



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

8

ZFJ

FACULTAD DE INGENIERIA

"APLICACION DE METODOS PARA EVALUAR LA
RELACION LLUVIA - ESCURRIMIENTO"

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

ALICIA ALLIER ONDARZA



MEXICO, D. F.:

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-011/94

Señorita
ALICIA ALLIER ONDARZA
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. JUAN CARLOS FERNANDEZ CASILLAS**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

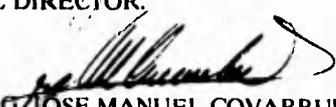
"APLICACION DE METODOS PARA EVALUAR LA RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO"

- I. INTRODUCCION
- II. PRECIPITACION Y ESCURRIMIENTO
- III. METODOS DE RELACION LLUVIA ESCURRIMIENTO
- IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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 deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universidad, a 18 de mayo de 1994.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl

**A mi familia en la
que he encontrado el
apoyo para el logro
de todas mis metas.**

Me enorgullezco de haber realizado mis estudios en la Universidad Nacional Autónoma de México y especialmente en esta honorable Facultad de Ingeniería que me brindó los conocimientos necesarios para mi ejercicio profesional, por lo que, establezco el compromiso de retribuirle todo lo que me sea posible.

Quiero agradecer a todos mis profesores el interés por compartir sus conocimientos y experiencia invaluable.

Un especial reconocimiento al Ing. Juan Carlos Fernández Casillas quien aceptó dirigir esta tesis y en quien encontré un amigo.

Así mismo, quiero agradecer a mis compañeros y amigos la solidaridad, confianza y amistad que me han brindado a lo largo de estos años.

Mi gratitud a CIEPS Consultores el haberme dado la oportunidad de trabajar con ellos siendo aún estudiante.

Quiero también agradecer al Ing. Javier Gutiérrez Reynoso su valioso apoyo.

A Felipe García Govea el favor de su tiempo y amistad incondicional.

Agradezco también los valiosos comentarios que me hizo el Físico Juan José Espinosa Rivera.

A mi hermana Nora Allier Ondarza quien tuvo la paciencia y la dedicación para elaborar los dibujos de este trabajo.

**APLICACION DE METODOS PARA
EVALUAR LA RELACION
LLUVIA-ESCURRIMIENTO.**

APLICACION DE METODOS PARA EVALUAR LA RELACION
LLUVIA-ESCURRIMIENTO

INDICE

I.- INTRODUCCION.	1
II.- PRECIPITACION Y ESCURRIMIENTO.	4
2.1. <u>Precipitación.</u>	
2.1.1. Formación de la precipitación.	4
2.1.2. Clasificación de la precipitación en relación con los mecanismos de enfriamiento de las masas de aire.	4
2.1.3. Medición de la precipitación.	6
2.1.4. Procesamiento de la información.	13
2.1.5. Exactitud en las mediciones y estimación de los registros faltantes.	15
2.1.6. Estimación de la precipitación promedio sobre un área.	19
2.2. <u>Escurrimiento.</u>	
2.2.1. Proceso de escurrimiento.	29
2.2.2. Factores que afectan el escurrimiento.	31
2.2.3. Medición del escurrimiento.	31
2.2.4. Análisis de hidrogramas.	43
2.2.5. Cálculo de volúmenes escurridos y estimación de registros faltantes.	47
III.- METODOS DE RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO.	49
3.1. <u>Introducción.</u>	
3.1.1. Generalidades.	49
3.1.2. Precipitación efectiva.	50
3.2. <u>Métodos para calcular la relación lluvia-escurrimiento.</u>	
3.2.1. Método de envolventes.	58
3.2.2. Método racional.	60
3.2.3. Método de Chow.	66
3.2.4. Hidrograma unitario.	68
3.2.5. Método de la curva S.	71
3.2.6. Hidrograma unitario instantáneo.	76
3.2.7. Hidrogramas unitarios sintéticos.	79
IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	89
ANEXO A	
BIBLIOGRAFIA	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Formación de la precipitación.....	5
Figura 2.2.a.	Precipitación ciclónica.....	7
Figura 2.2.b.	Precipitación convectiva.....	7
Figura 2.2.c.	Precipitación orográfica.....	7
Figura 2.3.	Regionalización meteorológica a partir de la precipitación.....	8
Figura 2.4.a.	Estación climatológica con pluviómetro.....	11
Figura 2.4.b.	Pluviógrafo.....	11
Figura 2.5.	Imagen de satélite para la detección de nubosidad.....	14
Figura 2.6.	Deducción de datos faltantes por regresión lineal.....	17
Figura 2.7.	Polígonos de Thiessen.....	21
Figura 2.8.	Método de isoyetas.....	22
Figura 2.9.a.	Curva masa media.....	24
Figura 2.9.b.	Hietograma de alturas de precipitación.....	24
Figura 2.9.c.	Hietograma de intensidades.....	24
Figura 2.9.d.	Construcción de la gráfica (i-d-T).....	24
Figura 2.9.e.	Curvas (i-d-T).....	28
Figura 2.10.	Representación del ciclo hidrológico.....	30
Figura 2.11.	Regionalización a partir del escurrimiento...	32
Figura 2.12.a.	Tirante crítico artificial.....	35
Figura 2.12.b.	Tirante crítico natural.....	35
Figura 2.13.a.	Vertedor triangular.....	37
Figura 2.13.b.	Vertedor rectangular.....	37
Figura 2.14.	Relación sección-pendiente.....	38

Figura 2.15.a.	Velocidad del flujo en sección transversal...	42
Figura 2.15.b.	Curva elevación-gasto.....	42
Figura 2.16.	Componentes del hidrograma.....	44
Figura 2.17.	Separación del flujo base.....	46
Figura 3.1.a.	Determinación del índice de infiltración.....	52
Figura 3.1.b.	Índice de precipitación antecedente.....	52
Figura 3.2.	Número de escurrimiento N.....	54
Figura 3.3.	Método de envolventes.....	59
Figura 3.4.	Cálculo del gasto máximo utilizando la fórmula racional.....	64
Figura 3.5.	Factor de reducción de pico.....	67
Figura 3.6.a.	Hietograma de intensidades de precipitación..	70
Figura 3.6.b.	Hidrograma de escurrimiento total.....	70
Figura 3.6.c.	Altura de lluvia en exceso.....	70
Figura 3.6.d.	Hidrograma unitario.....	70
Figura 3.6.e.	Hidrograma de una lluvia compleja.....	72
Figura 3.6.f.	Hidrograma unitario medio.....	72
Figura 3.7.a.	Hidrograma unitario conocido desplazado.....	74
Figura 3.7.b.	Hidrograma de la curva S correspondiente a la lluvia efectiva.....	74
Figura 3.7.c.	Desplazamiento de la curva S.....	74
Figura 3.7.d.	Hidrograma unitario deseado.....	74
Figura 3.8.	Hidrograma unitario instantáneo.....	77
Figura 3.9.	Hidrograma unitario sintético triangular.....	80
Figura 3.10.	Hidrograma unitario sintético adimensional...	87

LISTA DE TABLAS

Tabla III.1.	Selección de N.....	56
Tabla III.2.	Determinación del tipo de suelo para la selección del número N.....	57
Tabla III.3.	Correcciones de N de acuerdo a la altura de precipitación acumulada 5 días antes de la fecha en cuestión.....	57
Tabla III.4.	Valores del coeficiente C1 de Lowry para regiones de la República Mexicana.....	61
Tabla III.5.	Valores del coeficiente C para la fórmula racional.....	62
Tabla III.6.	Características de la cuenca para determinar C en la fórmula racional.....	65
Tabla III.7.a.	Velocidad media a partir de la pendiente del cauce.....	82
Tabla III.7.b.	Velocidad media a partir de la pendiente y el tipo de suelo.....	82
Tabla III.8.	Ecuaciones para calcular el tiempo de concentración.....	83

CAPITULO I
INTRODUCCION

INTRODUCCION

Cada vez se requiere tener un mejor conocimiento del fenómeno lluvia-escorrimento a fin de establecer los efectos que producen las lluvias tanto en zonas rurales como en urbanas, estableciendo medidas preventivas, correctivas y/o de desarrollo que permitan obtener mayores beneficios de éstas, o evitar afectaciones, mediante obras hidráulicas. Estas obras pueden ser: presas, encauzamientos, bordos, etc.

Actualmente existen muchos métodos y modelos computacionales para calcular la forma y magnitud de los efectos producidos por una avenida, pero éstos son susceptibles de perfeccionarse debido a que se cuenta en la actualidad con mayor y mejor información.

Para poder entender la relación lluvia-escorrimento es necesario revisar como es que se lleva a cabo el ciclo hidrológico.

A partir de que los rayos solares penetran a la atmósfera, éstos producen la evaporación de las moléculas en la superficie de las grandes masas de agua contenidas en océanos y otros cuerpos de agua grandes, debido a que adquieren una gran cantidad de energía cinética. El vapor de agua forma nubes, las cuales son llevadas tierra adentro por el viento. Los factores que afectan la evaporación son la temperatura del aire y del agua, la velocidad del viento, la presión atmosférica y la calidad del agua.

Debido a condiciones atmosféricas especiales, el agua evaporada se acumula en el ambiente, se condensa y regresa nuevamente a la superficie terrestre en forma de precipitación.

En el trayecto que sigue el agua precipitada hacia la superficie terrestre puede ocurrir que parte de ésta se evapore nuevamente debido a la temperatura, o sea interceptada por construcciones y/o plantas para sus funciones.

El agua restante puede seguir diferentes caminos como son: la infiltración, la retención superficial o el escurrimento, cuyo volumen puede llegar a presas, lagos y lagunas y, eventualmente, retornar al océano para reiniciar el ciclo.

En el proceso de infiltración primero se satisface la diferencia de humedad del suelo, siendo el exceso el que penetra en los estratos del suelo hacia el manto freático. Este fenómeno está ligado a la intensidad de la lluvia, pero además, influye en el tipo de vegetación y de suelo, de la rapidez de transmisión al suelo y del agotamiento de la capacidad de almacenaje que a su vez depende de la porosidad, espesor,

contenido de humedad, tamaño de poro, cantidad de materia orgánica y viscosidad del agua.

En la retención superficial puede ocurrir que el agua quede atrapada, en cuyo caso no se cuantificará para el escurrimiento, pudiendo en un momento determinado salir nuevamente a la superficie y comenzar el escurrimiento, o bien quedar como agua subsuperficial o subterránea, jugando un papel importante en el nivel freático y en el flujo que alimenta las corrientes cuando no hay lluvia.

Como se observa, la importancia de la relación radica en la cuantificación del escurrimiento que llega con mayor rapidez a la salida de la cuenca, considerando las pérdidas durante su trayecto. Actualmente existen métodos que determinan con mayor precisión el volumen de esas pérdidas, sin embargo falta mayor información por área.

Por otra parte se debe tener en cuenta que la respuesta de la cuenca no es inmediata ya que transcurre cierto intervalo de tiempo desde el momento que llueve hasta que ocurre el escurrimiento, llevándose a cabo un proceso de almacenamiento y regulación en el cauce, mismo que se valúa en las estaciones hidrométricas. Es así como surgen modelos que tratan de establecer la relación entre las causas y los efectos que se producen en una cuenca determinada por acción de una tormenta. Aunque en cada cuenca existen condiciones específicas como son: la pendiente, la vegetación, el tipo de suelo, y la transformación a través del tiempo por la acción del hombre, entre otros, el análisis de los fenómenos llevados a programas de cómputo agilizan la tarea y permiten obtener resultados más eficientes en menor tiempo. Por lo que la finalidad fundamental de estos modelos radica en el pronóstico y la predicción de cuencas sin aforos con base en valores adoptados en otros modelos.

La utilidad del modelo se puede destacar en todas las etapas de realización o desarrollo de obras hidráulicas:

- En la planeación mediante el estudio de los potenciales de generación de avenidas de diversas cuencas, o de sus valores en determinados puntos de la red de cauces para la selección de los mejores sitios para embalses futuros, sus efectos y su optimización.
- En el diseño, la importancia del modelo queda por sí misma justificada en cuanto a capacidad, seguridad y funcionalidad se refiere.
- En la construcción constituye una gran ayuda en la programación y desarrollo del proceso constructivo de toda la obra.

- En la operación de grandes embalses se incluyen pronósticos de control de avenidas para evitar inundaciones aguas abajo y utilizar los volúmenes aportados para otros fines.

Muchos de los parámetros utilizados surgen de manera empírica y su uso se limita a condiciones determinadas, pero a medida que se conocen mejor las características de cada fenómeno se podrán ajustar mejor a cualquier tipo de cuenca.

En el siguiente capítulo estableceremos con más detalle los fenómenos tanto de lluvia como de escurrimiento, indicando como es que se obtienen los valores para cada uno de ellos. En el capítulo 3 se indicarán las ecuaciones que relacionan a ambos, así como las posibles soluciones que se obtienen. Finalmente en el capítulo 4 haremos recomendaciones para el uso de los modelos así como las conclusiones a que nos lleva dicho análisis.

CAPITULO II
PRECIPITACION Y ESCURRIMIENTO

PRECIPITACION Y ESCURRIMIENTO.

2.1. Precipitación.

La precipitación es la cantidad de agua total, líquida o sólida que cae sobre una superficie determinada y depende de la localización en una región con respecto al sistema general de circulación, la latitud y la distancia a la fuente de humedad.

2.1.1. Formación de la precipitación.

Las condiciones para que se dé la precipitación son:

- Humedad en la atmósfera.
- Enfriamiento de masas de aire.
- Presencia de núcleos de condensación.

El agua que se evapora de la superficie terrestre debe elevarse hasta que la presión y la temperatura permitan alcanzar el punto de rocío (condensación). A medida que la masa de aire asciende, la presión a la que está sujeta decrece por lo que se expande y disminuye su temperatura. Si la temperatura desciende por debajo del punto de rocío pueden unirse varias gotas pequeñas para formar gotas más grandes, pero para que resulte significativa la cantidad de gotas es necesario que la supersaturación sea mayor de la que normalmente se produce en la atmósfera. Las gotas forman núcleos de condensación por medio de partículas pequeñas como polen y cristales y a medida que aumentan su tamaño el peso las hace caer por acción de la fuerza de gravedad. En su caída se unen con otras gotas hasta alcanzar diámetros de 5 a 7 mm o mayores. Fig. 2.1.

2.1.2. Clasificación de la precipitación en relación con los mecanismos de enfriamiento de las masas de aire.

- Precipitación ciclónica: se produce del levantamiento de aire que converge de un área de baja presión a otra de alta presión, clasificándose en frontal y no frontal. La frontal se origina del levantamiento de aire cálido sobre frío llamado frente caliente, el cual se distribuye sobre un área bastante grande produciendo lluvia ligera y continua, o bien, de aire frío sobre caliente llamado frente frío obteniéndose precipitación intensa y de corta duración. Fig. 2.2.a.

- Precipitación convectiva: causada por el ascenso de aire cálido debido a calentamientos diferenciales en la superficie y enfriamientos diferenciales en la parte superior de la capa de aire. Al irse elevando, las masas de aire se expanden y enfrían dinámicamente originando la condensación y la precipitación. Fig. 2.2.b.

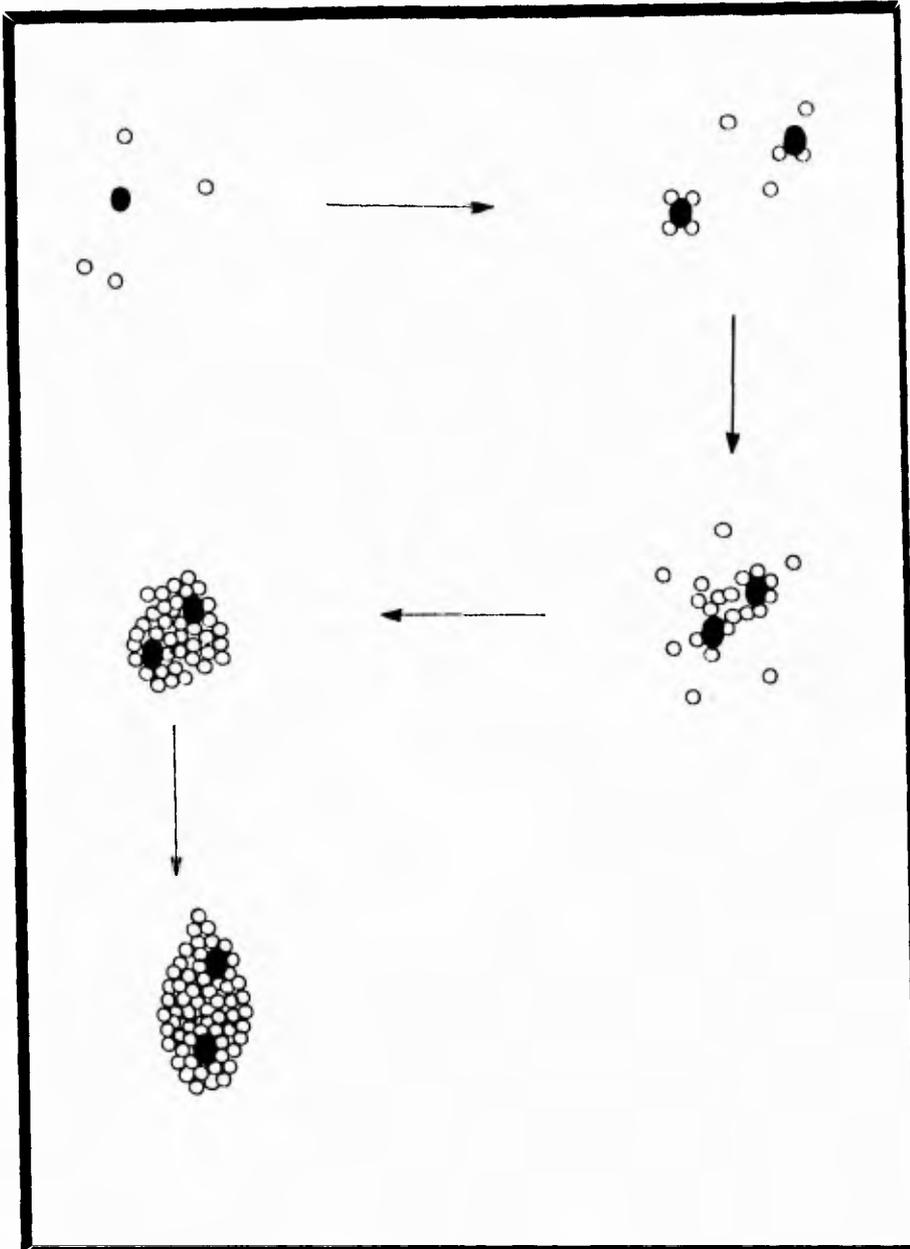


Fig.2). FORMACION DE LA PRECIPITACION

- Precipitación orográfica: se produce por el ascenso mecánico de la masa de aire sobre una cadena montañosa provocando el enfriamiento, condensación y precipitación.(1) Fig. 2.2.c.

2.1.3. Medición de la precipitación.

Para obtener información sobre la precipitación se han desarrollado técnicas e instrumentos que miden su cantidad y distribución espacial y temporal. Con este propósito la World Meteorological Organization (OMM) recomienda las siguientes densidades mínimas para redes de precipitación con fines hidrometeorológicos(2):

- 1.- En el caso de regiones planas situadas en zonas tropicales, mediterráneas o templadas, 600 a 900 km² por estación.
- 2.- Si se trata de regiones montañosas en zonas tropicales mediterráneas o templadas 100 a 250 km² por estación.
- 3.- Cuando se refiere a islas montañosas pequeñas con precipitación irregular, 25 km² por estación.
- 4.- Y por último en zonas áridas y polares, 1 500 a 10 000 km² por estación.

En México no se cumple con dichas recomendaciones ya que se tiene un terreno muy accidentado y con climas variados, así como por falta de recursos para reponer y mantener el equipo, por lo que en algunas zonas del territorio nacional se cuentan con una cantidad mínima de estaciones que apenas permiten establecer un panorama general sobre las 8 regiones clasificadas por la SARH para su estudio, con características definidas y homogéneas. Fig. 2.3. Las características de las precipitaciones en cada una de las regiones se dan enseguida.

Región 1. Lluvias importantes durante los meses de invierno por incursiones de masas de aire marítimo polar, el paso de sistemas frontales y eventualmente por efectos de bajas frías¹.

Región 2. Extremadamente seca debido a la inversión de los alisios que obstaculizan el crecimiento vertical de las nubes. Durante el invierno, los sistemas extratropicales producen ocasionalmente alguna precipitación. En el verano ciclones tropicales debilitados producen eventualmente precipitación.

Región 3. Las precipitaciones son escasas y se originan por efectos convectivos y orográficos, estimuladas ocasionalmente en el invierno por sistemas frontales y en verano, por líneas

¹ región de baja presión con aire frío.

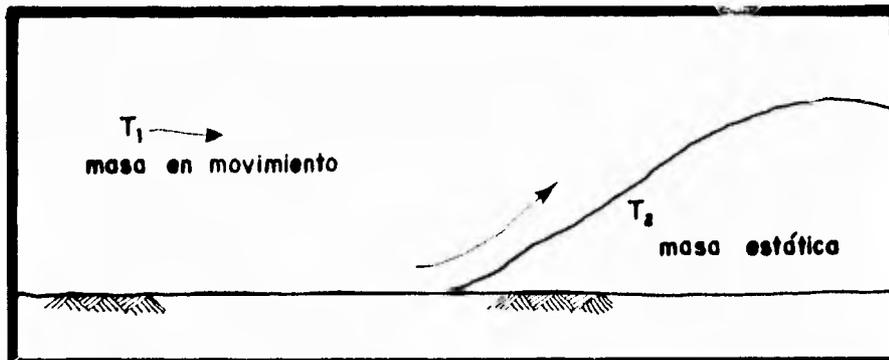


Fig. 2.2.a. PRECIPITACION CICLONICA

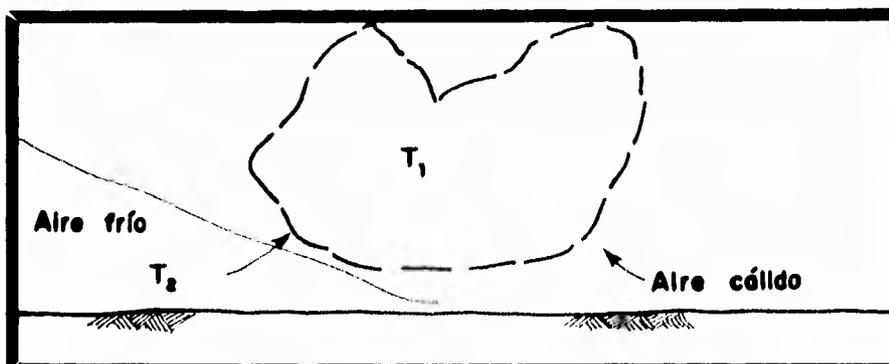


Fig. 2.2.b. PRECIPITACION CONVECTIVA

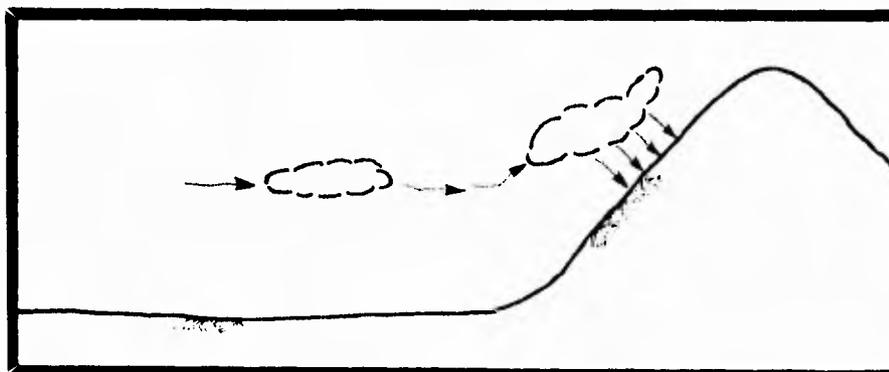


Fig. 2.2.c. PRECIPITACION OROGRAFICA

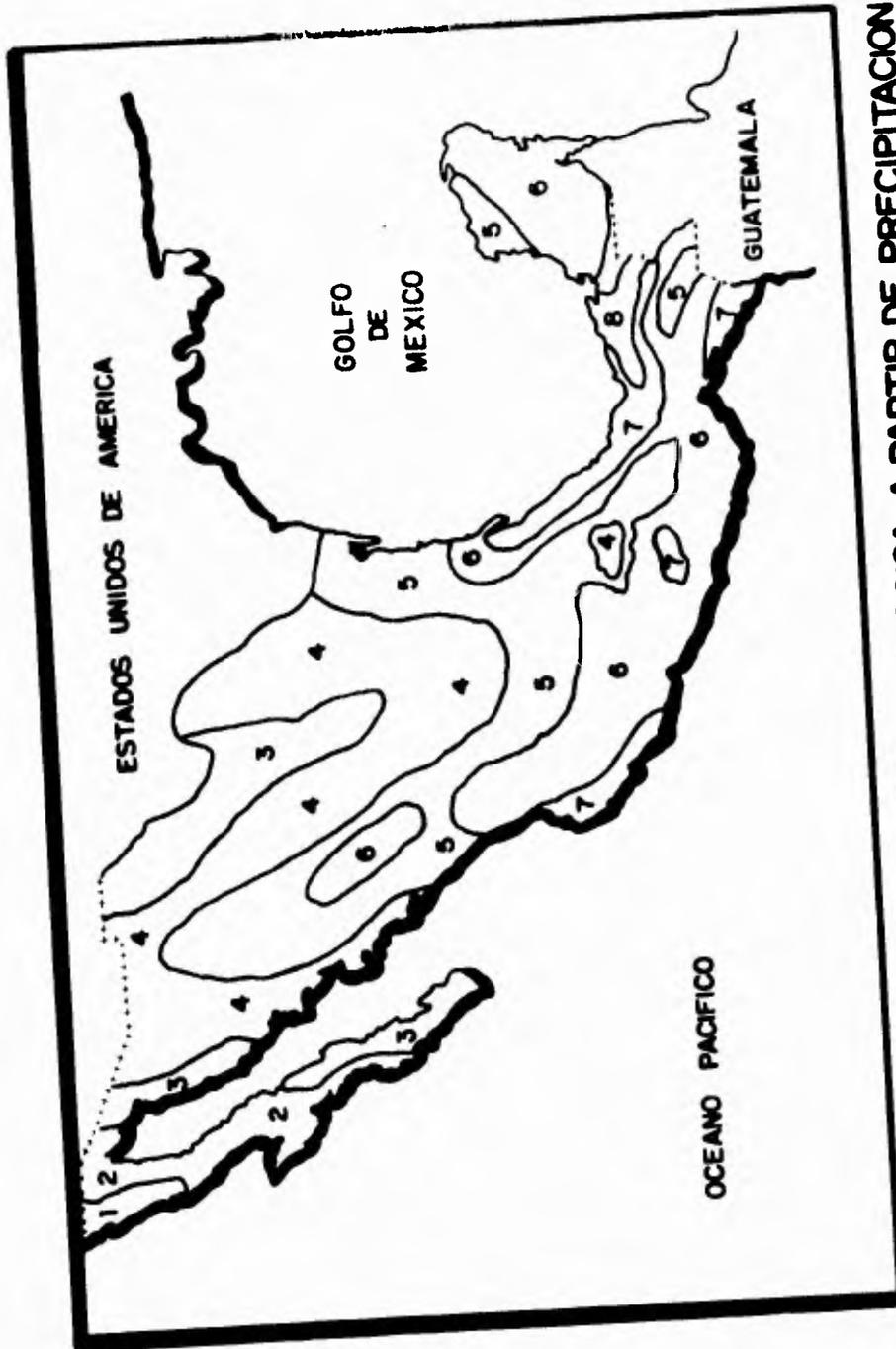


Fig.2.3 REGIONALIZACION METEOROLOGICA A PARTIR DE PRECIPITACION

de confluencia, ondas tropicales o efectos de ciclones tropicales en el sur de la península de Baja California.

Región 4. Semiárida. La lluvia se origina principalmente por la acción convectiva y los efectos orográficos. En el invierno, las corrientes de chorro, las vaguadas superiores² o los sistemas frontales, estimulan eventualmente la precipitación. En el verano, las ondas tropicales o los efectos secundarios de ciclones tropicales, estimulan ocasionalmente la precipitación.

Región 5. La precipitación es media y se produce principalmente por efectos convectivos y orográficos en la Sierra Madre Occidental, noreste del país y porción noroeste de la península de Yucatán. Los sistemas extra tropicales ocasionan eventualmente precipitación en invierno. En el verano las líneas de confluencia, las ondas tropicales y los ciclones estimulan la precipitación.

Región 6. En esta región la precipitación anual es alta ya que en la Sierra Madre Oriental y en la Península de Yucatán, el paso de frentes y los nortes que los acompañan, originan importantes precipitaciones durante el invierno. En el verano la lluvia es estimulada por ondas tropicales, líneas de confluencia y perturbaciones ciclónicas tropicales.

Región 7. La precipitación aumenta con valores cercanos a 2,000 mm. en la región localizada en la costa central y sur del Golfo de México. Los sistemas frontales que se presentan en el invierno, junto con los fuertes vientos del norte que ocasionan, aportan un considerable volumen de precipitación. En algunas áreas aisladas ubicadas al sur del país, la precipitación invernal es insignificante y el principal estímulo durante el verano son las perturbaciones ciclónicas tropicales del pacífico. En el área localizada sobre Chiapas, la proximidad de la zona de convergencia intertropical es determinante de los temporales lluviosos característicos de esta región durante los meses de verano.

Región 8. La precipitación anual es máxima ya que sobrepasa a 2,000 mm. Las características orográficas y la posición geográfica de la región, son fundamentales para establecer un régimen de precipitación intenso. En invierno, los frentes y las ondas prefrontales producen lluvias considerables. En el verano, los vientos dominantes del NE inciden directamente sobre las tierras, y junto con las ondas tropicales, efectos de huracanes y otras perturbaciones tropicales, estimulan considerablemente la precipitación en el área.(3)

² Regiones donde la presión es relativamente baja y donde la convergencia del aire hace que éste ascienda propiciando a menudo la formación de nubes y mal tiempo.

Clasificadas estas regiones se procede a la medición de los elementos del clima a través de estaciones meteorológicas entre las que se encuentran:

a) Sinópticas.- realizan mediciones que se anotarán en mapas geográficos mediante observaciones de superficie y altitud.

b) Climatológicas.- mediciones del clima realizadas a lo largo del tiempo considerando: tiempo real, viento, nubosidad, tipo y altura de las nubes, visibilidad, temperatura, humedad, presión atmosférica, precipitaciones, suelo nevado, insolación, temperatura del suelo, evaporación y T. de vapor entre otros.

c) Meteorológicas aeronáuticas.- situadas en los aeropuertos que efectúan mediciones de los dos tipos mencionados antes.

d) Meteorológicas agrícolas.- que incluyen la horticultura, ganadería y silvicultura.

e) Especiales.- Registran fenómenos meteorológicos particulares como: observación de parásitos atmosféricos, electricidad atmosférica, localización con radar de nubes e hidrometeoros, hidrología, medida de la radiación o de la iluminación, medida de ozono, microclimatología y química atmosférica.

Para el caso de la precipitación describiremos brevemente dos aparatos empleados para su medición.

Los pluviómetros captan la lluvia recibida en un intervalo de tiempo y consisten de un colector de sección circular de 20 cm. de diámetro y 60 cm. de alto, canalizándola mediante un embudo a una probeta graduada dentro del recipiente de vertido cuya área transversal es la décima parte del área del colector, de manera que por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente, permitiendo tomar lecturas, a simple vista, hasta de 0.1 mm de lluvia, que corresponde a un milímetro depositado en el recipiente. En México se acostumbra hacer las lecturas de los pluviómetros a las 8 de la mañana. Fig. 2.4.a.

Los pluviógrafos Fig.2.4.b.son aparatos que registran en forma continua la variación de la lluvia en el tiempo. Los más relevantes se describen a continuación.

El pluviógrafo de cubeta basculante posee la característica de que el agua cae en un colector, se dirige a un compartimiento donde se encuentran dos cubetas de tal manera que cuando cae 0.1 mm de lluvia se llena una de las cubetas produciendo un desequilibrio que hace que la otra se voltee, vertiendo su contenido en una vasija y moviendo el segundo



Fig.2.4.a. ESTACION CLIMATOLOGICA CON PLUVIOMETRO



Fig.2.4.b. PLUVIOGRAFO

compartimiento al lugar correspondiente, mientras tanto se acciona un circuito eléctrico que produce una señal que se digitaliza de manera remota.

El pluviógrafo de balanza pesa el agua que cae en una cubeta situada en una plataforma con báscula, registrando en una carta valores acumulados de precipitación.

Existen diferentes tipos de pluviógrafos de flotador, en su mayoría ascienden debido al incremento en la precipitación registrada en una carta y se vacían manualmente, aunque algunos lo hacen mecánicamente utilizando sifones, la desventaja que poseen es que puede dañarse el flotador si el agua atrapada se congela.

En regiones en donde es difícil la constante supervisión se utilizan pluviómetros de almacenamiento que pueden operar de 1 a 2 meses consecutivos o a veces hasta una estación completa sin la necesidad de la presencia humana. En mediciones prolongadas suele medirse con cinta las lecturas parciales y en la inicial o final mediante un pluviógrafo de báscula.

Los aparatos telemétricos permiten concentrar rápidamente información de precipitaciones y facilitar las mediciones en lugares de difícil acceso. Los principales problemas asociados a estos aparatos derivan del hecho de se requiere operen sin mantenimiento y sin fallas durante grandes lapsos, consumiendo poca energía, por lo que deben de colocarse de tal manera que se protejan de cualquier eventualidad.

Otros métodos utilizados para medir la precipitación son el radar y el uso de satélites. El primero consta de una antena que emite un pulso de energía electromagnética cuyo ancho y forma depende del tipo de onda, la cual viaja a velocidad de la luz, reflejándose en las nubes. Al retornar se le denomina señal del blanco y cuando aparece en pantalla se le llama eco. Tanto la señal como el eco son indicadores de la potencia de retorno que a su vez son una medida de la reflectividad cuyas unidades son dbz o mm/h.

La reflectividad de una señal depende de:

- La distribución y el tamaño de las gotas.
- El número de partículas por unidad de volumen.
- Estado físico en que se encuentra el agua.
- La forma de las nubes.
- Aspecto asimétrico de las nubes respecto al radar.

El radar permite observar la posición y movimiento de las áreas de precipitación. Algunos radares pueden proporcionar la evaluación de la intensidad de la lluvia en zonas de 40 a 200 km a su alrededor. Su principal defecto consiste en la interpretación de la reflexión de la onda emitida por el mismo radar, pues ésta debe ser calibrada para que pueda traducirse en intensidad de precipitación.

Los satélites resultan ser medios poco precisos ya que presentan el problema de que no pueden medir la precipitación directamente y su cuantificación requiere de la evaluación de un coeficiente de precipitación con base en la cantidad, tipo de nubosidad, probabilidad de lluvia y probabilidad de la intensidad de lluvia asociada con cada tipo de nube, por lo que en general sólo se utilizan para mediciones cuantitativas de la precipitación, con lo que es posible observar sistemas de tormentas importantes de manera que se obtenga información sobre su extensión y distribución temporal. Fig 2.5.

En México se utilizan todos estos dispositivos para obtener información meteorológica.

Actualmente, según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se tienen contabilizadas las siguientes estaciones hasta 1994 (4), que reportan cada 15 minutos las condiciones atmosféricas de cada zona:

Radio sondeo viento	12
Observatorios sinópticos	77
Climatológicas	5252
Estaciones automatizadas	600
Radares meteorológicos	5
Telecomunicación satélite digital	4
Satélite GOES7	1

Este último envía información, pero pertenece a una agencia norteamericana.

2.1.4. Procesamiento de la información.

Los datos de precipitación registrados en una estación climatológica pueden obtenerse en intervalos de 15 minutos, 1 hora, 3 horas y 1 día.

La cantidad total de precipitación que alcanza el suelo durante un determinado período de tiempo se expresa por la altura de la capa de agua que cubriría una superficie perfectamente horizontal si no hubiese pérdidas por infiltración o evaporación.

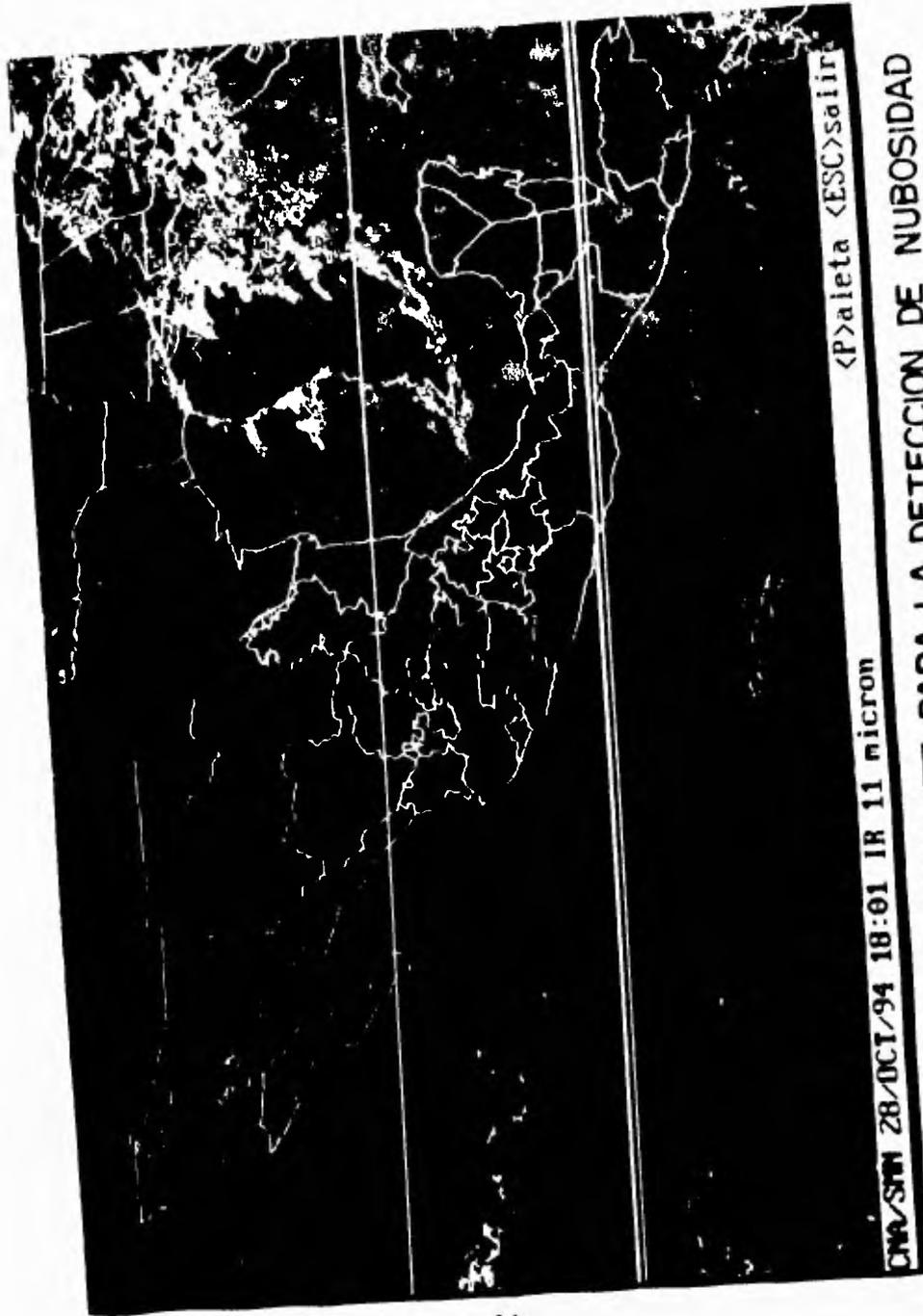


Fig.2.5. IMAGEN DE SATELITE PARA LA DETECCION DE NUBOSIDAD

Al registro de la precipitación en relación con el tiempo se le denomina pluviograma. Si a esta gráfica se le quitan los descensos ocasionados por la descarga del pluviógrafo se obtiene la gráfica de precipitación acumulada llamada curva masa cuya pendiente es la intensidad de lluvia, a partir de la cual es posible dibujar diagramas de barras que representen las variaciones de la altura de precipitación o de intensidad de la lluvia en intervalos de tiempo previamente seleccionados llamados hietogramas.

Cuando se desea conocer la variación en el tiempo de la precipitación media en una cuenca se determina una curva masa media, utilizando un factor de ajuste en caso de diferir en todas las estaciones.

A partir de los registros de precipitación también se pueden obtener datos decenales, mensuales y anuales. Por ejemplo mediante un programa llamado CLICOM, el cual se encuentra actualmente en proceso de evaluación e implementación en el SMN, mismo al que se le dan rangos de validación dependiendo de la región en la que se encuentre. De los registros obtenidos se pueden obtener datos totales, normales, medias, promedios y extremas los cuales permitirán manejar la información de manera conveniente. El anexo A muestra los diferentes elementos que se registran en una estación climatológica así como sus códigos, unidades y factores de escala, de acuerdo con la nomenclatura usada por el CLICOM. Los datos obtenidos en las estaciones climatológicas se analizan con los tomados en las estaciones hidrométricas de acuerdo con las condiciones de la cuenca.

2.1.5. Exactitud en las mediciones y estimación de los registros faltantes.

En el fenómeno de precipitación pueden existir errores de medición, por instrumento o por observación, siendo algunos acumulativos o compensatorios. Los errores(5) debidos a la medición son:

Evaporación
Adhesión
Calor
Inclinación
Salpicadura
Viento

Los errores por instrumento que se observan son:

- El cero de la escala del pluviógrafo no está bien calibrado.
- La plumilla del pluviógrafo cae antes de llegar al nivel máximo, o bien, no baja hasta el nivel mínimo.
- En algunas ocasiones los valores registrados de lluvia en 24

horas no parecen consistentes.

Para el caso del registro de los valores de precipitación suele ocurrir que no se cuente con la información de uno o más meses en cuyo caso existen algunos procedimientos aritméticos para obtener los registros faltantes, los cuales se describirán brevemente a continuación:

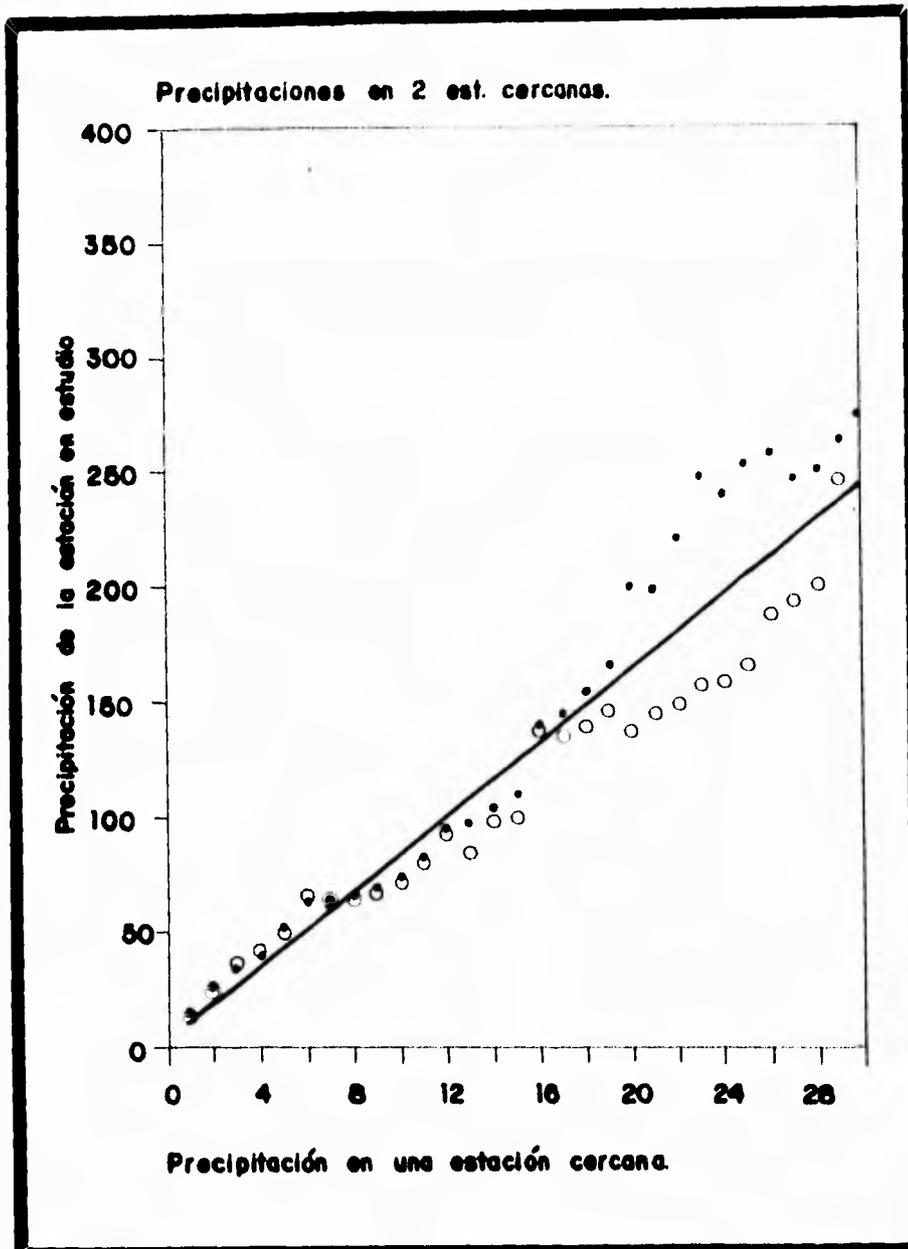
- Regresión lineal.- Para completar registros anuales de uno o más años seguidos o intercalados, el método que más se utiliza es el de regresión lineal. Para ello es necesario graficar los valores de la estación contra los de alguna estación cercana o el promedio de las medidas en varias estaciones circundantes con la de estudio a fin de conocer cual es la tendencia a la que mejor se ajustan los puntos. En caso de resultar una recta se utiliza el método de mínimos cuadrados. Fig 2.6.

Obtenida la gráfica con su correspondiente correlación se pueden deducir los datos faltantes, en caso de no resultar así se podrá utilizar algún otro método.

- Análisis de la Doble Masa.- Cuando se reubica un pluviómetro puede conllevar un cambio relativo en la cantidad captada por éste, para verificar la consistencia del registro de una estación comparado con la precipitación acumulada anual o estacional los valores de precipitación media para un grupo de estaciones deben resultar concurrentes y acumulados en los alrededores. Además se debe ejercer un cuidado considerable al aplicar esta técnica ya que los puntos en la gráfica se desvían alrededor de una línea media y los cambios bruscos de pendiente deben ser aceptados únicamente si están sostenidos por alguna otra evidencia.

- Método del U.S. National Weather Service.- Este permite obtener un dato faltante diario, mensual o anual con base en los datos observados en las estaciones circundantes. El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad W igual al recíproco del cuadrado de la distancia de cada estación vecina con la estación incompleta.

$$P_x = \frac{\sum P_i W_i}{\sum W_i} \quad (2.1)$$



**Fig.26 DEDUCCION DE DATOS FALTANTES
POR REGRESION LINEAL**

donde:

P_i = precipitación observada para la fecha de la faltante en las estaciones auxiliares circundantes.

$W_i = 1 / D_i^2$, siendo D la distancia entre cada estación circundante a la estación faltante.

- Método Racional Deductivo.- Cuando no se dispone de estaciones cercanas y circundantes a la estación incompleta, o bien las existentes no cuentan con observaciones de los datos faltantes se puede estimar el valor mensual faltante a partir de años completos. Este método puede sintetizarse mediante 4 pasos:

- 1) Se suman las precipitaciones mensuales en todos los años completos obteniéndose la lluvia mensual promedio.
- 2) Se calculan para años completos los porcentajes mensuales de precipitación.
- 3) Se suman los porcentajes de un año y se dividen entre el número de años completos obteniéndose el porcentaje promedio.
- 4) Los valores desconocidos tendrán un porcentaje, igual al porcentaje promedio(5), estableciendo la siguiente proporción:

$$\frac{P_i}{S_i} = \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \quad (2.2)$$

donde:

i = meses desconocidos (máximo 11).

P_i = precipitación mensual desconocida en cada año incompleto en mm.

$\sum S_i$ = suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce en porcentaje.

$\sum P$ = suma de las precipitaciones mensuales conocidos en los años incompletos, en mm.

S_i = porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

- Método de la Relación Normalizada.- En este método el dato faltante se estima a partir de los valores observados en tres estaciones cercanas, situadas uniformemente alrededor de la estación incompleta y que contengan los registros faltantes.

Si la precipitación media anual esta dentro de un 10% de la registrada en la estación incompleta, se usará el promedio aritmético de las tres estaciones para estimar el dato faltante. Si difiere más del 10% se utilizara el método de la relación normalizada mediante el cual los valores observados en las estaciones auxiliares son ponderados mediante las relaciones o cocientes de la precipitación media anual.

$$P_x = \frac{N_x}{3} \left(\frac{P_a}{N_a} + \frac{P_b}{N_b} + \frac{P_c}{N_c} \right) \quad (2.3)$$

donde:

N_x = precipitación media en la estación incompleta, en mm.

N_a, N_b, N_c = precipitación media en las estaciones auxiliares, en mm.

P_a, P_b, P_c = precipitación observada en las estaciones auxiliares para la misma fecha faltante, en mm.

2.1.6. Estimación de la precipitación promedio sobre un área.

Mediante el registro de las precipitaciones ocurridas, con un pluviógrafo, se obtiene la gráfica correspondiente h_p (mm) vs. t (h) a un punto, misma que recibe el nombre de curva masa, la cual con la ayuda de otros puntos permite conocer la variación en el tiempo de la precipitación media de la cuenca de acuerdo con los siguientes métodos:

- Aritmético.- Resulta de encontrar el promedio de las alturas de precipitación registradas en cada estación mediante la fórmula:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{p_i} \quad (2.4)$$

donde:

h_p = altura de precipitación media, en mm.

h_{p_i} = altura de precipitación media registrada en la estación i , en mm.

n = número de estaciones bajo análisis.

- Polígonos de Thiessen.- Toma en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos.

El método consiste en:

a) Unir entre sí las estaciones más próximas para formar triángulos cuyos vértices son, únicamente, estaciones pluviométricas.

b) Trazar líneas que bisecten únicamente los lados de cada triángulo, las cuales convergerán en un punto llamado circuncentro.

c) Cada estación quedará rodeada de un polígono y en algunos casos también por el parteaguas de la cuenca siendo ésta el área de influencia de la estación correspondiente.(6)

Calculándose la lluvia media como el promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente medida con un planímetro. Fig. 2.7.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n A_i \bar{h}_{p_i} \quad (2.5)$$

donde:

A_i = área de influencia de la estación i , en Km^2 .
 A_t = área total de la cuenca, en Km^2 .

- Isoyetas.- A partir de la información registrada se trazan las líneas de igual altura de precipitación de modo semejante a como se obtienen las curvas de nivel en topografía, sólo que ahora el peso es el área entre cada dos isoyetas y el parteaguas de la cuenca y la cantidad que se pesa es la altura de precipitación promedio entre las dos isoyetas. Fig.2.8.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n (h_{p_i} A_i) \quad (2.6)$$

donde:

n = número de áreas A_i consideradas, en Km^2 .

Otro análisis que ayuda a determinar el potencial de precipitación en una zona dada se obtiene a partir de las curvas altura de precipitación-área-duración (hp - A - d), que permiten trasponer tormentas de un sitio a otro estableciendo las cantidades máximas de precipitación producidas en áreas y duraciones diferentes con base en una red de estaciones

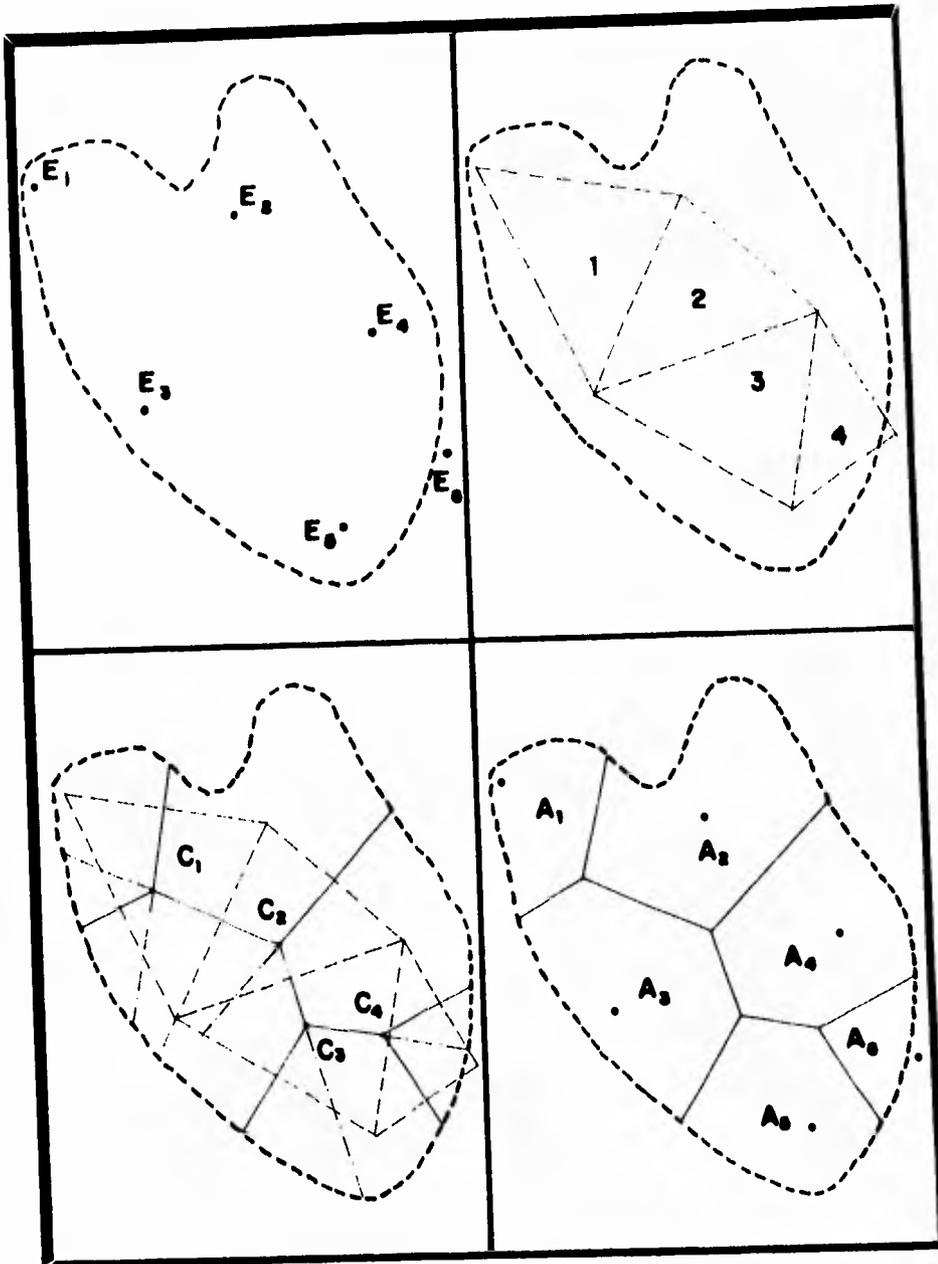


Fig. 2.7. POLIGONOS DE THIESSEN

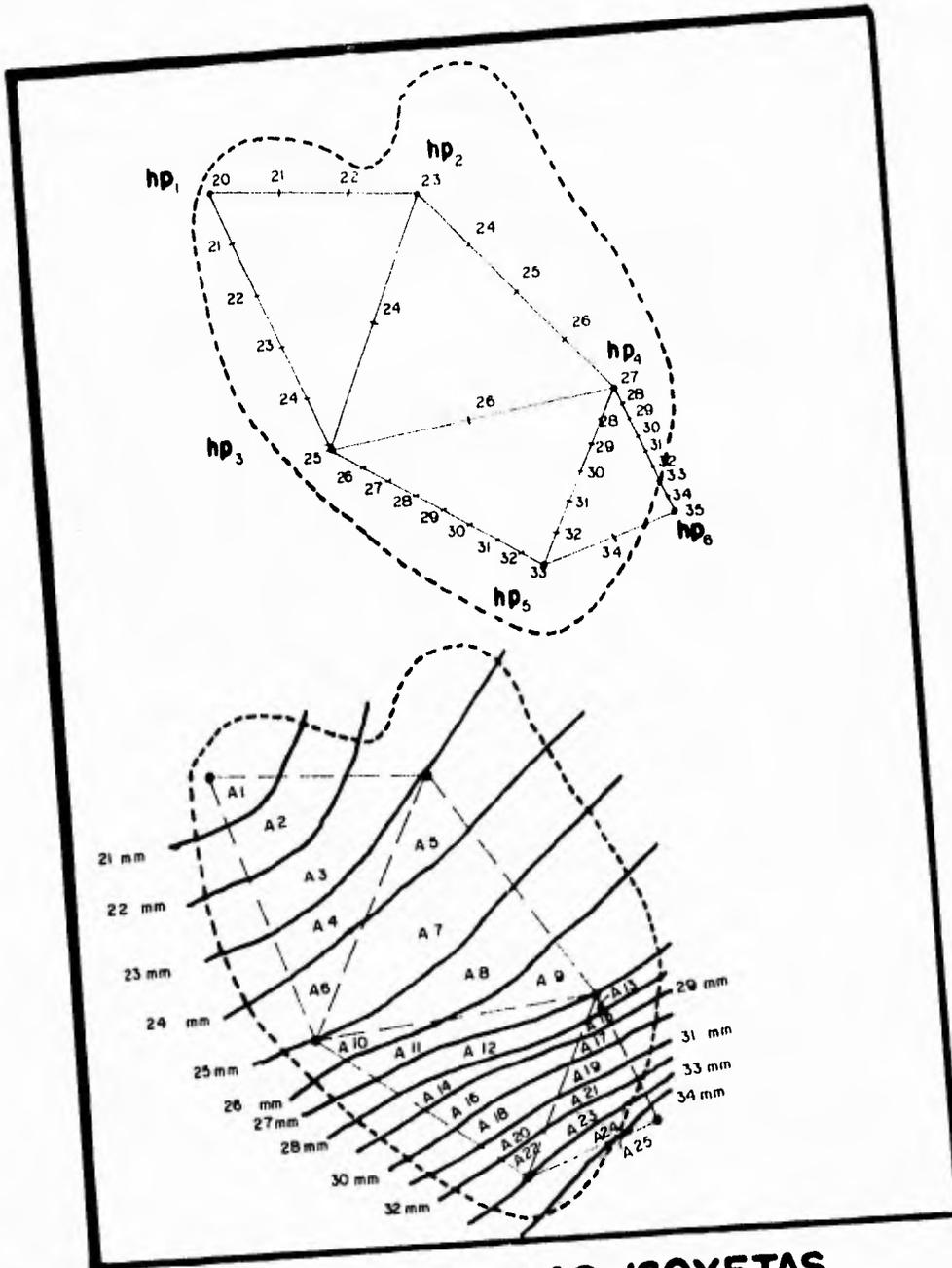


Fig.2.8. METODO DE LAS ISOYETAS

que registran simultáneamente la precipitación durante una tormenta dada. Estas curvas se extrapolan a sus valores máximos probables para ser usadas en la estimación de avenidas.

A partir de los datos de precipitación también es posible alimentar un modelo de lluvia-escorrentamiento para obtener una avenida de diseño utilizando las curvas intensidad-duración-tiempo de retorno (i-d-T).

Actualmente en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) existe una programa que calcula las curvas (hp-A-d) e (i-d-T) así como la distribución de frecuencias entre otros.

Para construir la gráfica (i-d-T) partiremos de la curva masa media, obtenida a partir de un pluviograma, la cual relaciona la altura de precipitación con la duración Fig.2.9.a.. Esta curva se transforma en una gráfica de barras, llamada hietograma de alturas de precipitación, dividiendo el tiempo que duró la tormenta en n intervalos y midiendo la altura de precipitación que se obtuvo en cada uno de ellos. Fig. 2.9.b. Si dividimos la altura, de precipitación de cada barra entre el tiempo Δt en que dura la lluvia, obtendremos el hietograma de intensidades. Fig.2.9.c. que se grafica como una serie de curvas asintóticas, Fig.2.9.d. mismas que obedecen a la siguiente relación matemática:

$$i = \frac{kT^c}{d^b} \quad (2.7)$$

i= intensidad de la lluvia, en mm.

T= tiempo de retorno, en años.

d= es la duración de la tormenta, en min.

b, c y k = constantes que se calculan por correlación lineal múltiple.

Es conveniente dividir la muestra para duraciones de tormenta $d \leq 120$ min, y otra para $d > 120$ min.(7)

El procedimiento para obtener las constantes se explica a continuación.

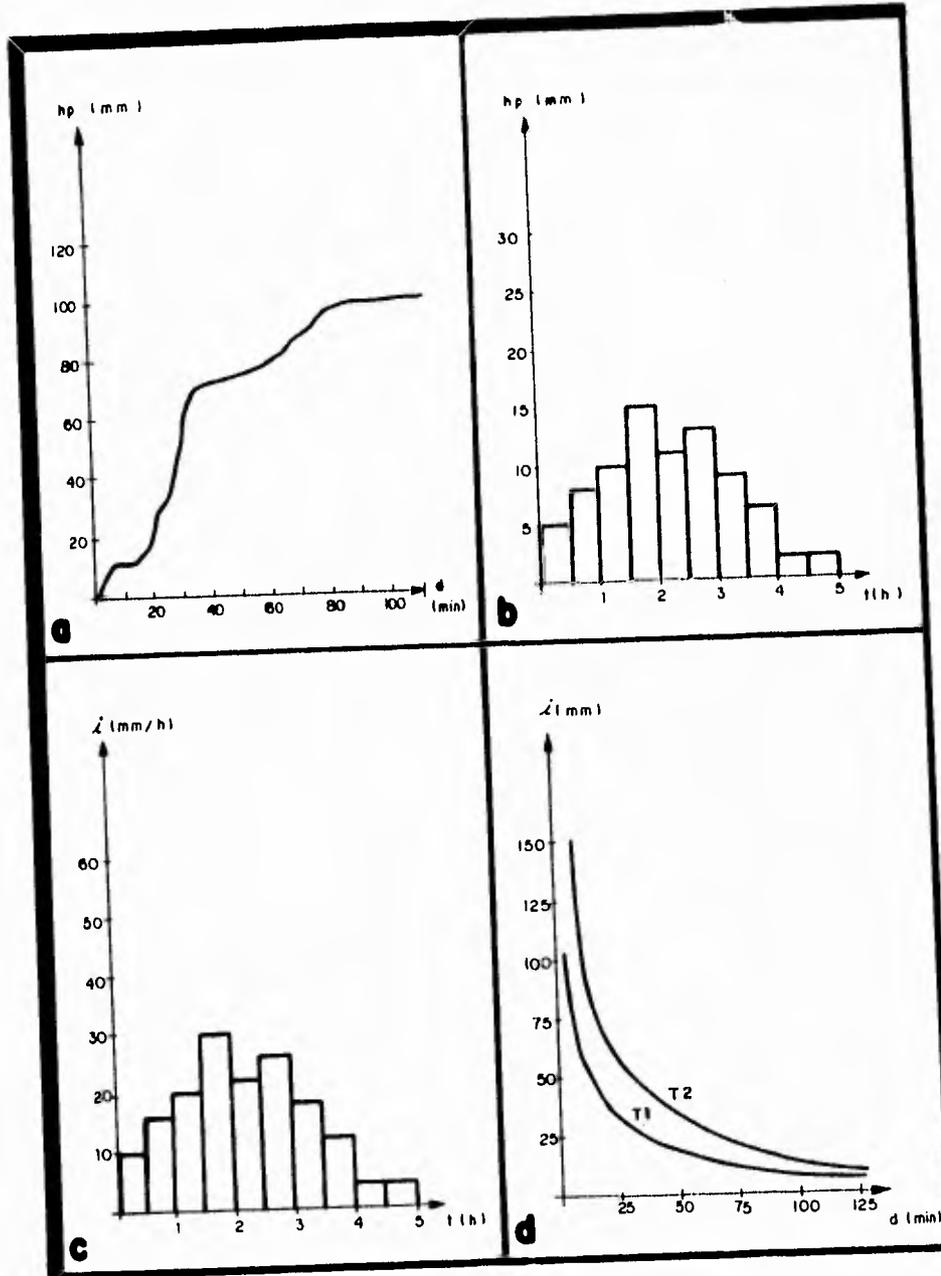


Fig. 2.9. CONSTRUCCION DE LA GRAFICA (λ -d-T)

Se toman los logaritmos de la ecuación anterior quedando como:

$$L(i) = L(k) + CL(T) - bL(d) \quad (2.8)$$

Para minimizar el error se obtiene:

$$\sum (I_{medida} - I_{cal})^2 \quad (2.9)$$

que corresponde a la función secante y donde:

$$I_{cal} = k + CT + BD \quad (2.10)$$

Se aplican derivadas parciales respecto a cada constante quedando finalmente como:

$$\sum K + \sum CT + \sum BD = \sum I \quad (2.11)$$

$$\sum KT + \sum CT^2 + \sum BDT = \sum IT \quad (2.12)$$

$$\sum KD + \sum CDT + \sum BD^2 = \sum ID \quad (2.13)$$

Estableciendo un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas (K, C y B) a las que se les aplica el antilogaritmo para encontrar su valor y consignarlo en la ecuación 2.7., obteniendo la intensidad de lluvia con la cual se diseña.

Por ejemplo, si queremos calcular la curva i-d-T de los siguiente datos tendremos:

Fechas	Duración en minutos				
	5	10	20	60	120
21 julio 1947	96	54	28	12	7
22 agosto 1948	150	93	60	26	13
18 junio 1949	120	105	53	19	10

$$T = n+1/m$$

n=número de datos.

m=número de orden de la muestra de mayor a menor.

m	T n+1/ m	d=5 minut.	d=10 minut.	d= 20 minut.	d=60 minut.	d=120 minut.
		i	i	i	i	i
1	4.00	150	105	60	26	13
2	2.00	120	93	53	19	10
3	1.33	96	54	28	12	7

Cada valor se calcula conservando todos los decimales:

$$D = \log d$$

$$I = \log i$$

$$T = \log T$$

d	i	T	D	I	T	DI	DT	D ²	TI	T ²
5	150	4	0.7	2.18	0.60	1.52	0.42	0.49	1.31	0.36
5	120	2	0.7	2.08	0.30	1.45	0.21	0.49	0.62	0.09
5	96	1.3	0.7	1.98	0.12	1.39	0.08	0.49	0.24	0.01
10	105	4	1.0	2.02	0.60	2.02	0.60	1.00	1.21	0.36
10	93	2	1.0	1.97	0.30	1.97	0.30	1.00	0.59	0.09
10	54	1.3	1.0	1.73	0.12	1.73	0.12	1.00	0.21	0.01
20	60	4	1.3	1.78	0.60	2.31	0.78	1.69	1.07	0.36
20	53	2	1.3	1.72	0.30	2.24	0.39	1.69	0.52	0.09
20	28	1.3	1.3	1.45	0.12	1.88	0.16	1.69	0.17	0.01
60	26	4	1.78	1.41	0.60	2.52	1.07	3.17	0.85	0.36
60	19	2	1.78	1.28	0.30	2.27	0.53	3.17	0.38	0.09
60	12	1.3	1.78	1.08	0.12	1.92	0.21	3.17	0.13	0.01
120	13	4	2.08	1.11	0.60	2.32	1.25	4.33	0.67	0.36
120	10	2	2.08	1.00	0.30	2.08	0.62	4.33	0.30	0.09
120	7	1.3	2.08	0.84	0.12	1.76	0.25	4.33	0.10	0.01
Σ			20.57	23.64	5.14	29.38	7.05	31.99	8.42	2.34

Sustituyendo los valores

$$\begin{aligned} 15 K + 5.14 C + 20.57 B &= 23.64 \\ 5.14 K + 2.34 C + 7.05 B &= 8.42 \\ 20.57 K + 7.05 C + 31.99 B &= 29.38 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} K &= 2.479 & K &= 10 & & = 301.30 & & i &= \frac{301.10 T}{0.802} \\ C &= 0.571 & C &= c &= 0.571 & & & & d \\ B &= -0.802 & B &= -b &= 0.802 & & & & \end{aligned}$$

Sustituyendo valores de (d) hasta 120 minutos y de (T) para 5, 10 y 20 años se presentan las curvas (i-d-T). Fig. 2.9.e.

duración(min)	T= 5 años	T= 10 años	T= 20 años
5	207.748	308.621	458.473
10	119.155	177.011	262.959
15	86.076	127.872	189.959
20	68.342	101.525	150.821
30	49.369	73.341	108.952
40	39.198	58.230	86.504
50	32.775	48.688	72.329
60	28.316	42.065	62.489
70	25.023	37.173	55.223
80	22.482	33.398	49.615
90	20.455	30.388	45.142
100	18.798	27.925	41.485
110	17.415	25.870	38.432
120	16.241	24.127	35.841

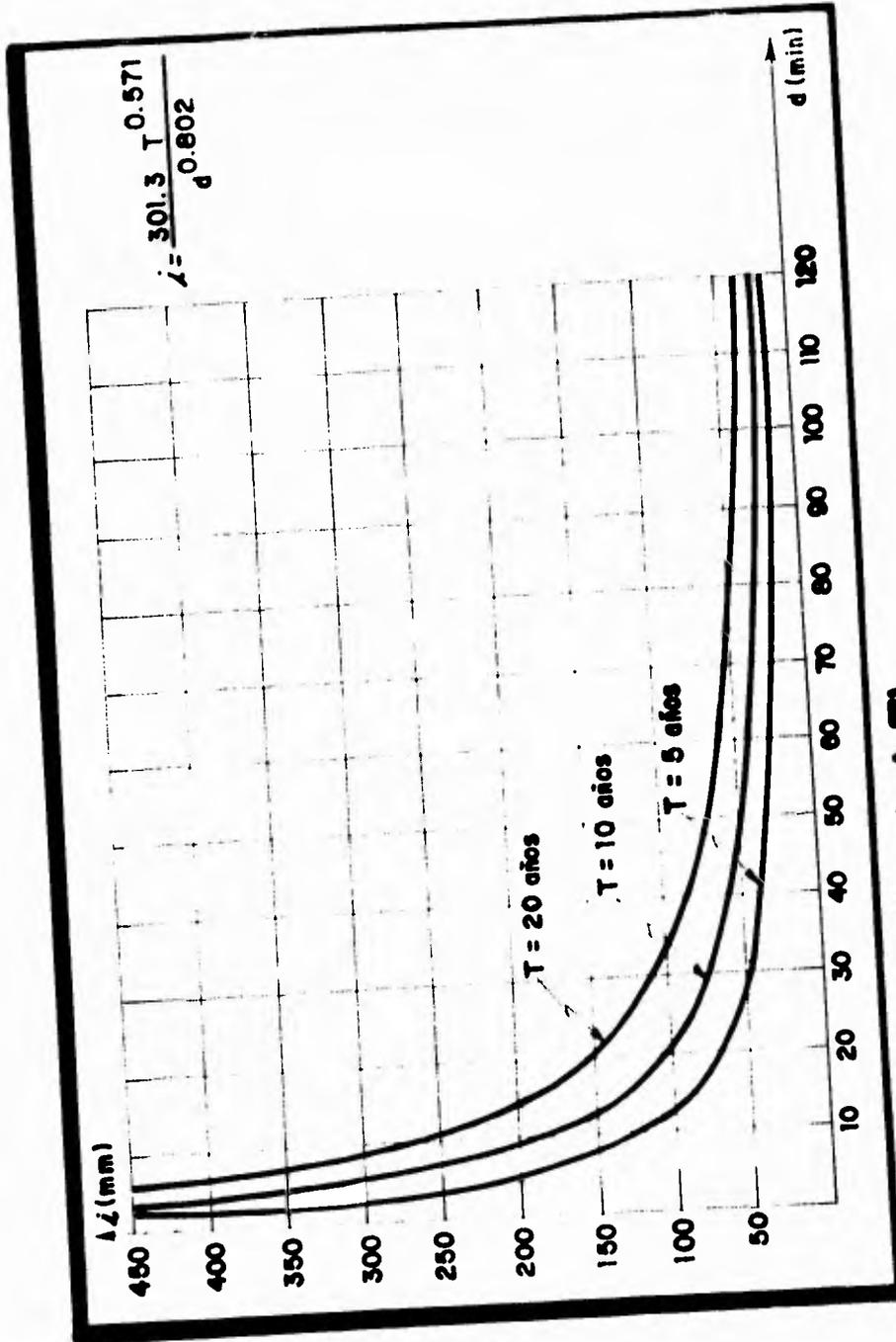


Fig. 2.9.0. CURVAS (i-d-T)

2.2. Escurrimiento.

Se denomina escurrimiento a la parte del ciclo hidrológico en la que el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca.

2.2.1. Proceso de escurrimiento.

Ocurrido el fenómeno de precipitación el agua presenta tres posibles caminos: el escurrimiento superficial, el subsuperficial y el subterráneo. Fig. 2.10.

El flujo de agua sobre la tierra o escurrimiento superficial, corresponde al volumen de lluvia que avanza sobre la superficie producto de una precipitación efectiva o en exceso hasta alcanzar una depresión. Esto ocurre cuando la intensidad de lluvia es mayor que la capacidad de infiltración.

En el flujo subsuperficial una porción del agua que se infiltra a través de la superficie se mueve mas lentamente que el flujo superficial a través de las capas superiores del suelo hasta llegar al cauce de la corriente. La profundidad depende de la permeabilidad y del nivel freático.

La infiltración se favorece en suelos permeables hacia la zona subterránea pudiendo ser mayor que las dos anteriores. En dicha región los espacios intermoleculares del suelo están llenos de agua descargándose eventualmente en corrientes subterráneas. A esta cantidad de agua en el suelo se le llama flujo base, siendo su frontera superior el nivel freático.

El objetivo de la clasificación es exclusivamente ilustrativa ya que el agua suele comenzar su escurrimiento como superficial y puede completar su viaje como escurrimiento subsuperficial, o bien, regresar a la superficie cuando se encuentre a su paso un estrato impermeable.

El escurrimiento directo se forma por los flujos superficial y subsuperficial que dan una respuesta inmediata a la lluvia.

El escurrimiento base se encuentra formado por los flujos subsuperficial y subterráneo que tienen una respuesta lenta ante la lluvia pero que permiten la existencia de corrientes todo el año y mantienen el nivel freático por arriba del fondo del cauce.

El escurrimiento total es la suma del escurrimiento directo y el base.(8)

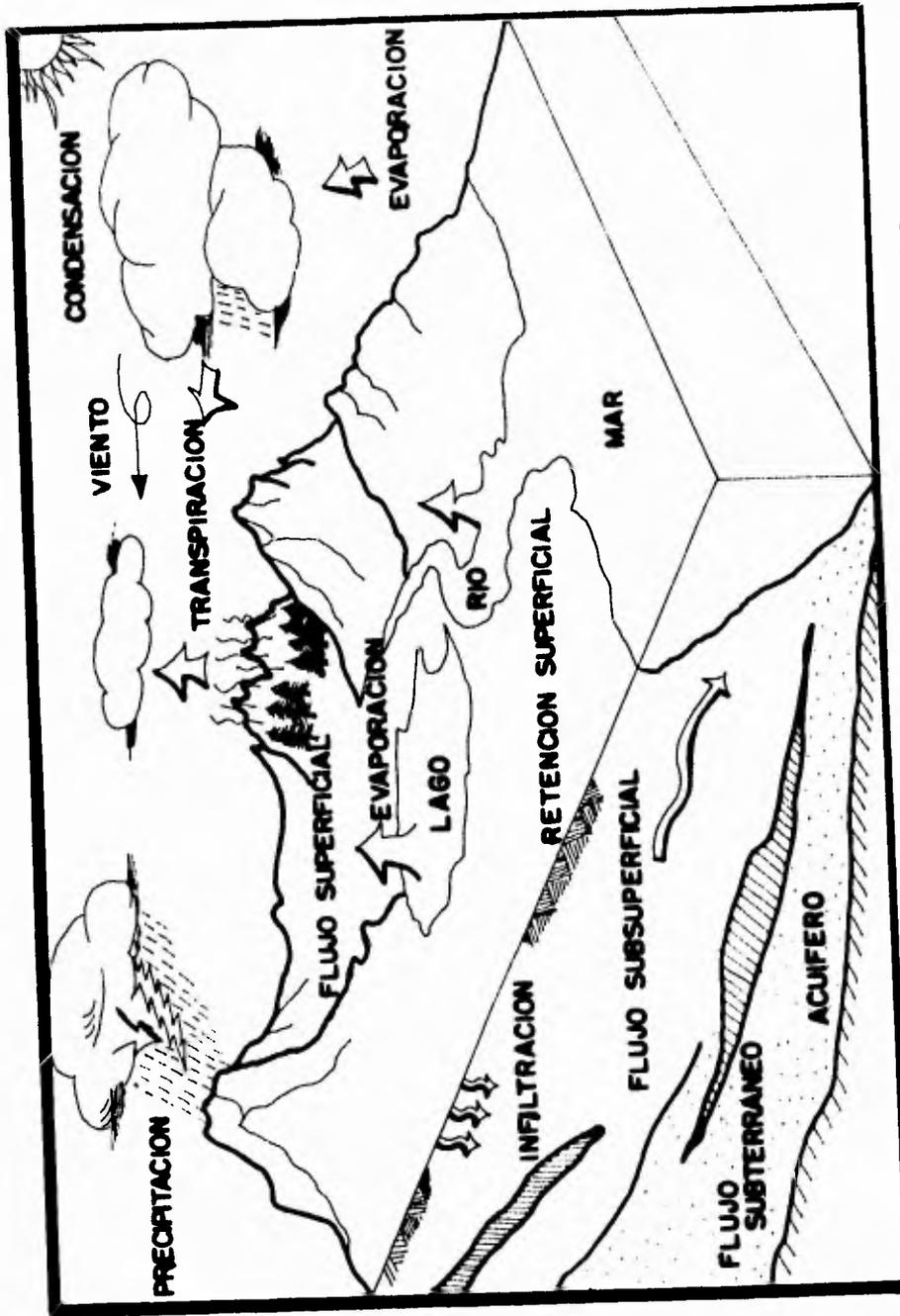


Fig. 2. 10. REPRESENTACION DEL CICLO HIDROLOGICO

2.2.2. Factores que afectan el escurrimiento.

El escurrimiento puede modificarse de acuerdo con los siguientes factores:

a) Factores que afectan el volumen de escurrimiento.

- Climáticos: temperatura, humedad en el aire.
- Fisiográficos: tamaño y pendiente de la cuenca, pendiente del cauce, tipo y uso del suelo.

b) Factores que afectan la distribución en el tiempo del escurrimiento.

- Meteorológicos: intensidad, duración, distribución y trayectoria de la precipitación.
- Físicos: intercepción, evapotranspiración y humedad del suelo.
- Fisiográficos: topográficos, geológicos, tipos de suelo, cubierta vegetal, red de drenaje.
- Humanos: estructuras hidráulicas, prácticas agrícolas y urbanización.

c) Factores que afectan la cantidad de escurrimiento generado a partir de la lluvia.

- La humedad de la cuenca al comienzo de la tormenta.
- Las características de la tormenta como: altura de precipitación, intensidad y duración.

2.2.3. Medición del escurrimiento.

Recibe el nombre de aforo de corriente la medición del gasto en una sección determinada por una estación hidrométrica preferentemente una vez al día, o bien, de 5 a 6 veces al mes según las condiciones del río. En época de avenidas el número de mediciones se incrementa.

Las estaciones hidrométricas con que cuenta la red nacional según el SMN en 1994 es de 795, distribuidas en 37 regiones hidrológicas. Fig.2.11. Cuenta además, con 113 estaciones de sedimentos y 282 estaciones de niveles en vasos. Este número de estaciones resultan insuficiente debido a que la mayoría de ellas aforan cuencas de más de 10000 Km², por lo que es necesario instrumentar una serie de cuencas pequeñas representativas de las diversas condiciones hidrológicas en el país cuyo fin sea conocer mejor su comportamiento y crear criterios propios.

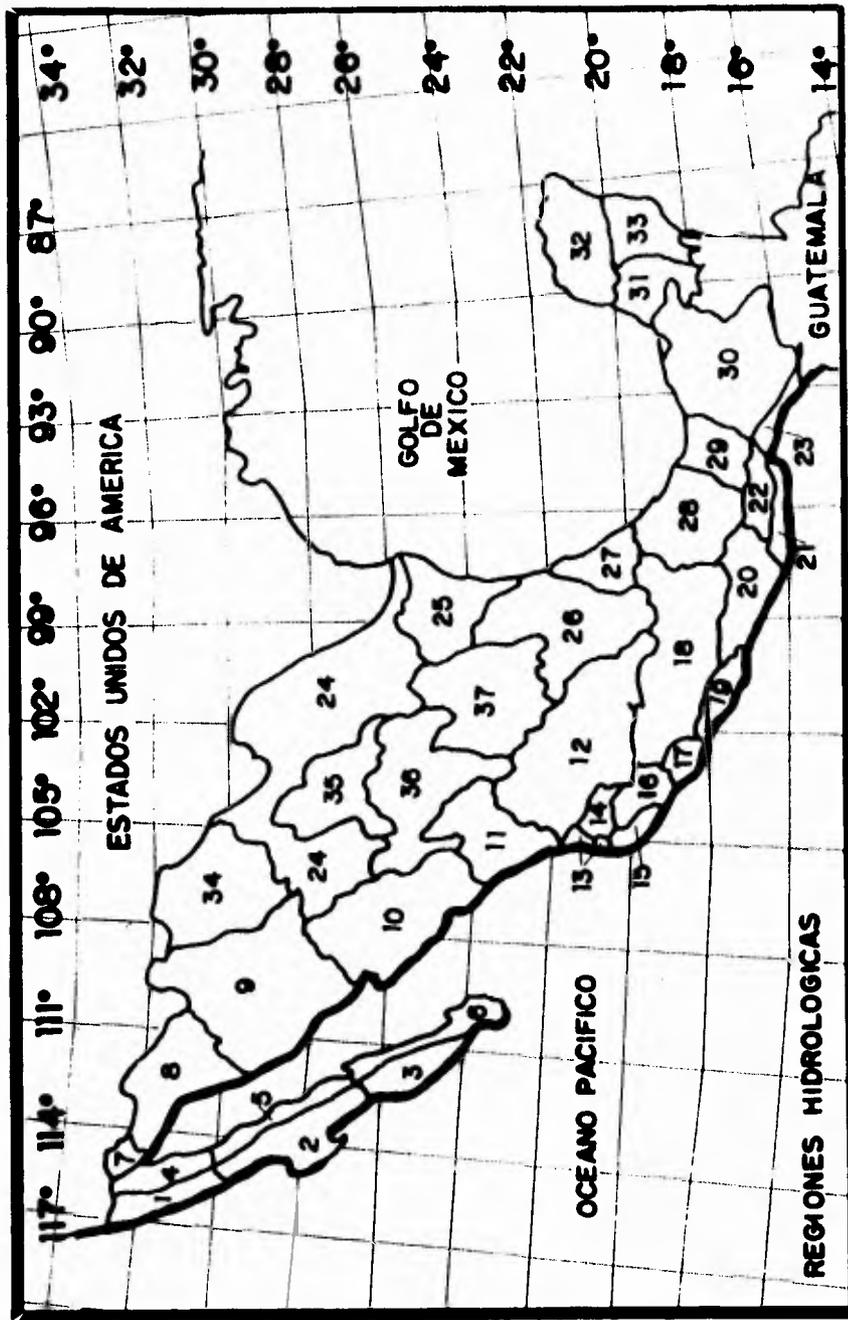


Fig. 2.11. REGIONALIZACION A PARTIR DEL ESCURRIMIENTO

Los aparatos con los que se mide el nivel del cauce son los limnómetros. Estos instrumentos pueden ser de dos tipos:

- Directos, también llamados escalas, los cuales miden las variaciones del nivel de agua en la corriente permitiendo la lectura directamente.
- Indirectos, instalaciones donde el nivel de la corriente se mide por medio de un peso suspendido o por medio de cable y peso.

El primero consiste en bajar un peso en una estructura hasta tocar la superficie del agua y por diferencia de alturas determinar la altura deseada. El segundo, posee un tambor con una circunferencia que a cada vuelta desarrolla una longitud de cable mismo que con un contador registra el número de vueltas determinándose así la altura.

Los limnógrafos son aparatos que registran continuamente las variaciones de nivel del agua de un río, sea por medio de un flotador o tomando en cuenta la variación de la presión del agua. Los primeros constan de un tambor acoplado a un sistema de relojería, un flotador con contrapeso y un cilindro que protege el mecanismo de la humedad y el polvo. En el tambor se coloca la gráfica donde se registra mediante una plumilla la variación del nivel del agua.

Los limnógrafos requieren de un pozo amortiguador que proteja el flotador y los cables del contrapeso de residuos flotantes y del oleaje superficial. El registro de niveles contra el tiempo que se obtiene de un limnógrafo se llama limnograma.

Algunos errores que se comenten en la medición del escurrimiento son:

- La cota del nivel del limnógrafo suele estar referida a algún banco arbitrario, por lo que no es posible relacionarla con la topografía del cauce.
- En muchas ocasiones no se aforan los valores máximos de los gastos durante las avenidas.
- Los aforos realizados no permiten reproducir las curvas elevaciones-gasto asociadas a algunas avenidas en particular.

Para poder valuar el gasto que pasa por una sección se utilizan los métodos de:

- 1) Sección de control.
- 2) Relación sección-pendiente.
- 3) Relación sección-velocidad.

Sección de control.

La sección de control es aquella en donde existe una relación conocida entre gasto y tirante. Esta sección puede valuarse mediante un tirante crítico provocado por la elevación de la plantilla del cauce y/o estrechando la sección, o bien, mediante la colocación de un vertedor, que lo hace más exacto. En general se utiliza en ríos con escurrimiento pequeño o para cauces artificiales, debido a que genera un remanso aguas arriba de la sección. Fig. 2.12.a.

Cuando se eleva el fondo del cauce el gasto se calcula usando la fórmula para vertedores de pared gruesa como:

$$Q = 1.7 BH^{3/2} \quad (2.14)$$

donde:

B= ancho del cauce, en m.
H= carga sobre el vertedor, en m.
Q= gasto, en m³/s.
L= longitud de la cresta, en m.

Se recomienda que:

$$3 < L/H < 4$$

o bien:

$$\sigma < 0.8 H$$

Otra manera de provocar un tirante crítico es cuando existe una caída libre del agua, la cual se calcula con el tirante medio justo antes de la caída, Fig.2.12.b., como:

$$Q = 1.65 By(gy)^{1/2} \quad (2.15)$$

donde:

y= tirante, en m.
g= aceleración de la gravedad, en m/s².

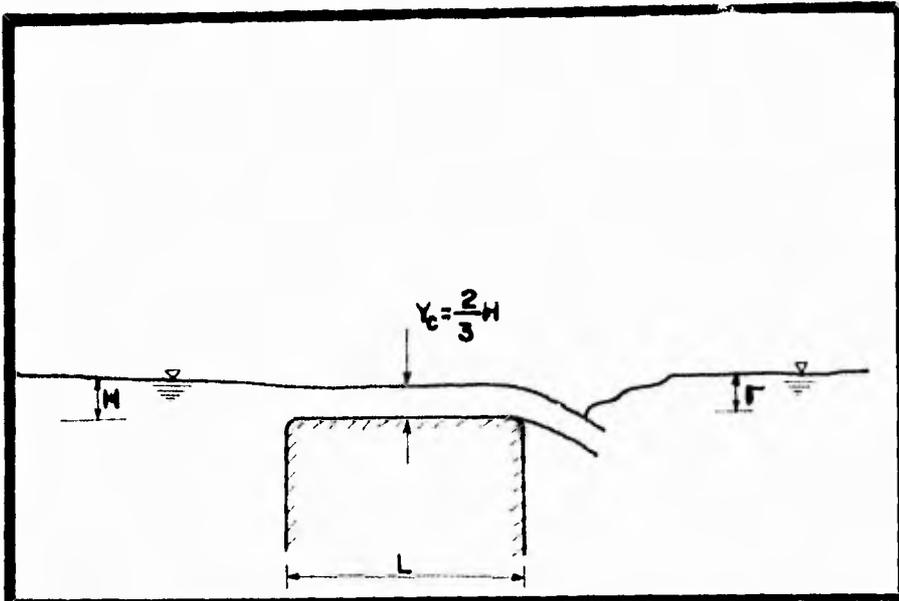


Fig. 2.12.a. TIRANTE CRITICO ARTIFICIAL

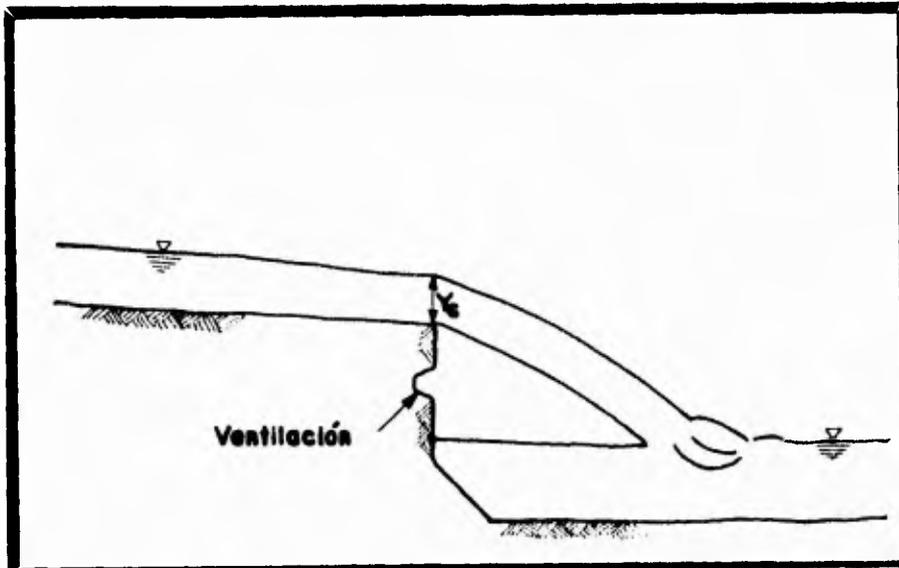


Fig. 2.12.b. TIRANTE CRITICO NATURAL

En caso de construir la sección de control Aparicio recomienda usar un vertedor triangular Fig.2.13.a. de pared delgada con ángulo de 90° para gastos pequeños de 0 a 100 l/s, calculándose como:

$$Q=1.49 H^{2.48} \quad (2.16)$$

El vertedor rectangular se recomienda para gastos mayores de 100 a 1000 l/s, Fig.2.13.b.en cuyo caso el gasto se obtendrá de la siguiente expresión:

$$Q=1.9 L H^{3/2} \quad (2.17)$$

donde :

H= carga sobre la cresta del vertedor, en m. medida a una distancia 4H aguas arriba de la cresta.

Relación sección-pendiente.

Este método está basado en la fórmula de Manning y se utiliza para estimar el gasto máximo que se presentó en una avenida reciente, para ello, es necesario conocer la topografía que permitirá determinar el área y el radio hidráulico, también es importante saber cual es el coeficiente de rugosidad del cauce así como el nivel máximo del agua durante la avenida. Fig. 2.14.

A partir de la fórmula de velocidad:

$$v = \frac{R^{2/3} S_f^{1/2}}{n} \quad (2.18)$$

donde:

v= velocidad, en m/s.

R= radio hidráulico, en m.

S_f= pendiente de la línea de energía específica.

n= coeficiente de rugosidad.

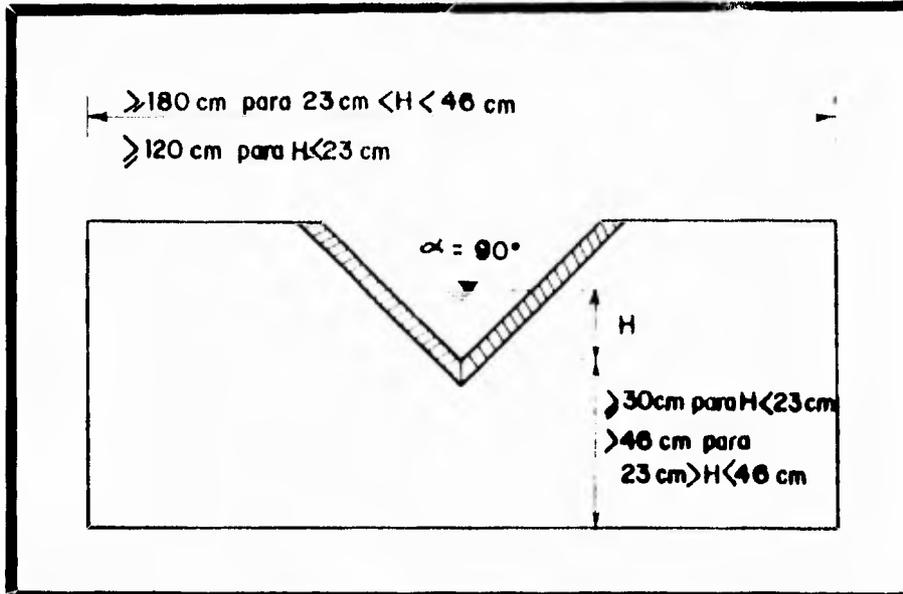


Fig. 2.13. a. VERTEDOR TRIANGULAR

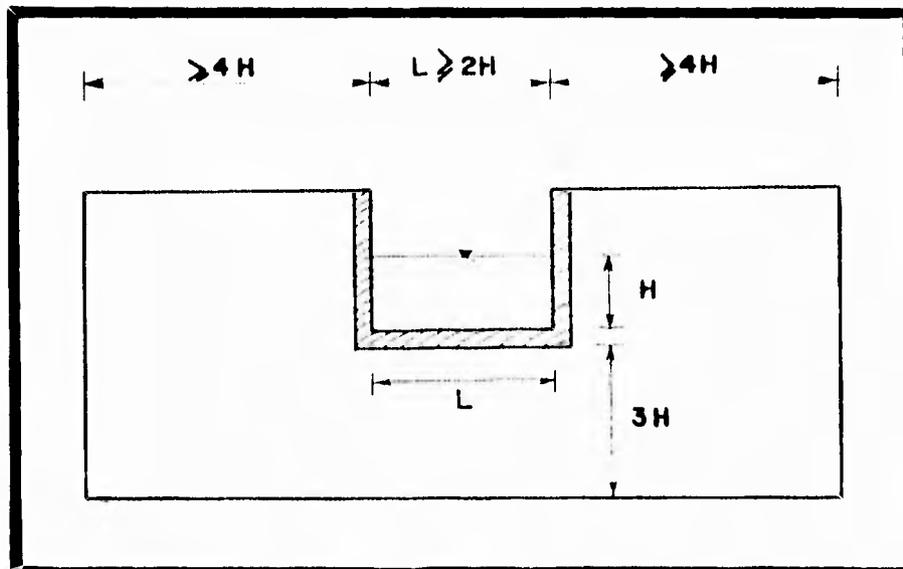


Fig. 2.13. b. VERTEDOR RECTANGULAR

Se aplicará la ecuación de Bernoulli en los extremos del tramo:

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (2.19)$$

Y con la ecuación de continuidad:

$$Q = v \cdot A \quad (2.20)$$

donde:

A = área hidráulica media para ambos puntos, en m².

Se obtiene que:

$$(z_1 + y_1) - (z_2 + y_2) = \Delta y \quad (2.21)$$

Por lo tanto:

$$h_f = \Delta y + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_1^3} - \frac{1}{A_2^3} \right) \quad (2.22)$$

Para tomar en cuenta las pérdidas locales la ecuación debe quedar como:

$$h_f = \Delta y + \frac{Q^2}{bg} \left(\frac{1}{A_1^3} - \frac{1}{A_2^3} \right) \quad (2.23)$$

donde:

b=2 si A₁ > A₂
b=4 si A₁ < A₂

Utilizando la ecuación del gasto a partir de la fórmula de la velocidad de Manning expresada como:

$$Q = \frac{A R^{2/3} S_f^{1/2}}{n} = K_p S_f^{1/2} \quad (2.24)$$

donde:

K_m = coeficiente de conducción medio en el tramo.

Y tomando en cuenta que:

$$S_f = \frac{h_f}{L} \quad (2.25)$$

Se obtiene:

$$S_f^2 = \frac{(\Delta y + \Delta h_v)}{L} \quad (2.26)$$

con el valor S_f iteramos obteniendo v y Q hasta que:

$$Q_i = Q_{i-1} \quad (2.27)$$

o suficientemente parecido, (en un rango de 1 al millar) véase en el siguiente ejemplo:

De acuerdo con la fig. 2.14 se tienen los siguientes datos:

$L = 30 \text{ m}$	$n = 0.017$
$A_1 = 8.25 \text{ m}^2$	$P_m = 4.2 \text{ m}$
$R = A/P_m = 1.9643 \text{ m}$	$z_1 = 97.5 \text{ m}$
$y_1 = 2.3 \text{ m}$	$A_2 = 8.12 \text{ m}^2$
$z_2 = 95.0 \text{ m}$	$y_2 = 2.25 \text{ m}$

Suponiendo el valor $S_f = 0.035$ calcularemos el valor de la velocidad v como:

$$v = \frac{R S_f}{n} = \frac{1.9643 (0.035)}{0.017} = 17.26 \text{ m/s}$$

$$Q = v A = (17.26)(8.25) = 142.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta y = (z_1 + y_1) - (z_2 + y_2) = (97.5 + 2.3) - (95.0 + 2.25) = 1.55 \text{ m}$$

$$h_f = \Delta y + \frac{Q^2}{2g} \left[\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right] = 1.55 + \frac{142.4^2}{19.82} \left[\frac{1}{8.25^2} - \frac{1}{8.12^2} \right] = 1.06 \text{ m}$$

$$S_f = h_f/L = 1.130/30 = 0.035329773$$

iterando tendremos

v= 17.342 m/s
Q= 143.069 m³/s
hf=1.055 m
Sf=0.035175846

2a. iteración

v= 17.304 m/s
Q= 142.757 m³/s
hf=1.057 m
Sf=0.035247694

3a. iteración

v= 17.322 m/s
Q= 142.902 m³/s
hf=1.0564 m
Sf=0.035214158

4a. iteración

v= 17.313 m/s
Q= 142.935 m³/s
hf=1.0569 m
Sf=0.035229811

5a. iteración

v= 17.317 m/s
Q= 142.866 m³/s
hf=1.0566 m
Sf=0.03522505

6a. iteración

v= 17.316 m/s
Q= 142.856698 m³/s
hf=1.05674 m
Sf=0.035224727

7a. iteración

v= 17.3158 m/s
Q= 142.856043 m³/s
hf=1.056746 m
Sf=0.035224878

Obteniendo el rango de error

$$1 - \frac{Q}{Q_{i-1}} = 1 - \frac{142.856698}{142.856043} = 0.00069$$

aceptándose la última iteración

Relación sección-velocidad.

Otra manera de aforar la corriente es evaluando el área hidráulica y estimando la velocidad media a través de un molinete colocado en varios puntos de la sección transversal que queremos medir, calculando el gasto con la ecuación de continuidad por medio de dovelas. Fig.2.15.a.

Los molinetes son aparatos que poseen una hélice o rueda con aspas o copas que giran impulsadas por la corriente y mediante un mecanismo eléctrico transmiten pulsos por un cable que indican el número de revoluciones con que gira la hélice. Esta velocidad angular se traduce a una velocidad lineal del agua usando una fórmula de calibración previamente determinada para cada aparato.

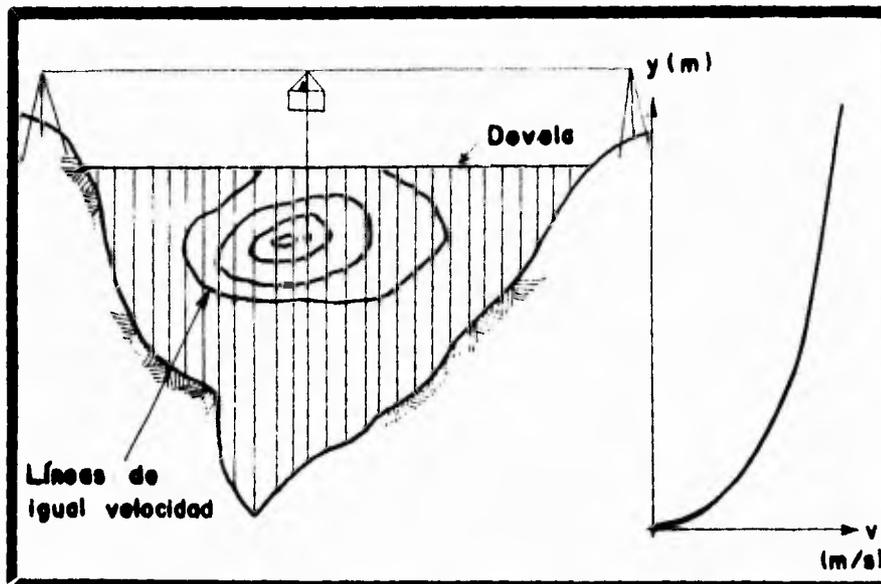


Fig. 2.15.a. VELOCIDAD DEL FLUJO EN SECC. TRANSVERSAL

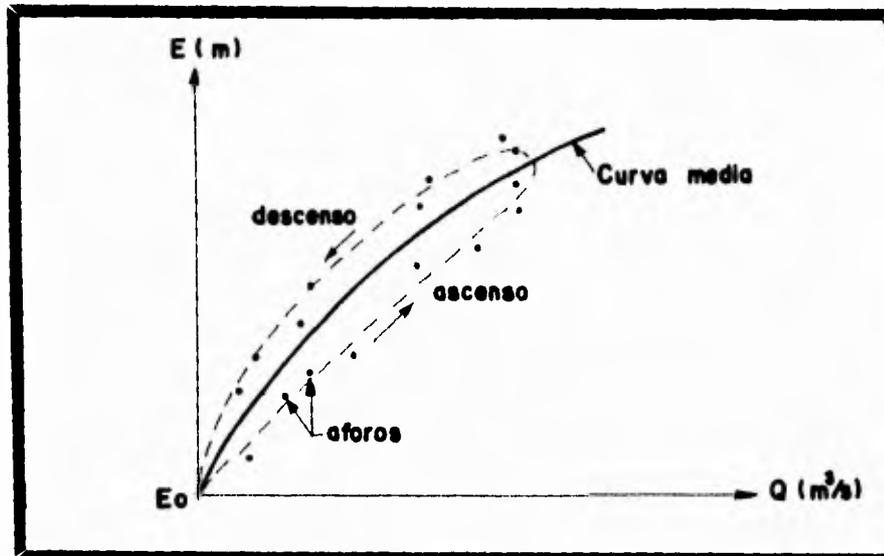


Fig. 2.15.b. CURVA ELEVACION - GASTO

El gasto que pasa por cualquier dovela es:

$$Q = a_1 v_{m1} \quad (2.28)$$

La velocidad media se puede tomar como la medida de la profundidad de $0.6 y_1$ (tirante medio al centro de la dovela, si ésta no es muy grande), en caso contrario la velocidad media será:

$$v_{mi} = \frac{v_{20} + v_{80}}{2} \quad (2.29)$$

donde:

v_{20} = velocidad medida a 0.2 de y_1

v_{80} = velocidad medida a 0.8 de y_1

El principal inconveniente es que resulta ser un aforo muy largo y sólo se pueden hacer algunas mediciones, lo que nos conduce a un hidrograma escaso de datos, por lo que, se acostumbra dibujar curvas de elevación del nivel del agua contra gasto, con lo que se logra un registro continuo de niveles en la sección que permite determinar el gasto en cualquier instante. Fig.2.15.b.

2.2.4. Análisis de hidrogramas.

Hidrograma es una gráfica del gasto que pasa por una sección particular de una corriente (normalmente a la salida de la cuenca) dibujada como una función del tiempo.

El hidrograma es reflejo y efecto del tipo de precipitación cuya representación gráfica se llama hietograma.

Se entiende por análisis de un hidrograma al proceso de señalar en él los escurrimientos base y directo así como sus puntos mas relevantes. Existen varios criterios para separarlos para lo cual, es necesario describir algunos términos.

Punto de levantamiento.- Es el punto donde el agua que proviene de una tormenta comienza a llegar a la salida de la cuenca. Fig.2.16.

Tiempo de pico.- Tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento del hidrograma hasta el pico del hidrograma.

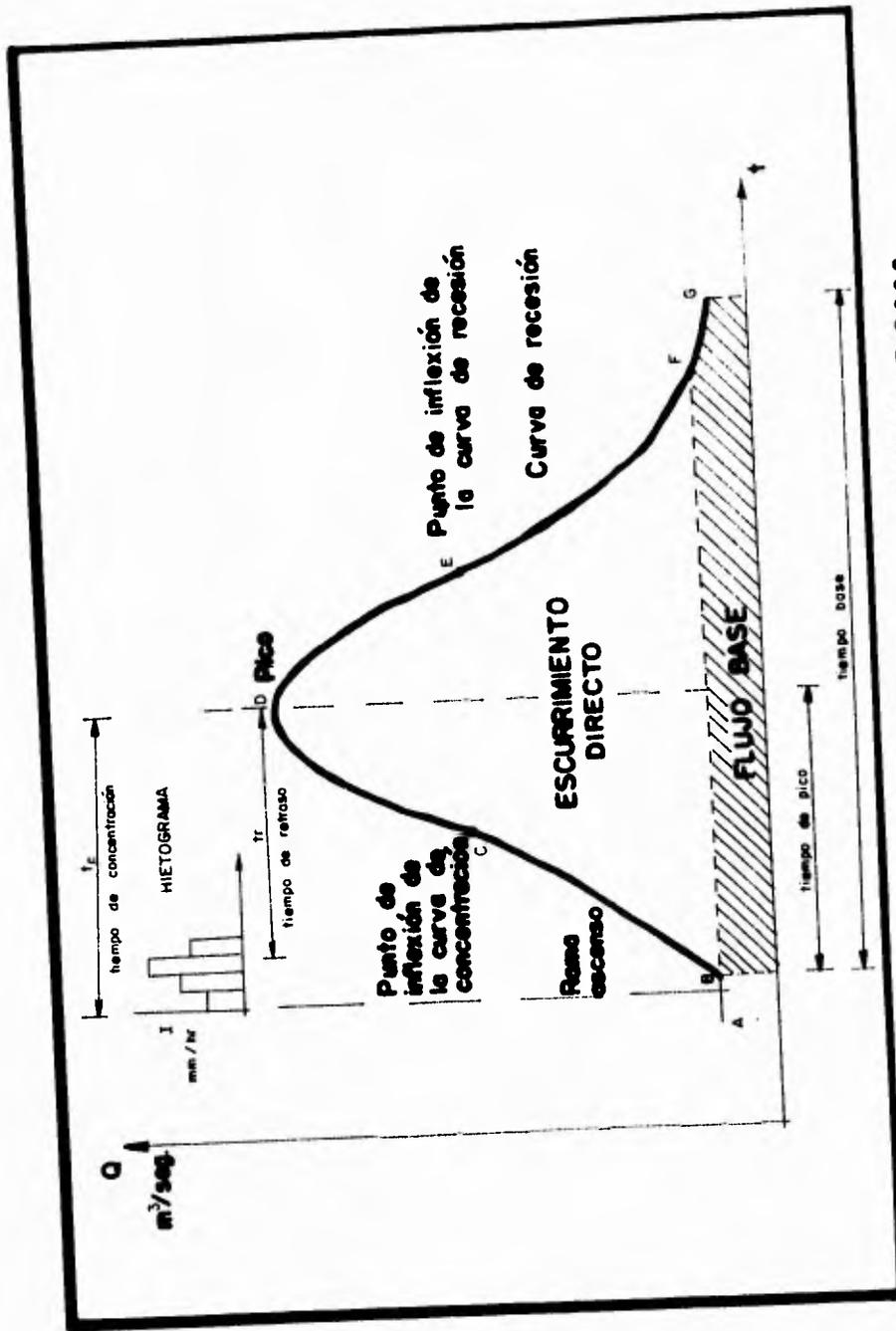


Fig. 2.16. COMPONENTES DEL HIETOGRAMA

Tiempo base.- Tiempo que transcurre desde el levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo.

Tiempo de concentración.- Tiempo transcurrido desde que comienzan los escurrimientos superficiales hasta que todas las precipitaciones efectivas sobre la cuenca contribuyen a incrementar el flujo en su sección de salida.

Los métodos para separar el escurrimiento base del directo son:

a) **Criterio de la horizontal.-** Se traza una línea horizontal donde inicia el punto de levantamiento hasta que corte con la curva de recesión.

b) **Criterio de la línea quebrada.-** Se traza una línea tangente al punto donde comienza el levantamiento hasta tocar la línea perpendicular al punto donde se alcanza el pico cortando la curva de recesión con la misma inclinación.

c) **Criterio de la doble tangente.-** Se traza una línea tangente al punto donde comienza el levantamiento hasta tocar la línea perpendicular al punto donde se alcanza el pico, se traza otra tangente al punto donde termina la curva de recesión hasta una línea perpendicular al punto de inflexión en la rama descendente cerrando ambas tangentes.

d) **Criterio de la curva.-** Se utiliza el método anterior sólo que esta vez se suavizan por medio de curvas las tangentes trazadas. Fig. 2.17.

Existen 3 zonas principales en un hidrograma:

a) La parte que corresponde al ascenso de la avenida llamada curva de concentración.

b) La zona que rodea al punto máximo del hidrograma llamada cresta.

c) La parte correspondiente a la disminución progresiva del caudal corresponde al tiempo de vaciado de la cuenca a partir del punto de inflexión, llamada curva de recesión.

La curva de concentración representa la subida de la avenida dependiendo de:

- La duración espacial y temporal de la lluvia.

- La extensión y la disposición de la cuenca comprendida entre las líneas isócronas de escurrimiento.

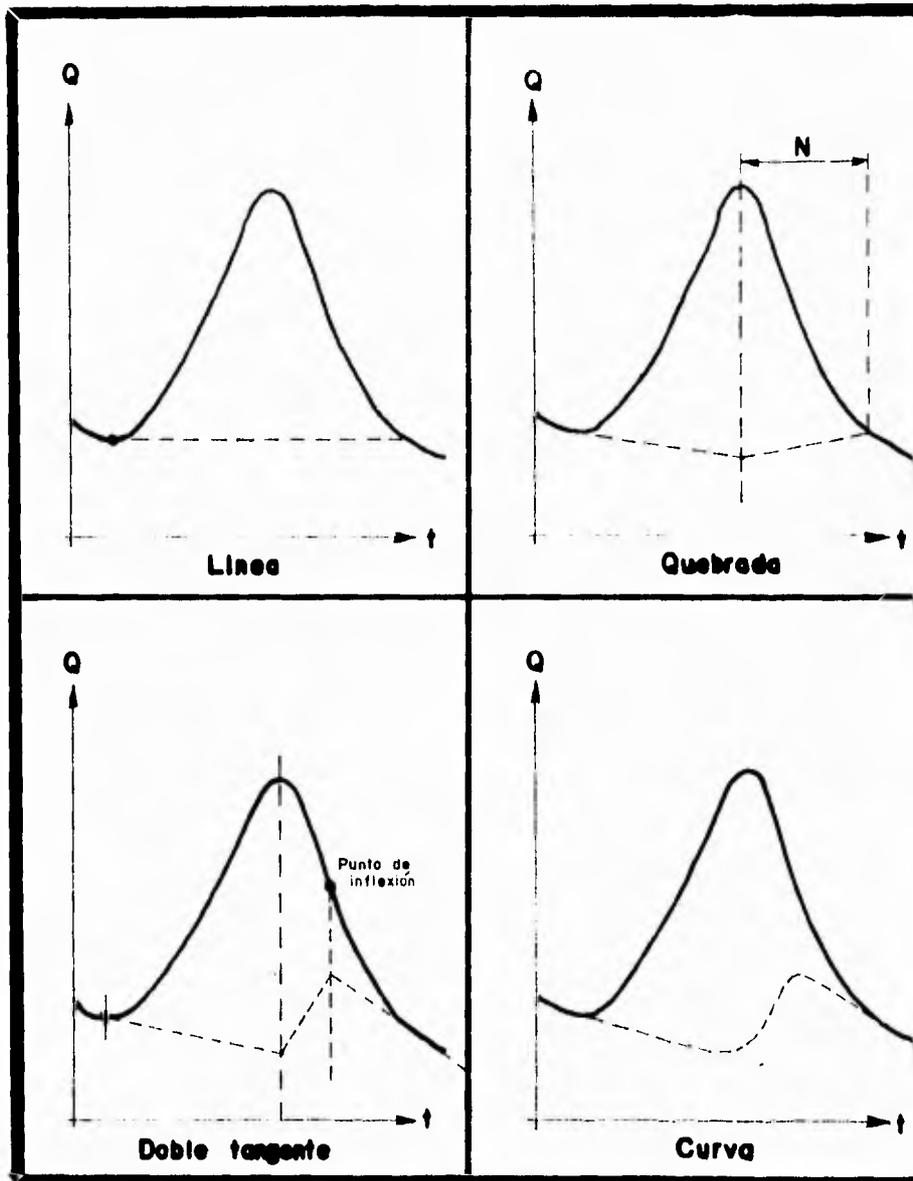


Fig.2.17. SEPARACION DEL FLUJO BASE

- Las condiciones iniciales de la cuenca (humedad del suelo y estado de la cobertura vegetal).

El caudal máximo a la salida de la cuenca se presenta un tiempo después de presentarse la máxima intensidad de la tormenta mismo que se denomina tiempo de retraso.

Aparte de la influencia de la capacidad de almacenamiento de la red hidrológica, el gasto de pico lo produce la zona de la cuenca que suministra el caudal de escurrimiento superficial mas fuerte. En el caso de que la lluvia sea de intensidad y distribución uniformes el pico no puede presentarse antes del fin de la lluvia, ya que sobreviene con un retraso que depende de las características de la cuenca y de la duración de la lluvia. Si la distribución de la lluvia no es uniforme, el pico estará más próximo al comienzo de la curva, o bien, cuando esté localizada cerca de la salida, o bien, si la intensidad máxima de la lluvia se presenta al inicio, el pico del hidrograma puede presentarse antes que finalice la lluvia.

2.2.5. Cálculo de volúmenes escurridos y estimación de registros faltantes.

Este cálculo surge a partir del hidrograma que relaciona gasto contra tiempo y del registro de niveles del agua, que abarque el período en el que se realizaron los aforos, dividiéndolo en dos épocas: de estiaje y de lluvias o avenidas.

A partir de la información disponible existen procedimientos de cálculo basados en:

- Lecturas de escala y tabla de gastos.
- Registro del limnógrafo y curva de elevaciones gastos.
- Aforos.

Con éstos datos se puede determinar el gasto medio diario y con la suma de todos los valores el volumen escurrido mensual y anual.

Quando se requiere estimar los valores faltantes de un registro de volúmenes escurridos anuales, se cuenta con el análisis de regresión y correlación aplicados a los registros hidrométricos cercanos o a las lluvias anuales de una estación pluviométrica ubicada dentro de la cuenca de la estación de aforos incompleta.

En el primer caso se busca la mejor correlación entre el registro anual incompleto y el de una estación hidrométrica cercana que contenga la información faltante, para que con la ecuación de regresión encontrada se estimen los valores faltantes.

En el segundo caso se plantean ecuaciones que relacionan la lluvia con el escurrimiento, la cual se describirá en el siguiente capítulo.

CAPITULO III
METODOS DE RELACION
LLUVIA ESCURRIMIENTO.

MÉTODOS DE RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO.

3.1. Introducción.

En muchos sitios de la República Mexicana se desconocen los datos de escurrimiento necesarios para el diseño de obras hidráulicas, por lo que se hace necesario contar con métodos que lo determinen con cierta precisión a partir de la información proporcionada de la cuenca.

La relación entre la precipitación y el escurrimiento es de gran importancia pues permite inferir uno a partir del otro, además se puede conocer la tormenta de diseño optimizando los registros de precipitación y si se conoce la liga entre la precipitación y el escurrimiento se podrá calcular la avenida máxima.

Actualmente se están haciendo estudios importantes para establecer coeficientes propios, pero existen algunos inconvenientes debido a que:

- Se perdió información en el temblor de 1985.
- Los registros hidroclimatológicos con frecuencia son defectuosos o inconsistentes.
- A medida que se cuenta con mayor cantidad de información los coeficientes pueden cambiar.

A continuación se establecerán los métodos más utilizados para determinar la relación lluvia-escurrimiento.

3.1.1. Generalidades.

Para obtener la relación entre lo que se precipita y lo que escurre se requiere conocer:

- Las características físicas y fisiográficas de la cuenca.
- La distribución espacial y temporal de la precipitación.

Las características de la cuenca que son tomadas con mayor frecuencia en los análisis son las siguientes: tamaño y pendiente de la cuenca³, tipo, uso y humedad del suelo.

³ En México una cuenca pequeña puede considerarse hasta de 3000 Km², mientras que en la literatura extranjera se considera de 250 Km².

La distribución de la precipitación se obtiene mediante los datos registrados por pluviómetros y pluviógrafos en una cuenca determinada, estableciendo la precipitación promedio del área de estudio mediante los Polígonos de Thiessen o mediante el método de isoyetas, obteniendo la altura de precipitación media.

Para calcular el escurrimiento producido a partir de los datos de precipitación existen diferentes métodos. A continuación mencionaremos los mas relevantes.

- Los que arrojan como resultado el gasto máximo sin definir la forma de la avenida, como el de las envolventes, el racional y el de Chow, entre otros.

- Los que requieren de mediciones simultáneas de precipitación y escurrimiento, y definen el gasto pico y la forma de la avenida; como el del hidrograma unitario.

- Otros que no requieren de mediciones simultáneas pero que definen la forma de la avenida como son el hidrograma unitario triangular y el hidrograma unitario adimensional.

La selección del método a aplicar dependerá de la cantidad de información disponible . En caso de contar con suficiente información dependerá del calculista. Esto resulta importante ya que una buena selección influirá en un mejor diseño.

Existen también programas de cómputo para predicciones de avenidas elaborados por el Instituto de Ingeniería y por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

3.1.2. Precipitación efectiva.

Todos los métodos que se describirán más adelante utilizan la precipitación efectiva, la cual se entiende como la diferencia entre el total de lo que llueve menos lo que se infiltra, es decir, la parte de la precipitación que efectivamente produce escurrimiento.

Para determinar el valor de la precipitación efectiva o precipitación en exceso existen algunos métodos como los del índice de infiltración constante o variable y el de los números de escurrimiento.

Los métodos del índice de infiltración consisten en establecer una relación entre lo que llueve y lo que escurre a través de un pluviógrafo y una estación de aforos, mediante la siguiente ecuación:

$$P=Q+F \quad (3.1)$$

donde:

F= volumen de infiltración que involucra la intercepción y el almacenaje o lámina de pérdidas acumuladas, en m³.

P= volumen de precipitación o altura de lluvia acumulada, en m³.

Q= volumen de escurrimiento directo, en m³.

El método del índice de infiltración media ϕ , se basa en la hipótesis de que para una tormenta en condiciones iniciales dadas, la cantidad de recarga en la cuenca permanece constante a través de toda la duración de la tormenta. Si se conoce el hietograma de la tormenta y el hidrograma de la avenida, el índice ϕ es la intensidad de la lluvia media sobre la cual el volumen de lluvia es igual al del escurrimiento directo observado.

Para obtener el índice ϕ , a partir del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo, se suponen valores de ϕ , hasta que la suma de las alturas de precipitación sea igual a hpe, de tal manera que:

$$\sum \Delta h_{pe_i} = h_{pe} \quad (3.2)$$

donde:

hpe= lluvia en exceso deducida del volumen de escurrimiento directo (Ved) dividido entre el área de la cuenca A.

$\sum \Delta h_{pe_i}$ =lluvia en exceso en el intervalo de tiempo Δt_i deducido del hietograma de la tormenta.

Debe señalarse que, la lluvia varía con respecto al tiempo y el índice ϕ es constante, por lo que, cuando la variación de la lluvia Δh_{pe_i} es menor que ϕ , se acepta que se infiltró.

En la Fig.3.1.a. se observa que, en este caso, la línea de separación entre el gasto base y gasto directo es una recta horizontal. El volumen de escurrimiento directo es entonces:

$$Ved = \frac{10 \times 1600 \times 9}{2} = 162\ 000 \text{ m}^3.$$

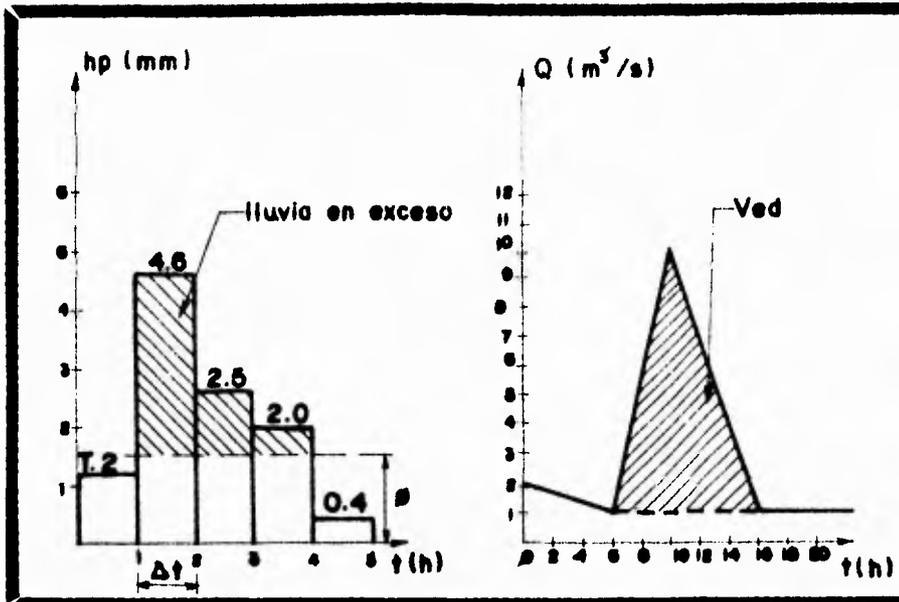


Fig.3.1. a. DETERMINACION DEL INDICE DE INFILTRACION

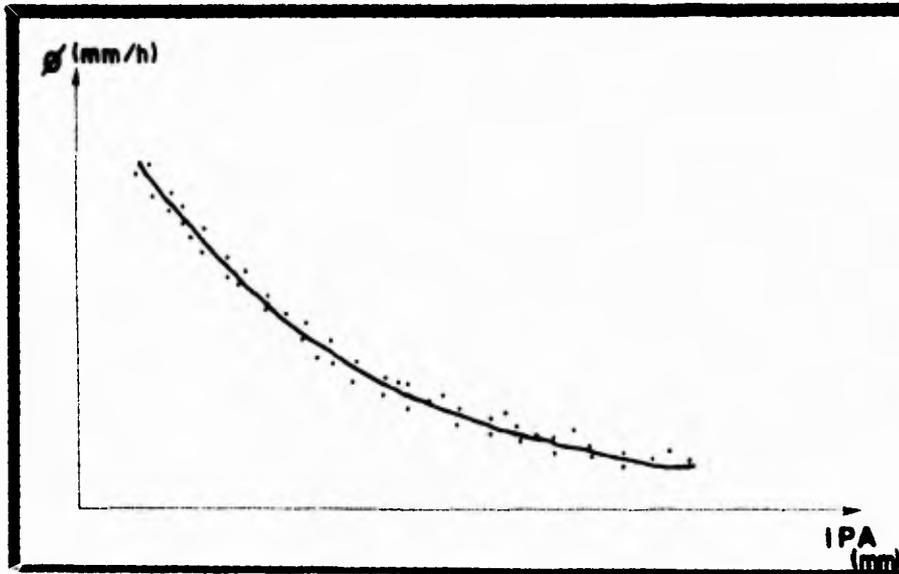


Fig. 3.1.b. INDICE DE PRECIPITACION ANTECEDENTE

Para calcular la lluvia efectiva dividiremos el volumen de escurrimiento directo entre el área de la cuenca que en este caso será de 36 Km². Por lo tanto:

$$hpe = \frac{162\ 000}{36 \times 10^6} = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m} = 4.5 \text{ mm}$$

Tanteando el valor ϕ tendremos:

ϕ mm/h	hpe1 mm	hpe2 mm	hpe3 mm	hpe4 mm	hpe5 mm	$\Sigma hpei$ mm
2	0	2.6	0.5	0	0	3.1
1.5	0	3.1	1.0	0.5	0	4.5

Por lo que ϕ será 1.5 mm/1 h dado que el intervalo Δt en este caso es de 1 h.

El índice ϕ se relaciona con las condiciones de humedad del suelo antes de la precipitación mediante un índice de precipitación antecedente (IPA) el cual es útil para problemas de predicción de avenidas a corto plazo, definido como:

$$(IPA)_{j+1} = k(IPA)_j + P_j \quad (3.3)$$

donde:

IPA= índice de precipitación antecedente, en mm.

P= precipitación total, en mm.

K= constante que toma en cuenta la disminución de la humedad con el tiempo, cuyo valor puede tomarse como de 0.85 para cálculos diarios.

j= día en cuestión.

Si se tienen registros de P y ϕ para varias tormentas en la cuenca en estudio y además se cuenta con las precipitaciones de algunos días anteriores a cada tormenta, es posible construir una gráfica de ϕ vs. IPA, suponiendo un valor inicial de IPA, se obtiene la función IPA(ϕ) mediante algún método de regresión. Fig.3.1.b.

Otra manera de obtener la precipitación efectiva es a partir del número N o número de escurrimiento, el cual depende del tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y la precipitación antecedente. Fig.3.2.

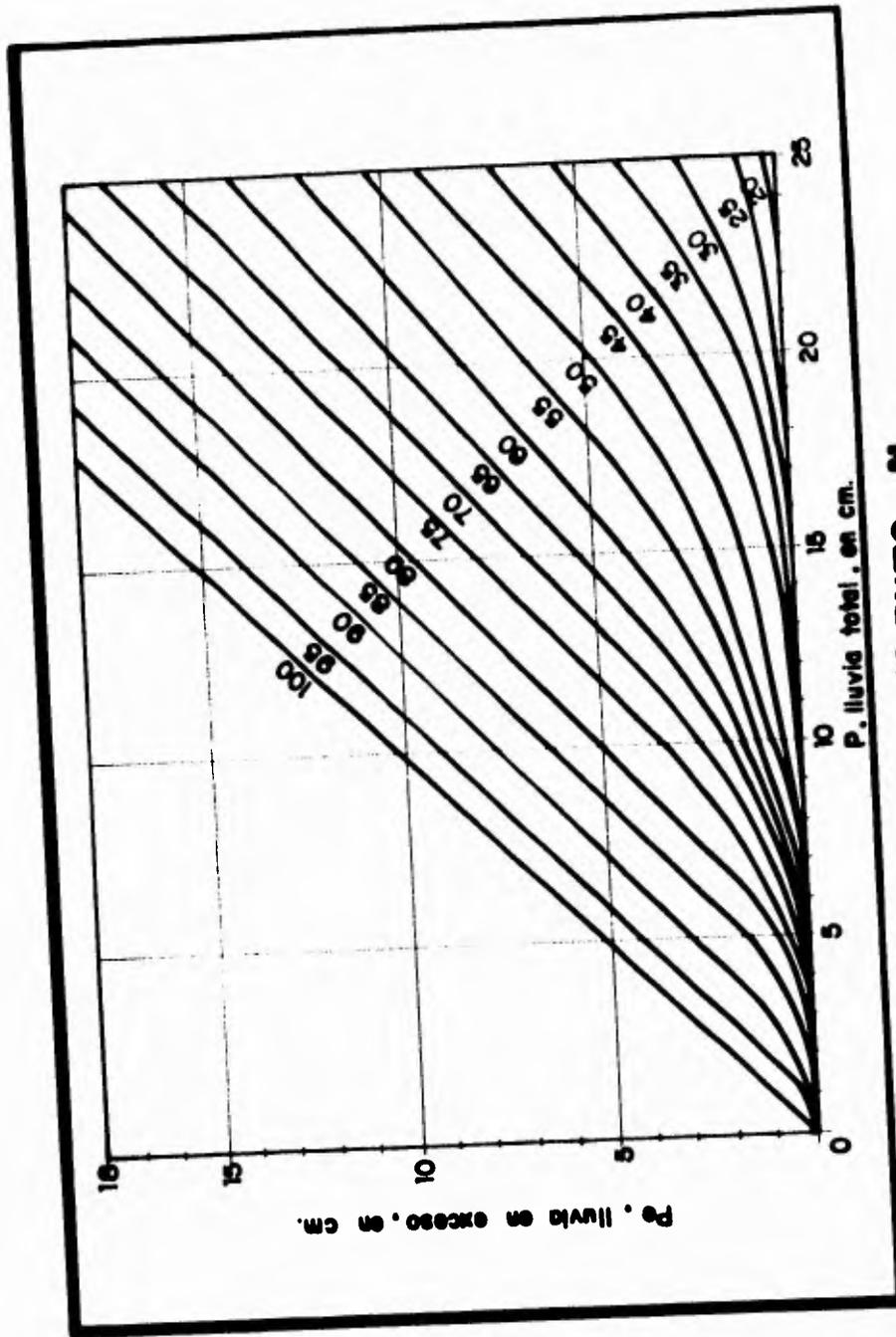


Fig-3.2. NUMERO DE ESCURRIMIENTO N

Para calcular la altura de lluvia efectiva se relaciona la altura de lluvia total con el número de escurrimiento N de acuerdo con la ecuación:

$$hpe = \frac{(P - \frac{508}{N} + 5.08)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (3.4)$$

donde:

hpe= precipitación efectiva, en cm.
P= lámina de lluvia total, en cm.
N= coeficiente adimensional.

Los valores de N se obtienen de la tabla III.1. De acuerdo a algunas condiciones y al tipo de suelo se estima mediante la tabla III.2. y suele hacerse una corrección al número de escurrimiento según la altura de precipitación acumulada 5 días antes de la fecha en cuestión, tabla III.3. de la siguiente manera:

- a) Si $ll_5 < 2.5$ cm, hacer corrección A.
- b) Si $2.5 < ll_5 < 5$ cm, no hacer corrección.
- c) Si $ll_5 > 5$ cm, hacer la corrección B.

Por ejemplo, si una cuenca está formada en un 40% de bosque ralo con arena muy fina y con alto contenido de arcilla, un 30% de pastizales con arenas finas y limos y pendientes mayores al 1%, un 20 % de suelo sin cultivo muy permeable y un 10% de cultivo con surcos rectos y pendiente menor al 1% con suelo muy impermeable y grandes cantidades de arcilla.

El número de escurrimiento para una tormenta cuya altura de precipitación es de 80 mm y en los 5 días anteriores la precipitación acumulada fue menor a 2.5 cm se calculará usando la tabla III.2 y posteriormente la III.1 de la siguiente forma:

$$\begin{array}{r} N_{40} = 78 \times 0.4 = 31.2 \\ N_{30} = 79 \times 0.3 = 23.7 \\ N_{20} = 77 \times 0.2 = 15.4 \\ N_{10} = 91 \times 0.1 = 9.1 \\ \hline 79.4 \end{array}$$

Tabla III.1. SELECCION DE N.

Uso de la tierra cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
sin cultivo	surcos rectos	---	77	86	91	94
Cultivos en surco	surcos rectos	> 1	72	81	88	91
	surcos rectos	< 1	67	78	85	89
	contorneo	> 1	70	79	84	88
	contorneo	< 1	65	75	82	86
	terrazas	> 1	66	74	70	82
	terrazas	< 1	62	71	78	81
Cereales	surcos rectos	> 1	65	76	84	88
	surcos rectos	< 1	63	75	83	87
	contorneo	> 1	63	74	82	85
	contorneo	< 1	61	73	81	84
	terrazas	> 1	61	72	79	82
	terrazas	< 1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	surcos rectos	> 1	66	77	85	89
	surcos rectos	< 1	58	72	81	85
	contorneo	> 1	64	75	83	85
	contorneo	< 1	55	69	78	83
	terraceo	> 1	63	73	80	83
	terraceo	< 1	51	67	76	80
Pastizales	---	> 1	68	79	86	89
	---	< 1	39	61	74	80
	contorneo	> 1	47	67	81	88
	contorneo	< 1	6	35	70	79
Pradera permanente	---	< 1	30	58	71	78
Bosques naturales						
Muy malo	---	---	56	75	86	91
Ralo	---	---	46	68	78	84
Normal	---	---	36	60	70	77
Espeso	---	---	26	52	62	69
Muy espeso	---	---	15	44	54	61
Caminos						
De terracería	---	---	72	82	87	89
Con superficie dura	---	---	74	84	90	92

Tabla III.2. DETERMINACION DEL TIPO DE SUELO PARA LA SELECCION DEL NUMERO N.

Tipo de suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla: suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.
D	Arcillas en grandes cantidades: suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy permeables.

Tabla III.3. CORRECCIONES DE N DE ACUERDO A LA ALTURA DE PRECIPITACION ACUMULADA 5 DIAS ANTES DE LA FECHA EN CUESTION.

N	N con corrección A	N con corrección B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

Para valores intermedios de N interpolar linealmente.

Dado que la precipitación antecedente fue menor a 2.5 cm se usará la corrección A haciendo una interpolación quedará:

$$N_c = 62.28$$

Con este valor y el de la precipitación igual a 8 cm utilizaremos la ecuación 3.5 para obtener la precipitación efectiva:

$$h_{pe} = \frac{(8 - \frac{508}{62.28} + 5.08)^2}{8 + \frac{2032}{62.28} - 20.32} = 1.19 \text{ cm}$$

Una vez estimado el valor del coeficiente de pérdidas por cualquiera de los métodos descritos se procede a calcular el hietograma de lluvia efectiva restando las pérdidas de cada una de las barras del hietograma total.

3.2. Métodos para calcular la relación lluvia-escorrentía.

3.2.1. Método de envolventes.

Creager obtuvo datos sobre avenidas máximas registradas en diferentes cuencas del mundo formando una gráfica como se muestra en la Fig. 3.3. en la que relacionó el área A de la cuenca con el gasto por unidad de área q trazando una envolvente cuya ecuación resultó ser:

$$q = \frac{1.303 C_c (0.386A)^\alpha}{A} \quad (3.5)$$

donde:

$$\alpha = \frac{0.936}{A^{0.048}}$$

A= área de la cuenca, en Km².

q= gasto máximo por unidad de área de la cuenca, en m³/s/km².

Cc= coeficiente de Creager.

Del mismo modo Lowry hizo una envolvente mundial obteniendo la siguiente expresión:

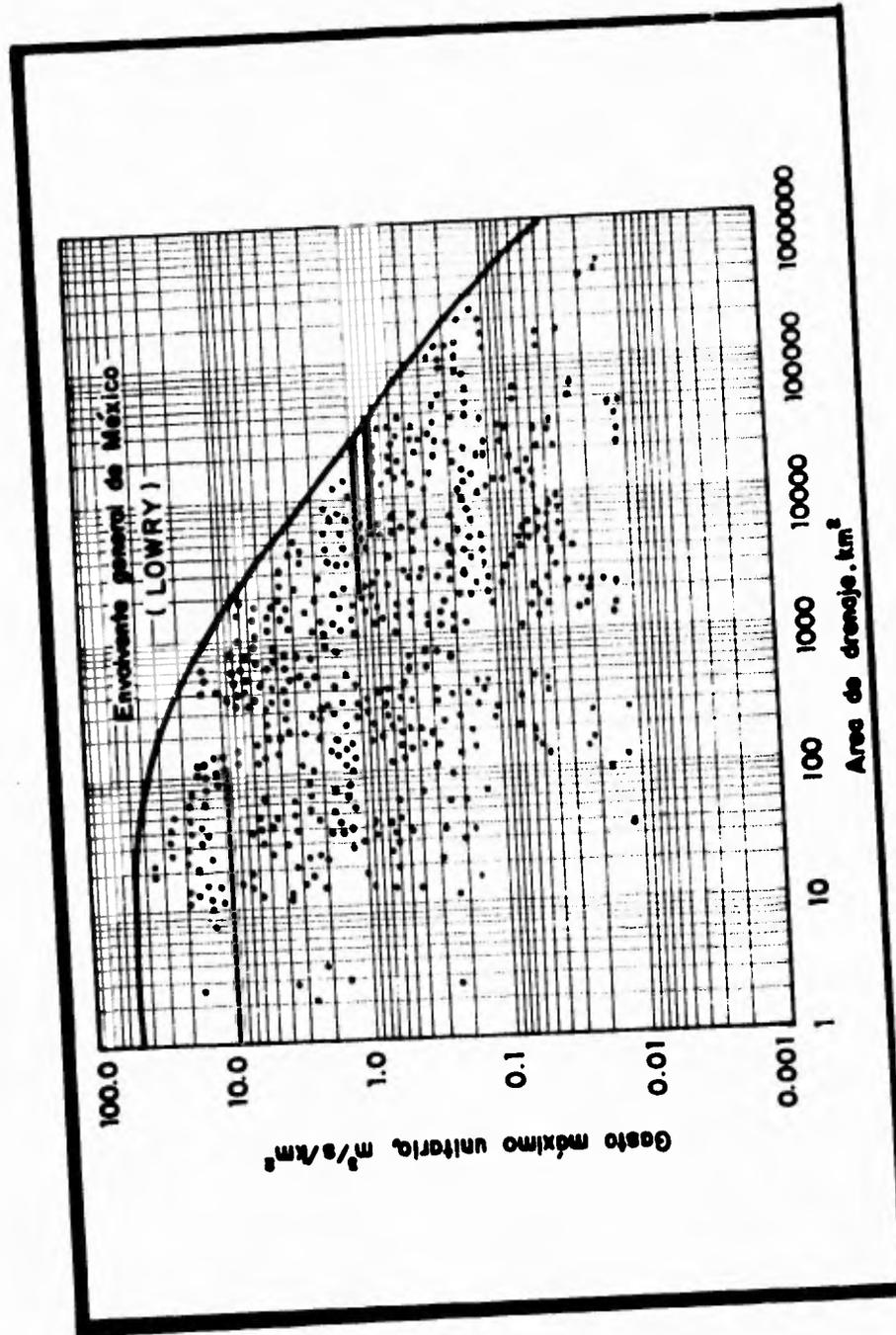


Fig. 3.3. METODO DE ENVOLVENTES

$$q = \frac{Cl}{(A+259)^{0.05}} \quad (3.6)$$

donde:

Cl= coeficiente de Lowry, el cual fue adaptado por la SARH para la República Mexicana, según Tabla III.4.

Ambos métodos tienen el inconveniente de no acotar el gasto máximo, tampoco toman en cuenta la frecuencia de los eventos lo que las hace imprecisas, dependen sólo del área de la cuenca y no de las características fisiográficas y climatológicas por lo que no corresponden a relaciones lluvia-escurrimiento.

En 1972 Springall trató de adaptar los valores de Cc y Cl obteniendo diferentes expresiones para cada una de las regiones hidrométricas en nuestro país, involucrando el gasto máximo para un cierto tiempo de retorno, la media de los gastos máximos observados, la desviación estándar de los gastos máximos anuales, el factor de frecuencia y algunos parámetros de ajuste a las características fisiográficas de las cuencas (7).

3.2.2. Método racional.

Considera que el gasto máximo se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración (véase capítulo 2). Si la duración de la lluvia efectiva es mayor que el tiempo de concentración, se alcanzará un estado de equilibrio tal que el volumen de lluvia efectiva que se precipita en la cuenca en un instante dado es igual al que escurre en su salida en el mismo instante. La fórmula es:

$$Qp = 0.278 C i A \quad (3.7)$$

donde:

Qp= gasto máximo o pico, en m³/s.

C= coeficiente de escurrimiento. Tablas III.5. y III.6.

i= intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, en mm/h.

A= área de la cuenca, en km².

0.278= factor de conversión de unidades.

Tabla III.4. VALORES DEL COEFICIENTE C1 DE LOURY PARA LAS REGIONES DE LA REPUBLICA MEXICANA.

REGION	COEFICIENTE
1 Baja California noroeste (Ensenada)	980
2 Baja California centro (El Vizcaíno)	530
3 Baja California suroeste (Magdalena)	2190
4 Baja California noreste (Laguna Salada)	1050
5 Baja California centro este (Santa Rosalía)	990
6 Baja California sureste (La Paz)	5120
7 Río Colorado	1050
8 Sonora Norte	760
9 Sonora Sur	2140
10 Sinaloa	3290
11 Presidio (San Pedro zona costera)	4630
11a Presidio (San Pedro zona alta)	470
12 Lerma Santiago	1290
13 Huicicila	760
14 Ameca	600
15 Costa de Jalisco	5270
16 Armería- Coahuayana	4940
17 Costa de Michoacán	2100
18 Balsas alto	1090
18a Balsas medio y bajo	4450
19 Costa Grande	2100
20 Costa Chica-Río Verde	3180
20a Alto Río Verde	390
21 Costa de Oaxaca (Puerto Angel)	3000
22 Tehuantepec	2170
23 Costa de Chiapas	1190
24a Alto Bravo-Conchos	1020
24b Medio Bravo	5170
24c Río Salado	1410
24d Bajo Bravo	2130
25 San Fernando-Soto la Marina	2330
26a Alto Pánuco	1360
26b Bajo Pánuco	3010
26c Valle de México	760
27 Tuxtla-Nautla	2450
28 Papaloapan	1750
29 Coatzacoalcos	1840
30a Grijalba-Usumacinta	2130
30b Alto-Grijalba	610
31 Yucatán oeste (Campeche)	370
32 Yucatán norte (Yucatán)	
33 Yucatán este (Quintana Roo)	
34 Cuencas cerradas del norte (Casas grandes)	230
35 Mapimí	
36a Nazas	1510
36b Aguanaval	380
37 El Salado	1310

Tabla III.5. VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO C PARA LA FORMULA RACIONAL.

Tipo de Area Drenada	Mín.	Máx.
Zonas comerciales:		
zona comercial	0.70	0.95
vecindarios	0.50	0.70
Zonas Residenciales:		
unifamiliares	0.30	0.50
multifamiliares espaciados	0.40	0.60
multifamiliares compactos	0.60	0.75
semiurbanas	0.25	0.40
casas habitación	0.50	0.70
Zonas Industriales:		
espaciado	0.50	0.80
compacto	0.60	0.90
Cementerios y parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril	0.20	0.40
Zonas Suburbanas	0.10	0.30
Calles:		
asfaltadas	0.70	0.95
de concreto hidráulico	0.80	0.95
adoquinadas	0.70	0.85
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas:		
suelos arenosos planos (pend. 0.02)	0.05	0.10
suelos arenosos medios (0.02-0.07)	0.10	0.15
suelos arenosos escarpados(0.07-más)	0.15	0.20
suelos arcillosos planos(0.02 o menos)	0.13	0.17
suelos arcillosos medios(0.02-0.07)	0.18	0.22
suelos arcillosos escarpados(0.07-más)	0.25	0.35

En este método se incorpora la altura de precipitación a partir de las curvas intensidad-duración-tiempo de retorno (i-d-T) y se utiliza para calcular el gasto máximo de una avenida pero no su forma supone además, que el coeficiente de escurrimiento es independiente del período de retorno lo cual es aproximadamente cierto para períodos de retorno entre 2 y 10 años. (9)

Por ejemplo, si queremos determinar el gasto de diseño para un tiempo de retorno de 10 años a la salida de la cuenca mostrada en la Fig.3.4., utilizando las curvas i-d-T las cuales fueron obtenidas con el procedimiento descrito en el capítulo 2.

La cuenca se clasifica de la siguiente manera: Para la parte superior de la cuenca la longitud del cauce es de 1.3 km, y la pendiente media es de 31, el cual corresponde a un terrenos escarpado con pendiente superior al 30% con infiltración lenta de arcilla, cubierta vegetal de buena a regular con bosques y almacenaje superficial despreciable. En la parte media la longitud del cauce es de 2.5 Km y su pendiente es del 15% y corresponde a una zona de pastizales y la parte inferior la longitud del cauce es de 0.8 Km, con pendiente del 5% en una zona suburbana. Fig.3.4.

Calculando el coeficiente C tendremos:

$$\begin{array}{ll} A_1 = 23.25 \text{ Km}^2 & A_2 = 182.81 \text{ Km}^2 \\ A_3 = 10.60 \text{ Km}^2 & A_t = 216.66 \text{ Km}^2 \end{array}$$

C1 de la tabla III.6 tenemos:

relieve	0.4
Infiltración	0.15
Cubierta vegetal	0.1
Almacenaje superficial	0.2
Σ	0.85

C2 de la tabla III.5 tenemos:

pradera con suelo arcilloso escarpado 0.35

C3

zona suburbana 0.3

$$C = \frac{0.85 A_1 + 0.35 A_2 + 0.3 A_3}{A_t} = .4012$$

De acuerdo a la Fig.2.9.e. que muestra la gráfica i-d-T, para una duración de 20 minutos y un período de retorno de 10 años:

$$i = 101.525 \text{ mm/h}$$



$T_r = 10$ años

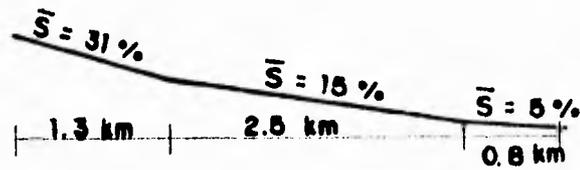
$d = 20$ min.

$$L = \frac{301.30 T^{0.571}}{d^{0.802}}$$

$$L = \frac{301.30 (10)^{0.571}}{200.802}$$

$$L = 101.525 \text{ mm/hr}$$

Area total de la cuenca 216.66 km^2



Perfil del río

Fig. 3.4. CALCULO DEL GASTO MAXIMO
UTILIZANDO LA FORMULA RACIONAL

DESIGNACION DE LAS CARACTERISTICAS DE UNA CUENCA	75 ALTO			50 NORMAL	25 BAJO
	100 EXTREMO	(30)	(15)	(20)	(10)
RELIEVE	(40) Escarpado, terreno abrupto, con pendiente superior al 30%	Montaña, con pendiente promedio de 10 a 30%	(15) Lenta para infiltrar el agua, arcilla u otro suelo con capacidad de infiltración baja	(20) Lomerío, con pendiente promedio de 5 a 10%	(10) Superficie relativamente plana con pendiente promedio de 0 a 5%
INFILTRACION EN EL SUELO	(20) Cubierta no efectiva, roca o suelo fino con capacidad de infiltración despreciable	(15) Lenta para infiltrar el agua, arcilla u otro suelo con capacidad de infiltración baja	(15) De pobre a regular, cultivos nuevos, en tiempo de cosecha o cubiertas pobres, menores al 10% de áreas bajas de drenaje con buena cubierta	(10) Normal, capacidad de infiltración semejante a las de la pampa Suelos limosos, profundos	(5) Alta, arenas profundas en otro tipo de suelo que toma el agua rápidamente
CUBIERTA VEGETAL	(20) Cubierta de plantas con efecto de intercepción. Cubierta llana o esparcida	(15) De pobre a regular, cultivos nuevos, en tiempo de cosecha o cubiertas pobres, menores al 10% de áreas bajas de drenaje con buena cubierta	(10) De regular a buena, aproximadamente el 50% del área de drenaje en pastizales, bosques o cubierta equivalente	(10) De buena a excelente, Aproximadamente del 90% de áreas de drenaje en pastizales, bosques o cubierta equivalente	(5)
ALMACENAJE SUPERFICIAL	(20) Despreciable, pocas depresiones superficiales y poco profundas, corrientes escarpadas y pequeñas, sin estanques y pantanos	(15) Bajo, un sistema bien definido de pequeñas corrientes sin estanques y pantanos	(10) Normal, considerables depresiones superficiales de almacenaje, sistema de drenaje parecido a las áreas típicas de la pampa, lagos, estanques y pantanos menores al 2% del área de drenaje	(5)	(5) Alto, grandes depresiones superficiales de almacenaje, sistemas de drenaje no muy bien definidos, plano amplio de la avenida de almacenamiento o un gran número de lagos, pantanos o estanques

*Para obtener el coeficiente C en porcentaje, sumar de acuerdo con las características de la cuenca en estudio de cuatro valores en los parentesis, correspondientes a cada columna y renglón

Toblo III. 6. CARACTERISTICAS DE LA CUENCA PARA LA FORMULA RACIONAL C EN LA FORMULA RACIONAL

Calculando el gasto de diseño tenemos:

$$Q=0.278 CiA =0.278 \times 0.4012 \times 101.525 \times 216.66 =2453.34 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.2.3. Método de Chow.

Chow desarrolló un método para el cálculo del gasto pico de hidrogramas en cuencas no urbanas menores a 25 km². Obteniendo la siguiente expresión:

$$Qp = \frac{0.278 \text{ hpe } A Z}{de} \quad (3.8)$$

donde:

Qp= gasto pico, en m³/s.

hpe= precipitación efectiva, en mm.

A= área de la cuenca, en Km².

Z= factor de reducción de pico que es función del tiempo de retraso, adimensional. Fig.3.5.

de= duración en exceso, en minutos.

El tiempo de retraso es el tiempo que transcurre del centro de masa de la precipitación al pico del hidrograma se calcula como:

$$tr = 0.005 \left(\frac{L}{S^{1/2}} \right)^{0.64} \quad (3.9)$$

donde:

L= Longitud del cauce principal, en m.

S= pendiente, en ‰.

tr= tiempo de retraso, en h.

Por ejemplo, supongamos una cuenca de 3 Km² con una longitud del cauce principal de 1.2 Km cuya pendiente es de 1‰ y un factor de escurrimiento N=75.

A partir de la curva i-d-T que se encuentra en el capítulo 2 y tomando un tiempo de retorno de 10 años tendremos:

$$i = \frac{301.30 T^{0.571}}{d^{0.802}}$$

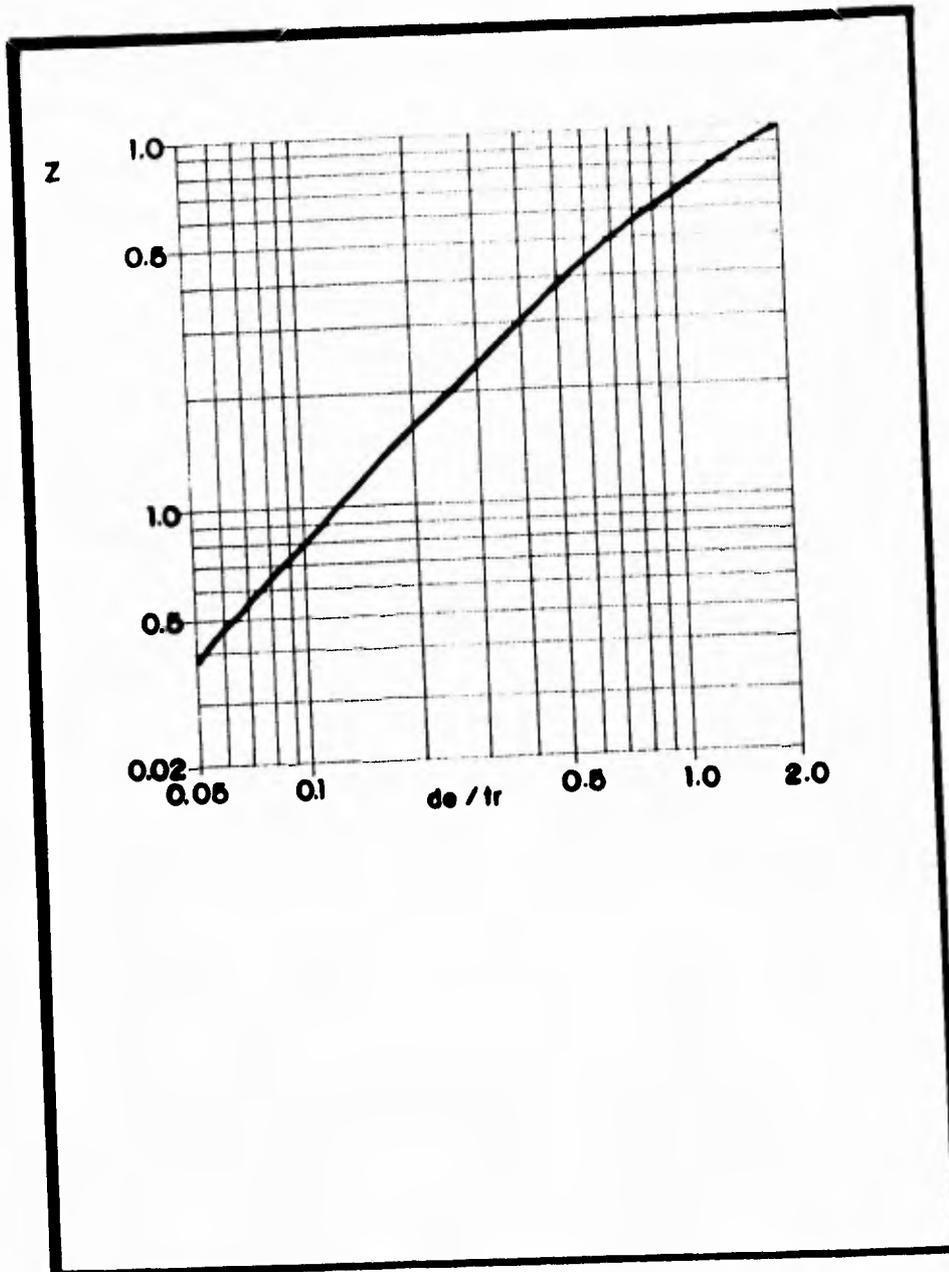


Fig. 3.8. FACTOR DE REDUCCION DE PICO

la precipitación se calcula como:

$$P = \frac{301.30 (10)^{0.547} (1-0.802)^{0.2}}{60} = 15.92 \text{ d}$$

el tiempo de retraso se calculará como:

$$tr = 0.005 \left[\frac{1200}{1} \right]^{0.64} = 0.467 \text{ h} = 28 \text{ minutos.}$$

Suponiendo diferentes duraciones (de) se calcula la precipitación, de acuerdo con la ecuación 3.4. se obtiene hpe y se relaciona de/tr con la que se entra a la Fig.3.5. encontrándose el coeficiente Z el cual se sustituye en la ecuación 3.8 y se calcula el gasto pico.

de, min	P, mm	hpe, mm	de/tr	Z, adim	Qp, m ³ /s
10	29.50	21.32	0.36	0.26	0.4623
20	33.84	25.45	0.71	0.50	0.5306
30	36.67	28.16	1.07	0.60	0.4697
40	38.82	30.23	1.43	0.80	0.5042
50	40.57	31.92	1.79	0.90	0.4792

Por lo que el gasto pico se diseña para 0.5306 m³/s.

3.2.4. Hidrograma unitario.

El método del hidrograma unitario tradicional HUT sólo se aplica a la fracción del escurrimiento total aportado por el escurrimiento superficial, por lo que, para su aplicación es necesario contar con una estación de aforo de gastos y una estación pluviográfica a la salida de la cuenca.

Este método fue desarrollado por Sherman en 1932 y toma en cuenta la altura total de precipitación, el área de la cuenca, su forma, su pendiente y su vegetación pero no las pérdidas por infiltración y la retención superficial.

Para poder realizar una valoración se toma en cuenta las siguientes hipótesis:

a) Tiempo base constante.- Para una cuenca dada, la duración total de escurrimiento directo o tiempo base es la misma para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva independientemente del volumen total escurrido.

b) Linealidad o proporcionalidad.- Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base son directamente proporcionales al volumen total de lluvia efectiva.

c) Superposición de causas y efectos.- El hidrograma que resulta de un período de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de períodos lluviosos precedentes.

Aceptando las hipótesis anteriores se obtiene el hidrograma unitario en el cual es posible determinar los hidrogramas de escurrimiento directo para cualquier tormenta.

Los pasos para obtener el hidrograma unitario son:

1.- Escoger el hidrograma de una tormenta aislada de la cual se conoce su hietograma. Fig.3.6.a.

2.- Del hidrograma de escurrimiento total se separa el escurrimiento directo del base por alguno de los métodos descritos en el capítulo 2. Obteniendo un hidrograma de calibración con lo que se puede conocer el tiempo base. Fig.3.6.b.

3.- Se calcula el volumen de escurrimiento directo como el valor que da la curva al calcular el área bajo ella, en el hidrograma de escurrimiento directo.

4.- Se calcula la precipitación en exceso o lluvia efectiva como:

$$hpe = \frac{VTED}{A} \quad (3.10)$$

donde:

VTED= volumen total de escurrimiento directo, en m³.

A= área de la cuenca, en m².

hpe= altura de precipitación en exceso, en m.

O bien, utilizando el coeficiente de infiltración y obteniendo la altura de lluvia en exceso y la duración de ésta. (10). Fig.3.6.c

5.- Se obtiene el hidrograma unitario dividiendo cada una de las ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo por el valor de la duración de la lluvia en exceso, he, proporcionando un gasto unitario que se mide en m³/seg/mm. Fig.3.6.d.

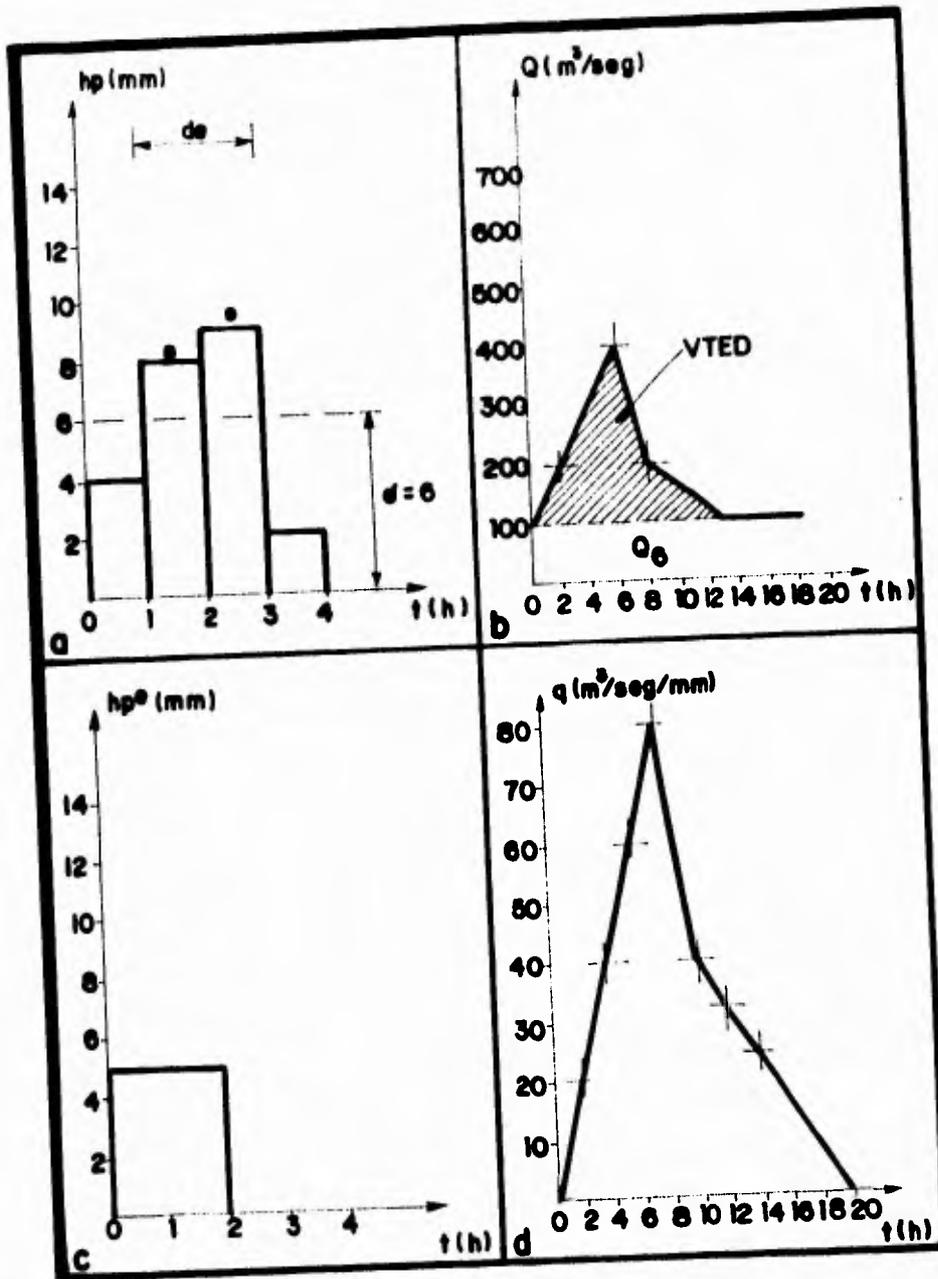


Fig. 3.6. HIDROGRAMA UNITARIO

Por ejemplo, supongamos una cuenca de 1120 Km², cuyo hietograma es la Fig. 3.6.a. y el hidrograma de la tormenta corresponde a la Fig.3.6.b.

Calculando el volumen total de escurrimiento directo tenemos:

$$VTED= 2 \times 3600 \text{ seg}(100+200+300+100+60+20) \text{ m}^3/\text{s} = 561600 \text{ m}^3$$

La precipitación en exceso será:

$$hpe = \frac{VTED}{A} = \frac{5.6 \times 10^6 \text{ m}^3}{1120 \times 10^6 \text{ m}^2} = 0.005 \text{ m} = 5 \text{ mm}$$

Suponiendo el valor $\phi=6$, el valor de la duración es $hpe = 5$ mm cada 2 horas. Fig.3.6.c.

Para construir el hidrograma unitario dividiremos cada uno de los valores del gasto entre 5 quedando la Fig.3.6.d.

$$\frac{100}{5} = 20 \quad \frac{200}{5} = 40 \quad \frac{300}{5} = 60 \quad \frac{60}{5} = 12 \quad \frac{20}{5} = 4$$

Una vez obtenido el hidrograma unitario para una cuenca y con una cierta duración, se puede conocer el hidrograma de escurrimiento superficial para cualquier otra lluvia de la misma duración, multiplicando las ordenadas del hidrograma unitario por la altura de lluvia en exceso. En el caso de lluvias complejas haremos uso del principio de superposición de causas y efectos. Fig.3.6.e.

Del análisis de otros hidrogramas con la misma duración se obtiene el hidrograma unitario medio al calcular el promedio de los gastos máximos y de los tiempos a los picos. Fig.3.6.f.

3.2.5. Método de la curva S.

El método de la curva S se emplea para calcular hidrogramas asociados a duraciones de lluvia diferentes a aquella para la que se calculó originalmente el hidrograma unitario(11). Se forma de la superposición de un número de hidrogramas unitarios suficiente para llegar al gasto de equilibrio, en duraciones en exceso grandes.

Al sumar las ordenadas se pueden presentar oscilaciones en la parte superior de la curva, lo cual puede indicar que la separación del gasto base y la duración en exceso salen de lo común, por lo que, se deberá suavizar.

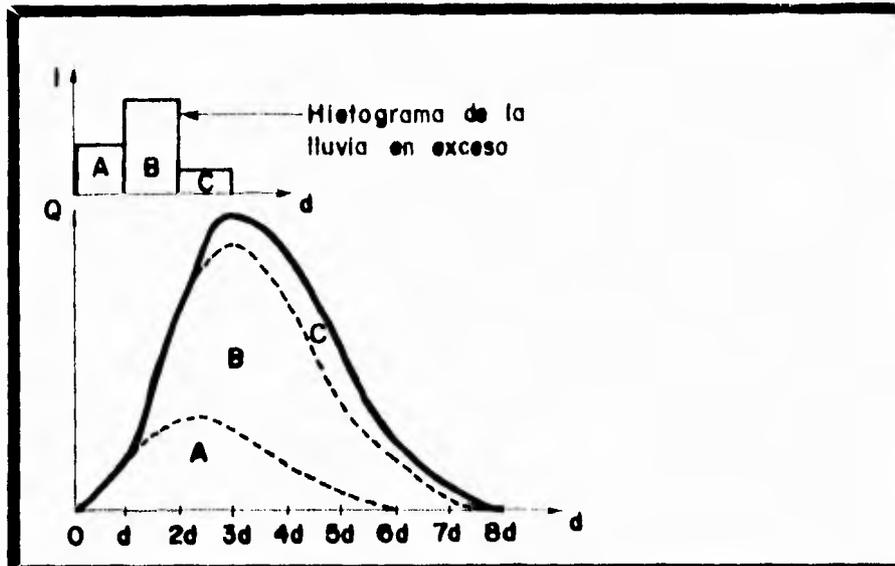


Fig. 3.6. e. HIDROGRAMA DE UNA LLUVIA COMPLEJA

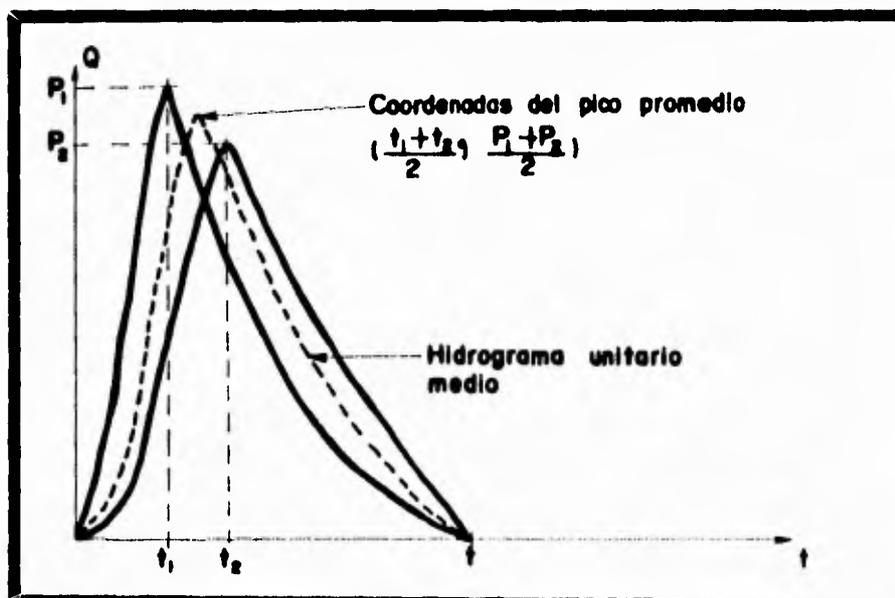


Fig. 3.6. f. HIDROGRAMA UNITARIO MEDIO

El método consta de los siguientes pasos:

1.- Se desplaza varias veces el hidrograma unitario conocido, de manera que cada separación sea igual a la duración do . Fig.3.7.a.

2.- Se suman las ordenadas de los hidrogramas formados con lo que se obtiene el hidrograma de la curva S que corresponde a la lluvia efectiva con intensidad constante $i = 1 \text{ mm/do}$ mantenida durante un tiempo muy grande. Fig.3.7.b.

Para obtener las ordenadas de la curva S puede utilizarse la ecuación:

$$S_n = \sum_{i=1}^n U_i \quad (3.11)$$

o bien las relaciones:

$$\begin{aligned} S_0 &= 0 \\ S_1 &= U_1 \\ S_2 &= U_1 + U_2 \\ &\text{etc.} \\ S_n &= U_1 + U_2 + \dots + U_n \end{aligned}$$

donde:

S_i = ordenada de la curva S para $t = i \text{ do}$.
 U_i = ordenada del hidrograma unitario conocido para $t = i \cdot do$.
 n = número de ordenadas para intervalos $\Delta t = do$.

3.- Se desplaza la curva S una distancia igual a d_1 . Fig.3.7.c.

4.- Se restan las ordenadas de la curva S obtenidos en los pasos 2 y 3. Fig.3.7.d.

5.- Las ordenadas del hidrograma unitario deseado se obtienen multiplicando los resultados obtenidos en el paso 4 por la relación do/d_1 . Fig.3.7.d.

En general este método se ocupa cuando no se cuenta con suficientes pluviógrafos teniendo solamente información de precipitaciones medias y se requiere trabajar con duraciones menores de 24 horas.

Por ejemplo, para obtener el hidrograma unitario con una duración en exceso de 3h a partir del hidrograma unitario del ejemplo anterior y una $de = 2h$ desarrollaremos en método a partir de la siguiente tabla:

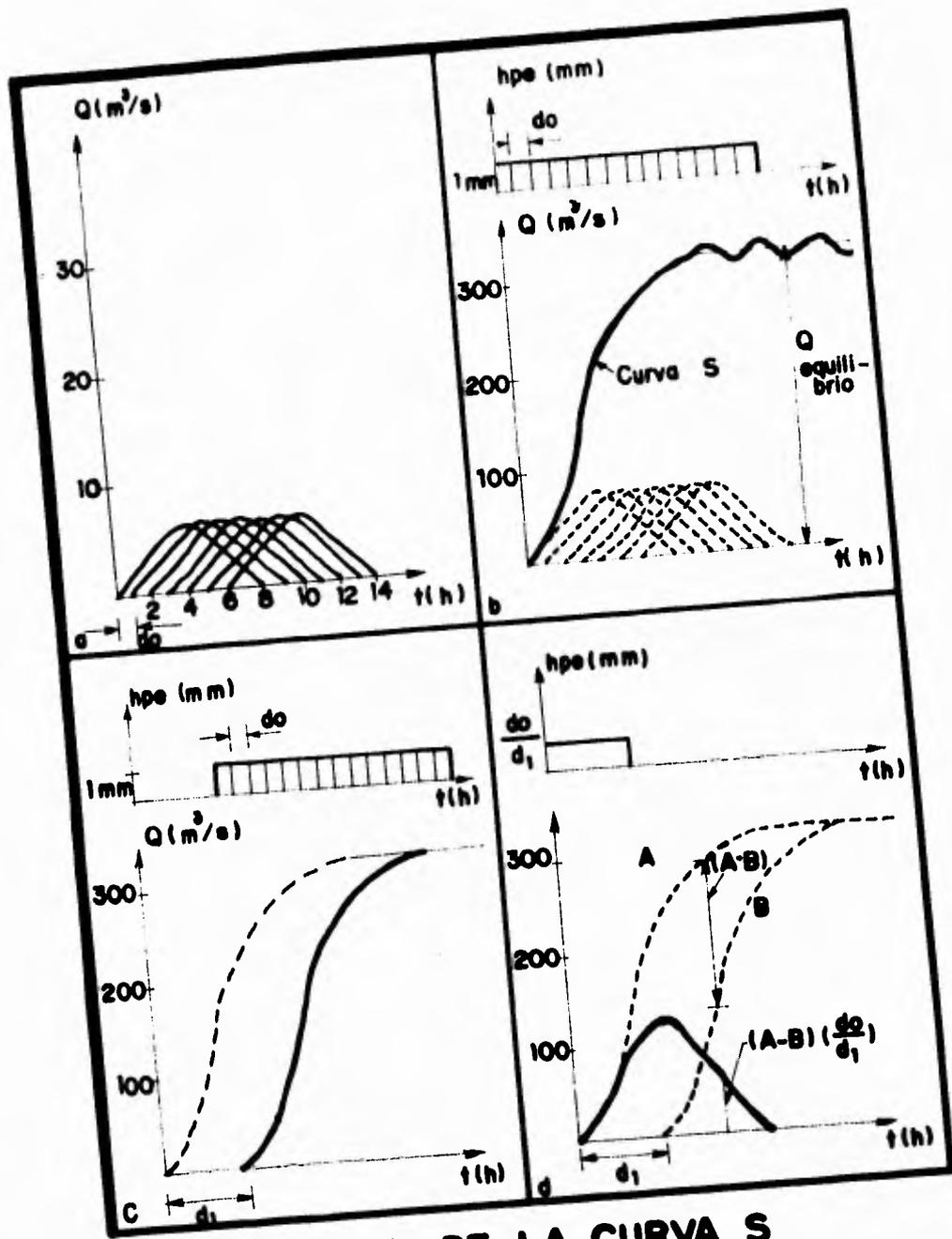


Fig. 3.7. METODO DE LA CURVA S

t, h	HU	HU (2h)	HU (4h)	HU (6h)	HU (8h)	HU (10h)	HU (12h)	HU (14h)	HU (16h)	Σ
0	0									0
2	20	0								20
4	40	20	0							60
6	60	40	20	0						120
8	80	60	40	20	0					200
10	40	80	60	40	20	0				240
12	32	40	80	60	40	20	0			272
14	24	32	40	80	60	40	20	0		296
16	16	24	32	40	80	60	40	20	0	312
18	8	16	24	32	40	80	60	40	20	320
20	0	8	16	24	32	40	80	60	40	320
22		0	8	16	24	32	40	80	60	.
24			0	8	16	24	32	40	80	.
26				0	8	16	24	32	40	.
28					0	8	16	24	32	.
30						0	8	16	24	.

Se obtiene la curva S Fig.3.7.b desplazándose una duración $d_1=3h$ construyendo la siguiente tabla:

t, h	Curva S A	Curva S (3h) B	A-B	Corrección $do/d_1= 0.67$
0	0		0	0.00
1	8		8	5.36
2	20		20	13.40
3	37	0	37	24.79
4	60	8	52	34.84
5	90	20	70	46.90
6	120	37	83	55.61
7	160	60	100	67.00
8	200	90	110	73.70
9	220	120	100	67.00
10	240	160	80	53.60
11	255	200	55	36.85
12	272	220	52	34.84
13	285	240	45	30.15
14	296	255	41	27.47
15	305	272	33	22.11
16	312	285	27	18.09
17	318	296	22	14.74
18	320	305	18	12.06
19	320	312	8	5.36
20	320	318	2	1.34
21	320	320	0	0.00

Por lo que la columna 5 corresponde al hidrograma unitario para una duración de= 3h y se puede comprobar que se volumen es igual a 1120 000 000 m³.

3.2.6. Hidrograma unitario instantáneo.

Este método considera la distribución temporal de la lluvia, por lo que se utiliza la superposición de causas y efectos para obtener los hidrogramas. Es importante seleccionar las avenidas por calibrar, ya que si no presenta irregularidades da buenos resultados.

Para mostrar el hidrograma de una tormenta completa con varios períodos lluviosos cada uno con una duración en exceso, de, se aplica el principio de superposición multiplicando cada barra del hietograma por el hidrograma unitario y se suman como se muestra en la Fig.3.8.

Esto se puede calcular estableciendo una matriz de ecuaciones que permita conocer los gastos ocurridos en una tormenta relacionando las ordenadas del hidrograma U con el escurrimiento directo que produciría una tormenta caracterizada por el hietograma de ordenadas P en intervalos de tiempo pequeños Δt a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_i = \sum_{k=1}^i U_k P_{i-k+1} \quad (3.12)$$

donde:

Q_i= gasto de escurrimiento directo para el i-ésimo intervalo de tiempo, en m³/s.

P_i= número de ordenadas de precipitación.

U_k= número de ordenadas del hidrograma unitario.

i= número de ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo.

Esta ecuación desarrollada queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Q_1 &= U_1 P_1 \\ Q_2 &= U_1 P_2 + U_2 P_1 \\ &\dots \\ Q_k &= U_1 P_k + U_2 P_{k-1} + \dots + U_k P_1 \end{aligned}$$

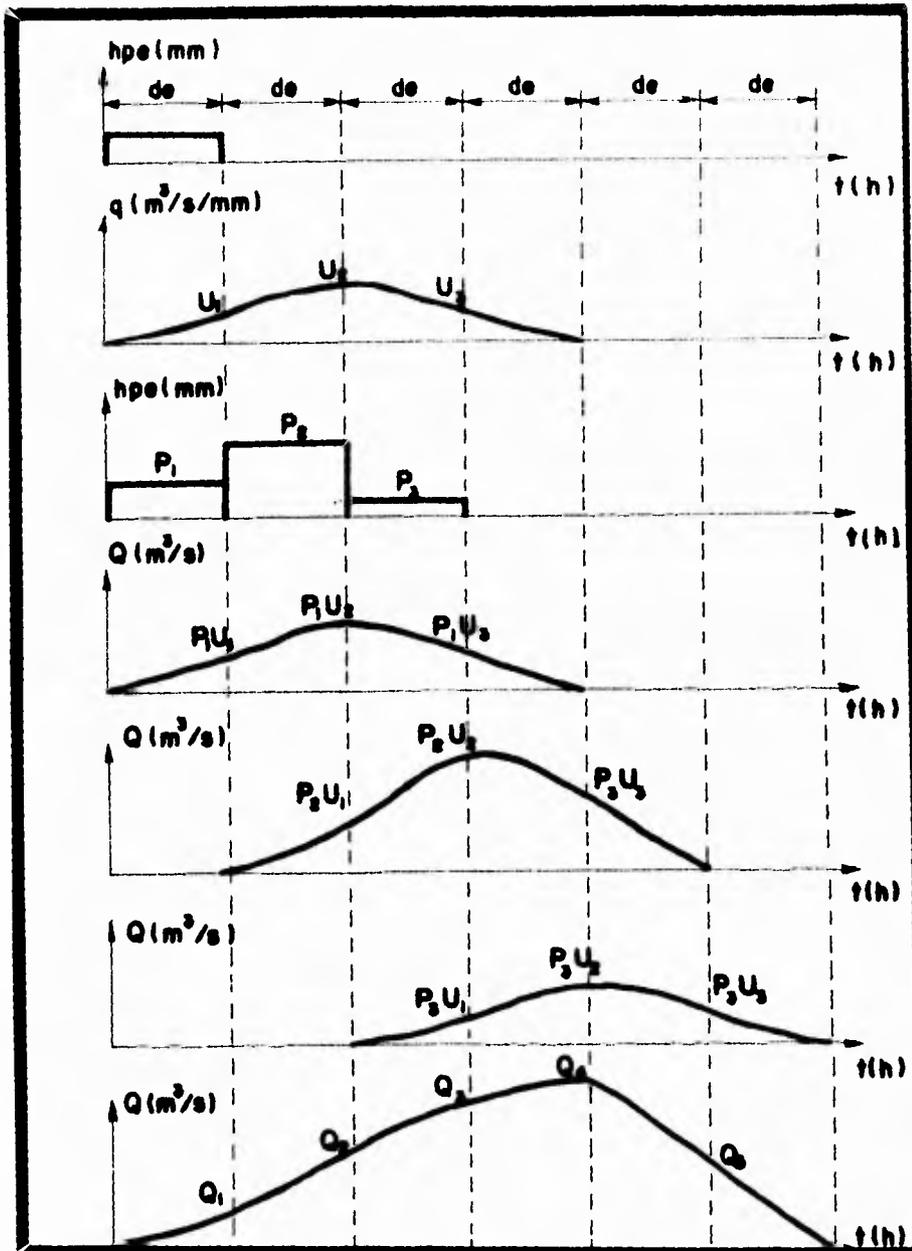


Fig. 3.8. HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTANEO

El sistema puede utilizarse directamente para predecir el hidrograma cuando se presenta una tormenta y se conoce el hidrograma unitario, o bien, utilizarse para conocer las ordenadas de este último cuando se tiene información de los valores simultáneos de lluvias P_i y escurrimientos Q_i durante una tormenta.(11).

Para reducir los errores que pudieran suscitarse por la no linealidad de la relación lluvia-escurrimiento se establece el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^n U_j \phi_{pp}(i-j) = \phi_{pq}(j-1) \quad (3.13)$$

donde:

$$\phi_{pp}(\sigma) = \begin{cases} \sum p_i p_{i+\sigma} & \text{para } \sigma=1,2,\dots,P-1 \\ 0 & \text{para } \sigma \geq P \end{cases}$$

$$\phi_{pq}(\Gamma) = \begin{cases} \sum p_i q_{i-\Gamma} & \text{para } \Gamma=1,2,\dots,P-1 \\ 0 & \text{para } \Gamma \geq U \end{cases}$$

Por ejemplo, para obtener el hidrograma unitario instantáneo para una cuenca en la que se registraron el hietograma de lluvia efectiva y el hidrograma de escurrimiento directo mostrados en la Fig.3.8. Se calcula de la siguiente manera:

N_p = número de ordenadas del hietograma = 3

N_q = número de ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo=5

N_u = número de ordenadas en el hidrograma unitario = $N_q - N_p + 1 = 3$

Hietograma		Hidrograma	
t, h	hpe, mm	t, h	q, m ³ /s
		0	0
0-2	6	2	5
2-4	12	4	10
4-6	3	6	5
		8	0

La matriz de coeficientes:

$$\begin{bmatrix} P1^2+P2^2+P3^2 & P1P2 + P2P3 & P1P3 \\ P1P2 + P2P3 & P1^2+P2^2+P3^2 & P1P2+P2P3 \\ P1P3 & P1P2+P2P3 & P1^2+P2^2+P3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 189 & 108 & 9 \\ 108 & 189 & 108 \\ 9 & 108 & 189 \end{bmatrix}$$

El vector de términos independientes:

$$\begin{bmatrix} P1Q1 + P2Q2 + P3Q3 \\ P1Q2 + P2Q3 + P3Q4 \\ P1Q3 + P2Q4 + P3Q5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 90 \\ 165 \\ 120 \end{bmatrix}$$

El sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 189 & 108 & 9 \\ 108 & 189 & 108 \\ 9 & 108 & 189 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 90 \\ 165 \\ 120 \end{bmatrix}$$

La solución resulta:

$$U = \begin{bmatrix} 0.060 \\ 0.709 \\ 0.227 \end{bmatrix}$$

que corresponden a los datos de las ordenadas

Calculando los gastos:

$$\begin{array}{l} Q1= P1U1= \\ Q2= P1U2 + P2U1= \\ Q3= P1U3 + P2U2 + P3U1= \\ Q4= \quad \quad P2U3 + P3U2= \\ Q5= \quad \quad \quad P3U3= \end{array} \begin{bmatrix} 0.360 \text{ m}^3/\text{s} \\ 4.974 \text{ m}^3/\text{s} \\ 10.050 \text{ m}^3/\text{s} \\ 4.851 \text{ m}^3/\text{s} \\ 0.681 \text{ m}^3/\text{s} \end{bmatrix}$$

3.2.7. Hidrogramas unitarios sintéticos.

Cuando no se dispone de registros simultáneos de lluvia y escurrimiento y se desea conocer la forma de la avenida en forma aproximada, ésta se puede inferir con la ayuda de métodos como el hidrograma unitario triangular o del hidrograma unitario adimensional.

Estos hidrogramas requieren únicamente de: tiempo base del hidrograma, el gasto pico y el tiempo de retraso de la cuenca.

En el hidrograma unitario triangular se considera una relación del tiempo base al tiempo pico de 2 cuando la cuenca es menor o igual a 250 Km² y para cuencas mayores se incrementa en forma lineal hasta llegar a 5 para cuencas de 5000 Km² o mayores. Fig.3.9. el gasto pico se calcula como:

$$Qp = \frac{0.555 A}{tb} \quad (3.14)$$

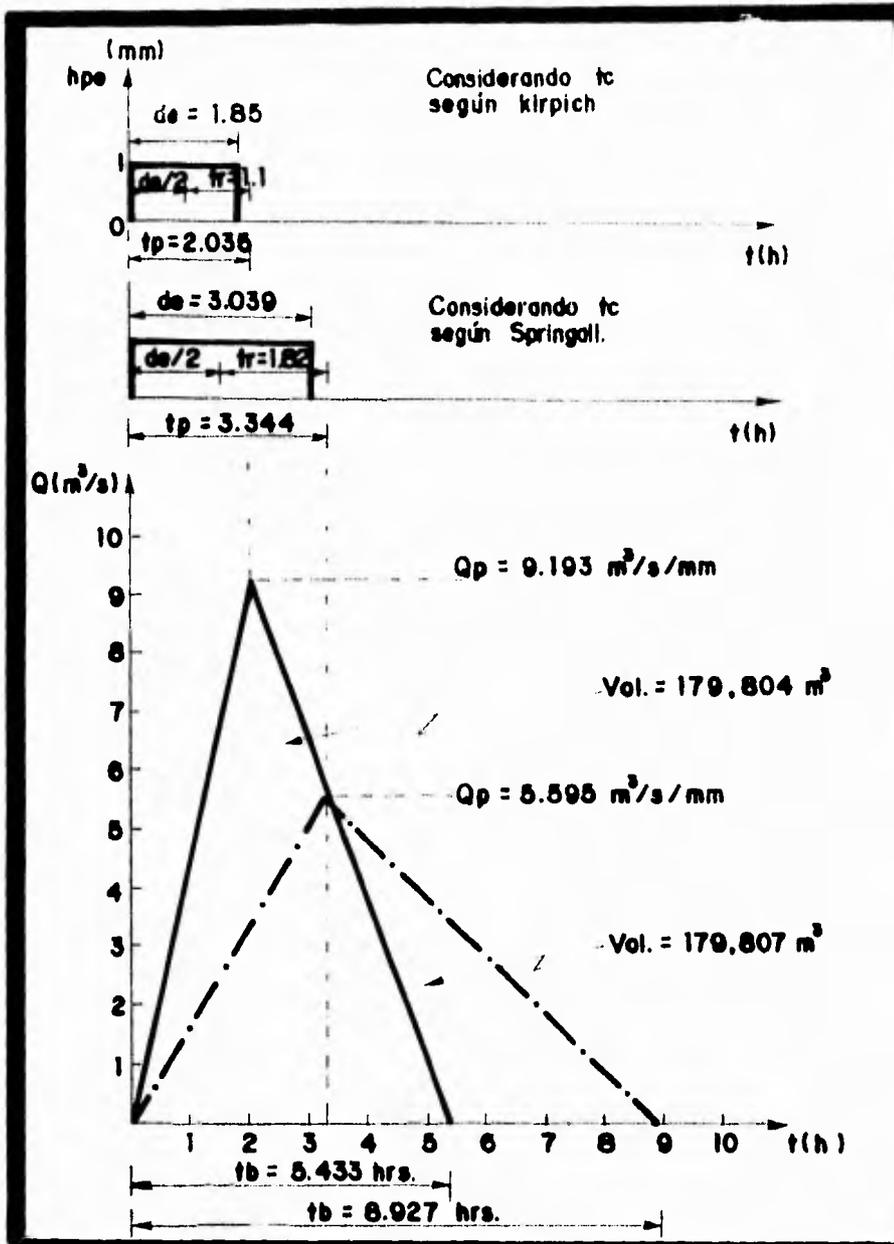


Fig. 3.9. HIDROGRAMA UNITARIO SINTETICO TRIANGULAR

donde:

- Qp= gasto pico, en m³/s.
- A= área de la cuenca, en Km².
- tb= tiempo base del hidrograma unitario, en horas.

Mockus concluye que el tiempo base y el pico se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$tb = 2.67 tp \quad (3.15)$$

Para este caso el tiempo pico se obtiene de la expresión:

$$tp = 0.5 de + tr \quad (3.16)$$

donde:

- de= duración de la lluvia en exceso, en h.
- tr= tiempo de retraso del hidrograma, en h.

$$tr = 0.6 tc \quad (3.17)$$

tc= tiempo de concentración de la cuenca, en horas, el cual se puede calcular por la fórmula de Kirpich (12), como:

$$tc = \frac{0.000325 L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (3.18)$$

donde:

- tc= tiempo de concentración, en h.
- L= longitud del cauce principal, en m.
- S= pendiente del cauce principal en decimales (H/L).

Otra manera de calcular tc según Aparicio (aunque éste sólo lo aplica para la fórmula racional) es:

$$tc = \frac{L}{3600 v} \quad (3.19)$$

donde:

v= velocidad media del cauce principal, en m/s. Véase tablas III.7.a. y III.7.b.

L= Longitud del cauce principal, en m.

Tabla III.7.a. VELOCIDAD MEDIA A PARTIR DE LA PENDIENTE DE LA CUENCA.

Pendiente del cauce principal en ‰	Velocidad media en m/s
1 - 2	0.6
2 - 4	0.9
4 - 6	1.2
6 - 8	1.5

Tabla III.7.b. VELOCIDAD MEDIA A PARTIR DE LA PENDIENTE Y DEL TIPO DE SUELO.

Pendiente ‰	Bosques vel. media m/s	Pastizales vel. media m/s	Canal natural no bien definido, m/s
0 - 3	0.3	0.5	0.3
4 - 7	0.6	0.9	0.9
8 - 11	0.9	1.2	1.5
12 - 15	1.1	1.4	2.4

Existe otra expresión propuesta por Springall la cual no es muy utilizada y surge a partir de un estudio realizado para la República Mexicana que es:

$$tc=0.01 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64} \quad (3.20)$$

donde:

L= longitud del cauce principal, en m.

S= pendiente del cauce principal, en ‰.

Existe una infinidad de fórmulas muy utilizadas en nuestro país para calcular el tiempo de concentración como se muestra en la tabla III.8 pero éstas no corresponden a las características de nuestras cuencas.

Tabla III.8. ECUACIONES PARA CALCULAR EL TIEMPO DE CONCENTRACION.

METODO Y FECHA	FORMULA PARA t_c (MIN)	OBSERVACIONES
Kirpich (1940)	$t_c = 0.00312L^{0.775}S^{-0.385}$ L = Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, metros. S = pendiente promedio de la cuenca m/m.	Desarrollada a partir de información del SCS en siete cuencas rurales en Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%), para flujo superficial en superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar t_c por 0.4; para canales de concreto se debe multiplicar por 0.2; no se debe hacer ningún ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas.
California Cubierta practice (1942)	$t_c = 1243284.537(L^2/H)^{0.385}$ L = Longitud del curso de agua más largo, metros. H = Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, metros.	Esencialmente es la ecuación de Kirpich, desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California (U S Bureau of Reclamation, 1973, pp 67-71).
Izzard (1946)	$t_c = \frac{75649.047(4.939 \times 10^{-9} + t_c)}{S^{0.933}i^{0.667}}L^{0.33}$ i = Intensidad de lluvia, m/s. c = Coeficiente de retardo L = Longitud de la trayectoria de flujo, m. S = Pendiente de la trayectoria de flujo, m/m	Desarrollada experimentalmente en laboratorio por el Bureau of Public Roads para flujo superficial en caminos y áreas de césped; los valores del coeficiente de retardo varían desde 0.0070 para pavimentos muy lisos hasta 0.012 para pavimentos de concreto y 0.06 para superficies densamente cubiertas de pasto; la solución requiere de procesos iterativos, el producto de i por L debe ser ≤ 500 .
Federal Aviation administracion (1970)	$t_c = \frac{0.994(1+C)^{0.5}}{S^{0.353}}L$ C = Coeficiente de escorrentía del método racional. L = Longitud de flujo superficial, m. S = Pendiente de la superficie, %.	Desarrollada de información sobre el drenaje de aeropuertos recopilada por el Corps of Engineers, el método tiene como finalidad el ser usado en problemas de drenaje de aeropuertos, pero ha sido frecuentemente usado para flujo superficial en cuencas urbanas.
Ecuaciones de onda cinemática. Morgali y Linsley (1965) Aron y Erborge (1973)	$t_c = (52.982L^{0.6}n^{0.6})(i^{-0.4}S^{-0.3})$ L = Longitud del flujo superficial, m. n = coeficiente de rugosidad de Manning i = intensidad de lluvia, m/s S = Pendiente Promedio del terreno, m/m	Ecuación para flujo superficial desarrollada a partir de análisis de onda cinemática de la escorrentía superficial desde superficies desarrolladas; el método requiere iteraciones debido a que tanto i (intensidad de lluvia) como t_c son desconocidos; la superposición de una curva de intensidad-duración-frecuencia de una solución gráfica directa para t_c .
Ecuación de retardo SCS. (1973)	$t_c = (20.345L^{0.8}[(1/CN-9)^{0.7} + 1](S^{-0.5})$ L = Longitud Hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria de flujo), m. CN = Número de curva SCS. S = Pendiente promedio de la cuenca, %.	Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 2,000 acres; se ha encontrado que generalmente es buena cuando el área se encuentra completamente pavimentada; para áreas mixtas tiene tendencia a la sobreestimación; se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras en canales e impermeabilización; la ecuación supone que $t_c = 1.67x$ retardo de la cuenca.
Cartas de Velocidad promedio del SCS (1975, 1986)	$t_c = 1/60V(L/V)$ L = Longitud de la trayectoria de flujo, m. V = Velocidad promedio en m por segundo de la fig. 3-1 del TR 55 para diferentes superficies	Las cartas de flujo superficial de la figura 3-1 del TR 55 muestran la velocidad promedio como una función de la pendiente del curso de agua y de la cubierta superficial.

Fuente: Kober, 1982, Copyright de la American geophysical Union

Estas fórmulas se encuentran en el Sistema Inglés y fueron convertidas al sistema Internacional

Cuando por alguna razón no se conoce la duración de la lluvia en exceso, esta se puede calcular en forma aproximada como:

$$de = 2 tc^{1/2} \quad (3.21)$$

para cuencas grandes, como se mencionó anteriormente, en México una cuenca grande se considera mayor a 3000 Km² mientras que en la literatura extranjera se considera mayor de 250 Km², por lo que no queda bien establecido cuando puede usarse la una o la otra.

$$de = tc \quad (3.22)$$

para cuencas pequeñas.

Sustituyendo las ecuaciones 3.14 y 3.15 se obtiene:

$$Qp = \frac{0.208 A}{tp} \quad (3.23)$$

donde:

$$tp = tc^{1/2} + 0.6 tc \quad (3.24)$$

Por ejemplo, si tenemos una cuenca de 90 Km² cuya longitud del cauce es 8.3 Km y una pendiente media de 0.012.

Para obtener el hidrograma unitario triangular calcularemos el tiempo de concentración con la fórmula de Kirpich, como:

$$tc = \frac{0.000325 L^{0.77}}{S^{0.385}} = \frac{0.000325 (8300)^{0.77}}{0.012^{0.385}} = 1.85 \text{ h.}$$

Obsérvese que si utilizamos la fórmula de Springall, ecuación 3.20. para obtener el tiempo de concentración tendremos:

$$tc = 0.01 \left[\frac{L}{S^{0.5}} \right]^{0.64} = 0.01 \left[\frac{8300}{1.2^{0.5}} \right]^{0.64} = 3.04 \text{ h.}$$

Calculando la duración en exceso para una cuenca pequeña para t_c de Kirpich tendremos:

$$d_e = t_c = 1.85 \text{ h}$$

si se considera el t_c de Springall será:

$$d_e = t_c = 3.04 \text{ h}$$

El tiempo de retraso para Kirpich será:

$$t_r = 0.6 t_c = 0.6 (1.85) = 1.11 \text{ h}$$

el t_r para Springall será:

$$t_r = 0.6 t_c = 0.6 (3.04) = 1.82 \text{ h}$$

Por lo que el tiempo pico para Kirpich resulta:

$$t_p = 0.5 d_e + t_r = 0.5 \times 1.85 + 1.11 = 2.035 \text{ h}$$

mientras que el t_p para Springall será:

$$t_p = 0.5 d_e + t_r = 0.5 \times 3.04 + 1.82 = 3.343 \text{ h}$$

El tiempo base para Kirpich se obtiene como:

$$t_b = 2.67 t_p = 2.67 \times 2.035 = 5.433 \text{ h}$$

El tiempo base para Springall como:

$$t_b = 2.67 t_p = 2.67 \times 3.343 = 8.927 \text{ h}$$

Finalmente el gasto pico para Kirpich es como:

$$q_p = \frac{0.208 A}{t_p} = \frac{0.208}{2.035} \times 90 = 9.19 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$$

y el q_p para Springall es:

$$q_p = \frac{0.208 A}{t_p} = \frac{0.208}{3.343} \times 90 = 5.595 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$$

Nótese que en la Fig.3.9 que aunque la cuenca es menor a 250 Km² el tiempo pico y el base no guardan una relación de 2 por lo que la linealidad no es del todo cierta.

Si se piensa que la extensión de la curva de recesión del hidrograma puede afectar el diseño, se utiliza un hidrograma curvilíneo, llamado hidrograma unitario adimensional.

Para aplicar el método se necesita calcular el gasto y el tiempo pico, el gasto se obtiene con la expresión:

$$q_p = A / 4.808 t_p$$

donde:

q_p = gasto pico, en m^3/s .
 A = área de la cuenca, en Km^2 .
 t_p = tiempo de pico, en h.

El tiempo pico se calcula con la ecuación 3.16 y si se desconoce el valor de la duración efectiva se calcula con la ecuación 3.21. El tiempo de concentración se estima utilizando el criterio del método racional.

Conocidos el gasto pico q_p que y el tiempo de pico t_p el hidrograma se obtiene con la ayuda de la Fig. 3.10. de la siguiente manera:

- 1.- Se escoge un valor t/t_p y con la figura 3.10 se obtiene q/q_p .
- 2.- Del valor q/q_p se despeja el valor de q , ya que se conoce q_p .
- 3.- Del valor t/t_p seleccionado se despeja el valor t , ya que se conoce el valor t_p .
- 4.- Se repiten los pasos 1 y 3 tantas veces como sea necesario para definir la forma del hidrograma.

Para obtener el hidrograma curvilíneo del ejemplo anterior se multiplican las ordenadas de la Fig. 3.10.a. por 9.199 $m^3/s/mm$ y las abscisas por 2.035 h, se obtiene el hidrograma unitario curvilíneo calculando la siguiente tabla y mostrando la Fig. 3.10.b. Lo mismo se hace para Springall y consignándolo en la misma tabla observaremos las diferencias que se generan.

$$q_{pK} = \frac{A}{4.808 t_p} = \frac{90}{4.808 (2.035)} = 9.199 \text{ m}^3/s$$

$$t_{bK} = 5 t_p = 5(2.035) = 10.175 \text{ h}$$

$$q_{pS} = \frac{90}{4.808 (3.343)} = 5.595 \text{ m}^3/s$$

$$t_{bS} = 5 (3.343) = 16.72 \text{ h}$$

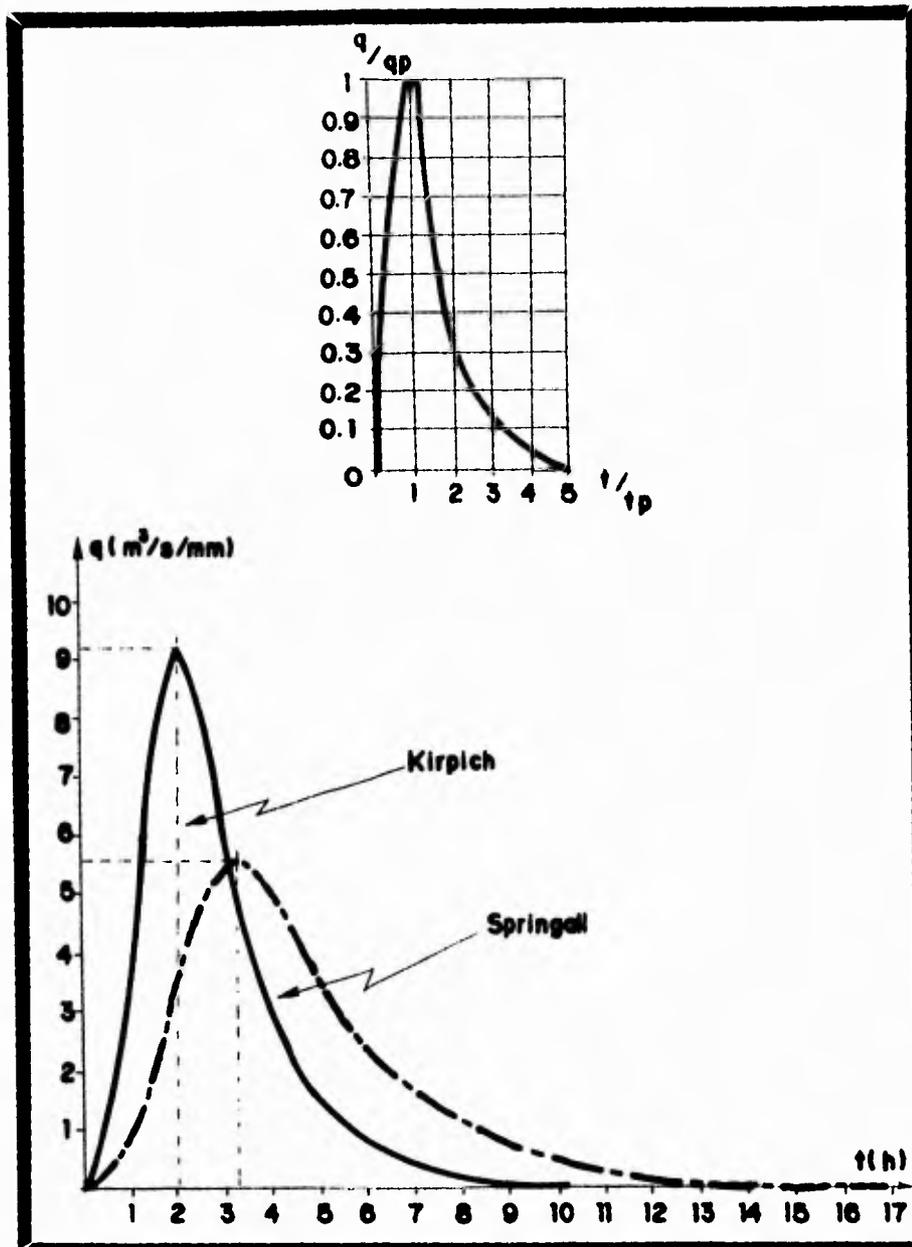


Fig. 3.10. HIDROGRAMA UNITARIO SINTETICO ADIMENSIONAL

HUAS		Kirpich		Springall	
t/tp	q,m/s/mm	t,h	q,m/s/mm	t,h	q,m/s/mm
0.0	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1	0.015	0.2035	0.1380	0.3344	0.0839
0.2	0.075	0.4070	0.6899	0.6688	0.4198
0.3	0.160	0.6105	1.4720	1.0032	0.8957
0.4	0.280	0.8140	2.5757	1.3376	1.5675
0.5	0.430	1.0175	3.9555	1.6720	2.4072
0.6	0.600	1.2210	5.5194	2.0064	3.3588
0.8	0.890	1.6280	8.1871	2.6752	4.9823
1.0	1.000	2.0350	9.1999	3.3440	5.5981
1.2	0.920	2.4420	8.4631	4.0128	5.1502
1.4	0.750	2.8490	6.8999	4.6816	4.1986
1.6	0.560	3.2560	5.1514	5.3504	3.1349
1.8	0.420	3.6630	3.8636	6.0192	2.3512
2.0	0.320	4.0700	2.9436	6.6880	1.7914
2.2	0.240	4.4770	2.2077	7.3568	1.3435
2.4	0.180	4.8840	1.6558	8.0256	1.0076
2.6	0.130	5.2910	1.1958	8.6944	0.7277
2.8	0.098	5.6980	0.9015	9.3632	0.5485
3.0	0.075	6.1050	0.6890	10.0320	0.4198
3.5	0.036	7.1225	0.3310	11.7040	0.2015
4.0	0.018	8.1400	0.1656	13.3760	0.1008
4.5	0.009	9.1575	0.0828	15.0480	0.0504
5.0	0.004	10.1750	0.0367	16.7200	0.0224

Por lo que, el gasto pico obtenido por Springall es 61% menor que el usado por Kirpich lo cual puede reportar diferencias muy importantes en cuanto a diseño y costos.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Las conclusiones del presente trabajo son:

1.- La relación entre la precipitación y el escurrimiento es de gran importancia pues permite inferir uno a partir del otro, además de que se puede conocer la tormenta de diseño optimizando los registros de precipitación y si se conoce la liga entre ambos se podrá calcular la avenida máxima.

2.- Se requiere realizar mayor cantidad de estudios en hidrología a fin de unificar criterios y eliminar los resultados basados en la media aritmética o utilizando métodos empíricos calibrados en otras regiones del mundo.

3.- La mayor parte de las estaciones hidrométricas en nuestro país aforan cuencas de más de 10,000 Km² por lo que es necesario instrumentar una serie de cuencas pequeñas representativas de las diversas condiciones hidrológicas, impulsando estudios regionales, como cuencas piloto donde se diseñe y opere una red hidroclimatológica adecuada, que permita conocer el comportamiento hidrológico de éstas, creando criterios propios.

4.- La red climatológica e hidrométrica en nuestro país no es suficiente debido a lo accidentado del terreno, o bien, por falta de recursos para el mantenimiento y/o reposición del equipo, lo que trae por consecuencia una gran pérdida de información.

5.- El uso de información confiable así como la aplicación de ésta en programas de cómputo, como el CLICOM o el HIDROS, permitirán hacerla consistente y accesible para realizar estudios fundamentados.

6.- En México se considera una cuenca pequeña aquella menor a igual a 3000 Km² mientras que en la literatura extranjera se considera de 250 Km², esto afecta en los criterios de cálculo del tiempo de concentración, ya que la duración en exceso está ligado al tamaño de la cuenca.

7.- La aplicación de las fórmulas para el gasto pico o el tiempo de concentración, entre otras, depende del criterio del que calcula o bien de la cantidad de información de que se disponga.

Por ejemplo, para calcular el tiempo de concentración es muy utilizada la fórmula de Kirpich, la cual fue obtenida para 7 cuencas rurales en Tennessee. En cambio la fórmula obtenida por Springall en un estudio realizado para la República Mexicana es poco utilizada.

Resulta importante observar que los valores obtenidos por el hidrograma unitario sintético triangular arroja resultados muy diferentes en ambos casos, siendo 61% menor la propuesta por Springall, esto es muy importante ya que se diseña con el gasto pico.

8.- El valor de las pérdidas por infiltración o retención superficial aún se cuantifica de manera burda, existen programas que se encuentran en perfeccionamiento en el CENAPRED, el Instituto de Ingeniería y el IMTA.

9.- La información por medio de satélite es proporcionada por una agencia norteamericana lo que limita muchas de las investigaciones que se puedan hacer al respecto.

10.- Mientras mayor sea la cantidad de información de que se disponga para el diseño de obras, la precisión de las estimaciones será mayor, los coeficientes de seguridad pueden reducirse y por lo tanto los costos.

11.- Existen algunas fórmulas como la del tiempo de concentración y los coeficientes C_c y C_l propuestos por Springall ajustados para nuestro país que han tenido poca difusión y se siguen utilizando en muchos de los casos los de la literatura extranjera.

12.- Algunos inconvenientes para establecer coeficientes definitivos en nuestro país son:

- La pérdida de información en el temblor de 85.
- Los registros hidroclimatológicos con frecuencia son defectuosos o inconsistentes.
- A medida que se cuenta con mayor cantidad de información los coeficientes pueden variar.

Las recomendaciones sugeridas para el empleo de los métodos son las siguientes:

1.- Se debe eliminar el uso del método de las envolventes ya que:

- no permite acotar los gastos máximos.
- no toma la frecuencia de los eventos.
- sólo depende del área de la cuenca y no de las características fisiográficas y climatológicas.

2.- Se debe cuidar en la aplicación de las fórmulas, las unidades a las que se refiere cada parámetro para no cometer algún error.

3.- En el cálculo de la curva i-d-T, se recomienda utilizar todas las cifras posibles ya que se modifica sensiblemente si se redondean las cantidades.

4.- Para el calculo del tiempo de concentración se recomienda utilizar la fórmula de Springall.

5.- Para la aplicación del hidrograma unitario triangular cuando la relación del tiempo pico al base no sea de 2 para cuencas pequeñas la linealidad que se propone debe analizarse.

6.- En la aplicación del método de Chow debe tenerse cuidado con el comportamiento del número N, ya que existe una relación entre este y la humedad antecedente, el cual es muy usado para valuar la lluvia en exceso cuyos resultados en ocasiones no son adecuados.

ANEXO A

Apéndice A

Definiciones de los elementos ordenadas por código

Para simplificar la búsqueda de un elemento en particular, los códigos de elemento se encuentran organizados por el tipo de observación.

COD- ELE- MENTO	NOMBRE-ELEM ABREV	ELEM ABREV	DEFINICION-ELEMENTO	UNDADES	FACTOR ESCALA
001	Temp, diaria obs	TMPOBS	Temperatura, diaria a la hora de la observación	Grados C	0.1
002	Temp, diaria máx	TMPMAX	Temperatura, diaria máxima	Grados C	0.1
003	Temp, diaria mín	TMPMIN	Temperatura, diaria mínima	Grados C	0.1
004	Temp, med diaria	TMPMN	Temperatura, media diaria	Grados C	0.1
006	Precip, diaria	PRECIP	Precipitación, diaria total	Milímetros	0.1
008	PRCP, max 5 min	PRMX5	Precip, máxima en 5 minutos	Milímetros	0.1
007	PRCP, max 10 min	PRMX10	Precip, máxima en 10 minutos	Milímetros	0.1
008	PRCP, max 15 min	PRMX15	Precip, máxima en 15 minutos	Milímetros	0.1
008	PRCP, max 30 min	PRMX30	Precip, máxima en 30 minutos	Milímetros	0.1
010	PRCP, max 60 min	PRMX60	Precip, máxima en 60 minutos	Milímetros	0.1
011	PRCP, max 3 horas	PRMX2H	Precip, máxima en 3 horas	Milímetros	0.1
012	Temp, pto roc máx	DPTMAX	Temperatura del punto de rocío, diaria máxima	Grados C	0.1
013	Temp, pto roc mín	DPTMIN	Temperatura del punto de rocío, diaria mínima	Grados C	0.1
014	Temp, pto roc med	DPTMN	Temperatura del punto de rocío, media diaria	Grados C	0.1
015	HR, diaria máx	RHMAX	Humedad relativa, diaria máxima	Porcentaje	1
016	HR, diaria mín	RHMIN	Humedad relativa, diaria mínima	Porcentaje	1
017	HR, media diaria	RHMEAN	Humedad relativa, media diaria	Porcentaje	1
018	Evap, diaria	EVAPPN	Evaporación, en un evaporímetro, diaria total	Milímetros	0.1
018	Evap, lago diaria	EVAPLK	Evaporación, en un lago, diaria total	Milímetros	0.1
020	Temp, evaper máx	MXTPAN	Temperatura, en el evaporímetro, diaria máx.	Grados C	0.1
021	Temp, evaper mín	MNTPAN	Temperatura, en el evaporímetro, diaria mín.	Grados C	0.1
022	Temp, evaper med	MTPAN	Temperatura, en el evaporímetro, media diaria	Grados C	0.1
023	HTNG Degree Day1	HTDD1	Heating degree days - Base 1	Sin unidades	1
024	HTNG Degree Day2	HTDD2	Heating degree days - Base 2	Sin unidades	1
025	CLNG Degree Day1	COO1	Cooling degree days - Base 1	Sin unidades	1
026	CLNG Degree Day2	COO2	Cooling degree days - Base 2	Sin unidades	1
027	GRNG Degree Day1	GDD1	Growing degree days - Base 1	Sin unidades	1
028	GRNG Degree Day2	GDD2	Growing degree days - Base 2	Sin unidades	1
029	Día con lluvia	OYRAIN	Día con lluvia	Sin unidades	1
030	Día con tormenta	DYTHND	Día con tormentas eléctricas	Sin unidades	1
031	Día con granizo	DYHAIL	Día con granizo	Sin unidades	1
032	Día con niebla	DYFOG	Día con niebla	Sin unidades	1
033	Día con torva.	DYSAND	Día con arena o polvo levantado	Sin unidades	1
034	Días con humo	OYSMOK	Día con humo o bruma espesa	Sin unidades	1
035	Día con nieve	OYSNOW	Día con nieve	Sin unidades	1
036	Día con ventiscas	OYSBNW	Día con ventiscas	Sin unidades	1
037	Días con vto. > 10	DYWND1	Días con viento mayor de 10 metros/seg	Sin unidades	1
038	Días con vto. > 15	OYWND5	Días con viento mayor de 15 metros/seg	Sin unidades	1
039	Días con lva. E.	DYGLAZ	Días con lluvia congelante	Sin unidades	1
040	Días con hoizn	DYGORZ	Días con hoizna	Sin unidades	1
041	Días con gta nve	DYICEP	Días con gotitas de hielo o nieve	Sin unidades	1
042	Días con tornado	DYTORN	Días con tornado	Sin unidades	1
043	Nubosidad diurna	SKYSUN	Cobertura nubosa promedio durante el día	Décimas	1
044	Nubosidad 24hrs	SKYND	Cobertura nubosa promedio de las 24 hrs ant.	Décimas	1
045	Percent Ins. Pos	SUNSHI	Porcentaje de insolación posible, diaria	Porcentaje	1
046	Insolación diari	INSOL	Insolación, diaria total en una superficie horiz.	Megajoules/M**2	0.1
047	Pres. estn prom	PRESST	Presión de la estación promedio diaria	Hectopascals	0.1
048	Presión red. prom	PRESL	Presión, reducida al nivel del mar, prom. diaria	Hectopascals	0.1
048	Nieve tot diaria	SNOW	Nieve total diaria	Centímetros	1

050	Espesor nieve	SNWDEP	Espesor de la nieve al momento de la obs. diaria	Centímetros	1
051	Esp. nve. eq agua	SNWWEQ	Altura de agua equivalente a la nieve	Milímetros	0.1
052	Capa suelo engel	TOPFGL	Capa superior de suelo congelado, profundidad	Centímetros	1
053	Prof. suelo engel	BOTFGL	Suelo congelado, profundidad a la base	Centímetros	1
054	Esp. tot. suelo en	THKFGL	Espesor total de suelo congelado	Centímetros	1
055	Esp. hielo en agu	ICE	Espesor del hielo sobre el agua	Milímetros	0.1
056	Vel. viento prom	WINDSPD	Velocidad del viento, promedio diario	Metros/segundo	1
057	Vto. Millas dia	WINDML	Recorrido del viento en millas, diario total	Kilómetros	1
058	Racha viento max	PKGUST	Rachas de viento, velocidad máxima diaria	Metros/segundo	1
059	Racha viento, dir	PKGSTD	Rachas de viento, dirección de la máxima diaria	Decenas de grados	1
060	Vel. max. vto. 1Min	WINDMX1	Velocidad máxima del viento en un minuto	Metros/segundo	1
061	Dir. vto. max 1min	WINDMXD	Dirección del viento máxima en un minuto	Decenas de grados	1
062	Temp. suelo05 max	SOILX1	Temperatura máxima del suelo a 5 cm, diario	Grados C	0.1
063	Temp. suelo05 min	SOILN1	Temperatura mínima del suelo a 5 cm, diario	Grados C	0.1
064	Temp. suelo10 max	SOILX2	Temperatura máxima del suelo a 10 cm, diario	Grados C	0.1
065	Temp. suelo10 min	SOILN2	Temperatura mínima del suelo a 10 cm, diario	Grados C	0.1
066	Temp. suelo20 max	SOILX3	Temperatura máxima del suelo a 20 cm, diario	Grados C	0.1
067	Temp. suelo20 min	SOILN3	Temperatura mínima del suelo a 20 cm, diario	Grados C	0.1
068	Temp. suelo50 max	SOILX4	Temperatura máxima del suelo a 50 cm, diario	Grados C	0.1
069	Temp. suelo50 min	SOILN4	Temperatura mínima del suelo a 50 cm, diario	Grados C	0.1
070	Temp. suelo1M max	SOILX5	Temperatura máxima del suelo a 100 cm, diario	Grados C	0.1
071	Temp. suelo1M min	SOILN5	Temperatura mínima del suelo a 100 cm, diario	Grados C	0.1
072	Temp. suelo05 dy	SOILO5	Temperatura del suelo a 5 cm, diario	Grados C	0.1
073	Temp. suelo10 dy	SOIL10	Temperatura del suelo a 10 cm, diario	Grados C	0.1
074	Temp. suelo20 dy	SOIL20	Temperatura del suelo a 20 cm, diario	Grados C	0.1
075	Temp. suelo50 dy	SOIL50	Temperatura del suelo a 50 cm, diario	Grados C	0.1
076	Temp. suelo1M dy	SOIL1M	Temperatura del suelo a 100 cm, diario	Grados C	0.1
077	Temp. suelo2M dy	SOIL2	Temperatura del suelo a 150 cm, diario	Grados C	0.1
078	Temp. suelo3M dy	SOIL3	Temperatura del suelo a 200 cm, diario	Grados C	0.1
079	Temp. suelo4M dy	SOIL4	Temperatura del suelo a 300 cm, diario	Grados C	0.1
080	Temp. suelo dy ma	MXSOIL	Temperatura máxima del suelo diario	Grados C	0.1
081	Temp. suelo dy mi	MNSOIL	Temperatura mínima del suelo diario	Grados C	0.1
082	Temp. suelo diari	DSOIL	Temperatura del suelo diario	Grados C	0.1
083	Flujo vapor	STRMFL	Flujo de vapor promedio diario	Metros ³ /segundo	1
084	Instrucción dia.	SUNSHN	Instrucción, total diario	Minutos	0.1
101	Temp. bulbo seco	TEMPDS	Temperatura de bulbo seco	Grados C	0.1
102	Temp. bulbo hum	TEMPHS	Temperatura de bulbo húmedo	Grados C	0.1
103	Temp. punto roc	TEMPDP	Temperatura del punto de rocío	Grados C	0.1
104	Presip. horaria	PRECIP	Precipitación, total horaria	Milímetros	0.1
106	Humedad Relativa	RELHUM	Humedad Relativa	Porcentaje	1
108	Presión, stn	PRESST	Presión de la estación	Hectopascades	0.1
107	Presión a n.m.m.	PRESSL	Presión reducida a n.m.m.	Hectopascades	0.1
108	Ajuste del Altimetro	ALTMTR	Ajuste del Altimetro	Milibares	0.1
109	Techo nubes	CEIL	Techo de las nubes	Codificado	1
110	Visibilidad	VISIBY	Visibilidad horizontal	Codificado	1
111	Vel del viento	WINDSPD	Velocidad del viento	Metros	1
112	Dirección viento	WINDDR	Dirección del viento	Grados	1
113	Vto. roc. horaria	WINDML	Recorrido del viento en una hora	Kilómetros	1
114	Cubert. nube tot	CLDTOT	Cubierta total de nubes	Octas	1
115	Nube opacidad 1	CLDOP1	Opacidad total de nubes	Octas	1
116	Nubes en, M 1	CLDAM1	Cantidad de nubes en la capa más baja	Octas	1
117	Tipo nube, M 1	CLDTY1	Tipo de nubes de la capa más baja	Codificado	1
118	Altura, M 1	CLDHT1	Altura de la capa más baja de nubes	Codificado	1
119	Opacidad, M1	CLDOP2	Opacidad de la capa más baja de nubes	Octas	1
120	Cont nube, M 2	CLDAM2	Cantidad de nubes de la segunda capa	Octas	1
121	Tipo nube, M 2	CLDTY2	Tipo de nubes de la segunda capa	Codificado	1
122	Altura, M 2	CLDHT2	Altura de la segunda capa de nubes	Codificado	1
123	Opacidad, M2	CLDOP3	Opacidad de la segunda capa de nubes	Octas	1
124	Cont nube, M 3	CLDAM3	Cantidad de nubes de la tercera capa	Octas	1
125	Tipo nube, M 3	CLDTY3	Tipo de nubes de la tercera capa	Codificado	1
126	Altura, M 3	CLDHT3	Altura de la tercera capa de nubes	Codificado	1
127	Opacidad, M3	CLDOP3	Opacidad de la tercera capa de nubes	Octas	1

128	Cant nube, M4	CLDAM4	Cantidad de nubes de la cuarta capa	Oclas	1
129	Tipo nube, M4	CLDTY4	Tipo de nubes de la cuarta capa	Codificado	1
130	Altura, M4	CLDHT4	Altura de la cuarta capa de nubes	Codificado	1
131	Opacidad, M4	CLDAP4	Opacidad de la cuarta capa de nubes	Oclas	1
132	Inciación hrs	SUN	Inciación total en horas	Minutos	1
133	Radiación, global	RADGLS	Radiación, global solar	Megajoules/M**2	0.1
134	Radiación, cielo	RADSKY	Radiación del cielo	Megajoules/M**2	0.1
135	Radiación, reflej	RADREF	Radiación solar reflejada	Megajoules/M**2	0.1
136	Radiación, net	RADNAW	Radiación neta de todas las ondas	Megajoules/M**2	0.1
137	Radiación, incid	RADOWN	Radiación total incidente	Megajoules/M**2	0.1
138	Radiación, salida	RADUP	Radiación total saliente	Megajoules/M**2	0.1
139	Radiación, direct	RADDSL	Radiación solar directa	Megajoules/M**2	0.1
140	Tiempo-Tornado	TORN	Tiempo, tornado, 1 = Tornado, 2 = Remolino	Codificado	1
141	Tiempo-Tormenta	THUNDER	Tiempo, tormentas eléctricas	Codificado	1
142	Tiempo-Lluvia	RAIN	Tiempo, lluvia	Codificado	1
143	Tiempo-Aguacero	RNSHW	Tiempo, aguacero	Codificado	1
144	Tiempo-Llovizna	DRZL	Tiempo, llovizna	Codificado	1
145	Tiempo-Lvs eng	FRZRN	Tiempo, lluvia engelante	Codificado	1
146	Tiempo-Lvs eng	FRZDRZ	Tiempo, lluvia engelante	Codificado	1
147	Tiempo-Nevasca	SNOW	Tiempo, nevada	Codificado	1
148	Tiempo-Nieve ch	SNWSHW	Tiempo, chubasco de nieve	Codificado	1
149	Tiempo-Nieve gr	SNWGRN	Tiempo, nieve granulada	Codificado	1
150	Tiempo-Crist hie	ICE	Tiempo, cristales de hielo	Codificado	1
151	Tiempo-Pelat hie	ICEPLT	Tiempo, pelotitas de hielo	Codificado	1
152	Tiempo-granizo	HAIL	Tiempo, granizo	Codificado	1
153	Tiempo-niebla	FOG	Tiempo, niebla	Codificado	1
154	Tiempo-Niebla hel	ICEFOG	Tiempo, niebla helada	Codificado	1
155	Tiempo-humo	SMOKE	Tiempo, humo	Codificado	1
156	Tiempo-bruma	HAZE	Tiempo, bruma	Codificado	1
157	Tiempo-ventisca	BLWSHW	Tiempo, ventisca	Codificado	1
158	Tiempo-Telv aren	BLWSNO	Tiempo, telvenera de arena	Codificado	1
159	Tiempo-Telv pelv	BLWDET	Tiempo, telvenera de polvo	Codificado	1
160	Tiempo-torbellano	SQUALL	Tiempo, torbellano	Codificado	1
161	Tiempo-turba lv	RANBG	Tiempo, torbellano y lluvia	Codificado	1
162	Tiempo-turba nve	SNOWSQ	Tiempo, torbellano y nieve	Codificado	1
163	Tiempo-pelat nve	SNOWPL	Tiempo, pelotitas de nieve	Codificado	1
164	Tiempo-niebla bj	GRDFOG	Tiempo, niebla baja	Codificado	1
165	Tiempo-capa hie	GLAZE	Tiempo, capa de hielo	Codificado	1
166	Presión de vapor	VAPPR	Presión de vapor	- Hectopascas	0.1
167	Tiempo Presente	PRSWX	Tiempo presente (OMM Código Síntico)	Codificado	1
168	Nube e,t,h M1	CLD-1	Cantidad, tipo y altura de nubes de nivel 1, código OMM	Codificado	1
169	Nube e,t,h M2	CLD-2	Cantidad, tipo y altura de nubes de nivel 2, código OMM	Codificado	1
170	Nube e,t,h M3	CLD-3	Cantidad, tipo y altura de nubes de nivel 3, código OMM	Codificado	1
171	Nube e,t,h M4	CLD-4	Cantidad, tipo y altura de nubes de nivel 4, código OMM	Codificado	1
172	Razón de mezcla	MIXRAT	Razón de mezcla	Gramos/KG	1
173	Presip, 15 min	15PRCP	Presipitación total 15 minutos	Milímetros	0.1
174	Presip, 3 horas	3HPRCP	Presipitación total 3 horas	Millímetros	0.1
180	Tatñico, mandly	MXTWIK	Tatñico, maximum daily ingestion rate, by running kilometer	KM/Hora	1
201	Temp, máx promed	MSXMTM	Temperatura, prom. mensual de la máx. diaria	Grados C	0.1
202	Temp, mín promed	MSMNTM	Temperatura, prom. mensual de la mín. diaria	Grados C	0.1
203	Temp, med manual	MTMTP	Temperatura, media manual	Grados C	0.1
204	Temp, máx extrema	MXMTMP	Temperatura, máxima extrema mensual	Grados C	0.1
205	Fecha máx extrema	DMXTMP	Fecha de la temperatura máxima extrema	Sin unidades	1
206	Temp, mín extrema	MXMTMP	Temperatura, mínima extrema mensual	Grados C	0.1
207	Fecha mín extrema	DMNTMP	Fecha de la temperatura mínima extrema	Sin unidades	1
208	Presip, total man	TOTPRC	Presipitación, total manual	Millímetros	0.1
209	Nieve, total man	TOTSNW	Nieve, total manual	Centímetros	1

210	Prec ,diaria máx	MXPRCP	Precipitación, diaria máxima en el mes	Milímetros	0.1
211	Fecha máx precip	DMXPRC	Fecha de la precipitación máx.diaria en el mes	Sin unidades	1
212	Nieve,máx diaria	MXSNOW	Nieve, máxima diaria en el mes	Centímetros	1
213	Fecha máx nieve	DMXSNW	Fecha de la nieve máxima diaria en el mes	Sin unidades	1
214	Evap, manual	EVAPPN	Evaporación, total mensual en evaporímetro	Milímetros	0.1
215	Evap, lago, mes	EVAPLK	Evaporación, total mensual en un lago	Milímetros	0.1
216	Temp, evap, máx pr	MMXPAN	Temperatura, del evaporímetro, promedio mensual máxima diaria	Grados C	0.1
217	Temp, evap mín pr	MMNPAN	Temperatura, del evaporímetro, promedio mensual mínima diaria	Grados C	0.1
218	Temp, evap, med	MNPAN	Temperatura, del evaporímetro, media mensual	Grados C	0.1
219	Temp, evap, máx ex	MXXPAN	Temperatura, del evaporímetro, máxima extrema mensual	Grados C	0.1
220	Fecha, máx ext, ev	DMXPAN	Fecha de la temperatura máxima extrema en evaporímetro	Sin unidades	1
221	Temp, evap, mín ex	XANPAN	Temperatura, del evaporímetro, mínima extrema mensual	Grados C	0.1
222	Fecha, mín ext, ev	DMXPAN	Fecha de la temperatura mínima extrema en evaporímetro	Sin unidades	1
223	HTNG Degree Day1	HDD1	Heating degree days, total monthly - Base 1	Sin unidades	1
224	HTNG Degree Day2	HDD2	Heating degree days, total monthly - Base2	Sin unidades	1
225	CLNG Degree Day1	CDD1	Cooling degree days, total monthly - Base1	Sin unidades	1
226	CLNG Degree Day2	CDD2	Cooling degree days, total monthly - Base2	Sin unidades	1
227	GRNG Degree Day1	GDD1	Growing degree days, total monthly - Base 1	Sin unidades	1
228	GRNG Degree Day2	GDD2	Growing degree days, total monthly - Base2	Sin unidades	1
229	Días con lluvia	DYRAIN	Número de días con lluvia	Sin unidades	1
230	Días con torn	DYTHND	Número de días con tormentas eléctricas	Sin unidades	1
231	Días con granizo	DYHAIL	Número de días con granizo	Sin unidades	1
232	Días con niebla	DYFOG	Número de días con niebla	Sin unidades	1
233	Días con torvaes	DYSAND	Número de días con torvaes de polvo e arena	Sin unidades	1
234	Días con humo	DYSMOK	Número de días con humo o niebla espesa	Sin unidades	1
235	Días con nieve	DYSNOW	Número de días con nieve	Sin unidades	1
236	Días con ventos	DYBENW	Número de días con ventos	Sin unidades	1
237	Días con vte. > 10	DYWND1	Número de días con vel de viento > 10 m/seg	Sin unidades	1
238	Días con vte. > 15	DYWND5	Número de días con vel viento > 15 m/seg	Sin unidades	1
239	Días c/cape Nal	DYGLAZ	Número de días con capa de hielo (lluvia engelante)	Sin unidades	1
240	Días temp < -10	DYTML1	Número de días con temperatura < -10.0	Sin unidades	1
241	Días temp < -5	DYTML2	Número de días con temperatura < -5.0	Sin unidades	1
242	Días temp < 0	DYTML3	Número de días con temperatura < 0.0	Sin unidades	1
243	Días temp > 30	DYTMG1	Número de días con temperatura > 30.0	Sin unidades	1
244	Días temp > 35	DYTMG2	Número de días con temperatura > 35.0	Sin unidades	1
245	Días temp > 40	DYTMG3	Número de días con temperatura > 40.0	Sin unidades	1
246	Días precip > 0	DYPRG1	Número de días con precipitación > 0.0	Sin unidades	1
247	Días precip > 5	DYPRG2	Número de días con precipitación > 5.0	Sin unidades	1
248	Días precip > 10	DYPRG3	Número de días con precipitación > 10.0	Sin unidades	1
249	Temp, prom máx PR	MNMXDP	Temperatura prom. máxima del punto de rocío	Grados C	0.1
250	Temp, prom mín PR	MNMNDP	Temperatura prom. mínima del punto de rocío	Grados C	0.1
251	Temp, media PR	MNDP	Temperatura media del punto de rocío	Grados C	0.1
252	Temp, máx ext PR	EXMXDP	Temperatura máx. extrema mensual del punto de rocío	Grados C	0.1
253	Fecha Má Ext PR	OXMXDP	Fecha de la temp máx. extrema mensual del punto de rocío	Sin unidades	1
254	Temp, mín ext PR	EXMNDP	Temperatura mínima extrema mensual del punto de rocío	Grados C	0.1
255	Fecha Mn Ext PR	OXMNDP	Fecha de la temp mínima extrema mensual del punto de rocío	Sin unidades	1
256	HR, prom máx	MNMXRH	Humedad Relativa, promedio máxima mensual	Porcentaje	1
257	HR, prom mín	MNMNRH	Humedad Relativa, promedio mínima mensual	Porcentaje	1
258	HR, prom mens	MNRH	Humedad Relativa, promedio mensual	Porcentaje	1
259	HR, extm máx	EXMXRH	Humedad Relativa, máxima extrema mensual	Porcentaje	1

260	Fecha extr Má HR	DXMXRH	Fecha de la humedad relativa máxima extrema mensual	Sin unidades	1
261	HR, extrm mín	EXMNRH	Humedad Relativa, mínima extrema mensual	Porcentaje	1
262	Fecha extr Mñ HR	DXMNRH	Fecha de la humedad relativa mínima extrema mensual	Sin unidades	1
263	Evap, max diaria	EVAPMX	Evaporación, máxima diaria en el mes	Milímetros	0.1
264	Fecha max evap	DMXEVP	Fecha de la máxima evaporación diaria en el mes	Sin unidades	1
265	Días c/ tornado	MYTORN	Número de días con tornado	Sin unidades	1
266	Días c/Apelt hiel	MYICEP	Número de días con pedruzcos de hielo	Sin unidades	1
267	Días c/Lluzina	MYGDRZ	Número de días con Lluvia	Sin unidades	1
268	Inciación Mens	MLYSUN	Inciación total mensual	Horas	0.1
269	Temp, suel4M men	MSOIL4	Temperatura del suelo a 300 cm, mensual	Grados C	0.1
270	Temp, suel3M men	MSOIL3	Temperatura del suelo media mensual a 300cm	Grados C	0.1
271	Temp, suel2M men	MSOIL2	Temperatura del suelo media mensual a 150cm	Grados C	0.1
272	Temp, suel1M men	MSOIL1	Temperatura del suelo media mensual a 100cm	Grados C	0.1
273	Temp, suel50 men	MSOIL50	Temperatura del suelo media mensual a 50cm	Grados C	0.1
274	Temp, suel20 men	MSOIL20	Temperatura del suelo media mensual a 20cm	Grados C	0.1
275	Temp, suel10 men	MSOIL10	Temperatura del suelo media mensual a 10cm	Grados C	0.1
276	Temp, suel5 men	MSOIL5	Temperatura del suelo media mensual a 5 cm	Grados C	0.1
301	Presión del nvl	PRESS	Presión de este nivel de sondes	Hectopascasles	0.1
302	Altura de nvl se	HEIGHT	Altura del nivel de sondes	Metros	1
303	Temp del nvl se	TEMPDB	Temperatura del nivel de sondes	Grados C	0.1
304	Dep Pt Rele mda	DPTDEP	Depresión del punto de rocío en este nivel de sondes	Grados C	0.1
306	Dir vto nvl sen	WNOHDR	Dirección del viento en el nivel de sondes	Grados	1
308	Vel vto nvl sen	WNOHPO	Velocidad del viento para el nivel de sondes	Nudos	1
401	Temp, med max dec	MMAXTM	Temperatura media máxima diaria, decesal	Grados C	0.1
402	Temp, med mín dec	MMINTM	Temperatura media mínima diaria, decesal	Grados C	0.1
403	Temp, med 10 días	MNTMP	Temperatura media decesal	Grados C	0.1
404	Temp, Ext Máx Dec	XMAXTMP	Temperatura máx extrema, decesal	Grados C	0.1
406	Fecha Máx Ex Dec	DMXTMP	Fecha de la temp max extrema, decesal	Sin unidades	1
408	Temp, Mín Ext dec	XMINTMP	Temperatura mínima extrema, decesal	Grados C	0.1
407	Fecha, Mín Ext Dec	DMINTMP	Fecha de la temp mínima extrema, decesal	Sin unidades	1
408	Preop, Total 10D	TOTPRC	Preopitación total decesal	Milímetros	0.1
409	Nieve Total 10D	TOTSNW	Nieve total de 10 días	Centímetros	1
410	Preop, max d10D	MXPRCP	Preopitación máxima diaria en un periodo de 10 días	Milímetros	0.1
411	Fecha, Max Pre 10D	DMXPRC	Fecha de la máx preop, diaria en 10 días	Sin unidades	1
412	Nieve, max d 10D	MXSNOW	Nieve máxima diaria en un periodo de 10 días	Centímetros	1
413	Fecha, Max Nve 10D	DMXSNW	Fecha de la nieve máxima diaria en 10 días	Sin unidades	1
414	Evap, tot, 10D	EVAPPN	Evaporación total de 10 días, en evaporímetro	Milímetros	0.1
416	Evap, tot, lag 10D	EVAPLK	Evaporación total en lago de 10 días	Milímetros	0.1
416	Temp, prom, max 10D	MMXPAN	Temperatura prom máx, evaporímetro 10 días	Grados C	0.1
417	Temp, prom, mín 10D	MMNPAN	Temperatura prom mín, evaporímetro 10 días	Grados C	0.1
418	Temp, med, evap 10D	MMNPAN	Temperatura media de evaporímetro en 10 días	Grados C	0.1
419	Temp, max, evap 10D	XMAXPAN	Temperatura máx, en evaporímetro en 10 días	Grados C	0.1
420	Fecha, Má, Ex, 10D	DMXPAN	Fecha de la temp max extrema en evaporímetro para 10 días	Sin unidades	1
421	Temp, mn, evap 10D	XMINPAN	Temperatura mínima extrema en evaporímetro en 10 días	Grados C	0.1
422	Fecha, Mín, Ex, evap	DMNPAN	Fecha de la mínima extrema en evaporímetro en 10 días	Sin unidades	1
423	HTNG Degree Day1	HDD1	Heating degree days, total 10 day - Base1	Sin unidades	1
424	HTNG Degree Day2	HDD2	Heating degree days, total 10 day - Base2	Sin unidades	1
426	CLNG Degree Day1	CDD1	Cooling degree days, total 10 day - Base1	Sin unidades	1
426	CLNG Degree Day2	CDD2	Cooling degree days, total 10 day - Base2	Sin unidades	1
427	GRNG Degree Day1	GDD1	Growing degree days, total 10 day - Base1	Sin unidades	1
428	GRNG Degree Day2	GDD2	Growing degree days, total 10 day - Base2	Sin unidades	1
428	Días c/Luz 10D	DYRAIN	Núm. días con lluvia en periodo de 10 días	Sin unidades	1
430	Días c/Tm 10D	DYTHND	Núm. días con tormenta en periodo de 10 días	Sin unidades	1
431	Días c/Grniz 10D	DYHAR	Núm. días con granizo en periodo de 10 días	Sin unidades	1

432	Días c/Niebla10D	DYFOG	Núm. días con niebla en período de 10 días	Sin unidades	1
433	Días c/Torvan10D	DYSAND	Núm. días con torvanera en período de 10 días	Sin unidades	1
434	Días c/Humo 10D	DYSMOK	Número días con humo o bruma en período de 10 días	Sin unidades	1
435	Días c/Nieve 10D	DYSNOW	Número de días con nieve en período de 10 días	Sin unidades	1
436	Días c/Ventis10D	DYSBNW	Número de días con ventisca en período de 10 días	Sin unidades	1
437	Días c/Vte > 10	DYWNO1	Núm. días con viento > 10 m/seg en 10 días	Sin unidades	1
438	Días c/Vte > 15	DYWNO5	Núm. días con viento > 15 m/seg en 10 días	Sin unidades	1
439	Días c/Hielo 10D	DYGLAZ	Número de días con capa de hielo (Suvs eng) en 10 días	Sin unidades	1
440	Días temp < 1	DYTML1	Número de días con temp < 1 en 10 días	Sin unidades	1
441	Días temp < 2	DYTML2	Número de días con temp < 2 en 10 días	Sin unidades	1
442	Días temp < 3	DYTML3	Número de días con temp < 3 en 10 días	Sin unidades	1
443	Días temp > 1	DYTMG1	Número de días con temp > 1 en 10 días	Sin unidades	1
444	Días temp > 2	DYTMG2	Número de días con temp > 2 en 10 días	Sin unidades	1
445	Días temp > 3	DYTMG3	Número de días con temp > 3 en 10 días	Sin unidades	1
446	Días precip > 1	DYPRG1	Número de días con precip > 1 en 10 días	Sin unidades	1
447	Días precip > 2	DYPRG2	Número de días con precip > 2 en 10 días	Sin unidades	1
448	Días precip > 3	DYPRG3	Número de días con precip > 3 en 10 días	Sin unidades	1
449	Temp. pr. med max	MNMXDP	Temperatura del punto de rocío media máx en 10 días	Grados C	0.1
450	Temp. pr. med min	MNMNDP	Temperatura del punto de rocío media mínima en 10 días	Grados C	0.1
451	Temp. pr. med 10D	MNDP	Temperatura del punto de rocío media en 10 días	Grados C	0.1
452	Temp. pr max 10D	EXMXDP	Temperatura del punto de rocío máx extrema de 10 días	Grados C	0.1
453	Fecha Máx Ext PR	DXMXDP	Fecha de la temp máx extrema del punto de rocío en 10 días	Sin unidades	1
454	Temp. pr min 10D	EXMNDP	Temperatura del punto de rocío min extr en 10 días	Grados C	0.1
455	Fecha Míx ext PR	DXMNDP	Fecha de la temperatura mínima extrema de 10 días	Sin unidades	1
456	HR, med max 10D	MNMXRH	Humedad Relativa media máxima en 10 días	Porcentaje	1
457	HR, med min 10D	MNMNRH	Humedad Relativa media mínima en 10 días	Porcentaje	1
458	HR, med 10 días	MNRH	Humedad Relativa media en 10 días	Porcentaje	1
459	HR, extm max	EXMXRH	Humedad Relativa máxima extrema de 10 días	Porcentaje	1
460	Fecha Máx extr HR	DXMXRH	Fecha de la HR máx extrema en 10 días	Porcentaje	1
461	HR, extm min	EXMNRH	Humedad Relativa mínima extrema en 10 días	Porcentaje	1
462	Fecha Míx extr HR	DXMNRH	Fecha de la HR mínima extrema en 10 días	Sin unidades	1
463	Evap. max día 10D	EVAPMX	Evaporación máxima diaria en un período de 10 días	Milímetros	0.1
464	Fecha max avap	DMXEVP	Fecha de la max evaporación en período de 10 días	Sin unidades	1

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Springall Galindo R.. Hidrología. UNAM 1970.
- 2.- World Meteorological Organization. Guide to Hydrometeorological Practices, 2d.ed. No.168. Tech. Page 82.1970.
- 3.- SARH. Plan Nacional Hidráulico 1981. Anexo 2 Disponibilidad de agua y suelo.
- 4.- C.N.A. Servicio Meteorológico Nacional. Boletín informativo. 1974.
- 5.- Campos Aranda M.. Procesos del ciclo hidrológico.UASLP. 1987.Tomo 1/2. 1a. Reimpresión.
- 6.- Aparicio Mijares Fco. Fundamentos de hidrología de superficie. Edit. LIMUSA.
- 7.- Springall Galindo R. Revista de Ingeniería Hidráulica en México. Evolución de la hidrología superficial en México. Núm. especial. Octubre de 1990. pág.39.
- 8.- Fuentes O. Análisis de escurrimientos. Universidad Veracruzana. 1978.
- 9.- CFE. Manual de diseño de obras civiles. Hidrotecnia. A.1.5. Relaciones entre precipitación y escurrimiento.
- 10.- Martínez Toledano T. Tesis profesional. Teoría y aplicaciones del hidrograma unitario. México, 1982.
- 11.- Salas Salinas M. A. y Domínguez Mora R. CENAPRED. Desarrollo de un modelo para predicción de avenidas a partir de los datos de lluvia. Enero 1992.
- 12.- Chow V.T. Hidrología aplicada. Mc. Graw-Hill.1964.