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACION

AREA NO. 1

PARAMETRO	PESO RELATIVO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	CALIFICACION	CAPACIDAD DE INFILTRACION
Composición litológica	20%	El agua se pierde por intercepción	3	$3 \times 0.20 = 0.60$
Fracturamiento	25%	El agua se infiltra	4	$4 \times 0.25 = 1.00$
Estructuras	25%	El agua se pierde por intercepción y evaporación	3	$3 \times 0.25 = 0.75$
Pendiente	10%	El agua se pierde por escurrimiento	3	$3 \times 0.10 = 0.30$
Vegetación	5%	El agua se pierde por intercepción	2	$2 \times 0.05 = 0.10$
Uso del suelo	15%	El agua se pierde por evaporación, intercepción y escurrimiento	2	$2 \times 0.15 = 0.30$

Capacidad Total = 3.05

AREA NO. 2

PARAMETRO	PESO RELATIVO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	CALIFICACION	CAPACIDAD DE INFILTRACION
Composición litológica	20%	El agua se pierde por intercepción	3	$3 \times 0.20 = 0.60$
Fracturamiento	25%	El agua se pierde por escurrimiento	2	$2 \times 0.25 = 0.50$
Estructuras	25%	El agua se infiltra	4	$4 \times 0.25 = 1.00$
Pendiente	10%	El agua se pierde por escurrimiento	4	$4 \times 0.10 = 0.40$
Vegetación	5%	El agua se pierde por retención	3	$3 \times 0.05 = 0.15$
Uso del suelo	15%	El agua se pierde por retención y escurrimiento	2	$2 \times 0.15 = 0.30$

Capacidad Total = 2.95

AREA NO. 3

PARAMETRO	PESO RELATIVO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	CALIFICACION	CAPACIDAD DE INFILTRACION
Composición litológica	20%	El agua se infiltra	4	$4 \times 0.20 = 0.80$
Fracturamiento	25%	El agua se pierde por escurrimiento	3	$3 \times 0.25 = 0.75$
Estructuras	25%	El agua se infiltra	4	$4 \times 0.25 = 1.00$
Pendiente	10%	El agua se pierde por intercepción y escurrimiento	2	$2 \times 0.10 = 0.20$
Vegetación	5%	El agua se pierde por intercepción	3	$3 \times 0.05 = 0.15$
Uso del suelo	15%	El agua se pierde por intercepción	3	$3 \times 0.15 = 0.45$

Capacidad Total = 3.35

AREA NO. 4

PARAMETRO	PESO RELATIVO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	CALIFICACION	CAPACIDAD DE INFILTRACION
Composición litológica	20%	El agua se pierde por escurrimiento	2	2×0.20
Fracturamiento	25%	El agua se infiltra	4	4×0.25
Estructuras	25%	El agua se pierde por escurrimiento	1	1×0.25
Pendiente	10%	El agua se pierde por escurrimiento	1	1×0.10
Vegetación	5%	El agua se pierde por retención	2	2×0.05
Uso del suelo	15%	El agua se infiltra	4	4×0.15

Capacidad Total = 2.45

TABLA 6 (continuación). RESULTADOS FINALES DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACION

AREA NO. 5

PARAMETRO	PESO RELATIVO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	CALIFICACION	CAPACIDAD DE INFILTRACION
Composición litológica	20%	El agua se infiltra	4	4 x 0.20
Fracturamiento	25%	El agua se pierde por escurrimiento	3	3 x 0.25
Estructuras	25%	El agua se infiltra	4	4 x 0.25
Pendiente	10%	El agua se infiltra	4	4 x 0.10
Vegetación	5%	El agua se pierde por retención	2	2 x 0.05
Uso del suelo	15%	El agua se pierde por retención	3	3 x 0.15

Capacidad Total = 3.50

AREA NO. 6

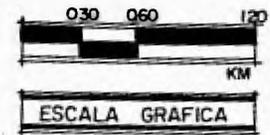
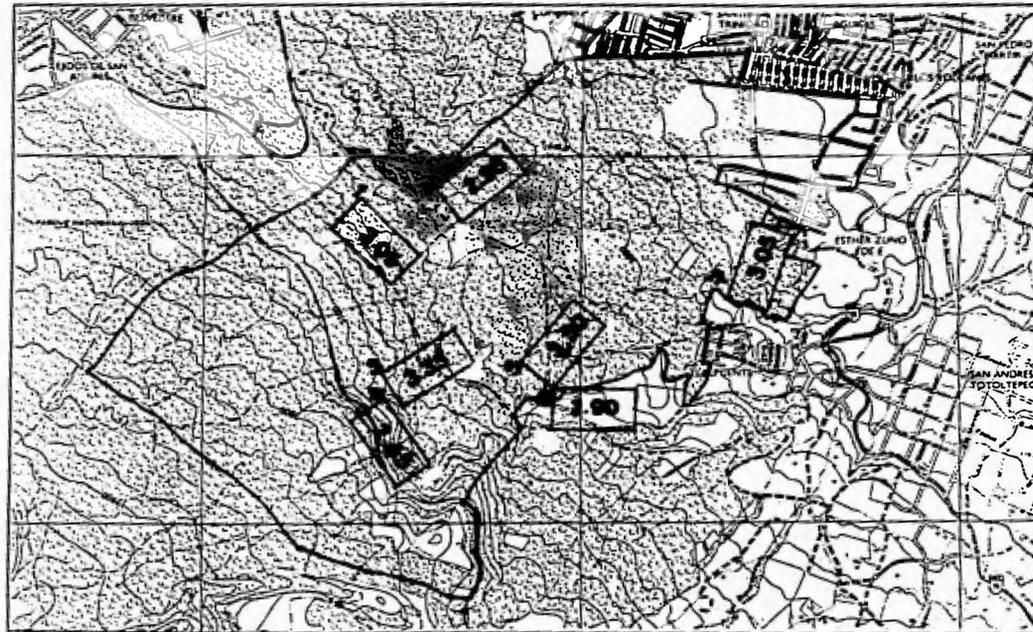
PARAMETRO	PESO RELATIVO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	CALIFICACION	CAPACIDAD DE INFILTRACION
Composición litológica	20%	El agua se pierde por retención	2	2 x 0.20
Fracturamiento	25%	El agua se pierde por escurrimiento	1	1 x 0.25
Estructuras	25%	El agua se pierde por retención	1	1 x 0.25
Pendiente	10%	El agua se infiltra	4	4 x 0.10
Vegetación	5%	El agua se infiltra	3	3 x 0.05
Uso del suelo	15%	El agua se infiltra	3	3 x 0.15

Capacidad Total = 1.90

AREA NO. 7

PARAMETRO	PESO RELATIVO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	CALIFICACION	CAPACIDAD DE INFILTRACION
Composición litológica	20%	El agua se infiltra	3	3 x 0.20
Fracturamiento	25%	El agua se pierde por escurrimiento	3	3 x 0.25
Estructuras	25%	El agua se infiltra	4	4 x 0.25
Pendiente	10%	El agua se pierde por retención	3	3 x 0.10
Vegetación	5%	El agua se pierde por retención	2	2 x 0.05
Uso del suelo	15%	El agua se pierde por retención	2	2 x 0.15

Capacidad Total = 3.05



Maria Elena Vázquez Jaimes,
Tesis Profesional, 1995.

Figura 24.- Mapa de Capacidades de Infiltración. Parque Ecológico de la Ciudad de México

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

La infiltración junto con el escurrimiento subterráneo y el escurrimiento superficial son hoy los elementos de mayor importancia para satisfacer la demanda de agua en las grandes ciudades. Por ello, su estudio debe de encaminarse a cuantificar el volumen de agua disponible.

La infiltración natural es un medio de recarga. Los métodos que se utilizan para determinar su valor en las zonas altas donde esta tiene efecto, se basan en medidas directas, por medio de fórmulas empíricas y con la aplicación de la teoría de la infiltración. Para obtener buenos resultados con medidas directas es necesario contar con instrumentos que permitan obtener datos directos, precisos; aparatos que hasta la fecha no cumplen con esa cualidad y son demasiado costosos. Las fórmulas empíricas tienen que hacer uso de datos de escurrimiento y precipitación previamente determinados además de otros términos sin fundamento sólido. Los datos de lluvia y precipitación, para la mayoría de los casos no está disponible y por lo tanto su aplicación es restringida. La teoría de la infiltración para la construcción de modelos matemáticos, tiene un respaldo teórico muy fuerte, pero probablemente no se ajuste a las condiciones reales dadas la numerosas variables que intervienen.

La cantidad de agua que se infiltra depende de las condiciones físicas del terreno por el que se va a infiltrar. La composición litológica, las características del fracturamiento, la forma y dimensiones de las estructuras presentes, la pendiente, el tipo y la densidad de vegetación, y el uso del suelo influyen de manera directa en la capacidad que tiene el terreno para infiltrar el agua. La evaluación de las propiedades y características del medio permeable a través de la medición de sus componentes físicas nos dá una idea del comportamiento de la capacidad de infiltración.

A la infiltración se le puede estudiar como un subsistema del ciclo hidrológico. Una propiedad hidrológica del medio superficial es su capacidad de infiltración. A su vez, ésta tiene 4 elementos que afectan a dicha propiedad. El que tiene

que ver con las características superficiales del medio permeable integra a los siguientes parámetros. a) composición litológica, b) fracturamiento, c) estructuras, d) pendiente del terreno, e) densidad de vegetación, y f) uso del suelo. Desde el punto de vista sistemático el comportamiento de cada uno afecta al comportamiento general de la capacidad de infiltración del terreno y esta a su vez, a la infiltración del sistema. Por lo tanto, los resultados que se obtienen por medio del estudio de cada uno y su posterior integración, nos definen las condiciones que presenta el terreno en cuanto a su capacidad de infiltración.

Se aplicó el método propuesto a una superficie de 727 hectáreas de terreno federal que se conoce como Parque Ecológico de la Ciudad de México.

El área total del acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México es de 3448 km² considerando al acuitardo y al acuífero principal, de los cuales probablemente una tercera parte le corresponda a la superficie de recarga de la Sierra Chichinautzin. Tiene una recarga efectiva de 15.6 m³/s provenientes del aporte del acuitardo y de la precipitación pluvial. Esta tesis protege una superficie importante en la que aproximadamente el 90 % del agua de lluvia se infiltra aportando un volumen considerable al valor de recarga de la Sierra Chichinautzin.

Los resultados que se obtuvieron para áreas homogéneas de 9.78 hectáreas (225 m x 435 m) fueron los siguientes: Área 1, $I_{fit} = 3.05$; área 2, $I_{fit} = 2.95$; área 3, $I_{fit} = 3.35$; área 4, $I_{fit} = 2.45$; área 5, $I_{fit} = 3.5$; área 6, $I_{fit} = 1.90$, y área 7, $I_{fit} = 3.05$.

Las superficies de mayor capacidad de infiltración son el área no. 2 y el área no. 5. En éstas, la composición litológica, las estructuras y la pendiente le dan un valor muy alto a dicha propiedad. Los resultados finales comparativamente están muy próximos; esto se debe a que es una zona de recarga natural con condiciones hidrogeológicas similares. En general el área de estudio se encuentra en una zona que es muy permeable, por lo tanto se le considera dentro de parte de la zona sur de recarga natural del sistema acuífero de la

Cuenca de México. Se recomienda la total conservación del Parque, y que únicamente por ahora, se destine a las actividades que ayuden a su preservación. Para cualquier uso que necesariamente se proyecte a futuro se propone proteger a las superficies de mayor capacidad de infiltración, de tal manera que, únicamente se puedan modificar las de menor capacidad.

El método propuesto para determinar la capacidad de infiltración del terreno proporcionó en una primera aplicación los resultados esperados: Conocer dentro de los límites de áreas de recarga zonas de mayor y menor capacidad de infiltración sin que medie sólo la apreciación subjetiva del hidrólogo.

Debe de existir un reglamento de construcción para las colonias que colindan con el límite del Parque de tal manera que se proteja a las zonas ya perturbadas. Es decir, frenar el crecimiento de más viviendas y en el caso de nuevos pavimentos, evitar el uso de materiales inadecuados. Se le recomienda a las autoridades correspondientes implementar técnicas de infiltración inducida las cuales no son costosas, propician la participación ciudadana, y generan conciencia del uso y ahorro adecuado del agua.

Las ventajas de esta propuesta son:

El método se aplica a cualquier zona con diversidad litológica donde se requiera conocer la capacidad de infiltración del terreno. En este sentido, si se llega a aplicar el método bajo estas condiciones esperamos contar con un rango más amplio de resultados. Para una zona de poca superficie se esperará encontrar condiciones geológicas similares y junto con ellas valores de capacidades de infiltración muy próximos.

En términos económicos, el método es accesible al no tener que contar con tecnologías y procedimientos sumamente costosos y de difícil obtención.

Minimiza las delimitaciones subjetivas derivadas de diferentes apreciaciones y percepciones al incluir mediciones y ponderaciones a pesos estimados.

Proporciona a las autoridades encargadas de normar y vigilar el reglamento del uso del suelo y argumentos más sólidos para la protección del medio ambiente.

Propone unificar los criterios que se utilizan para demarcar a las zonas de recarga natural en el sistema de una cuenca mediante el seguimiento de una serie de pasos ordenados.

Se consideran como desventaja que el método por sí solo no proporciona información del volumen infiltrado por lo que en este caso, es necesario recurrir a otras metodologías.

Para demarcar cuadros de grandes superficies se requiere un control topográfico. Esta actividad puede retardar la obtención de los resultados finales.

Por último, se recomienda continuar el estudio de este método pues sólo es una propuesta que requiere de la crítica y de la observación de los expertos en la materia para hacerla válida en su uso y aplicación.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA .

Academia de la Investigación Científica, A. C., Academia Nacional de Ingeniería, A. C., Academia Nacional de medicina, A. C., 1995. El agua y la Ciudad de México. México, 353 p.

Alvarez Cruz E., 1992. Condiciones de temperatura y precipitación en el SW del D.F., tesis profesional, Facultad de Filosofía y Letras UNAM.

Aparicio Mijares, M., 1989. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, México, 302 p.

Bouwer H., 1978. Groundwater Hydrology. McGraw-Hill, U.S.A., 480 p.

Campos Aranda D., 1987. Procesos del Ciclo Hidrológico. Vol. 1, tomo 1/2, Universidad de San Luis Potosí, SLP.

Campos Aranda D., 1987. Procesos del Ciclo Hidrológico. Vol. 1 tomo 2/2, Universidad de San Luis Potosí, SLP.

Castany G., 1971. Tratado de aguas subterráneas. Omega, España, 672 p.

Castany G., 1975. Prospección y Explotación de las aguas subterráneas. Omega, España, 738 p.

Chow Vente et. al., 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Colombia, 584 p.

Chávez Gullén, R., 1977. El agua subterránea en relación con los fenómenos que integran el Ciclo Hidrológico. Bol. Soc. Geol. Mex., tomo 37, no. 1, pp 29-39.

Cortés A. and Farvolden R. N., 1989. Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, México. Journal of Hydrology: 107 pp 147-153.

Cruickshank Villanueva C., 1992. Relación entre las aguas superficiales y subterráneas en una cuenca. Ingeniería Hidráulica en México, enero/abril IMTA.

Cruz Badilla R., 1977. Estudio Petrológico de la lava de la parte noreste del pedregal de San Angel, D.F. Bol. Soc. Geol. Mex., tomo 38, no. 1, pp 40-57.

Custodio Emilio y Ramón Llamas, 1976. Hidrología subterránea. Omega, España, 738 p.

Braja M. Das, 1990. Principles of geotechnical engineering. 2nd ed., PWS-KENT, USA, pp 93-121.

De Cserna, Z., et. al., 1987(1988). Estructura geológica, gravimetría sísmica y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Bol. 104, Instituto de Geología UNAM, 71p.

Deming H., 1979. El agua. Nuevo Mar, México, 343 p.

D.D.F. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica., 1986. Manual técnico de diseño, construcción, operación y mantenimiento de pozos en las Cuencas de México y del Alto Lerma. Capítulos 1 y 2.

Derrau M., 1981. Geomorfología. Ariel, Barcelona.

Donn W., 1978. La meteorología. Reverte, España, 610 p.

Durazo J. and Farvolden R. N., 1989. The Groundwater regime of the Valley of Mexico from Historic Evidence and field observations. Journal of Hydrology: 112, pp 171-190.

Ezcurra Exequiel, 1991. De las Chinampas a la Megalópolis. El medio ambiente en la Cuenca de México. Fondo de Cultura Económica, México.

Freeze Allan and Cherry John, 1979. Groundwater. Prentice-Hall, U.S.A. 604 p.

Guerra Peña F., 1980. Fotogeología. Facultad de Ingeniería, UNAM, 337 p.

Guerrero Legorreta M., 1991. El agua. Fondo de Cultura Económica, México 117 p.

Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A., 1986. Mecánica de Suelos. 3ª ed. Tomo 1, Limusa, México, 642 p.

Linsley Ray K. y Kohler M., 1977. Hidrología para ingenieros. McGraw-Hill, México, 386 p.

Llaugue Damoa F., 1971. ¿La meteorología? Pero si es muy fácil. Marcombo, S.A., España, 220 p.

Lugo Hubp J., 1991. Elementos de Geomorfología aplicada (métodos cartográficos). Instituto de Geografía, UNAM, 109 p.

Lugo Hubp J., 1984. Geomorfología del sur de la Cuenca de México. Serie Varía T.1, no. 9, Instituto de Geografía UNAM, 95 p.

Mooser F., 1975. Historia Geológica de la Cuenca de México. Memoria de las obras del sistema de Drenaje Profundo del D.F., D.D.F., tomo 1, pp 7-38.

Ortega Guerrero A. and Farvolden R.N., 1989. Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico. Journal of Hydrology: 110, pp 271-294.

Small R.J., 1989. Geomorphology and Hydrology. Longman Modular Geography Series, U K, 177 p.

Stanley N. Davis y De Wiest Roger J. M., 1971. Hidrología. Ariel, Barcelona 563 p.

Thornes J. B., 1990. Vegetation and erosion. Process and environments. John Wiley and sons LTD, Britain, 518 p.

Vázquez Sánchez E. y Jaimes Palomera R., 1989. Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, Vol. 28 no. 2, pp 133-190.

Wiesner C. J., 1970. Hidrometeorology. Chapman and Hall LTD, England 232 p.

Williams H. and McBirney, 1979. Volcanology. Freeman Cooper and Company, USA 397 p.

Wisler C. O., 1949. Hydrology. John Wiley Sons Inc. U.S.A. 419 p.

Zenón Fuentes A, 1991. El enfoque de sistemas en la solución de problemas. La elaboración del modelo conceptual. Cuadernos de planeación y sistemas no. 4, UNAM 38 p.

CARTOGRAFIA

Carta Urbana escala 1:20 000 Ciudad Universitaria. Sistema de información geográfica, S. A. Edición 1986.

Plano Uso del Suelo de la Delegación Tlalpan. D.D.F., edición 1986.

Carta topográfica escala 1:50 000 Ciudad de México (E14A39). INEGI, edición 1989.

Plano de delimitación, señalización y control del Parque Ecológico de la Ciudad de México Tlalpan, escala 1:5 000. D.D.F., edición 1986.

Carta Geológica de México escala 1:100 000. Instituto de Geología UNAM.

Fotografías aéreas escala 1:15 000 Ciudad de México 1991: L3-6, L3-7, L4-6, L4-7. Geocentro.

PLANOS E ILUSTRACIONES

**ESTUDIO PETROGRAFICO
PERFIL DEL SUELO
ANALISIS GRANULOMETRICOS
ILUSTRACIONES**

ANALISIS PETROGRAFICO

NO. DE MUESTRA: V-1

LOCALIZACIÓN: Afloramiento sobre la vía del tren, cotas arriba de las terrazas.

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:

Color: Gris claro y oscuro.
Textura: Tobácea.
Estructura: Compacta y pseudoestratificada.

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:

Textura: Piroclástica.
Mineralogía
Primarios: Andesina-oligoclasa, hornblenda, augita, vidrio y minerales opacos.
Secundarios: Hematita-limonita y minerales arcillosos.

RELACIÓN MINERALÓGICA:

Las plagioclasas presentan cotornos angulosos bien definidos.

CLASIFICACIÓN: Toba de composición traquiandesítica.

ORÍGEN: Orígen piroclástico anterior a la última manifestación del volcán xitle.

NO. DE MUESTRA: 1-AB

LOCALIZACIÓN: Afloramiento en el camino principal entre la entrada principal y el Seminario.

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:

Color: Gris oscuro con tonalidades rojizas.
Textura: Vesicular/afanítica.
Estructura: masiva.

DESCRIPCION MICROSCOPICA:

Textura: Porfídica/vesicular.

Mineralogía

Primarios: Andesina-labradorita y vidrio básico.

Secundarios: Hematita y minerales arcillosos.

Accesorios: Augita, enstatita, olivino y minerales opacos.

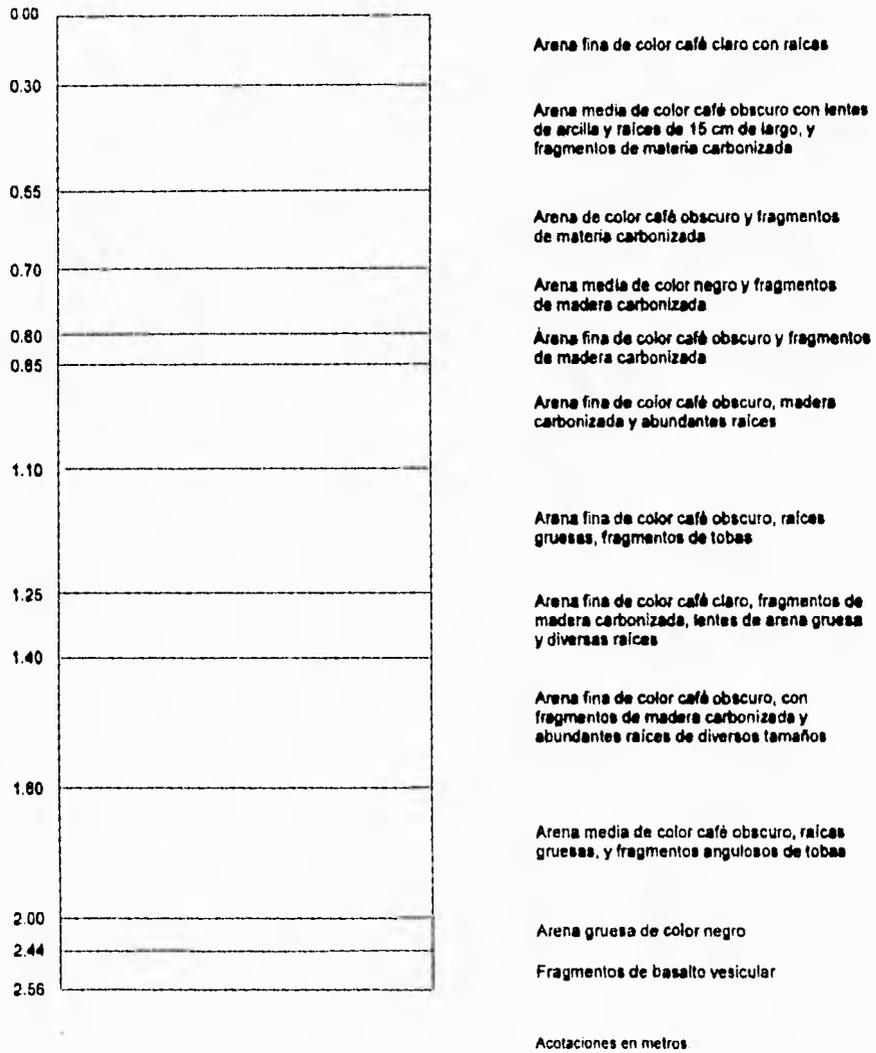
RELACIÓN MINERALÓGICA:

Los cristales de plagioclasas y minerales accesorios se encuentran en una matriz de vidrio básico.

CLASIFICACION: Andesita basáltica.

ORIGEN: Proviene de un flujo de lava del volcán Xitle.

Analizó: Ma. Elena Vázquez Jaimes.
Tesis Profesional 1995.



Perfil del suelo de una terraza. Parque Ecológico de la Ciudad de México

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA TERRAZA. PARQUE ECOLOGICO DE TALAPAN.

Muestra 12-1

Número de malla	Abertura mm	Peso retenido gr	Peso acumulado gr	% acumulado	% que pasa
4	4.76	1.18	1.18	1.54	98.46
8	2.38	3.45	4.63	6.06	93.94
10	1.68	1.77	6.40	8.38	91.62
12	1.41	0.59	6.99	9.15	90.85
20	0.84	7.45	14.44	18.92	81.08
40	0.42	28.12	42.56	55.76	44.24
60	0.25	15.28	57.84	75.78	24.22
100	0.15	12.32	70.16	91.92	8.08
200	0.07	5.60	75.76	99.26	0.74
charola	0	0.56	76.32	100	0

Contenido de agua = 12.62%

% de gruesos = 91.73

% de finos = 8.27

Muestra 10-3

Número de malla	Abertura mm	Peso retenido gr	Peso acumulado gr	% acumulado	% que pasa
4	4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.38	0.36	0.36	1.63	98.37
10	1.68	0.47	0.83	3.77	96.23
12	1.41	0.20	1.03	4.68	95.32
20	0.84	2.18	3.21	14.59	85.41
40	0.42	5.68	8.89	40.42	59.58
60	0.25	3.70	12.59	57.25	42.75
100	0.15	4.70	17.29	78.62	21.38
200	0.07	4.57	21.86	99.40	0.60
charola	0	0.13	21.99	100.00	0.00

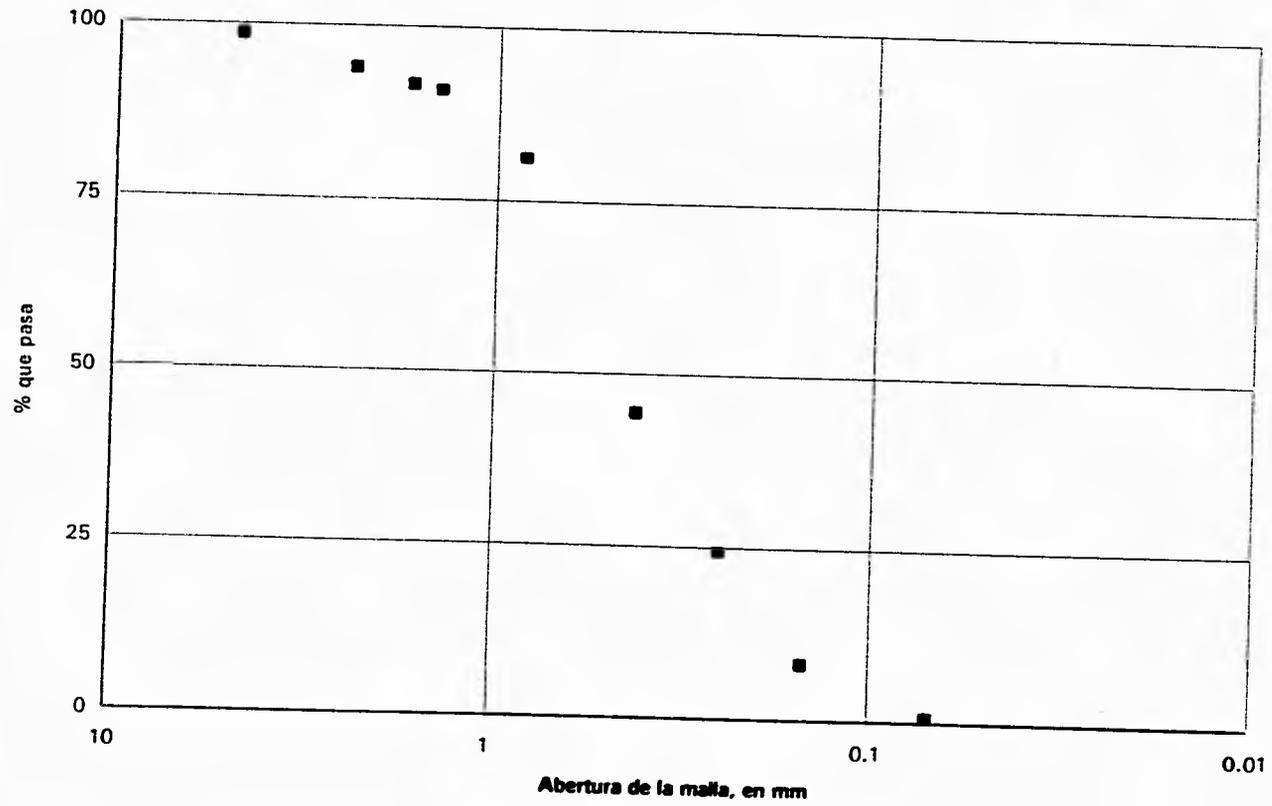
Contenido de agua = 49.73%

% de gruesos = 48.35

% de finos = 51.65

Muestra 12-1 Curva Granulométrica

Cu = 3.9
Cc = 0.95

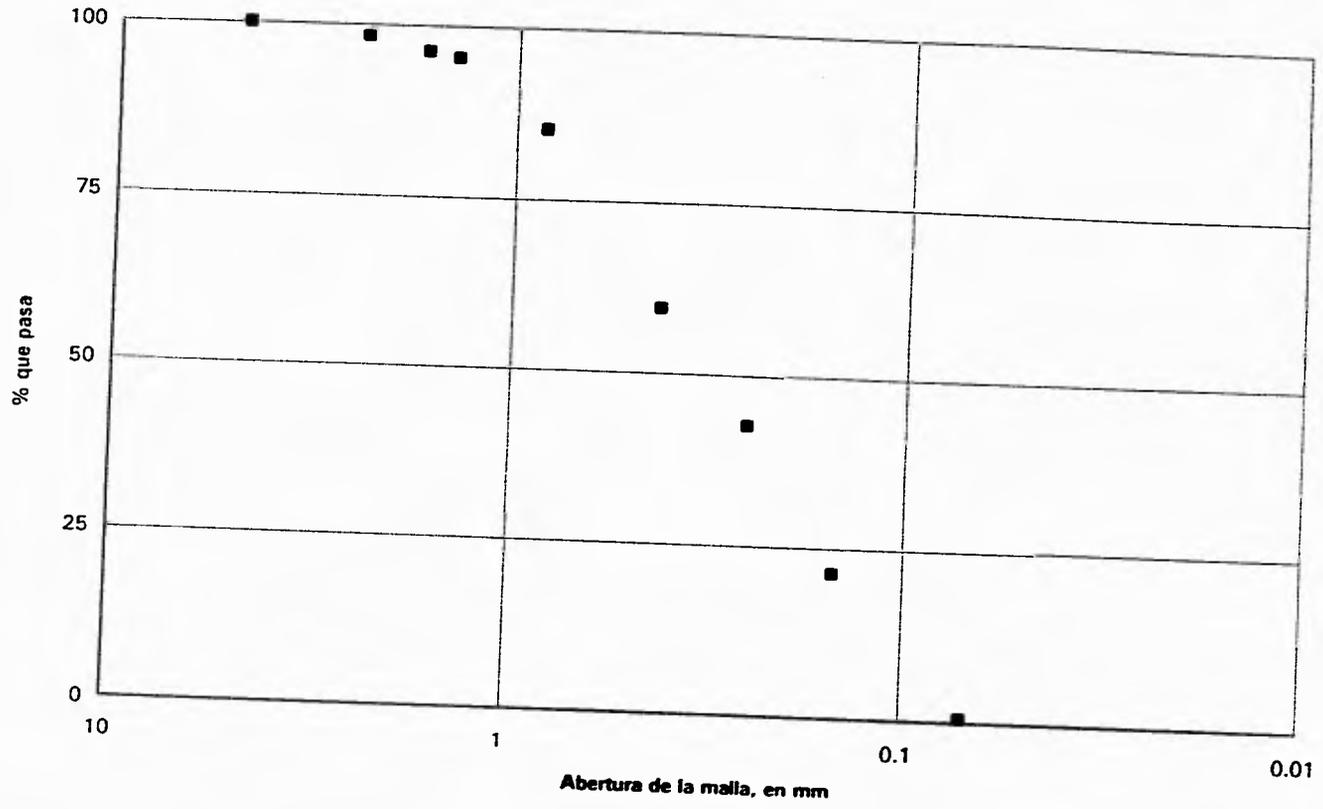


TESIS SIN PAGINACION

COMPLETA LA INFORMACION

Muestra 10-3 Curva Granulométrica

Cu = 4.3
Cc = 0.76



Muestra 8-5

Número de malla	Abertura mm	Peso retenido gr	Peso acumulado gr	% acumulado	% que pasa
4	4.76	0.11	0.11	0.37	99.63
8	2.38	1.16	1.27	4.31	95.69
10	1.68	0.87	2.14	7.26	92.74
12	1.41	0.22	2.36	8.01	91.99
20	0.84	3.25	5.61	19.04	80.96
40	0.42	9.71	15.32	52.00	48.00
60	0.25	5.17	20.49	69.55	30.45
100	0.15	5.16	25.65	87.06	12.94
200	0.07	3.65	29.30	99.45	0.55
charola	0	0.16	29.46	100.00	0.00

Contenido de agua = 35.93%

% de gruesos = 54.36

% de finos = 45.64

Muestra 5-8

Número de malla	Abertura mm	Peso retenido gr	Peso acumulado gr	% acumulado	% que pasa
4	4.76	0.43	0.43	1.92	98.08
8	2.38	0.45	0.88	3.94	96.06
10	1.68	0.34	1.22	5.47	94.53
12	1.41	0.05	1.27	5.69	94.31
20	0.84	1.35	2.62	11.74	88.26
40	0.42	5.67	8.29	37.17	62.83
60	0.25	4.69	12.98	58.20	41.80
100	0.15	5.40	18.38	82.42	17.58
200	0.07	3.85	22.23	99.68	0.32
charola	0	0.07	22.30	100.00	0.00

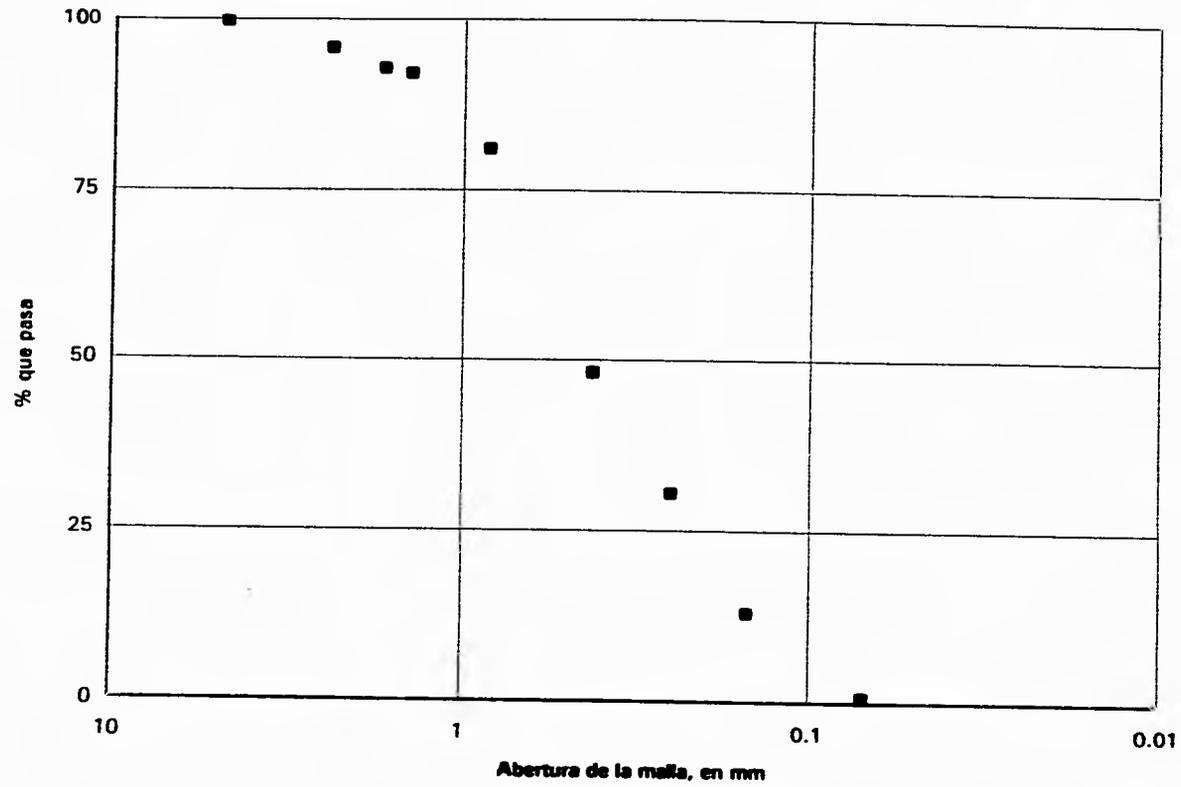
Contenido de agua = 27.76%

% de gruesos = 49.58

% de finos = 50.41

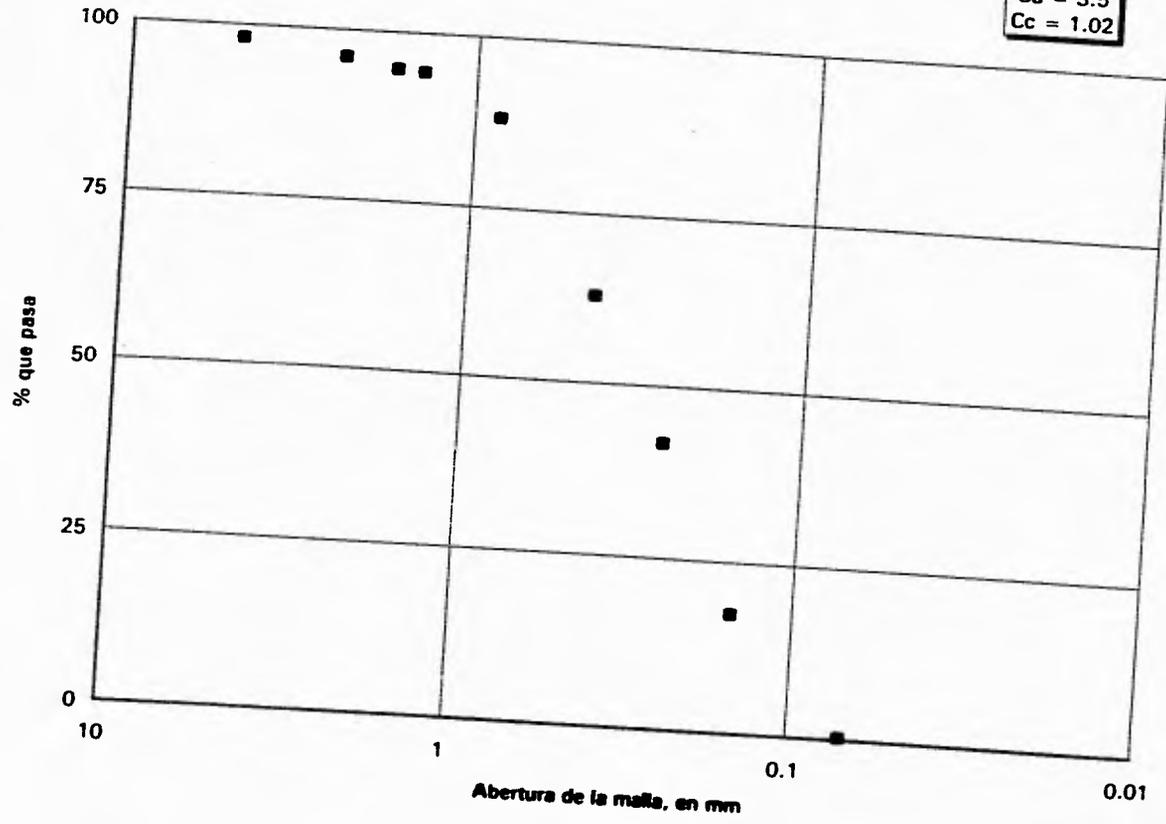
Muestra 8-5 Curva Granulométrica

Cu = 3.3
Cc = 1.02



Muestra 5-8 Curva Granulométrica

Cu = 3.5
Cc = 1.02



Muestra 3-10

Número de malla	Abertura mm	Peso retenido gr	Peso acumulado gr	% acumulado	% que pasa
4	4.76	0.14	0.14	0.51	99.49
8	2.38	0.76	0.90	3.28	96.72
10	1.68	0.40	1.30	4.74	95.26
12	1.41	0.10	1.40	5.10	94.90
20	0.84	1.97	3.37	12.29	87.71
40	0.42	7.53	10.99	40.08	59.92
60	0.25	5.81	16.71	60.94	39.06
100	0.15	6.23	22.94	83.66	16.34
200	0.07	4.30	27.24	99.34	0.66
charola	0	0.18	27.42	100.00	0.00

Contenido de agua = 31.45%

% de gruesos = 55.05

% de finos = 44.94

Muestra 1-12

Numero de malla	Abertura mm	Peso retenido gr	Peso acumulado gr	% acumulado	% que pasa
4	4.76	0.47	0.47	1.66	98.34
8	2.38	0.62	1.09	3.85	96.15
10	1.68	0.56	1.65	5.83	94.17
12	1.41	0.17	1.82	6.43	93.57
20	0.84	2.32	4.14	14.63	85.37
40	0.42	7.68	11.82	41.78	58.22
60	0.25	5.82	17.64	62.35	37.65
100	0.15	6.23	23.87	84.30	15.70
200	0.07	4.33	28.20	99.68	0.32
charola	0	0.09	28.29	100.00	0.00

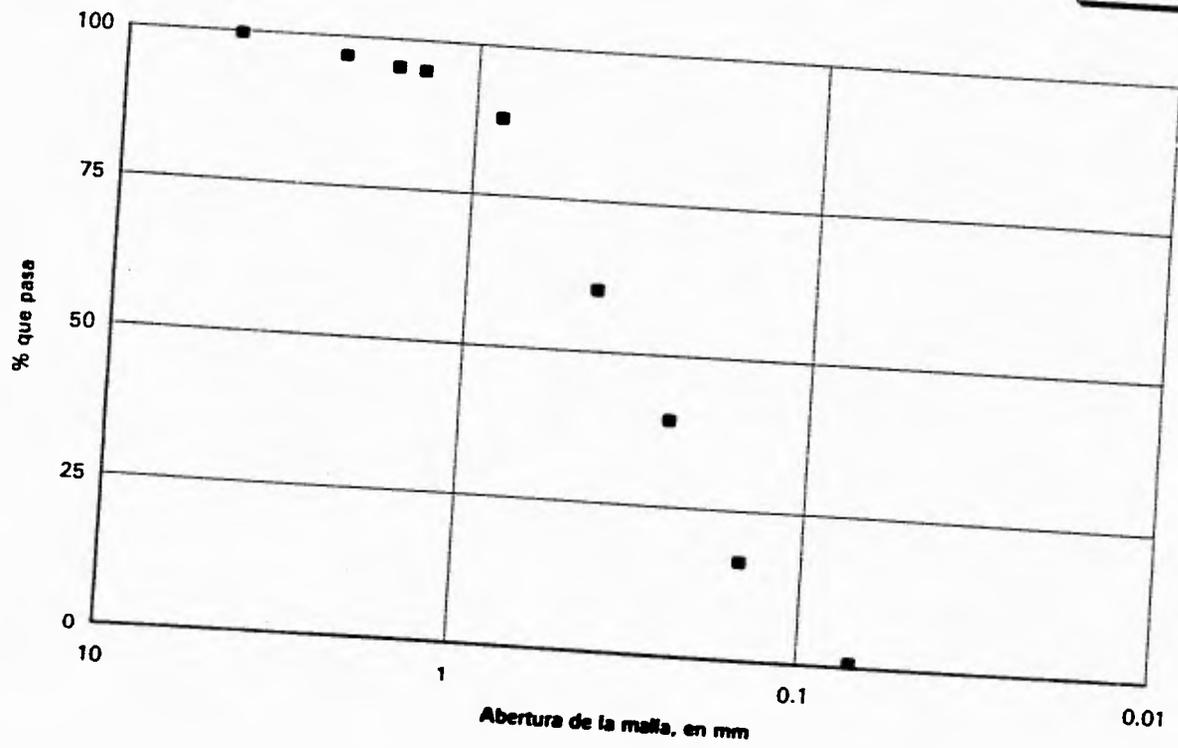
Contenido de agua = 21.09%

% de gruesos = 62.90

% de finos = 37.09

Muestra 3-10 Curva Granulométrica

Cu = 3.6
Cc = 1.09



Muestra 1-12 Curva Granulométrica

Cu = 2.2
Cc = 0.55

