

Repartición Probabilística de Intensidad de Lluvias en el Valle de Cajamarca

José Miguel Manco Pisconti
SENAMHI-Cajamarca

Resumen

El presente estudio se desarrolló en la Dirección Regional SENAMHI - CAJAMARCA ciudad ubicada a una latitud de 07° 10' S; longitud 78° 30' W; con una temperatura media anual de 14° C.; una precipitación promedio anual de 620 m.m.; con tres períodos, uno lluvioso con 55% de la precipitación anual (Dic., Ene., Feb. y Mar.); un período intermedio de 36% de la precipitación anual (Abr., Set., Oct. y Nov.) y un período seco con 9% de la precipitación anual (May., Jun., Jul. y Agt.). En la metodología desarrollada, se empleó el Método de las Series Anuales y para la variable del período de retorno (T_e) el Método de Kimball. Para la comprobación se determinaron los coeficientes de correlación (r), determinándose que el ajuste de las series anuales de intensidad de lluvias, a una distribución exponencial es satisfactoria, verificados por los (r) determinados altamente significativos. Se analizaron los pluviogramas diarios de un período de registros de 17 años (1973-1989). Determinándose las siguientes intensidades para el valle de Cajamarca.

- a) La de cinco minutos (5') de duración; con un $r = 0.92$ ++
 - I = 88.3 mm./hora; para $T_e = 5$ años
 - I = 103.8 mm./hora; para $T_e = 10$ años
 - I = 124.4 mm./hora; para $T_e = 25$ años
 - I = 140.06 mm./hora; para $T_e = 50$ años
- b) La de diez minutos (10') de duración; con un $r = 0.86$ ++
 - I = 65.3 mm./hora; para $T_e = 5$ años
 - I = 74.2 mm./hora; para $T_e = 10$ años
 - I = 85.9 mm./hora; para $T_e = 15$ años
 - I = 94.8 mm./hora; para $T_e = 50$ años
- c) La de treinta minutos (30') de duración; con un $r = 0.92$ ++
 - I = 34.2 mm./hora; para $T_e = 5$ años
 - I = 38.8 mm./hora; para $T_e = 10$ años
 - I = 45.0 mm./hora; para $T_e = 25$ años
 - I = 49.6 mm./hora; para $T_e = 50$ años
- d) La de sesenta minutos (60') de duración; con un $r = 0.96$ ++
 - I = 20.5 mm./hora; para $T_e = 5$ años
 - I = 23.7 mm./hora; para $T_e = 10$ años
 - I = 27.8 mm./hora; para $T_e = 25$ años
 - I = 30.9 mm./hora; para $T_e = 50$ años

Introducción

A menudo es importante conocer, no solamente la altura de las precipitaciones correspondientes a un período bastante largo (un día por ejemplo), sino también la intensidad (o el caudal) de esas precipitaciones expresadas en m.m./hora o por minuto, en cada instante en el curso del aguacero o tormenta. Se utilizan a este efecto pluviógrafos cuya plumilla traza, sobre un diagrama (pluviograma), la curva de las alturas de las precipitaciones acumuladas en función del tiempo (o un gráfico que permite calcular éstas fácilmente).

El poder erosivo de las lluvias viene dado por una combinación de sus tres características : Intensidad, Cantidad y Frecuencia.

El análisis de las precipitaciones diarias y de las intensidades, caídas durante intervalos de tiempo del orden de media hora presenta para el Ingeniero un interés particular, para la dimensión de ciertas obras como alcantarillados urbanos, obras de desagüe urbanas o agrícolas; anchura, profundidad y pendientes de las zanjas de drenaje; el tamaño y abertura o claro de los puentes, cunetas de las pistas, etc. En esto el análisis de las intensidades máximas juega un papel preponderante.

El objetivo de este trabajo es suministrar información básica de intensidades máximas de las precipitaciones, su distribución en el valle de Cajamarca.

La naturaleza de la información existente, 17 años de información pluviográfica diaria, permite un trabajo bastante preciso y representativo para la zona de estudio, desarrollada por el personal de la Dirección Regional SENAMHI Cajamarca.

3 - Revision de la literatura

3.1. Importancia tecnica y practica del analisis de los aguaceros o tormentas

REMENIERAS (1971). No es económico diseñar ciertas obras hidráulicas como alcantarillas, sistemas de desagüe urbanos y agrícolas, zanjas de evacuación de aguas pluviales, etc, para la precipitación más intensa que pueda ocurrir en el curso de una duración indefinida. Por consideraciones que ponen en la balanza, de una parte, el costo de una sobre medida de las obras y, de otra, el de los estragos debidos a su insuficiencia durante un violento aguacero ocasional, se hacen esfuerzos por determinar el caudal óptimo para el cual conviene establecerlas. En definitiva no se busca una protección absoluta, sino una protección contra un "aguacero - tipo" de probabilidad determinada (es decir, que ocurren en promedio, una vez cada cinco años, 10 años, 25 años, etc)

FAO (1965), las gotas de lluvia son responsables de la mayor parte de la erosión en suelos de cultivo cuando estos no se encuentran protegidos.

REMENIERAS (1971), Una medida de lluvia no puede ser jamás "repetida" y raramente (y siempre aproximadamente) "duplicada".

En la mitad norte de Francia, una precipitación que sobrepasa 1 mm. por minuto es ya excepcional. (una precipitación de 1 mm./min. corresponde a un gasto de $1.60 = 0.0166 \text{ lit/s. por m}^2 \text{ ó } 16.6 \text{ m}^3/\text{seg. x km}^2$.

CHEREQUE (1989). Se define tormenta, al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. Una tormenta puede durar desde minutos hasta varias horas y aún días y puede abarcar desde una zona pequeña hasta una extensa región.

3.2. Analisis de frecuencia de lluvias

CHOW (1958), lo presenta como un método en el cual los datos hidrológicos son tratados como variables estadísticas; la distribución de la frecuencia de estos datos es examinada por una aproximación analítica y, se determina la magnitud de la variable para un intervalo de retorno dado. El intervalo de retorno es definido como, intervalo promedio del tiempo en el cual la magnitud de una variable dada es igualada o excedida.

CHEREQUE (1989).- El análisis de tormentas tiene por objeto obtener aseveraciones como por ejemplo: "En el lugar tal, es probable que se presente una tormenta de intensidad máxima de 48 m.m./h., para un periodo de duración de 20 minutos, cada 15 años en promedio.

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.

BARRY (1972).- En el estudio de frecuencia otro dato de gran utilidad lo constituye el período medio de tiempo dentro del cual se puede esperar que se produzca una sola lluvia de intensidad determinada, esto se conoce como intervalo de retorno o de recurrencia (Te). El período de retorno no significa que dichas lluvias tengan que producirse necesariamente en los años determinados (5,10, 25,... n, años) de un período largo, sino incluso pueden producirse en el primer año.

La determinación de la frecuencia así como del tiempo de retorno de una tormenta determinada, tiene enorme importancia para poder precisar con cierta exactitud la intensidad y la magnitud de la misma para poder asegurar de este modo un volumen total de agua o caudal necesario que se requiera para el diseño de una obra hidráulica. Dicha frecuencia, según BENITES (1982) se deduce del análisis estadístico y que para esto es necesario determinar el valor de la intensidad máxima para períodos de duración diferentes a la misma tormenta.

FERRE, et al (1978).- Recomendamos que al analizar la variabilidad de la lluvia y la estimación de probabilidades para su aplicación, en la agricultura, se debe tratar de saber con que frecuencia, el suelo recibirá determinada intensidad de lluvias, superior o inferior a ella.

Frecuentemente, los niveles de probabilidad derivan de las consideraciones económicas de acuerdo con las cuáles una estructura puede fracasar, o según LINSLEY (1977), la selección del nivel de probabilidad apropiada para el diseño, es decir, el riesgo que se considera aceptable, depende de las condiciones económicas y políticas.

3.3. Series anuales y series de duracion parcial

LANGBEIN (1949).- compendia los conceptos generales de ambos métodos y presenta una investigación de la relación entre ellos. Encontró que la relación del período de retorno de las series parciales al período de retorno de las series anuales, es ligeramente menor que la del de los valores teóricos; pero al graficar los puntos, estos son muy cercanos a las posiciones teóricas. La desviación se supone que es debido a la independencia y ocurrencia al azar de los eventos de acuerdo con la teoría de probabilidades.

MANCO (1980).- emplea la metodología de series de duración parcial para el valle de Cajamarca. Determina las siguientes intensidades.

La de 10 minutos de duración :

$I = 77.9 \text{ mm./hr. para } T_e = 10 \text{ años}$

$I = 88.9 \text{ mm./hr. para } T_e = 25 \text{ años}$

$I = 97.2 \text{ mm./hr. para } T_e = 50 \text{ años}$

La de 30 minutos de duración :

$I = 45.0 \text{ mm./hr. para } T_e = 10 \text{ años}$

$I = 52.2 \text{ mm./hr. para } T_e = 25 \text{ años}$

$I = 57.6 \text{ mm./hr. para } T_e = 50 \text{ años}$

La de 60 minutos de duración :

$I = 25.7 \text{ mm./hr. para } T_e = 10 \text{ años}$

$I = 29.6 \text{ mm./hr. para } T_e = 25 \text{ años}$

$I = 32.6 \text{ mm./hr. para } T_e = 50 \text{ años}$

3.4. Intervalo de repetición o período de retorno

LANGBEIN (1949), explica que existe una diferencia en el significado del período de retorno, entre los dos métodos de análisis de frecuencia de datos hidrológicos. En la serie anual, es el período promedio en el que un evento determinado ocurre como máximo anual; en cambio, en la serie parcial es el período promedio entre eventos de determinada magnitud, independiente del período de tiempo. Estas diferencias subsisten, aunque para eventos mayores ambos períodos de retorno tienden a ser numéricamente iguales.

Entre los métodos basados en consideraciones de probabilidades para calcular el período de retorno, destaca el método de KIMBALL o WEIBULL, tanto a datos de series anuales como series parciales; así mismo, proporcionan resultados aceptables concordantes con algunas de las últimas teorías y además de fácil uso.

La expresión del método de KIMBALL o WEIBULL, puede tomarse del libro de MOLINA (1975); o de otros y es la siguiente :

$$T_e = \frac{n + 1}{m}$$

Donde :

T_e : período de retorno en años.

n : número de años de registro.

m : número de orden del evento; siendo $m = 1$ para el mayor.

PAULET (1974).- Considera que el análisis de frecuencia se refiere al análisis de la distribución del número de ocurrencias de eventos de la misma magnitud, y el período de retorno establecido con el análisis de frecuencia indica sólo el intervalo promedio entre eventos de igual o mayor magnitud que un evento de magnitud dada o la probabilidad P que el evento no ocurra en cualquier año; sin embargo los T_e para un evento dado pueden ser substancialmente menores que el promedio, en consecuencia, si se desea seleccionar descarga de diseño que probablemente no ocurra durante la vida de la estructura, es necesario utilizar un intervalo de retorno mayor que la vida útil estimada de dicha estructura y que el diseño de cualquier obra con una vida útil larga, debe estar basada en probabilidades anuales.

Si el análisis de frecuencia busca eventos con probabilidades menores de 0.5 LINSLEY (1977), recomienda utilizar una Serie Anual de datos, o sea tomando el mayor evento de cada año.

Para analizar eventos con mayor frecuencia de ocurrencia son mejores las series parciales, los que constituyen tomando las intensidades por encima de algún valor base seleccionado, dicha base se escoge generalmente de tal manera que no se incluyan más de dos o tres veces eventos en cada año, por que las Series Parciales pueden indicar la probabilidad de eventos que son igualados o excedidos dos o tres veces por año.

3.5. Distribución de series anuales

Según LINSLEY (1977), debido a que la longitud de los registros es normalmente corto, no es posible determinar la distribución de frecuencias más apropiada para ser usada al analizar las probabilidades asociada con crecientes y precipitaciones que se ajustan con diversos grados de favorabilidad y no existe una distribución claramente superior, recomendándose el uso de las series anuales, distribución Log Pearson Tipo III y la primera distribución de GUMBEL. Esta última, PAULET (1974), señala que es la más usada para representar más razonablemente a los datos observados cuando se trabaja en la serie anual de máximas, además de proveer a la curva de intervalos de confiabilidad.

CHOW (1963).- Proporciona la siguiente expresión para la solución de la distribución de excedentes anuales:

$$Y = A + B \text{Log}_{10} T_e.$$

La cual dará una relación lineal de la variable Y , con el período de retorno de excedentes anuales T_e cuando se gráfica en un papel semi logarítmico, con T_e representado en la escala logarítmica.

La curva teórica es ajustada a los datos observados por el método de los cuadrados mínimos, como las ecuaciones derivadas por este método sólo pueden aplicarse a datos ploteados en coordenadas rectangulares, la función lineal del período de retorno sería empleada para la derivación de una línea recta teórica.

Según CHEREQUE (1989), afirma que para el análisis de frecuencias de máximas intensidades el método de GUMBEL se ajusta satisfactoriamente, siendo la ecuación de la forma :

$$Y = \bar{u} + \frac{1}{\bar{O}} W; \text{ además } \bar{u} = Y - YN \times \frac{\bar{O}N}{S}$$

Donde :

- W = Variable reducida
- Y = Es la media de la serie de datos
- YN = Valor medio esperado de la variable reducida. (según tablas).
- $\bar{O}N$ = Desviación Standard de la variable reducida (según tablas).

4.- Materiales y metodos

4.1. Descripción del area

La información empleada para el presente estudio, corresponde a la estación Meteorológica Agrícola Principal (MAP) . "Augusto Weberbauer", del convenio U.N.C. - SENAMHI, de la Dirección Regional Senamhi -Cajamarca. Se encuentra geográficamente ubicada a Lat. 07° 10' S y Long. 78° 30' W, a una altitud de 2536 m.s.n.m. en pleno valle de Cajamarca en la que destaca la climatología anual siguiente:

Temperatura máxima promedio anual	21.3°C
Temperatura mínima promedio anual	7.0°C
Temperatura media promedio anual	14.1°C
Precipitación promedio anual	620.0 lit/m ²
Humedad relativa promedio anual	72%
Insolación total mensual anual	180.7 horas sol
Radiación global mensual anual	466 langley/día
Evaporación promedio mensual anual	111.7 m.m.

Evapotranspiración potencial promedio mensual anual (Método de Hargreaves con MF)104.5 m.m.

Los pluviogramas analizados son diagramas diarios, del año 1973 al año 1989. El análisis consistió en considerar las coordenadas de la altura de lluvia y de tiempo, en todos los cambios de pendiente, de la línea dibujada por la pluma incriptora del pluviógrafo. Considerándose tormentas independiente cuándo deja de llover por un período mínimo de seis horas. Para el análisis de las intensidades se han considerado aquellas precipitaciones iguales o mayores a 5 m.m. de lluvia acumulada. Esto es así, porque como los pluviogramas son diarios permite este tipo de análisis, así mismo se tiene como principal objetivo el conocimiento de las magnitudes críticas que serán determinantes en los diseños del Ingeniero.

4.2. Analisis de las intensidades de las precipitaciones

Los análisis corresponden a la obtención para cada tormenta de las intensidades máximas de 5, 10, 30, 60, y 120 minutos de duración (ver anexo 1). Es decir primero se determina la cantidad de agua caída en la unidad de tiempo, ósea, la lluvia parcial a la que correspondería en el tiempo de una hora y esto constituye la intensidad para cada tiempo parcial. La intensidad es el valor máximo de la misma durante el período de su duración y se determinó mediante la expresión matemática que MANCO (1979), lo enuncia.

$$im = \frac{P}{t} \times 60$$

Donde :

im = Intensidad máxima en m.m./hora.

P = Precipitación parcial.

t = Tiempo parcial en minutos de la duración total de la tormenta.

En segundo término se ordenan en forma decreciente las intensidades analizadas, con sus respectivos tiempos parciales y estimándose a partir de ellas, las intensidades correspondientes a los tiempos de duración establecidos con las intensidades máximas de cada tormenta para las diversas duraciones, se hizo un análisis de su distribución probabilística referido al período de años de registro. ver cuadros del 1 al 5.

4.3 Analisis de frecuencia y tiempo de retorno (Te)

Para determinar la frecuencia, del cálculo de las intensidades máximas para diferentes tiempos de duración, se tomo de cada año de observaciones y de cada tiempo de duración la máxima intensidad en estricto orden cronológico e independiente de su fecha de ocurrencia obteniéndose tantos valores como número de años de observaciones. Luego, éstos valores se ordenan en forma decreciente, para cada duración y empleándose la metodología de Serie Anual para el tiempo de retorno (Te), según MOLINA propone.

$$Te = \frac{n + 1}{m}$$

Donde :

Te : Tiempo de retorno, expresado en años para un evento de frecuencia dada.

n : Número de años de observación.

m : Número del orden del evento, cuya frecuencia se desea.

4.4. Analisis probabilistico de series anuales de intensidad maxima de precipitacion

Las intensidades obtenidas para 5, 10 y 30 minutos son confiables por provenir de diagramas diarios.

El método de los mínimos cuadrados, empleado en el ajuste de los datos de intensidades de precipitaciones de series anuales, puede consultarse en SPIEGEL, o en otro libro de estadística; por otro lado el cálculo de las fuentes de variación y el coeficiente de correlación (r), se ha optado seguir lo señalado por CALZADA. A continuación de éste análisis, en base a las ecuaciones y ajustes de los datos o de los gráficos obtenidos se presenta la relación Intensidad - Duración, y para diferentes períodos de retorno (ver gráfico 1 y 2). El papel de probabilidades utilizado es el papel logarítmico.

4.5. Ajuste a una curva teorica

La curva teórica de los datos observados, es ajustada por el método de los mínimos cuadrados, como se describió anteriormente.

En los cuadros del 1 al 5 se muestran los cálculos necesarios para aplicar el método.

4.6. Extrapolacion de curvas de frecuencia

Se emplea como método de extrapolación, el extender la curva teórica de ajuste de los datos observados, y como límite práctico 4 veces el período de registro. La estación MAP - A. WEBERBAUER, tiene para este estudio 17 años de información, asumimos sea 50 años el período de retorno máximo satisfactorio de extrapolación.

4.7. Relación de intensidad - duración para diferentes periodos de retorno o intervalo de repetición

El mecanismo gráfico, consiste en tomar las intensidades de las tormentas para varias duraciones en una vertical correspondiente a un intervalo de repetición, ver gráfico 1; luego se traslada marcando las intensidades contra sus respectivas duraciones de la gráfica 2. Se han considerado intervalos de duración de 5, 10, 25 y 50 años. Puede utilizarse también un proceso analítico, reemplazando los valores de los intervalos de repetición elegidos en la ecuación de la curva de ajuste.

5.- Resultados

5.1 Intensidad de las lluvias

Las tormentas analizadas en el presente estudio, correspondiente a la estación MAP " A. WEBERBAUER" se sintetiza en el anexo I; el mismo que luego de un procesamiento, se pueden apreciar las intensidades máximas en m.m./h., para las diferentes duraciones consideradas (5, 10, 30, 60 y 120 minutos). Esta información determinada nos permite señalar que existe una relación inversa entre las intensidades y el tiempo de duración de la tormenta, así a mayor intervalo de duración de dicha tormenta la intensidad es menor y viceversa, coincidiendo con lo estipulado por REMENIERAS (1971) y por lo deducido por MANCO (1980).

5.2. Analisis de frecuencia y periodo de retorno

Del anexo 1 y de los cuadros del 1 al 5 observamos las frecuencias y los períodos de retorno determinado para las diferentes intensidades máximas, de donde se deduce el valor de la intensidad máxima y la frecuencia, la relación es inversa; mientras que la relación entre los valores de la intensidad y el tiempo de retorno es directa, en otras palabras, los eventos de mayor magnitud serán poco frecuentes y se presentarán en un tiempo promedio prolongado, mientras que, los eventos de menor magnitud serán mas frecuentes y se presentarán en un tiempo promedio más corto. Así por ejemplo observamos el anexo 1 que las intensidades máximas de los diferentes tiempos de duración correspondientes a la columna 2 tendrán una frecuencia de 11.1% y se presentarán cada 9 años en promedio, por otro lado, las intensidades máximas correspondientes a la columna 12, tendrán una frecuencia de 66.7% y se presentarán con un período de retorno de 1.5 años, con lo que se comprueba lo estipulado líneas arriba.

Las series anuales, al ser ajustadas por el método de los mínimos cuadrados, a una distribución exponencial, tiene coeficientes de correlación cercanos a 1, para los tiempos de (5,10, 30, 60 y 120 minutos) apreciar el valor de (r) en el anexo II. En consecuencia la bondad del ajuste obtenido es satisfactorio, para los fines que se persiguen, además los valores del (ANVA) y el F calculado al ser comparados con los de la tabla respectiva, muestran que en un 95 y 99% el período de retorno (Te) tiene efecto en la determinación de la intensidad máxima estimada y por otro lado, la relación establecida es altamente significativa, ver cuadro 6. En el gráfico 1 se aprecia la probabilidad de Series Anuales, es ejemplo satisfactorio de acuerdo a la Bibliografía confrontada.

Adicionalmente, tomando en cuenta para la planificación y diseño de las obras hidráulicas de cierta magnitud y costo, se han efectuado los cálculos de extrapolación de las intensidades máximas, ajustándose a la primera distribución de los valores extremos, llamada Distribución de GUMBELL Tipo I, estipulado por PAULET (1974) y CHEREQUE (1989). Los resultados del mismo se muestra en el cuadro 7, infiriendo que a medida que se produce el intervalo del tiempo de duración de la tormenta, la intensidad máxima expresada en m.m./h. se incrementa, es decir existe una relación inversa entre éstas 2 variables, aspecto que concuerda con lo estipulado por BENITES (1982). Así mismo podemos señalar que existe una relación directa entre la intensidad y el período de retorno, encontrándose mayor intensidad a mayor tiempo de retorno para los mismos intervalos de duración y menor intensidad a menor tiempo de retorno.

5.3. Relación intensidad - duración - frecuencia

La familia de curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia, (gráficos 1 y 2) son en realidad otro ejemplo de las curvas de probabilidad, teniendo mayor uso en los trabajos de Ingeniería; por lo tanto su forma se debe como corolario a las causas que influyen en las curvas de probabilidades. Estas curvas se construyeron para 5, 10, 30, 60 y 120 minutos de duración y períodos de retorno de 5, 10, 25, y 50 años, considerando además los valores de intensidades máximas obtenidas mediante la extrapolación infiriendo que la intensidad máxima con 10 años de período de retorno, será sensiblemente menor que aquella que se presenta con un período de retorno de 25 años, y esta a su vez será menor que la que se presenta en 50 años, etc.

Lo estipulado se comprueba en el gráfico 1, en el cual apreciamos que la intensidad máxima para una duración de 30 minutos y período de retorno de 10 años es de 38.8 m.m./hora, en cambio, para el mismo tiempo de duración y

para un período de retorno de 25 años es de 45.0 m.m./hora como se puede deducir, la intensidad máxima que se presenta con un período de retorno de 10 años es menor que la que se presenta en un tiempo de retorno de 25 años. Por lo que al realizar una obra, hay que tener presente la intensidad máxima a seleccionar en función (años seleccionados).

Lo beneficioso de las familias de curva antes señaladas, como lo indica REMENIERAS (1974), es nada menos que para determinar la magnitud de la descarga del diseño y la intensidad máxima de precipitación en función al período de retorno y frecuencia; cuyos valores serán válidos solo para diseñar tal o cual estructura hidráulica de un determinado lugar o para lugares cercanos a ella debido a que las intensidades varían de una zona a otra, también de acuerdo a su altitud y topografía, etc.

Además también tiene mucha importancia en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, sobre todo las intensidades máximas para períodos de 5 minutos, que son los valores más deseables, ya que las más altas intensidades, ocurren en períodos cortos; por ello el presente estudio es una contribución para los especialistas en Ingeniería y los Edafólogos y conservacionistas de nuestros suelos andinos, principalmente.