

.1 Introducción

La principal fuente de humedad para la precipitación la constituye la evaporación desde la superficie de los océanos. Sin embargo, la cercanía a los océanos no conlleva una precipitación proporcional, como lo demuestran muchas islas desérticas. Son los factores del clima ya estudiados (latitud, altitud, continentalidad, corrientes marinas, vientos dominantes) y las barreras orográficas, las que determinan la humedad atmosférica sobre una región.

Definición

Se define precipitación a toda forma de humedad, que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas, las garúas y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación. En Estados Unidos, la lluvia se identifica según su intensidad, en:

- ligera, para tasas de caída de hasta 2.5 mm/h
- moderada, desde 2.5 hasta 7.6 mm/h
- fuerte, por encima de 7.6 mm/h

Formación

Debido a su calentamiento cerca de la superficie, motivado por diferencias de radiación, las masas de aire ascienden hasta alturas de enfriamiento suficientes para llegar a la saturación. Pero esto no conlleva precipitación. Suponiendo que el aire está saturado, o casi saturado, para que se forme neblina o gotas de agua o cristales de hielo, se requiere la presencia de núcleos de condensación (en los dos primeros casos) o de congelamiento (en el tercero). Los núcleos de condensación consisten de productos de combustión, óxidos de nitrógeno y minúsculas partículas de sal; los núcleos de congelamiento consisten de minerales arcillosos, siendo el caolín el más frecuente.

Después de la nucleación se forman finísimas gotitas de diámetro medio de aproximadamente 0.02 mm. y como las gotas de lluvia tienen un diámetro medio de aproximadamente 2 mm., significa que se produce un aumento del orden de un millón de veces en el volumen de las gotitas. Este enorme aumento de tamaño se produce por la unión entre sí de numerosas gotitas y esta unión se explica por:

- la atracción electrostática entre las gotitas que conforman las nubes;
- las microturbulencias dentro de la masa de la nube;
- el barrido de las gotitas más finas por las gotas mayores;
- la diferencia de temperaturas: las gotas más frías se engrosan a expensas de las más calientes.

Mantenimiento de la precipitación

Lo que se acaba de exponer explica la formación de las gotas de lluvia dentro de la masa de la nube, pero esto no quiere decir que las gotas así formadas llegarán a la superficie terrestre, o, en otras palabras que el volumen de agua contenido en la nube es igual al volumen de agua llovida. Mediciones realizadas demuestran que lo normal es que el agua de lluvia que cae a tierra sea mucho mayor que el agua contenida en la nube. La única explicación es que las nubes se rehan continuamente durante el proceso mismo de la formación de las precipitaciones, lo que significa una alimentación constante a partir del vapor de agua de los alrededores; esto se produce principalmente:

- cuando existe una turbulencia dentro de la nube que provoca y facilita la renovación del vapor de agua;
- cuando hay movimiento del aire húmedo desde las partes bajas, es decir un movimiento vertical ascendente.

La lluvia artificial

De tiempo en tiempo se habla de la lluvia artificial en el Perú, como una solución al riego de las zonas áridas de la Costa, sin que hasta ahora se haya logrado concretar algo. Esto se explica por lo compleja que resulta en realidad la producción de la lluvia artificial. En los experimentos que se vienen realizando en otros países se usa para el bombardeo de las nubes tanto el dióxido de carbono sólido (hielo seco) como el yoduro de plata; ambos agentes actúan como núcleos de congelamiento. El envío se hace por medio de avionetas, globos, cohetes y generadores. Aun cuando el panorama actual no es del todo claro, hay el optimismo de lograr a corto plazo la producción a costo razonable de lluvia artificial.

Tipos de precipitaciones

Las precipitaciones se clasifican en tres grupos, según el factor responsable del levantamiento del aire que favorece el enfriamiento necesario para que se produzcan cantidades significativas de precipitación.

- a) Precipitaciones convectivas. Son causadas por el ascenso de aire cálido más liviano que el aire frío de los alrededores. Las diferencias de temperatura pueden ser sobre todo el resultado de calentamientos diferenciales en la superficie o en la capa superior de la capa de aire. La precipitación convectiva es puntual y su intensidad puede variar entre aquella correspondiente a lloviznas ligeras y aguaceros.
- b) Precipitaciones orográficas. Resultan del ascenso del aire cálido hacia una cadena de montañas. Las regiones que quedan del otro lado de las montañas pueden sufrir la ausencia de lluvias, puesto que todas las nubes son interceptadas y precipitadas en el lado de donde ellas provienen.

Es el caso de la Selva Alta de nuestro país, la región más lluviosa, donde las nubes provienen de la Selva Baja.

- c) Precipitaciones ciclónicas. Se producen cuando hay un encuentro de nubes de diferentes temperaturas: las más calientes son impulsadas a las partes más altas donde precipitan.

En la naturaleza, los efectos de estos tres tipos de enfriamiento están inter-relacionados y la precipitación resultante no puede identificarse como de un solo tipo.

2.2 Medición de la Precipitación

Fundamentalmente, existen tres tipos de instrumentos.

1. Pluviómetros simples.- En principio cualquier recipiente abierto de paredes verticales puede servir de pluviómetro, porque lo que interesa es retener el agua llovida para luego medirla. En el sistema métrico se mide en milímetros y décimos de milímetro. Sin embargo, es importante que las dimensiones de estos instrumentos sean normalizadas para poder comparar las medidas tomadas en diferentes localidades.

El pluviómetro estándar del U.S. National Weather Service (fig. 2.1) consta de un recipiente cilíndrico (a), un embudo colector (b) de diámetro 8" y un tubo medidor (c) de área igual a un décimo del área del embudo colector; de esta manera, 1 mm. de lluvia llenará el tubo medidor 10 mm. con el cual se mejora la precisión de la lectura. Con una regla graduada en mm. es posible estimar hasta los décimos de mm.

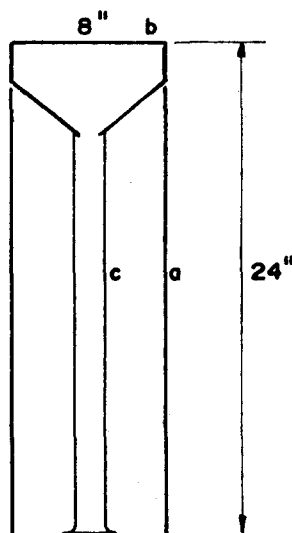


Fig. 2.1 PLUVIOMETRO

Cuando se espera que nieve se retiran tanto el embudo como el tubo y se recibe la nieve en el depósito cilíndrico; después que la nieve se ha fundido se vierte en el tubo medidor.

2. Pluviómetros registradores (pluviógrafo).- Los pluviómetros simples sólo registran la cantidad de lluvia caída; no nos dicen nada acerca de la intensidad que ella adquiere en el transcurso de la precipitación, lo cual se consigue con los pluviógrafos. La intensidad de la lluvia es un parámetro importante para el diseño de obras hidráulicas como veremos en su oportunidad.

La descripción de estos pluviómetros puede verse en la referencia 3. Básicamente, el agua es recibida por un embudo y conducida a un depósito con doble compartimiento, oscilante alrededor de un pivote.

El movimiento oscilante del depósito es transmitido a una aguja que va marcando su trazo en un papel enrollado sobre un tambor que gira gracias a un mecanismo de relojería. El gráfico resultante recibe el nombre de pluviograma. El de la fig. 2.2 ha sido tomado de la referencia 4.

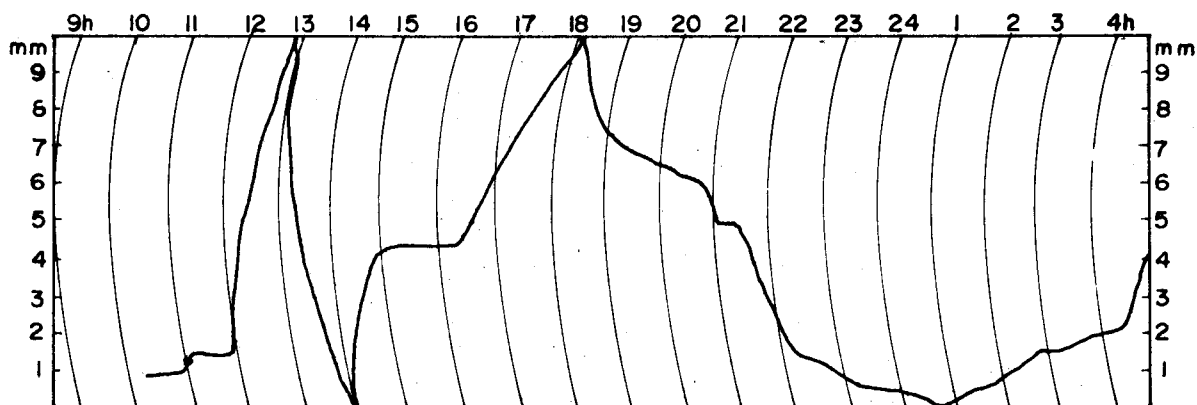


Fig. 2.2 PLUVIOGRAMA

3. Pluviómetros totalizadores.- Se utilizan cuando hay necesidad de conocer la pluviometría mensual o estacional de una zona de difícil acceso, donde sólo se va unas pocas veces al año. Estos pluviómetros acumulan el agua llovida durante un período de tiempo más o menos largo. Para proteger el agua de la congelación se usa cloruro de calcio u otro anticongelante, y para protegerla de la evaporación una capa de aceite.

Instalación.- Deben evitarse las instalaciones en los tejados y laderas con mucho viento. El mejor lugar para instalar un pluviómetro será aquél donde haya una superficie plana rodeada con arbustos o árboles que sirvan de protectores contra el viento, pero estos no deben estar tan cerca al pluviómetro que lo obstruyan.

Curva masa de precipitación en una estación

La curva masa es la representación de la precipitación acumulada vs. el tiempo. Se extrae directamente del pluviograma.

Si en una zona hay instalados un pluviómetro registrador y otros no registradores, próximos al primero, es posible obtener también las curvas masa para los no registradores. Para ello se supone que la curva masa de la precipitación en un pluviómetro no registrador es proporcional en la forma a la del pluviómetro registrador, excepto en lo que se define de otra manera por las lecturas observadas y las notas.

En la fig. 2.3 se han dibujado las curvas masa de la precipitación en cuatro estaciones próximas entre sí (A, B, C, D), de las cuales sólo la estación A es registradora.

Ejemplo 2.1

- B. Febrero 16 empezó a las 9 p.m.
17 terminó a las 9.30 a.m.
empezó a las 11 a.m.
terminó a la 1 p.m.
medida a las 6 p.m. = 5.56 pg.
- C. Febrero 16 empezó a las 11 p.m.
17 medida a las 6 p.m. = 2.06 pg.
- D. Febrero 16 empezó a las 10 p.m.
17 medida a las 8 a.m. = 3.40"
terminó a la 1.30 p.m.
medida a las 6 p.m. = 4.06"

A = pluviómetro registrador

B, C, D = pluviómetros no registradores con medida diaria a las 6 p.m.

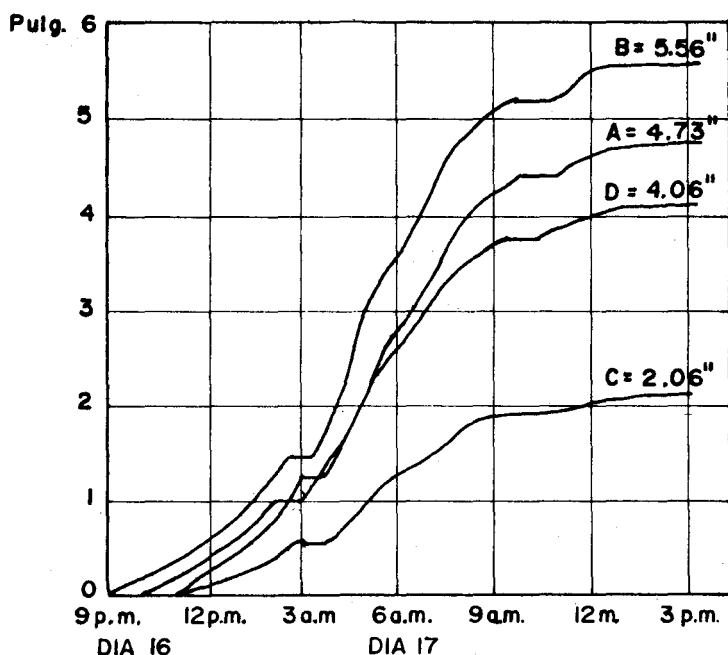


Fig. 2.3 CURVAS MASA DE PRECIPITACIONES

2.3 Análisis de los Datos Pluviométricos

Las precipitaciones en altura de agua medidas con pluviómetros varían de un lugar a otro y, en un mismo lugar, de un tiempo a otro. Estas medidas constituyen un conjunto numeroso de datos, que es necesario analizar y sintetizar en unos pocos valores más manuable y fáciles de utilizar - en proyectos hidráulicos. Se recurre para ello a la Estadística, escogiendo un modelo matemático que represente el comportamiento de la lluvia en el lugar en estudio. Se utiliza para ello la experiencia acumulada sobre el particular. Esto es estudiado con cierto detenimiento en el Capítulo 10, de modo que ahora sólo veremos los aspectos generales del problema.

Ejemplo 2.2

La tabla 2.1 contiene las precipitaciones mensuales registradas en la estación de Sibayo, en Puno, tomadas de la referencia 4.

TABLA 2.1 PRECIPITACIONES MENSUALES EN SIBAYO - PUNO

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1951	156.3	133.8	55.2	6.4	0.0	2.1	3.4	3.1	33.6	1.4	6.8	56.5	458.6
1952	126.3	163.9	152.2	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	76.4	76.4	619.2
1953	100.3	255.9	86.0	31.9	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	29.9	27.1	554.0
1954	123.6	154.4	221.6	17.8	18.0	6.0	3.0	0.0	5.0	21.3	22.8	160.9	754.4
1955	114.1	81.1	22.6	1.2	1.7	0.0	0.0	0.4	2.2	0.0	11.2	14.0	248.5
1956	122.4	164.7	150.0	3.5	0.0	27.1	0.0	0.0	8.7	5.8	1.6	97.0	580.8
1957	82.3	145.5	123.2	5.3	6.3	0.0	2.5	2.7	13.8	24.2	31.2	24.9	461.9
1958	64.0	131.9	102.6	25.1	7.9	1.0	0.0	0.0	5.0	5.9	9.7	213.5	566.6
1959	193.4	66.1	225.6	10.8	0.0	0.6	0.0	6.1	24.1	29.9	68.0	52.9	677.5
1960	152.4	152.3	91.1	55.1	28.0	0.8	0.0	24.8	17.7	6.3	103.5	163.7	795.7
Pro- me- dio	123.5	145.0	123.0	17.2	7.3	3.8	0.9	3.7	11.0	11.5	36.1	88.7	571.7

Valor central dominante.- En este caso viene a ser la precipitación anual media o módulo pluviométrico anual, que es 571.7 mm. Este valor da una idea de la magnitud de las lluvias en Sibayo.

Rango.- Es la diferencia entre los valores extremos de las precipitaciones anuales. Para el registro utilizado: 795.7 - 248.5 = 547.2 mm.

Desviación estándar o desviación típica.- Se define por la fórmula:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \bar{x} \sum x}{n-1}} \quad \dots(2.1)$$

S_x ... desviación estándar de las precipitaciones anuales

\bar{x} ... valor promedio de las precipitaciones anuales = 571.7 mm.

x ... cada una de las precipitaciones anuales del registro

n ... longitud del registro en años (10).

Hechos los cálculos se obtiene $S_x = 159$ mm.

Coeficiente de variabilidad.- Se define: $\gamma(x) = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100 \dots (2.2)$

$$\gamma(x) = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100 = \frac{159}{571.7} \times 100 = 27.8 \%$$

Si suponemos que las precipitaciones anuales en Sibayo constituyen una población normal, y que la muestra tiene también una distribución de frecuencias normal como la población, entonces el punto medio de la campana de Gauss corresponde al valor medio \bar{x} y los demás valores respecto a la media se distribuyen así:

- el 50 % de los datos se encuentra entre $\bar{x} \pm \frac{2}{3} S_x$;
- el 68 % de los datos se encuentra entre $\bar{x} \pm S_x$;
- el 95 % de los datos se encuentra entre $\bar{x} \pm 2 S_x$.

Se interpreta diciendo que, en la localidad de Sibayo:

- es de esperar una precipitación anual comprendida entre 678.0 y 466.0 mm., con un 50 % de probabilidad;
- es de esperar una precipitación anual comprendida entre 731.0 y 413.0 mm., con un 68 % de probabilidad;
- es de esperar una precipitación anual comprendida entre 890.0 y 254.0 mm., con un 95 % de probabilidad.

Luego del trabajo que se acaba de hacer, ya es posible tomar decisiones para el diseño de alguna estructura hidráulica en particular que se proyecte en la zona de Sibayo, en Puno.

El manejo estadístico de la información pluviométrica, es decir el estudio de su comportamiento según un modelo matemático, sólo es posible realizarlo cuando la información reúne estos tres requisitos: es completa, consistente y de extensión suficiente. Es por eso que, una información pluviométrica antes de ser estudiada en su comportamiento debe ser revisada en estos tres aspectos, en la forma cómo se describe enseguida.

2.3.1 Estimación de Datos Faltantes

Frecuentemente se halla uno con que faltan datos en los registros de lluvias. Esto se debe a ausentismo del operador o a fallas instrumentales.

Se llama correlación a la operación o procedimiento por medio del cual se completan los datos faltantes. Para ello se utilizan los datos de estaciones índices, que sí tienen los datos completos y que se seleccionan de modo que estén lo más cerca posible y sean de altitud parecida a la estación en estudio. Distancia y altitud son pues los factores principales para la selección de las estaciones índice.

Métodos de estimación

Método del U.S. Weather Bureau.- Si los datos faltantes son lluvias diarias, se escogen tres estaciones índice A, B, C.

- a) Si la precipitación anual media en cada estación índice (\bar{x}_A , \bar{x}_B , \bar{x}_C) está dentro de un 10 % de la correspondiente a la estación incompleta (\bar{x}), un promedio aritmético simple de las precipitaciones en las estaciones índice da una estimación adecuada. En los ejemplos que siguen las precipitaciones es tán en mm.

Ejemplo 2.3

Estación	\bar{x}	Δ	%	día j
A	680	10	1.5	15
B	710	40	6.0	20
C	701	31	4.6	25
x	670			

$$\bar{x} = \frac{15 + 20 + 25}{3} = 20 \text{ mm.}$$

- b) Si la precipitación anual media en cualquiera de las estaciones índice difiere de aquella de la estación problema en más de un 10 %, se utiliza la fórmula:

$$p_x = \frac{1}{3} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_A} p_A + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_B} p_B + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_C} p_C \right) \quad \dots (2.3)$$

Si los datos faltantes son precipitaciones anuales, se puede aplicar el método de los promedios o el método de la recta de regre sión.

Método de los promedios.- Se escoge una estación índice (A) cuya precipitación anual media es \bar{x}_A ; si la estación problema es la estación x, se halla su correspondiente precipitación anual media \bar{x} y se establece la proporción:

$$\frac{x}{\bar{x}_A} = \frac{\bar{x}}{\bar{x}_A} \quad \dots (2.4)$$

de donde se puede despejar x que es el dato faltante. Hay que tener cuidado de hallar los valores medios para el período común de registros, como se puede apreciar en el ejemplo 2.4.

Ejemplo 2.4

	\bar{x}_A	x
1984	754	731
1985	766	690
1986	166	
1987	410	306
1988	576	610

$$\bar{x} = \frac{731 + 690 + 306 + 610}{4} = 584.3$$

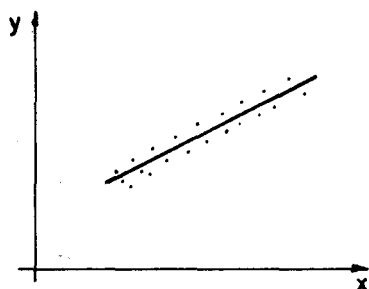
$$\bar{x}_A = \frac{754 + 766 + 410 + 576}{4} = 626.5$$

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x}_A} \cdot x_A = \frac{584.3}{626.5} \cdot 166 = 154.8 \text{ mm.}$$

Si hay dos o tres estaciones índice se procede igual con cada una de ellas, obteniéndose 2 ó 3 valores de x. El valor final de x será el promedio de esos valores.

Método de la recta de regresión.- Por razones de comodidad se va a designar con "y" a la estación con datos incompletos y con "x" a la estación índice. Básicamente, el método consiste en:

1. Dibujar el diagrama de dispersión (puntos de coordenadas x, y);
2. Ajustar una recta a ese diagrama de dispersión;
3. Esta recta, llamada "línea de regresión", se usa para completar la información faltante en y.



Esto mismo puede realizarse analíticamente.

Cuando hay varias estaciones índice surge la interrogante de cuál de ellas utilizar. La respuesta la encontramos en la Estadística: de varias estaciones índice la mejor correlacionada con la estación incompleta es la de mejor coeficiente de correlación (r).

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n-1) S_x \cdot S_y} \quad \dots (2.5)$$

- n número de pares de datos conocidos = número de datos de y ;
- \bar{x} media aritmética de los datos de x que forman parejas con los de y ;
- \bar{y} media aritmética de todos los datos de y ;
- S_x desviación estándar para todos los datos de x que forman parejas con los de y ;
- S_y desviación estándar para todos los datos de y.

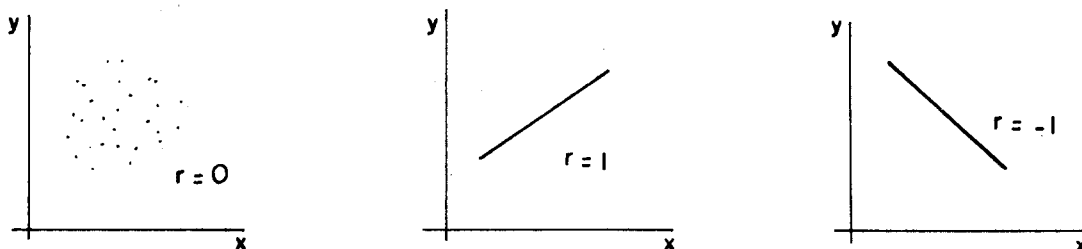
$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n-1}} \quad \dots (2.6)$$

Los valores de r varían de -1 a +1.

$r = 0$, significa que no existe ningún grado de asociación entre los valores de x y los valores de y (correlación nula).

$r = 1$, significa que los puntos del diagrama de dispersión se alinean en una recta de pendiente positiva (correlación directa óptima).

$r = -1$, significa que los puntos del diagrama de dispersión se alinean en una recta de pendiente negativa (correlación inversa óptima).



En el caso presente de precipitaciones anuales, la experiencia indica que la correlación es directa y entonces la ecuación de la recta de regresión es:

$$y' = \alpha + \beta x \quad \dots (2.7)$$

La letra y con índice (y') se emplea para referirse a los valores derivados de la recta de regresión.

Los valores de los coeficientes α y β se hallan generalmente con la teoría de los mínimos cuadrados.

En vez de (2.7) se prefiere usar:

$$y' = a + b (x - \bar{x}) \quad \dots (2.8)$$

Siempre con la teoría de mínimos cuadrados se halla:

$$\begin{aligned} a &= \bar{y} \\ b &= \frac{\sum (x - \bar{x}) y}{\sum (x - \bar{x})^2} = \frac{\sum xy - n \bar{x} \bar{y}}{\sum x^2 - n \bar{x}^2} \quad \dots (2.9) \end{aligned}$$

Se demuestra también que : $b = r \frac{S_y}{S_x} \quad \dots (2.10)$

siendo r , como antes, el coeficiente de correlación.

Ejemplo 2.5

Completar la información para la estación pluviométrica A a partir de las estaciones índice B y C, próximas a A y de altitudes parecidas, mediante el método de la recta de regresión. Las cifras se refieren a precipitaciones anuales en mm.

	A	B	C
1967	786	628	765
8	846	708	876
9	1332	1112	1020
1970	918	816	641
1		830	918
2	930	803	781
3	1115	1020	849
4	887	867	807
5	800	1056	875
6	857	847	947
7	930	756	889
8		918	799
9	888	793	871
1980	915	1002	1000
1	817	831	933
2	999	797	849

Se correlaciona primero A con B y luego A con C hallando en cada caso el respectivo coeficiente de correlación r con la ecuación 2.5. Se escoge luego la estación de mayor r y se halla la ecuación de la recta de regresión.

Correlacionando A con B:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= 860 & S_x &= 133.67 \\ \bar{y} &= 930 & S_y &= 138.19 & r &= 0.59\end{aligned}$$

Correlacionando A con C:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= 865 & S_x &= 94.69 \\ \bar{y} &= 930 & S_y &= 138.19 & r &= 0.33\end{aligned}$$

Se escoge la estación B. Ecuación de la recta de regresión (2.8):

$$y' = \bar{y} + r \frac{S_y}{S_x} (x - \bar{x})$$

$$y' = 930 + 0.59 \frac{138.19}{133.67} (x - 860)$$

$$y' = 930 + 0.61 (x - 860)$$

Los datos faltantes son:

$$\begin{array}{lll}\text{año 1971} & x = 830 & y' = 912 \text{ mm.} \\ \text{año 1978} & x = 918 & y' = 965 \text{ mm.}\end{array}$$

2.3.2 Análisis de Consistencia

Cualquier cambio en la ubicación como en la exposición de un pluviómetro puede conllevar un cambio relativo en la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro. El registro completo publicado representará condiciones inexistentes. Un registro de este tipo se dice que es inconsistente.

Una forma de detectar las inconsistencias es mediante las curvas doble másicas.

Una curva doble másica se construye llevando en ordenadas los valores acumulados de la estación en estudio y en abscisas los valores acumulados de un patrón, que consiste en el promedio de varias estaciones índice.

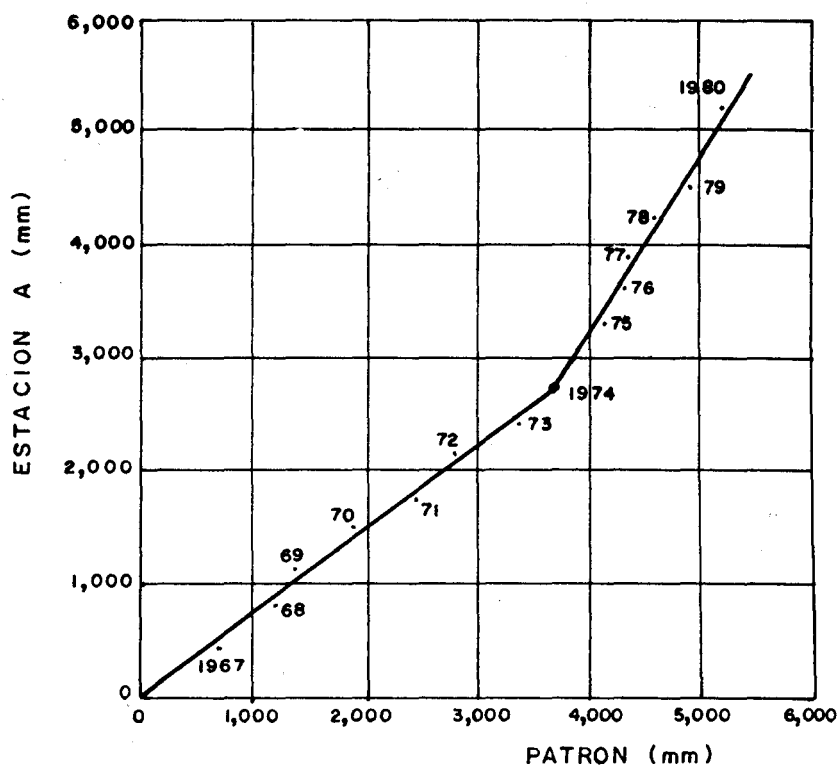


Fig. 2.4 CURVA DOBLE MASA

En la fig. 2.4 se observa un quiebre el año 1974. Si se supone que las estaciones que componen el patrón son confiables éste será consistente y por lo tanto el quiebre debe atribuirse a una inconsistencia de la estación en estudio, A.

Es necesario ajustar los valores del período más lejano (1967-1973) para reducirlos a las condiciones de ubicación, exposición, etc. imperantes en el período más reciente (1974-1980). En el ejemplo de la fig. 2.4, el ajuste o corrección se realiza multiplicando cada precipitación del período 1967 a 1973 por la razón de las pendientes $\frac{m_2}{m_1}$:

$$pc = \frac{m_2}{m_1} \cdot p \quad \dots (2.11)$$

p ... precipitación observada
 pc .. precipitación corregida
 m2 .. pendiente del período más reciente
 m1 .. pendiente del período cuando se observó p.

La ecuación 2.11 corrige la precipitación registrada de manera que la curva doble másica se convierte en una sola recta.

Se ha partido de suponer que el patrón es consistente. Sin embargo, se recomienda verificar la consistencia de cada estación índice. Es to se hace dibujando una curva doble másica entre cada estación y el patrón formado por las restantes. Aquellas estaciones que resul ten inconsistentes deben ser removidas del patrón.

Al trazar la curva doble másica no se consideran los quiebres que no persisten por más de 5 años, ya que se considera que los quie - bres cortos se deben principalmente a la variabilidad inherente a los datos hidrológicos.

A veces un cambio pequeño en la ubicación del pluviómetro, de sólo unos cuantos metros, puede afectar su exposición y provocar incon - sistencias en el registro. Además, aunque el pluviómetro no cambie de ubicación su exposición puede verse afectada por el crecimiento de vegetación cercana, o por la construcción de edificios en los al rededores.

No se recomienda usar curvas doble másicas en regiones montañosas, porque las diferencias en los registros de estaciones cercanas pueden deberse a eventos meteorológicos diferentes.

2.3.3 Extensión del Registro

El tercer requisito para que un registro pluviométrico sea sometido a análisis probabilístico (apartado 2.3) es que sea de exten sión suficiente. No es posible precisar cuántos años debe tener un registro pluviométrico. Es evidente, sin embargo, que cuanta mayor extensión tenga es mejor. En la práctica se presentan esta ciones con muy pocos años, las mismas que pueden extenderse sólo unos cuantos años también.

Una primera forma de extender un registro de corta duración es me diante la recta de regresión (2.3.1). El registro x es más largo que el registro y; los valores extendidos son valores y'.

Una segunda forma es mediante la curva doble másica. Aquí el pa - trón es más extenso que la estación A (2.3.2).

Comentario.- En el trabajo de acondicionamiento de una cierta in formación pluviométrica, las correcciones se aplican en el siguien te orden:

- 1° Análisis de consistencia. Si hay datos faltantes se hace un relleno provisional aproximado con el método de los promedios.

2° Relleno de datos faltantes. Se emplea el método de la recta de regresión.

3° Extensión del registro. Con cualquiera de las dos formas indicadas.

2.4 Estudio de la Cuenca

Definición. Se define cuenca el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido.

Delimitación. La delimitación de una cuenca se hace sobre un plano a curvas de nivel, siguiendo las líneas del divortium acuorum o líneas de las altas cumbres. En la fig. 2.5 se ha delimitado la cuenca del río x correspondiente al punto P.

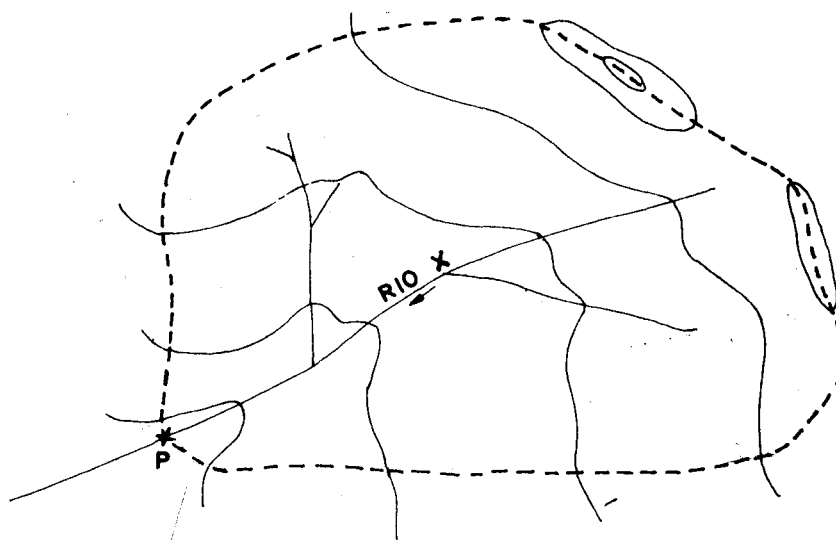


Fig. 2.5 CUENCA DEL PUNTO P

Con el fin de establecer grupos de cuencas hidrológicamente semejantes, se estudian una serie de características físicas en cada cuenca.

Superficie. Se refiere al área proyectada en un plano horizontal. Se determina con planímetro.

Topografía. Se describe a través de dos gráficos característicos:

Curva hipsométrica. Representa la relación entre la altitud en m.s.n.m. y la superficie que queda por encima de dicha altitud (fig. 2.6).

Polígono de frecuencia de altitudes. Es la representación gráfica de la distribución en porcentaje de las superficies ocupadas por diferentes escalones altitudinales (fig. 2.6).

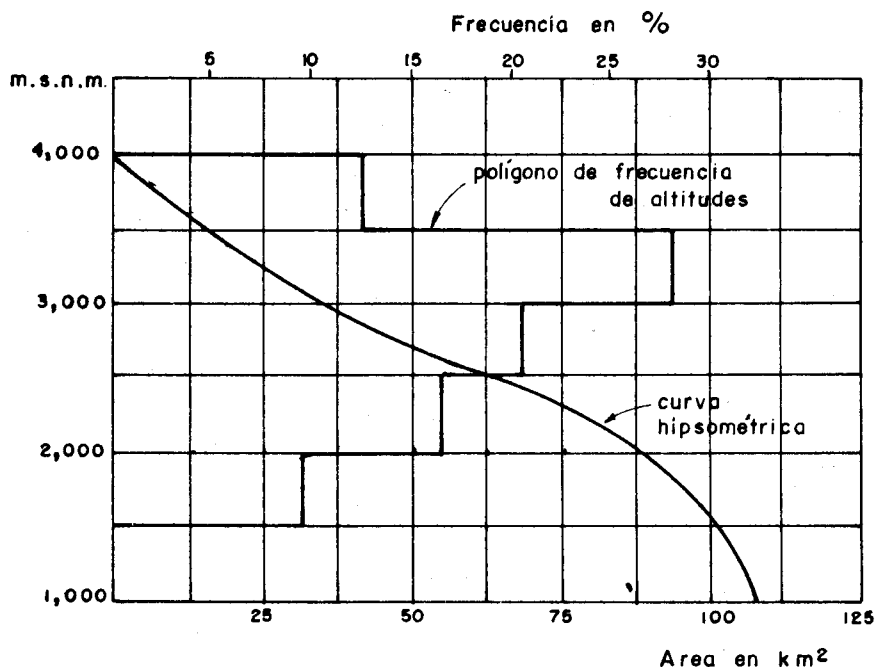


Fig. 2.6 CURVAS CARACTERISTICAS

Altitudes características. Se obtienen a partir de los gráficos anteriores.

Altitud media: es la ordenada media de la curva hipsométrica. ~~Divide a la cuenca en dos áreas iguales.~~ Se obtiene dividiendo el área debajo de la curva hipsométrica entre el área de la cuenca

Altitud más frecuente: es el escalón que alberga el mayor porcentaje de área.

Geología y suelos. Esta información es útil sobre todo para el estudio de las napas de agua subterránea y para la determinación de la escorrentía, porque la geología y el tipo de suelo son factores importantes de la infiltración.

Cobertura. Se refiere al tipo de cubierta vegetal. También es un factor importante para la determinación de la escorrentía.

Glaciología. Se refiere a la ubicación, en la cuenca, de los nevados. Estos nevados, cuando existen, aseguran un cierto caudal permanente en los ríos, aun en las épocas en que no llueve; actúan como reservorios.

Perfil. En muchos casos conviene dibujar en papel milimetrado el perfil longitudinal del curso principal, para tener una idea de las pendientes que tiene en los diferentes tramos. Esto es especialmente útil en el caso de los aprovechamientos hidroeléctricos.

Estaciones. Como ya se indicó con anterioridad (apartado 1.2), es obligación del Estado establecer estaciones de medición en todas las cuencas de relativa importancia. El objeto es disponer de registros de lluvias, caudales, radiación, temperatura, evaporación y otros.

2.5 Precipitación Media en la Cuenca

A partir de las lluvias medidas en los pluviómetros es posible calcular la precipitación media en la cuenca. Singularmente útil resulta la pre cipitación media anual, o módulo pluviométrico anual, en la cuenca.

Los pluviómetros deben ubicarse estratégicamente y en número suficiente para que la información resulte de buena calidad.

El problema entonces se refiere al cálculo de la lámina o altura de agua que cae en promedio durante 1 año en una cuenca. Existen para ello va- rios métodos disponibles, de los cuales los más usados son los tres que se describen a continuación.

Promedio aritmético.- Si p_1, p_2, \dots, p_n son las precipitaciones anuales observadas en diferentes puntos de la cuenca, entonces la preci- pitación anual media en la cuenca es:

$$p = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{n} \quad \dots (2.12)$$

Es el método más sencillo pero que sólo da buenos resultados cuando el nú- mero de pluviómetros es grande.

•Polígonos Thiessen.- El método consiste en (fig. 2.7):

1. Unir las estaciones formando triángulos;
2. Trazar las mediatrices de los lados de los triángulos formando políg_o nos. Cada polígono es el área de influencia de una estación;
3. Hallar las áreas a_1, a_2, \dots, a_n de los polígonos.
4. Si p_1, p_2, \dots, p_n son las correspondientes precipitaciones anua- les, entonces:

$$p = \frac{p_1 a_1 + p_2 a_2 + \dots + p_n a_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} \quad \dots (2.13)$$

es la precipitación anual media en la cuenca.

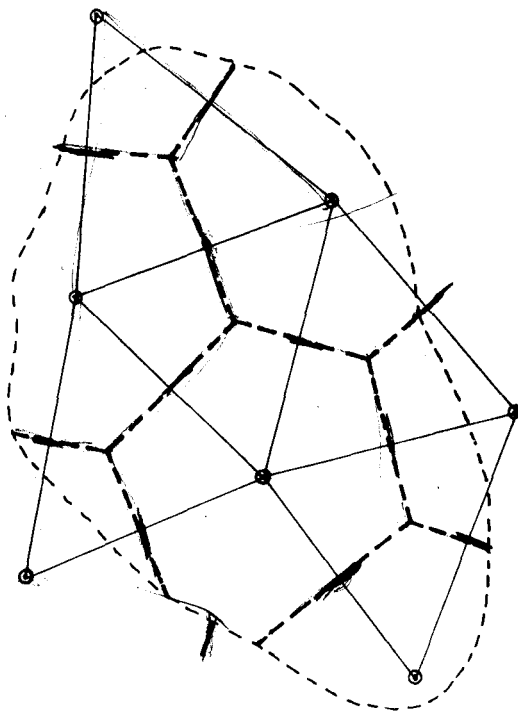


Fig.2.7 POLIGONOS THIESSEN

Curvas Isoyetas.- Se define isoyeta la línea de igual precipitación.

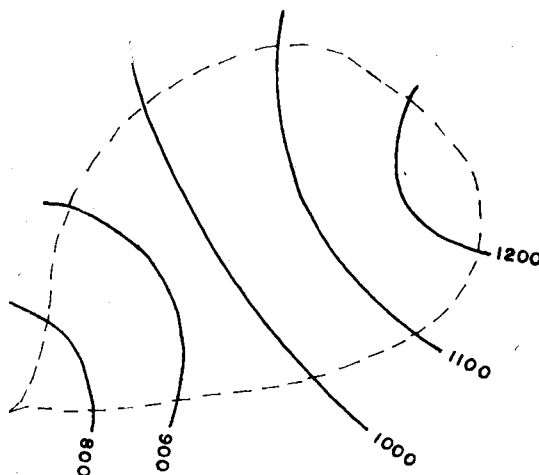
El método consiste en (fig. 2.8):

- 1° Trazar las isoyetas, interpolando entre las diversas estaciones , de modo similar a cómo se trazan las curvas de nivel;
- 2° Hallar las áreas a_1, a_2, \dots, a_n entre cada 2 isoyetas seguidas;
- 3° Si p_0, p_1, \dots, p_n son las precipitaciones anuales representadas por las isoyetas respectivas, entonces:

$$p = \frac{\frac{p_0 + p_1}{2} a_1 + \dots + \frac{p_{n-1} + p_n}{2} a_n}{a_1 + \dots + a_n} \dots (2.14)$$

es la precipitación anual media en la cuenca.

Fig.2.8 ISOYETAS



De los tres métodos, el más preciso es el de las isoyetas, porque en la construcción de las curvas isoyetas el ingeniero puede utilizar todo su conocimiento sobre los posibles efectos orográficos. Por ejemplo, si existen dos estaciones en un valle, una en cada ladera, no se puede su poner que la precipitación que cae durante una tormenta varíe linealmen te entre las dos estaciones.

Método de Thiessen mejorado.-

El método clásico de Thiessen se puede mejorar asignándole un peso a ca da estación, de modo que la precipitación media en toda la cuenca se evalúe en la forma simple:

$$P = \sum P_i \cdot p_i \quad (2.15)$$

P = precipitación media en la cuenca, en lámina de agua
 P_i = precipitación en cada estación
 p_i = el peso de cada estación

Para los polígonos Thiessen de una cuenca los pesos se determinan una so la vez, del modo que a continuación se indica.

- 1° Se dibujan los polígonos Thiessen y las curvas isoyetas al mismo tiempo (fig. 2.9)

2° Se halla la precipitación sobre cada polígono operando con las isoyetas.

$$h = \Sigma hm. \frac{a}{aT} \quad (2.16)$$

hm = precipitación media entre isoyetas

a = área comprendida entre isoyetas

aT = área del polígono

3° Se anota la relación de áreas de cada polígono (área del polígono entre área de la cuenca).

4° Se halla el peso de cada estación con la fórmula:

$$p_i = \frac{\text{precip. sobre el polígono}}{\text{precip. en la estación}} \times \text{relación de áreas} \quad (2.17)$$

Ejemplo 2.6

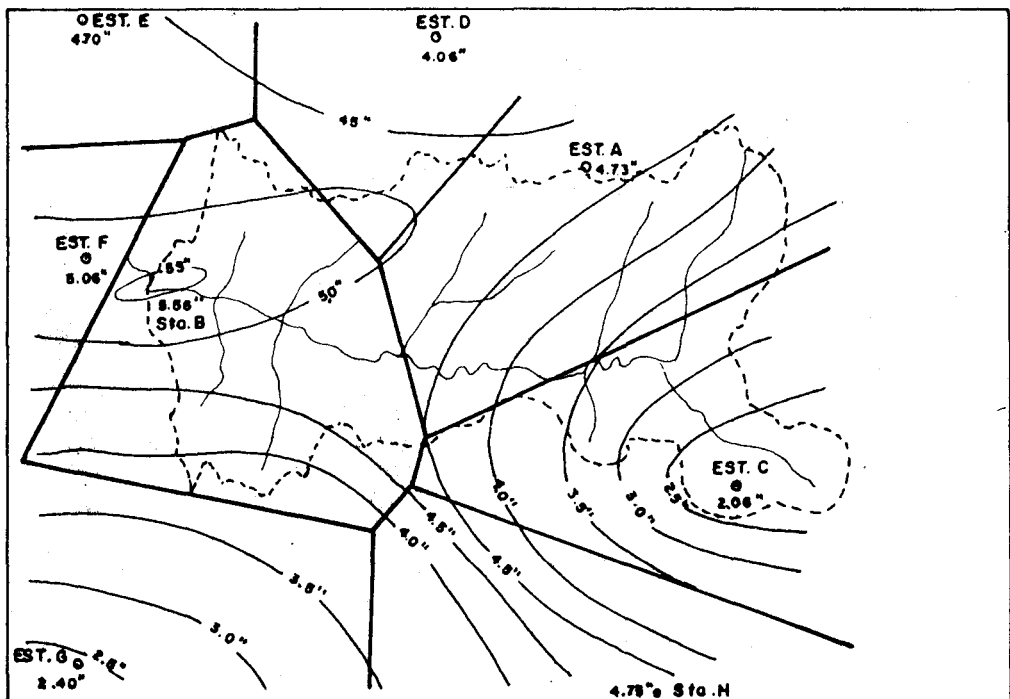


Fig. 2.9 POLIGONOS THIESSEN Y CURVAS ISOYETAS

Ver cálculo de los pesos en la tabla 2.2.

Precipitación media en la cuenca (con la fórmula 2.15).

$$P = 4.73 \times 0.35 + 5.56 \times 0.31 + 2.06 \times 0.29 + 4.06 \times 0.04 = 4.14 \text{ pg.}$$

De haberse procedido con el método ordinario de Thiessen:

$$P = 4.73 \times 0.389 + 5.56 \times 0.370 + 2.06 \times 0.211 + 4.06 \times 0.03 = 4.45 \text{ pg.}$$

TABLA 2.2 CALCULO DE LOS PESOS

Estación (1)	Precip. sobre el polígono Thiessen (2)	Relación de áreas (3)	Precip. en la estación (4)	Peso = $\frac{(2)}{(4)} \times (3)$
A	4.3	0.389	4.73	0.35
B	4.6	0.370	5.56	0.31
C	2.8	0.211	2.06	0.29
D	5.0	0.030	4.06	0.04

Para que el método modificado resulte práctico, las isoyetas y los polígonos se dibujan una sola vez, para la información de mayor confianza, a fin de obtener los pesos de las estaciones. De ahí en adelante, para evaluar la precipitación media en la cuenca sólo se requieren los datos de precipitación en las estaciones (fórmula 2.15).

El método de los polígonos Thiessen recién descrito, junto con el ejemplo numérico, están contenidos en la referencia 6, de donde han sido tomados con ciertos ajustes para su adaptación al presente texto.

6 Curva Masa de la Precipitación Media en la Cuenca

Ejemplo 2.7

La figura 2.9 muestra una cuenca y cuatro estaciones pluviométricas A, B, C y D, de las cuales sólo la A es registradora. Con las posiciones de estas cuatro estaciones se han dibujado los polígonos Thiessen y con los totales registrados de una cierta precipitación se han dibujado las curvas isoyetas.

En la fig. 2.3 se han dibujado las curvas masa de las precipitaciones en las cuatro estaciones.

Los pesos de las estaciones son, respectivamente, 0.35, 0.31, 0.29 y 0.04 (ejemplo 2.6).

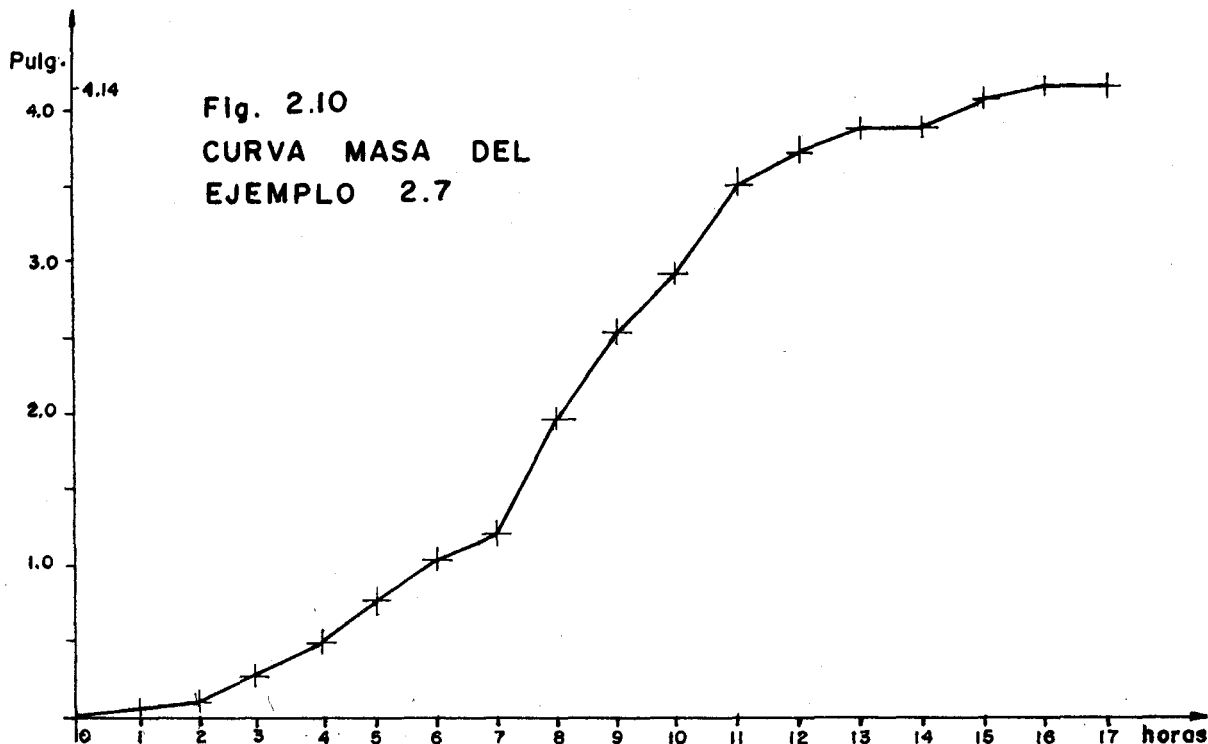
La idea es, a partir de esta información, dibujar la curva masa de la precipitación media en la cuenca.

El método consiste en calcular el promedio pesado de las precipitaciones horarias. Para ello se determinan los incrementos horarios de la precipitación, se multiplican por los pesos y se suman, como se muestra en la tabla 2.3.

TABLA 2.3 CURVA MASA DE LA PRECIPITACION MEDIA

t hrs	ESTACION A			ESTACION B			ESTACION C			ESTACION D			Σ (3)
	$\begin{matrix} p_{ly} \\ m \end{matrix}$ (1)	$\begin{matrix} \Delta p_{ly} \\ \Delta m \end{matrix}$ (2)	$\begin{matrix} .35 \times \\ \Delta m \end{matrix}$ (3)	m (1)	Δm (2)	$\begin{matrix} .31 \times \\ \Delta m \end{matrix}$ (3)	m (1)	Δm (2)	$\begin{matrix} .29 \times \\ \Delta m \end{matrix}$ (3)	m (1)	Δm (2)	$\begin{matrix} .04 \times \\ \Delta m \end{matrix}$ (3)	
0				0									
1				0.17	0.17	.053				0			.053
2	0			0.33	0.16	.050	0			0.15	0.15	.006	.056
3	0.20	0.20	.070	0.52	0.19	.059	0.09	0.09	.026	0.29	0.14	.006	.161
4	0.40	0.20	.070	0.80	0.28	.087	0.17	0.08	.023	0.52	0.23	.009	.189
5	0.73	0.33	.116	1.20	0.40	.124	0.32	0.15	.044	0.84	0.32	.013	.297
6	1.20	0.47	.164	1.41	0.21	.065	.52	0.20	.058	1.01	0.17	.007	.294
7	1.20	0	0	1.85	0.44	.136	.52	0	0	1.34	0.33	.013	.149
8	2.05	0.85	.298	2.91	1.06	.329	.89	0.37	.107	2.05	0.71	.028	.762
9	2.80	0.75	.262	3.49	0.58	.180	1.22	0.33	.096	2.47	0.42	.017	.555
10	3.15	0.35	.122	4.19	0.70	.217	1.37	0.15	.044	3.00	0.53	.021	.404
11	3.90	0.75	.262	4.79	0.60	.186	1.70	0.33	.096	3.40	0.40	.016	.560
12	4.20	0.30	.105	5.08	0.29	.090	1.83	0.13	.038	3.63	0.23	.009	.242
13	4.40	0.20	.070	5.18	0.10	.031	1.92	0.09	.026	3.73	0.10	.004	.131
14	4.40	0	0	5.18	0	0	1.92	0	0	3.83	0.10	.004	.004
15	4.59	0.19	.066	5.49	0.31	.096	2.00	0.08	.023	3.97	0.14	.006	.191
16	4.70	0.11	.038	5.56	0.07	.022	2.04	0.04	.012	4.04	0.07	.003	.075
17	4.73	0.03	.010	5.56	0	0	2.06	0.02	.006	4.06	0.02	.001	.017
Total													
	4.73	1.653		5.56	1.725		2.06	0.599		4.06	.163		

Los valores de la última columna son los promedios pesados de las precipitaciones horarias en la cuenca, valores con los que se puede dibujar la curva masa.



2.7 Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia

Se define tormenta el conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. Una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aun días y puede abarcar desde una zona pequeña hasta una extensa región.

De las tormentas interesa conocer las curvas intensidad - duración - frecuencia.

Intensidad. - Se mide en mm/h. y su valor varía durante la tormenta.

Duración. - Se mide en minutos o en horas. Es el tiempo transcurrido entre el comienzo y el fin de la tormenta.

Período de duración. - Es un concepto importante. Es un período de tiempo dentro de la duración de la tormenta. Se escogen períodos de duración tipos. Por ejemplo: 10 m., 30 m., 60 m., 120 m., 240 m. Lo que se busca, como veremos, son las intensidades máximas para estos períodos de duración.

Frecuencia. - Aclararemos este concepto mediante un ejemplo. Una tormenta de frecuencia 1/15 significa que es probable que se presente, como término medio, una vez cada 15 años. Los 15 años vienen a constituir el tiempo de retorno o período de retorno de dicha tormenta.

El análisis de tormentas tiene por objeto obtener aseveraciones como la de este otro ejemplo, más completo. "En el lugar tal, es probable que se presente una tormenta de intensidad máxima 48 mm/h., para un período de duración de 20 minutos, cada 15 años en promedio".

Si bien este asunto del análisis de tormentas ha podido posponerse para ser estudiado en el Capítulo 10, lo vamos a tratar aquí porque necesitamos el resultado del análisis de tormentas para una buena interpretación de la fórmula racional (Capítulo 7).

El análisis de tormentas se hace a través de siete etapas o pasos.

Paso 1.- Se parte de un pluviograma, es decir el registro de un pluviógrafo, como el de la fig. 2.2.

Paso 2.- Se hace la siguiente tabulación, a partir del pluviograma.

Hora	Intervalo de tiempo min.	Lluvia parcial mm.	Intensidad mm / h
11.00			
	60	0.5	0.5
12.00			
	50	8.5	10.2
12.50			
	70	10.0	8.6
14.00			
	140	4.5	1.9
16.20			

Hora. Se anotan las horas en que cambia la intensidad.

Intervalo de tiempo. Es el intervalo entre las horas de la primera columna.

Lluvia parcial. Es la lluvia caída en cada intervalo de tiempo. Se saca por diferencia.

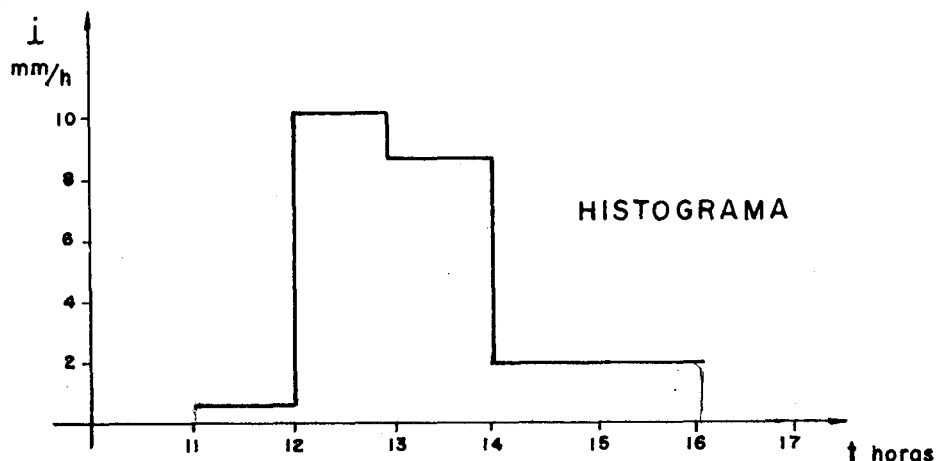
Intensidad. Es la precipitación referida a 1 hora, para cada intervalo de tiempo. Se obtiene mediante una regla de tres. Para el segundo intervalo, por ejemplo:

$$\frac{8.5}{50} = \frac{x}{60} \quad x = \frac{8.5 \times 60}{50} = 10.2 \text{ mm/h.}$$

Paso 3.- Se dibuja el gráfico intensidad - tiempo, que recibe el nombre de histograma.

El histograma permite apreciar más objetivamente cómo varía la intensidad durante la tormenta.

Paso 4.- Se calcula la intensidad máxima para diferentes períodos de duración. Fijemos 10 m., 30 m., 60 m., 120 m., 240 min



- a) Tomemos la intensidad máxima: 10.2 mm/h durante 50 min. Luego la intensidad máxima para períodos de duración de 10 m. y 30 m. es 10.2 mm/h.
- b) Para 60 min. faltan 10 min. Hay que buscar antes o después de los 50 min. la intensidad máxima inmediata inferior: 8.6 mm/h durante 70 min. Luego, la intensidad máxima para 60 min. será:

$$\frac{50}{60} \times 10.2 + \frac{10}{60} \times 8.6 = 9.9 \text{ mm/h.}$$

- c) Análogamente, para 120 min. :

$$\frac{50}{120} \times 10.2 + \frac{70}{120} \times 8.6 = 9.3 \text{ mm/h.}$$

- d) Para 240 min:

$$\frac{50}{240} \times 10.2 + \frac{70}{240} \times 8.6 + \frac{120}{240} \times 1.9 = 5.6 \text{ mm/h.}$$

Después del paso 4 se tiene la siguiente tabla:

Período de duración (min.)	10	30	60	120	240
Intensidad máxima (mm/h)	10.2	10.2	9.9	9.3	5.6

Falta ver cómo se determina la frecuencia.

Para esto, se procede a analizar todas las tormentas caídas en el lugar siguiendo el proceso ya indicado; es decir que para cada tormenta se ha lla la intensidad máxima en diferentes períodos de duración.

Paso 5.- Se tabulan los resultados en orden cronológico, tomando la intensidad mayor de cada año para cada período de duración.

Año	Período de duración (min.)				
	10	30	60	120	240
1950	102	81	64	42	18 21
1951	83	70	56	33	16
1952	76	61	42	29	19
1953	102 105	72 83	45 65	32 44	11 23
1954	61	58	36	28	14
.
.
.
.

Paso 6.- Procediendo por separado para cada período de duración, se colocan en orden decreciente, prescindiendo del año, los valores de la tabla última.

N° de orden m	Frecuencia $p = \frac{m}{n}$	Tiempo de retorno $T = \frac{1}{p}$	Período de duración (min.)				
			10	30	60	120	240
1	1/30	30	105	83	65	44	23
2	2/30	15	102 89	81 72	64 56	42 37	21 19
3	3/30	10	69 77	72 61	58 46	37 28	19 12
.
.
.
n=30							

Paso 7.- Se construyen las curvas intensidad-duración-frecuencia.

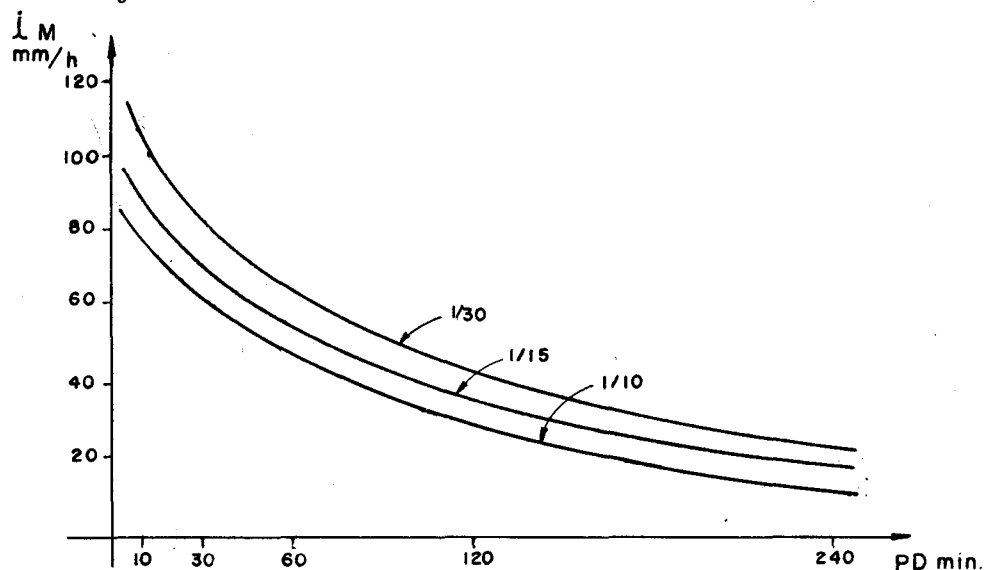


Fig. 2.II CURVAS INTENSIDAD - DURACION - FRECUENCIA

Se ilustra el uso de estas curvas con un par de ejemplos. En este lugar, es probable que se presente una tormenta de intensidad máxima igual a 72 mm/h. para un período de duración de 30 min., cada 15 años en término medio.

En este lugar, la intensidad máxima para un período de duración de 120 min. y período de retorno de 30 años es 44 mm/h.

A las tormentas de frecuencias 1/15, 1/10, 1/5, etc. se les llama "tormenta de los 15, 10, 5 años", etc., respectivamente.

La probabilidad de que un año cualquiera se presente una tormenta de magnitud igual o mayor que la magnitud de la tormenta de los 5 años, es: $1/5 = 0.20 = 20 \%$.

2.8 Problemas

Problema 2.1

En una cierta cuenca se han instalado pluviómetros en 4 estaciones A, B, C, D. Las altitudes de las 4 estaciones son parecidas.

La estación A está situada entre las estaciones B, C, D, a las distancias:

$$\begin{aligned} A - B &= 10 \text{ Km.} \\ A - C &= 5 \text{ Km.} \\ A - D &= 2 \text{ Km.} \end{aligned}$$

Durante un cierto día fueron registradas las siguientes lluvias:

$$\begin{aligned} B &: 50 \text{ mm.} \\ C &: 25 \text{ mm.} \\ D &: 2 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Hallar la altura de lluvia en A.

Problema 2.2

En una cierta cuenca se han instalado 4 pluviómetros totalizadores de lectura mensual. En un cierto mes del año falta una de las lecturas, mientras que las restantes son 37, 43 y 51. Si las precipitaciones medias anuales de estos 3 pluviómetros son 726, 752 y 840 mm., respectivamente, y del pluviómetro incompleto 694 mm., estimar la lectura faltante de precipitación mensual.

Problema 2.3

La fig. 2.12 representa el registro de un pluviógrafo durante una cierta tormenta.

Calcular las intensidades de lluvia durante períodos sucesivos de 1 hora y dibujar el histograma.

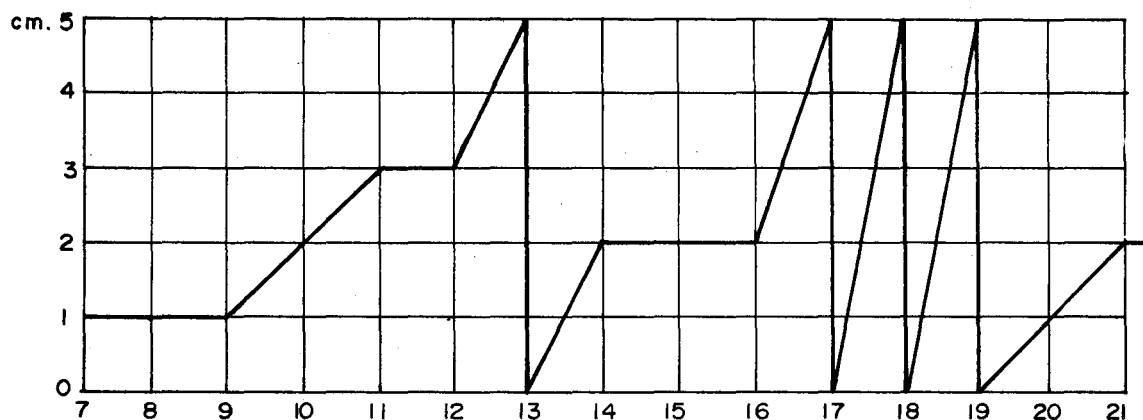
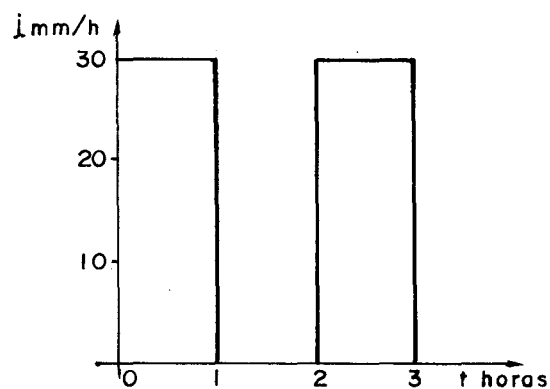
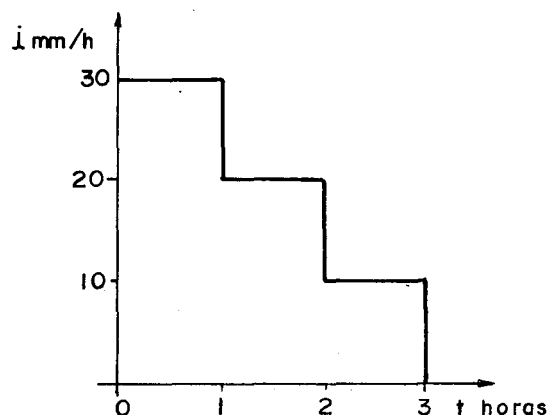


Fig. 2.12 PLUVIOGRAMA DEL EJEMPLO 2.3

Problema 2.4

Las dos figuras de abajo representan los histogramas de dos tormentas.



Dibujar la curva masa para cada tormenta, e indicar la intensidad media de la tormenta en cada caso.

Problema 2.5

La tabla 2.4 presenta las precipitaciones anuales de la estación X y las precipitaciones anuales medias de una estación patrón.

- Examinar la consistencia de la información de X.
- ¿Cuándo ocurrió un cambio en el régimen? Discutir las posibles causas.
- Ajustar la información y determinar la diferencia en la precipitación anual media de los 36 años en la estación X.

TABLA 2.4 DATOS DEL PROBLEMA 2.5

Año	x	Patrón	Año	x	Patrón
1972	188	264	1954	223	360
1971	185	228	1953	173	234
1970	310	386	1952	282	333
1969	295	297	1951	218	236
1968	208	284	1950	246	251
1967	287	350	1949	284	284
1966	183	236	1948	493	361
1965	304	371	1947	320	282
1964	228	234	1946	274	252
1963	216	290	1945	322	274
1962	224	282	1944	437	302
1961	203	246	1943	389	350
1960	284	264	1942	305	228
1959	295	332	1941	320	312
1958	206	231	1940	328	284
1957	269	234	1939	308	315
1956	241	231	1938	302	280
1955	284	312	1937	414	343

Problema 2.6

En una cuenca se han instalado 4 pluviómetros. En la figura 2.13 se presentan las precipitaciones medias anuales y las curvas isoyetas, con sus correspondientes porcentajes de área. Determinar la precipitación anual media por medio de los polígonos Thiessen y las curvas isoyetas.

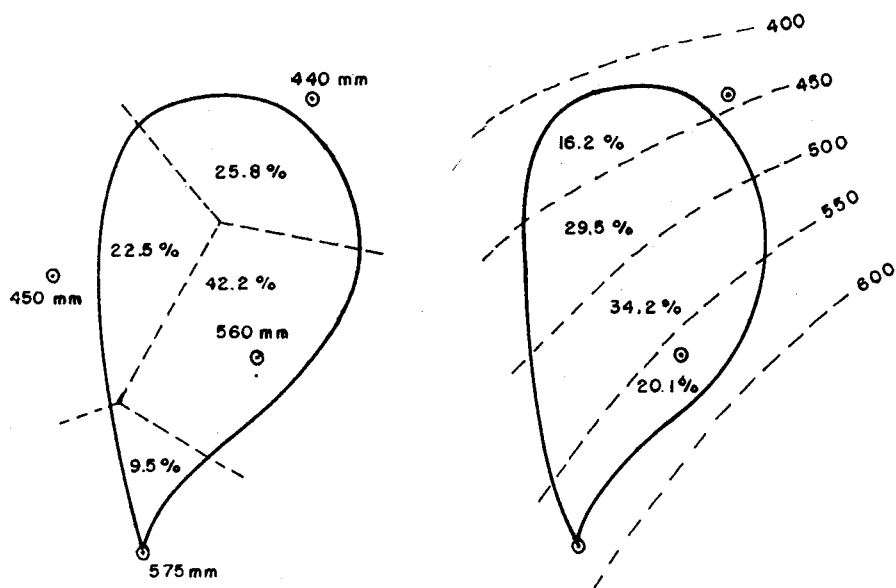


Fig. 2.13 DATOS DEL PROBLEMA 2.6

viene de la página 14

B. PERIODO DE OBSERVACION (1,400 - 1,600)

Durante el período conocido como del Renacimiento, se percibió un cambio gradual de los conceptos puramente filosóficos de hidrología hacia la ciencia observacional del presente. Por ejemplo, basado en observaciones, Leonardo Da Vinci y Bernardo Palissy acumularon un entendimiento correcto del ciclo hidrológico, especialmente la infiltración del agua de lluvia y el retorno del agua a través de los manantiales.

C. PERIODO DE MEDICION (1,600 - 1,700)

La moderna ciencia de la hidrología puede considerarse haber comenzado en el siglo XVII con las mediciones. Por ejemplo, Pierre Perrault midió la lluvia, la evaporación y la capilaridad en la cuenca de drenaje del Sena. Edmé Mariotte calculó las descargas del Sena en París; y Edmundo Halley midió la tasa de evaporación y la descarga de los ríos para el estudio del Mar Mediterráneo. A partir de estas mediciones, ellos fueron capaces de delinear conclusiones correctas de los fenómenos hidrológicos observados.

D. PERIODO DE EXPERIMENTACION (1,700 - 1,800)

Durante el siglo XVIII, florecieron los estudios experimentales de hidrología. Como resultado, se obtuvo mucho en el modo de conducir nuevos descubrimientos y la comprensión de los principios hidráulicos. Ejemplos notables son el piezómetro de Bernoulli, el tubo Pitot, el medidor Woltman, el tubo de Borda, el principio de D'Alembert, el teorema de Bernoulli y la fórmula de Chezy. Todos estos desarrollos han acelerado grandemente el comienzo de los estudios hidrológicos sobre una base cuantitativa.

sigue en la página 72