



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.- GENERALIDADES

Como sabemos el agua es un recurso fundamental para la vida y un factor esencial para el sector productivo, por lo que, el estudio de las precipitaciones en una región, tiene especial importancia debido al predominio de las actividades relacionadas con el aprovechamiento de los recursos hídricos. A través de esto, es posible obtener una información valiosa para la gestión del agua, en términos de los usos agrícolas, forestales, energéticos y de uso doméstico, etc.

Para esto, es necesario conocer las intensidades de precipitación, para distintos períodos de retorno. La precipitación, como variable de estado hidrológica, se puede caracterizar a través de la intensidad, su distribución en el espacio y en el tiempo, y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia, y para poder caracterizarla es necesario un gran número de observaciones, extraídas de series pluviométricas y pluviográficas, con el objeto de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior.

La utilización de metodologías actualizadas, durante el diseño de las obras de tipo hidráulico es de vital importancia debido a las drásticas variaciones climatológicas en todo el mundo.

En general, tales métodos asumen relaciones empíricas de manera que es posible estimar la precipitación de una determinada duración con otra de duración diferente, mediante el análisis de datos históricos y el uso de funciones de distribución de probabilidades para estimar los eventos extremos.

Ahora bien, la disponibilidad de datos de caudal es imprescindible para el diseño y



planificación de actividades físicas. Pero, muchas veces no se disponen de registros de caudales, o éstos no tienen la suficiente duración como para hacer los análisis de frecuencia requeridos; debe entonces usarse la información pluviométrica para estimar crecidas de cierta frecuencia. Es, por lo tanto, muchas veces necesario presentar la información pluviométrica correspondiente a una tormenta o lluvia en formas de intensidades, a partir de los registros de las estaciones pluviográficas si hubiera en el estudio.

Por ende, esta investigación pretende analizar el diseño y construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia; (IDF), y actualización de ecuaciones IDF para las distintas ciudades del departamento de Tarija, para lo cual se necesitará conocer el comportamiento de las precipitaciones en función de la duración y la frecuencia, en estaciones pluviométricas aledañas a las ciudades en estudio y cuya única finalidad será la de aportar patrones de conductas de las lluvias, en función a un mapa de intensidades para el departamento de tal manera que permitan diseños confiables y efectivos para la ingeniería hidráulica, además proponer la disposición ecuaciones Intensidad – Duración - Frecuencia para que sean una herramienta de análisis por ejemplo para la estimación de caudales máximos.

Ahora bien una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los gastos resultantes a través de éste se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escurrimiento y tránsito de gastos.

También dicho de otra forma una tormenta de diseño puede definirse mediante una altura de precipitación en un punto, mediante un histograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación. Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de



precipitación en el método racional para determinar los gastos pico en alcantarillados de aguas de lluvia y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de histogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escorrimento en embalses de detención de aguas urbanas o el diseño de vertedores en proyectos que involucran grandes embalses.

En muchos métodos de diseño de obras hidráulicas se precisan conocer las características de la lámina de agua que va a pasar por la obra bajo condiciones probables de manejo. Por otro lado, pocas veces se disponen de datos relativos al comportamiento del agua en la región de interés.

“Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia” se especifican las concepciones teóricas y de ajuste de las expresiones matemáticas que relacionan los valores de la intensidad de la lluvia con su tiempo de duración y su periodo de retorno.

La precipitación, como variable de estado hidrológica, se puede caracterizar a través de la intensidad, su distribución en el espacio y en el tiempo, y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia, y para poder caracterizarla es necesario un gran número de observaciones, extraídas de series pluviométricas y si hubiera las series pluviográficas, con el objeto de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior. Ahora bien, la disponibilidad de datos de caudal es imprescindible para el diseño y planificación de actividades físicas.

Pero, muchas veces no se disponen de registros de caudales, o éstos no tienen la suficiente duración como para hacer los análisis de frecuencia requeridos; debe entonces usarse la información pluviométrica para estimar crecidas de cierta frecuencia. Es, por lo tanto, muchas veces necesario presentar la información pluviométrica correspondiente a una tormenta o lluvia en formas de intensidades, a partir de los registros de las estaciones pluviométricas en estudio.



Fig. 1.1 Rotura del Puente en Medellín-Colombia

Fuente: Periódico El Deber de Santa Cruz 26/3/2004



Fig. 1.2 Inundación Urbana en Concepción-Chile

Fuente: Periódico El Clarín de Buenos Aires 17/9/2006

1.2.- MOTIVO DE REALIZACIÓN DEL PROYECTO

El motivo principal radica que en nuestro medio no se cuenta con datos de caudales aforados en cantidad y calidad deseable para la realización de proyectos, para esto se debe recurrir a métodos indirectos; estos métodos requieren de intensidades de lluvia asociados a una probabilidad de ocurrencia (tormenta de diseño) que se pueden determinar a partir de mediciones de precipitaciones.

Por tal motivo se busca determinar un parámetro importante que es la intensidad de la lluvia por medio de modelos matemáticos que relacionan la Intensidad, la Duración y la Frecuencia.

Y con las ecuaciones estimadas, se dejará al buen criterio del diseñador el empleo de las mismas en la búsqueda de parámetros de diseño, como es el caudal, que es básico para dimensionar las estructuras encargadas de transportar y retener el recurso agua, de tal forma prevenir efectos indeseables.

Es de suma importancia tener una ecuación Intensidad – Duración – Frecuencia para todas las ciudades del departamento de Tarija porque así podremos determinar el caudal de diseño con lluvias de la propia zona lo que representa una mayor confiabilidad de los datos obtenidos.



También es importante saber la intensidad máxima para diferentes periodos de retorno porque así podremos estimar la crecida mediante ecuaciones matemáticas como ser: La fórmula racional “ $Q=C*I*A$ ” y otras ecuaciones, y con este dato fundamental se podrá proteger las obras civiles y a la vez proteger vidas humanas.

Es así que se estimará ecuaciones Intensidad – Duración – Frecuencia para las ciudades y poblaciones más importantes del Departamento de Tarija como ser: Yacuiba, Entre Ríos, Bermejo, San Lorenzo, Villa montes, Carapari, Padcaya, Iscayachi, El Puente, Valle Concepción y la ciudad de Tarija.

1.3.- INFORMACIÓN SOBRE LA SITUACIÓN ACTUAL

1.3.1.- DEPARTAMENTO DE TARIJA



Fig. 1.3 Mapa de ubicación de los principales ríos del Departamento de Tarija

Fuente: Editorial Producciones CIMA



Fig. 1.4 Mapa Orográfico e Hidrográfico del Departamento de Tarija

Fuente: Editorial Producciones CIMA

El Departamento de Tarija es un departamento de Bolivia situado en el sureste del país. Limita al oeste con el Departamento de Potosí, al norte con el departamento de Chuquisaca, al este con Paraguay y al sur con Argentina. Tiene un área de 37623 km² y una población aproximada de 551909 habitantes.

1.3.1.1.- HIDROGRAFÍA DE TARIJA

Los ríos del departamento de Tarija cruzan o nacen en las serranía altas de la región occidental o en las sierras subandinas o por los llanos chaqueños. Hidrográficamente Tarija es tributaria de la Cuenca de la Plata, mediante los ríos Pilcomayo y Bermejo.

Subcuenca del Río Pilcomayo.- La subcuenca del río Pilcomayo tiene sus fuentes en las provincias del departamento de Oruro, cruzan Chuquisaca y parte de Potosí recibiendo numerosos afluentes. En el departamento de Tarija capta las aguas del río Pilaya, este río, a continuación del Cambilaya ha venido marcando el límite con Chuquisaca en su mitad



noroccidental. El Límite oeste con Potosí y Chuquisaca es definido por el río San Juan del Oro que corre con dirección al norte, en este trayecto receptiona las aguas del río Hondo que desciende de la serranía de Tajsara; posteriormente en el límite noroccidental se une con el Camblaya para seguir de oeste a este; en su curso admite el cauce de los ríos Palchu formado por la serranía de Chismuri; y más al este al río Huacata; ya como río Pilaya continúa con la misma dirección, acogiendo el cauce de los ríos Temporal – San Pedro, Pajonal, Cajas que llegan de las serranías de Camoneda y Cóndor, al llegar al meridiano $64^{\circ}00'$; confluye con el Pilcomayo que viene de Chuquisaca y se adentra luego en Tarija, cruzando toda su mitad oriental, hasta el punto tripartito de Argentina, Paraguay y Bolivia; atraviesa las últimas estribaciones de la cordillera, las sierras Subandinas, para salir al llano de Villamontes de ahí, sigue hasta la frontera con Paraguay. El río Pilcomayo en la primera parte de su recorrido, en Tarija, recibe al río Salado y aguas abajo del río Suaruro que viene de las faldas septentrionales de la serranía del mismo nombre; por la orilla norte aportan a su cauce los ríos Caipipendi que también lleva el nombre de la serranía de la que proviene; el río Camatindi que se origina en la serranía de Caipirenda, finalmente el Machareti constituye otro río de llanura que se une al Pilcomayo, que continúa en curso sin recibir afluentes de mayor importancia. En las proximidades de Villamontes el río Pilcomayo tiene una profundidad de 6.6 metros y un ancho de 150 metros.

Subcuenca del Río Bermejo.- El río Bermejo delimita el extremo sur de la frontera con la República de la Argentina. Recibe el mayor número de afluentes y subafluentes del departamento, entre los que destacamos: El río Santa Rosa que corre por el Valle Sur de la serranía del Candado, al juntarse con el Orosas y el Emborozu, toma el nombre de río Bermejo, al que hecha sus aguas el río Salado. El río Grande de Tarija con sus nacientes cerca de la ciudad de Tarija como río Guadalquivir, va captando los cauces de los ríos Camacho, por el sur ; Tolomosa por el Oeste; Santa Ana-Yesera y San Agustín por el norte, con este caudal ya lleva el nombre de río Tarija, hasta confluir con el Salinas, que viene de captar los ríos Lacajes y Nogal; luego toma las aguas del Pampa Grande y Chuquisaca para llamarse río Grande de Tarija al que aporta el San Telmo y finalmente en las juntas de San Antonio confluye con el río Bermejo.

1.3.2.- PROVINCIA DE CERCADO

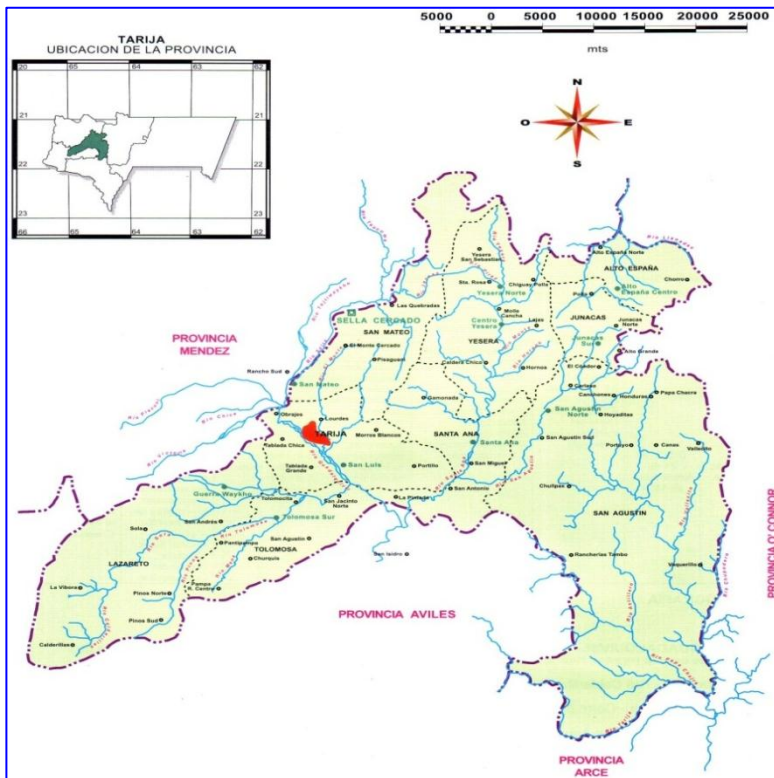


Fig. 1.5 Mapa Hidrográfico
de la Provincia Cercado
Fuente: Producciones editorial CIMA

Cercado es una de las 6 provincias en que se divide el departamento de Tarija, Bolivia. Está ubicada en el centro-oeste del departamento. Limita al noroeste con Méndez, al este con Burdet O'Connor, al sur con Arce y al suroeste con Avilés. Su capital es Tarija, que también lo es de todo el departamento.

Provincia creada por decreto supremo el 6 de julio de 1843. Con capital provincial Sella Cercado y con capital departamental la ciudad de Tarija.

1.3.2.1.- HIDROGRAFÍA (RÍOS)

Río Guadalquivir.- Cruza por la ciudad de Tarija beneficiándola con sus aguas en unos de sus afluentes esta la represa hidroeléctrica de San Jacinto.

Afluentes.- Son el río Calderillas, río Sola, río Pinos, río Tolomosa, río Mena, río El Monte.

Río Santa Ana.- Corre por la parte central de la provincia.

Afluentes.- Son el San Agustín, río del Horno, río Montes, río Pirai, río Yesera.

Río Sella.- Es un afluente del río Guadalquivir, su tributario es el río Jarcas, que bordea el noroeste de la provincia.

Río Llanadas.- Bordea el extremo noreste.

Río Chupadero.- Bordea el suroeste, sus afluentes son el río Vallecito, río Artillero, río Papa Chajra, el río Tarija.

1.3.3.- PROVINCIA GRAN CHACO

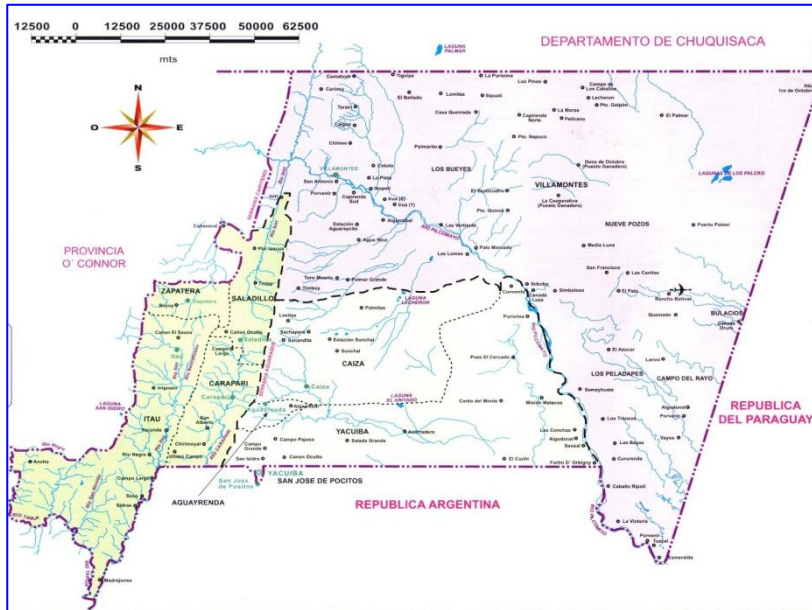


Fig. 1.6 Mapa Hidrográfico de la Provincia Gran Chaco
Fuente: Producciones editorial CIMA

Provincia del departamento de Tarija en Bolivia, que se encuentra la zona geográfica llamada Gran Chaco, es la mayor provincia de Tarija con una superficie de 17.428 km². Su capital es la ciudad de Yacuiba, cerca de la frontera con la Argentina. En esta provincia se hallan las mayores reservas de gas natural de toda Bolivia y las segundas en Sudamérica después de Venezuela. Creada por decreto supremo el 12 de agosto de 1876.

1.3.3.1.- HIDROGRAFÍA (RÍOS)

El perfil hidrográfico definido por el río principal Pilcomayo y sus afluentes, el río Tarija, que son los mayores que surcan el territorio, proveen de agua para riego y recursos piscícolas a la población.

Río Pilcomayo.- Corre de noroeste a sureste por el centro de la provincia.

Afluentes.- río Palos Blancos, río Isiri, río Caipipendi, río Huacaya.

Río Tarija.- río Negro, río Itau, río Ñancahuasu, río Carapari.

Lagunas.- La laguna El Grito, laguna de los Palcko entre otros.

1.3.4.- PROVINCIA AVILÉS

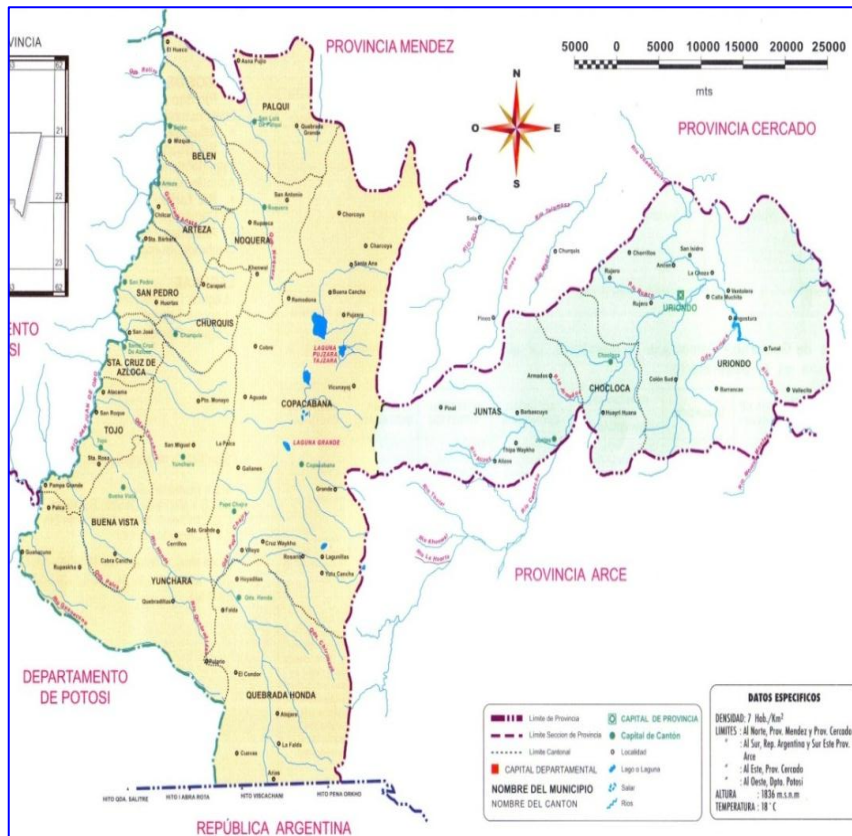


Fig. 1.7 Mapa Hidrográfico de la Provincia Avilés

Fuente: Editorial Producciones CIMA

José María Avilés es una provincia del departamento de Tarija, en Bolivia, y cuenta con una población de 17.504 habitantes (2001). Creado mediante ley el 5 de diciembre de 1901, con capital Uriondo.

1.3.4.1.- HIDROGRAFÍA

Ríos de la Cuenca de la Plata son:

Ríos San Juan del Oro.- Bordea el oeste de la provincia siendo límite natural con el departamento de Potosí.

Afluentes.- Río Honda, río Quebradillas.

Río Guanacuno.- Bordea la parte, suroeste limitando con departamento de Potosí. Además de varias quebradas.

Río Tarija.- Nace de la convergencia del río Guadalquivir y el río Camacho.

Afluentes.- Río Rujero, río Armados, río Alizos, río Camacho, quebrada Suriaca, río Montes.

Lagunas.- La laguna Pujzara ubicada en Copacabana, la laguna Tajzara, la Laguna Grande.

1.3.5.- PROVINCIA BURNET O'CONNOR

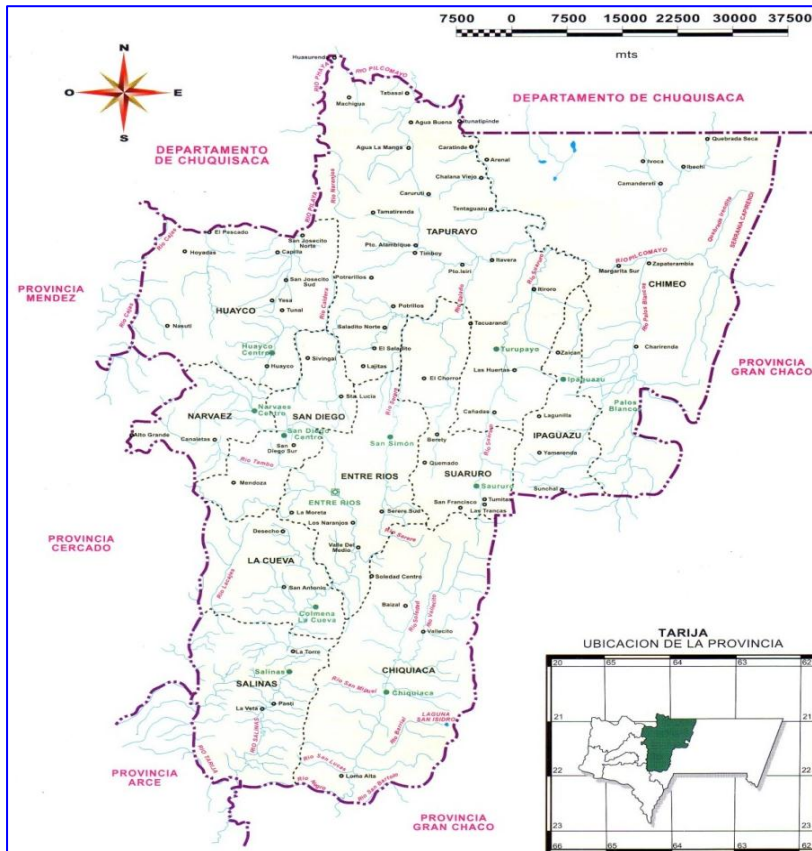


Fig. 1.8 Mapa Hidrográfico
De la Provincia
Burnet O'Connor
Fuente: Producciones editorial CIMA

La provincia Burnet – O’Oconnor fue creada mediante ley el 3 de diciembre de 1906. Su capital es la ciudad de Entre Ríos.

1.3.5.1.- HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DE LA PLATA

Los ríos principales en esta provincia son:

Río Tarija.- Corre de norte a sur bordea la provincia sirve de límite natural con la provincia Arce.

Afluentes.- Río Salinas, río Lacajes, río Tambo.

Río Negro es un río principal.

Afluentes.- Río San Lucas, río Barrial, río San Miguel, río Soledad, río Vallecito.

Río Pilcomayo.- Corre de oeste a este en la provincia, sirve para la pesca y el riego.

Afluentes.- Río Palos Blancos, río Suaruro, río Salado, río Serere, río Caldera.

Río Cajas.- Bordea el límite oeste con la provincia Méndez.

Río Pilaya.- Bordea el noroeste prolongándose al norte, después de recibir las aguas del río

Naranjos para juntarse al río Pilcomayo.

Laguna.- La principal es la laguna de San Isidro.

1.3.6.- PROVINCIA ARCE

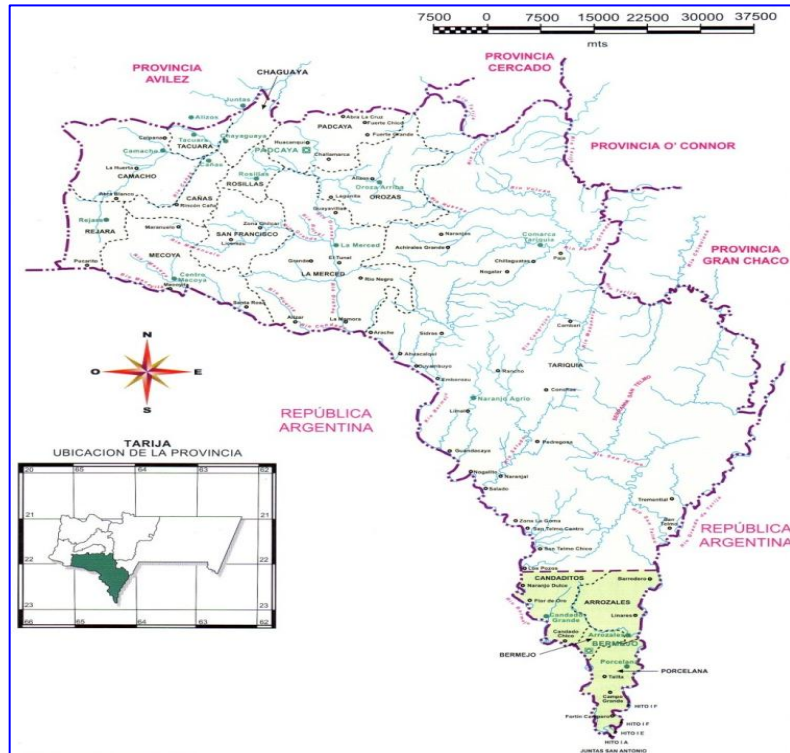


Fig. 1.9 Mapa Hidrográfico de la Provincia Arce

Fuente: Producciones editorial CIMA

La Provincia de Aniceto Arce es una de las 6 provincias del Departamento de Tarija, al sur de Bolivia. Cuenta con una población de 58.702 habitantes (según el Censo INE 2006), y comprende una superficie de 5.205 km². La capital provincial es la ciudad de Padcaya en el municipio homónimo. Creada por ley el 8 de noviembre del 1894.

1.3.6.1- HIDROGRAFÍA (RÍOS)

El perfil hidrográfico definido por dos ríos principales, el río de Bermejo y el río Grande de Tarija, con sus pequeños ríos afluentes, forman parte de la cuenca del río de la Plata (Argentina)

Río Bermejo.- Corre de norte a sur sirviendo de límite con la República Argentina y de vía de comunicación.

Afluentes.- El río Salado, río Orossas, río condado, río Baizal, río Grande, río Mecoya, río Mecoyita, río Cañas, río Maranelo, río Huerta.

Río Grande de Tarija.- Corre de norte a sur, sirve de límite con la República de la Argentina por el sur este converge con el río Bermejo. En las juntas de San Antonio.

Afluente.- Río Santelmo.

Un río principal también es el río Tarija

Afluente.- Río Volcán, río Pampa Grande, río Lorayo, río Huacas, río Cangrejos, río Mañanera.

1.3.7.- PROVINCIA MENDEZ

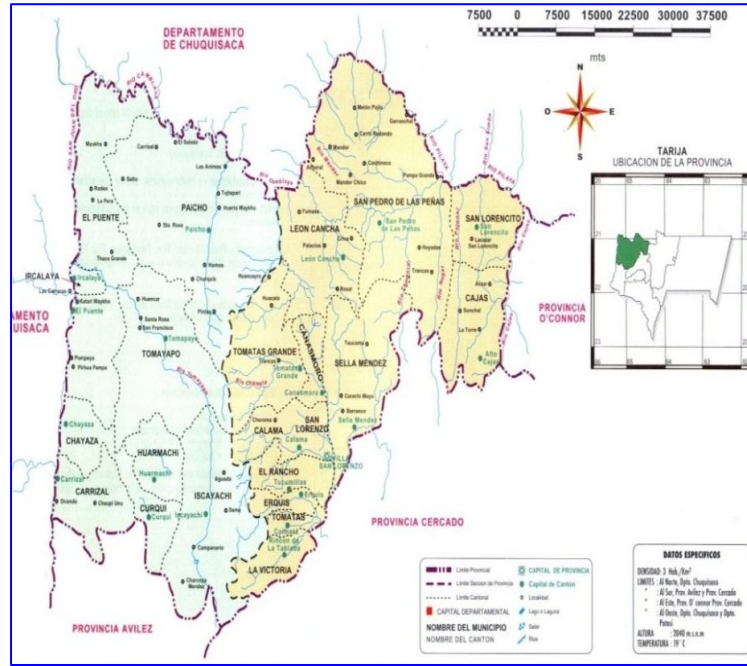


Fig. 1.10 Mapa Hidrográfico

De la Provincia Méndez

Fuente: Producciones editorial CIMA

Eustaquio Méndez (antes San Lorenzo) es una provincia del departamento de Tarija, en Bolivia, y cuenta con una población de 32.038 habitantes (2006). Fue creada por ley el 19 de octubre de 1880; su nombre se debe al valiente guerrillero Eustaquio Méndez héroe de la independencia vencedor en la batalla de la Tablada el 15 de abril de 1817. Su capital de esta provincia es la villa de San Lorenzo.

1.3.7.1.- HIDROGRAFÍA (RÍOS)

Los ríos de esta provincia integran la red de la cuenca de la Plata.

Río San Juan del Oro.- Límite natural con el departamento de Chuquisaca por el oeste.

Afluente.- Río Tomayapo

Río Camblaya.- Límite Natural con el departamento de Chuquisaca, por el norte.

Río Pilaya.- Límite natural con el departamento de Chuquisaca por el noreste.

Afluentes.- Río Mandor, río Temporal, río Nogal, río Pajonal, río Cajas, este último bordea el este, siendo límite natural con la provincia O'Connor.

Río Chamata.- Corre por San Lorenzo, siendo afluente del río Guadalquivir que nace en esta sección.



1.4.- OBJETIVOS

1.4.1.- OBJETIVO GENERAL

- Determinar los coeficientes de las ecuaciones Intensidad - Duración - Frecuencia para las principales ciudades y poblaciones del departamento de Tarija con el fin de estimar un parámetro fundamental en el diseño de las obras hidráulicas por ejemplo; en el sistema alcantarillado pluvial, sumideros y cunetas.

1.4.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Actualizar la ecuación Intensidad - Duración - Frecuencia, mediante la obtención de sus respectivos coeficientes para cada ciudad.
- Proponer ecuaciones de modelo de intensidad en función de la duración de la lluvia y el periodo de retorno.
- Comparar los resultados de las ecuaciones Intensidad - Duración - Frecuencia, mediante modelos anteriores a estas ecuaciones halladas (si hubiera), para así dar la validez a los resultados.
- Validar los modelos propuestos en el presente proyecto, mediante el uso de las interpretaciones de las bandas pluviográficas para la ciudad de Tarija.
- Crear un software que permita calcular y actualizar los coeficientes de las ecuaciones Intensidad - Duración - Frecuencia, mediante las metodologías propuestas en el presente proyecto.

1.5.- ALCANCE DEL PRESENTE ESTUDIO

El alcance del estudio "Estimación y Actualización de las Ecuaciones Intensidad - Duración - Frecuencia, para las principales ciudades y poblaciones del departamento de



Tarija” abarca lo siguiente:

- ✓ Cálculo de lluvias máximas diarias y horarias para diferentes periodos de retorno.
- ✓ Construcción de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, para las ciudades estudiadas en cuestión.
- ✓ Cálculo de los coeficientes para las respectivas ciudades por las diferentes metodologías propuestas en el presente proyecto.
- ✓ Validación de resultados con ecuaciones con mediciones de bandas pluviográficas que existan en algunas ciudades.
- ✓ Propuesta de ecuación para la ciudad respectiva.
- ✓ Generar tablas de ecuaciones de Intensidad – Duración – Frecuencia, en función del periodo de retorno.
- ✓ Establecer un mapa de intensidades para lluvias de larga duración para el departamento de Tarija, donde se puedan precisar los lugares que tiene la intensidad leve, moderada y fuerte según una clasificación hecha en EEUU.

1.6.- INFORMACIÓN DEL PROYECTO


La primera premisa que se debe cumplir para la obtención de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia, es disponer de estaciones pluviométricas y pluviograficas que contengan longitudes de registros de por lo menos 5 años, para así poder realizar un análisis estadístico confiable de los registros de las tormentas.

Debido a que la gran mayoría de estaciones hidrometereologicas del departamento de Tarija

no tienen este tipo de información procesada, o la longitud de sus registros no cumplen con la primera premisa, el estudio se enfoca a revisar, comparar, actualizar y calcular los registros de las tormentas para las ciudades del departamento con estaciones representativas.

Se cuenta con un catálogo de las estaciones hidrometeorológicas (ver Anexo N°1), pertenecientes al departamento; para cada estación se seleccionaron las lluvias máximas diarias, determinando los eventos por excedencias anuales y por máximas anuales, para así realizar los ajustes y análisis estadísticos que requiere la metodología, utilizada para el propósito final.

Para zona de los valles generalmente por su alta correlación se recomienda utilizar la ecuación matemática de curva IDF de Sherman que sirve para el diseño hidráulico.


$$i = \frac{\lambda * T^{\psi}}{(d + \theta)^{\eta}}$$

Dónde: i = Intensidad de precipitación (mm/hrs)

η , λ , θ , y ψ = Son constantes determinadas mediante ajuste matemático

d = Duración de la lluvia (min)

T = Periodo de retorno (años)

1.7.- JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La ejecución del proyecto se justifica plenamente, desde el punto de vista metodológico.

La realización del proyecto es fundamental para la estimación de caudales de diseño en el alcantarillado pluvial y la protección de las obras hidráulicas y civiles.

1.7.1 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

La escasa información de caudales hace necesario estimar la intensidad de la lluvia o que es



lo mismo la tormenta de diseño

No contar con una ecuación Intensidad – Duración – Frecuencia, para una zona en específico, significa que no se podrá hacer otros proyectos de envergadura para la zona en estudio.

Por lo tanto una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido que se utiliza en el diseño de un sistema hidrológico, esta se define mediante un valor de altura de precipitación en un punto dado.

También podemos definir a la tormenta de diseño como la distribución hipotética de la cantidad de lluvia precipitada en un cierto periodo de tiempo definido. En el estudio de avenidas, representa a la lluvia que genera un caudal extremo con determinado periodo de retorno.

Tanto las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, nos sirven para determinar la tormenta de diseño puntual, como es el caso de la aplicación del método racional.

En cuanto a la justificación de metodologías, se aplicarán los modelos que ya fueron empleados en las ciudades de Antofagasta, Concepción – Chile. Aplicándose el modelo de Sherman a estas ciudades. De igual manera fue empleado el modelo de Bernard en Medellín – Colombia donde los resultados obtenidos en cuanto al cálculo de las intensidades fueron satisfactorios.

Ahora en el presente proyecto solamente se desarrollaran tres metodologías (Sherman (1931), Bernard (1932), (Ponce, 1989) o modelo de Talbot). Y la creación de un software que realice además de los modelos anteriores, los modelos de Wenzel (1982), Chow et al. (1994), Koutsoyiannis et al. (1998).



CAPÍTULO II

HIDROLOGÍA DE TORMENTAS DE DISEÑO

2.1.- IMPORTANCIA DE LAS TORMENTAS DE DISEÑO

Para los profesionales que utilizan el recurso hídrico es de fundamental importancia la caracterización de las lluvias intensas que se emplean para determinar indirectamente los caudales. Debido a que la disponibilidad de caudales es escasa, es necesario desarrollar metodologías para realizar la estimación indirecta de caudales a partir de la precipitación, que es una variable cuyo registro es más sencillo, más extenso y más frecuente.

Para predecir caudales críticos y para ingeniería de diseño de obras hidráulicas, es necesario asociar una probabilidad a lluvias máximas de diferentes duraciones.

Deducir la probabilidad de ocurrencia de un evento requiere contar con registros continuos de precipitación, que son muy escasos en nuestro país.

El conocimiento de las características de las precipitaciones intensas es de gran importancia para el dimensionamiento de obras hidráulicas, tales como canales, vertederos, presas, etc. Es necesario determinar una tormenta de diseño para poder estimar los caudales de diseño, esta tormenta de diseño no es otra cosa que la distribución de la precipitación en el tiempo.

2.2.- DEFINICIONES DE HIDROLOGÍA

“Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”.

“Hidrología es la ciencia que trata de los procesos que rigen el agotamiento y recuperación de los recursos de agua en las áreas continentales de la tierra y en las diversas fases del



ciclo hidrológico”

2.2.1.- DEFINICIÓN Y VARIABLES DE LAS TORMENTAS DE DISEÑO

Se entiende por tormenta al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. De acuerdo a esta definición una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días; pueden abarcar extensiones de terrenos muy variables, desde pequeñas zonas hasta vastas regiones. Es decir que las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes.

También una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación, la tormenta de diseño es la entrada al sistema, y los caudales resultantes se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales.

La magnitud de la tormenta se analiza con los valores de las alturas de precipitación máxima (h_p , mm) o bien a partir de las intensidades máximas de lluvia (i , mm/h).

La duración es función del intervalo de tiempo utilizado para registrar la precipitación y en la hidrología, se consideran como lluvias de corta duración aquellas cuyo tiempo oscila entre 5 y 120 minutos, mientras que para las de larga duración el tiempo será mayores 120 minutos.

La frecuencia o probabilidad de ocurrencia permite estimar la magnitud de la tormenta de diseño correspondiente a una probabilidad dada. En la hidrología se utiliza el concepto del periodo de retorno (T_r , años).



2.2.2.- PRECIPITACIÓN

La precipitación, es toda forma de humedad que originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como el granizo y nevisca.

2.2.3.- PROCESO DE FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

A medida en que el vapor de agua va ascendiendo, se va enfriando y el agua se condensa de un estado de vapor a un estado líquido, formando la niebla, las nubes o los cristales de hielo. Pero, para que esta formación se lleve a cabo, generalmente se requiere la presencia de núcleos de condensación, alrededor de los cuales las moléculas del agua se pueden unir.

Existen diversas partículas que pueden actuar como núcleos de condensación, con tamaños que varían desde 0.1 (aerosoles) hasta 10 mm de diámetro; entre estas partículas tenemos: Algunos productos de la combustión, como óxidos de nitrógeno y sulfuro, partículas de sal producto de la evaporación de la espuma marina y algunas partículas de polvo que flotan en el aire. Las gotas o cristales de hielo crecen rápidamente debido a la nucleación, pero el crecimiento después de esto es lento.

Mientras que las partículas que constituyen las nubes tienden a asentarse, los elementos promedio pesan tan poco que sólo un leve movimiento hacia arriba del aire es necesario para soportarlo. Constantemente hay gotas de agua que caen de las nubes, pero su velocidad de caída es tan pequeña, que no llegan a la tierra porque muchas veces vuelven a evaporarse antes de alcanzarla y ascienden de nuevo en forma de vapor.

Al aumentar el vapor, o si la velocidad de caída supera los 3 m/s, las gotas de agua incrementan su peso, provocando lluvia (Figura 2.1); cuando este peso se hace mayor, aumenta la velocidad de caída con lo que la lluvia se intensifica y puede transformarse en una tormenta.



Fig. 2.1 Formación de la precipitación en las nubes

Fuente: Texto de Hidrología Aplicada de Máximo Villon

2.2.4.- FORMAS DE PRECIPITACIÓN

De acuerdo a sus características físicas y producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, y de las condiciones locales, la precipitación puede adquirir diversas formas, siendo las más comunes: llovizna, lluvia, escarcha, nieve y granizo.

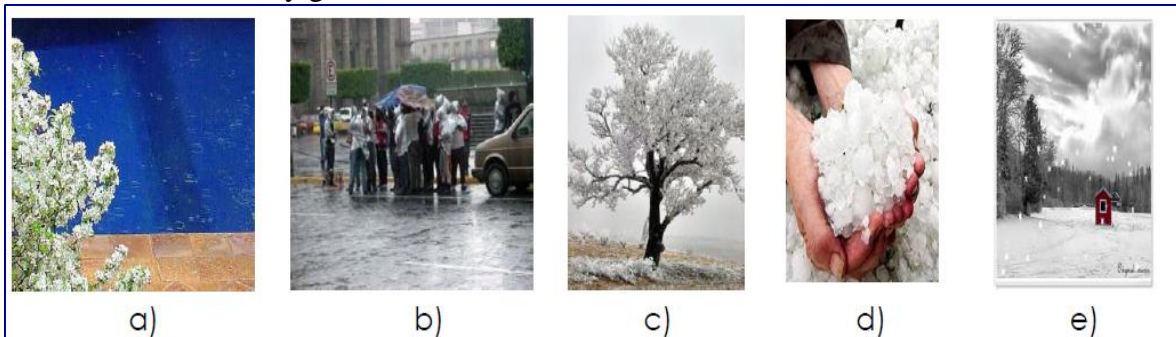


Fig. 2.2 Formas de Precipitación

Fuente: www.wikipedia.es/hidrologia/ar

**a).- Llovizna**

Más conocida como garúas, consiste en diminutas gotitas de agua líquida cuyo diámetro fluctúa entre 0.1 y 0,5 mm; debido a su pequeño tamaño tienen un asentamiento lento y en ocasiones parecen que flotarían en el aire. Por lo general la llovizna cae de estratos bajos y muy rara vez sobrepasa un valor de 1mm/h.

b).- Lluvia

Consiste de gotas de agua líquida en su mayoría con un diámetro mayor a los 5 mm. En muchos países como en Estados Unidos por ejemplo suelen clasificarla como ligera, moderada o fuerte según su intensidad: Ligera: Para tasas de caída hasta de 2.5 mm/h. Moderada: Desde 2.5 hasta 7.6 mm/h. Fuerte: Por encima de 7.6 mm/h. Esta clasificación está dada para lluvias de larga duración.

c).- Escarcha

Es una capa de hielo, por lo general transparente y suave, pero que usualmente tiene bolsas de aire que se forma en superficies expuestas por el congelamiento de agua superenfriada que se ha depositado en forma de lluvia o llovizna. Su gravedad específica puede llegar a ser de 0,8 a 0,9.

d).- Granizo

Es la precipitación en forma de bolas de hielo, producida en nubes convectivas. El granizo se forma a partir de partículas de hielo que, en sus desplazamientos por la nube van "atrapando" gotas de agua, las gotas se depositan alrededor de la partícula de hielo y se congelan formando capas, como una cebolla. Los granizos pueden ser esferoidales, cónicos o irregulares en forma, y su tamaño varía desde 5 hasta 125 mm de diámetro.

e).- Nieve

La nieve está compuesta de cristales de hielo blanco o translúcidos principalmente de forma compleja combinados hexagonalmente y a menudo mezclados con cristales simples; algunas veces aglomerada en copos de nieve, que pueden tener varios centímetros de diámetro. La



densidad relativa de la nieve fresca varía sustancialmente, pero en promedio se asume como $0,1\text{gr/cm}^3$.

2.2.5.- TIPOS DE PRECIPITACIÓN

La precipitación lleva a menudo el nombre del factor responsable del levantamiento del aire que produce el enfriamiento en gran escala y necesario para que se produzcan cantidades significativas de precipitación, en base a ello se distinguen tres tipos de precipitación:

2.2.5.1.- PRECIPITACIÓN CICLÓNICA

Se producen cuando hay un encuentro de dos masas de aire, una caliente (color rojo) y otra fría (color azul) y convergen en zonas de bajas presiones (ciclones); las nubes más calientes son violentamente impulsadas a las partes más altas, donde pueden producirse la condensación y precipitación.

La precipitación ciclónica puede subdividirse en frontal y no frontal. La precipitación frontal resulta del levantamiento del aire cálido a un lado de una superficie frontal sobre aire más denso y frío.

La precipitación no frontal es la precipitación que no tiene relación con los frentes. Precipitación de frente cálido, el aire caliente avanza hacia el aire frío por lo que el borde de la masa es un frente caliente, tienen una pendiente baja entre $1/100$ y $1/300$, y lentamente el aire caliente fluye hacia arriba por encima del aire frío, generalmente las áreas de precipitación son grandes y su duración varia de ligera, moderada y casi continúa hasta el paso del frente.

Precipitación de frente frío, el aire frío avanza hacia el aire caliente, entonces el borde de la masa de aire es un frente frío el cuál tiene una pendiente casi vertical, con lo cuál el aire caliente es forzado hacia arriba más rápidamente que en el frente caliente.

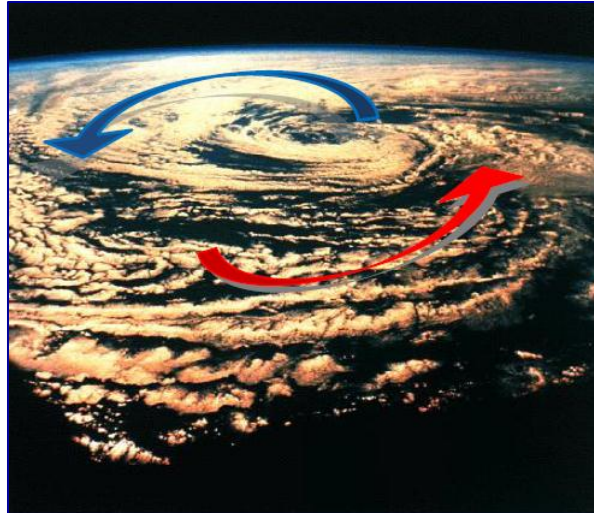


Fig. 2.3 Precipitación Ciclónica

Fuente: Atlas Universal Encarta 2010

2.2.5.2.- PRECIPITACIÓN CONVECTIVA

Se presenta cuando una masa de aire que se calienta tiende a elevarse, por ser el aire cálido menos pesado que el aire de la atmósfera circundante. La diferencia en temperatura puede ser resultado de un calentamiento desigual en la superficie.

A medida que la masa de aire caliente se eleva, el aire se enfría llegando hasta la condensación (formación de nubes) y dar origen a la precipitación (gotas de agua).

Un claro ejemplo de este tipo de precipitación son las tormentas eléctricas al atardecer de días calurosos de aire húmedo. La precipitación convectiva es puntual y su intensidad puede variar entre aquellas que corresponden a lloviznas y aguaceros.

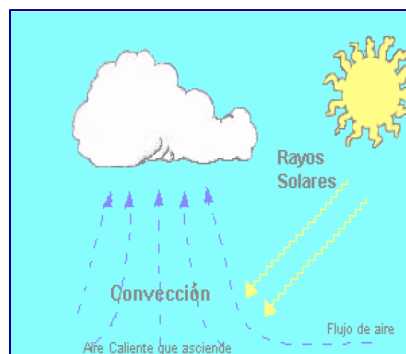


Fig. 2.4 Precipitación Convectiva

Fuente: www.wikipedia.es/hidrologia/ar

2.2.5.3.- PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA

Se producen cuando el vapor de agua que se forma sobre la superficie de agua es empujada por el viento hacia las montañas, donde las nubes siguen por las laderas de las montañas y ascienden a grandes alturas, hasta encontrar condiciones para la condensación y la

consiguiente precipitación. La precipitación es mayor a barlovento, que a sotavento.

En las cadenas montañosas importantes, el máximo de precipitación se produce antes de la divisoria. En cambio con menores altitudes, el máximo se produce pasado esta, debido a que el aire continúa el ascenso.



Fig. 2.5 Precipitación Orográfica

Fuente: www.wikipedia.es/hidrologia/ar

2.2.6.- PLUVIOGRAMA

El registro que se obtiene de un pluviógrafo se llama pluviograma.

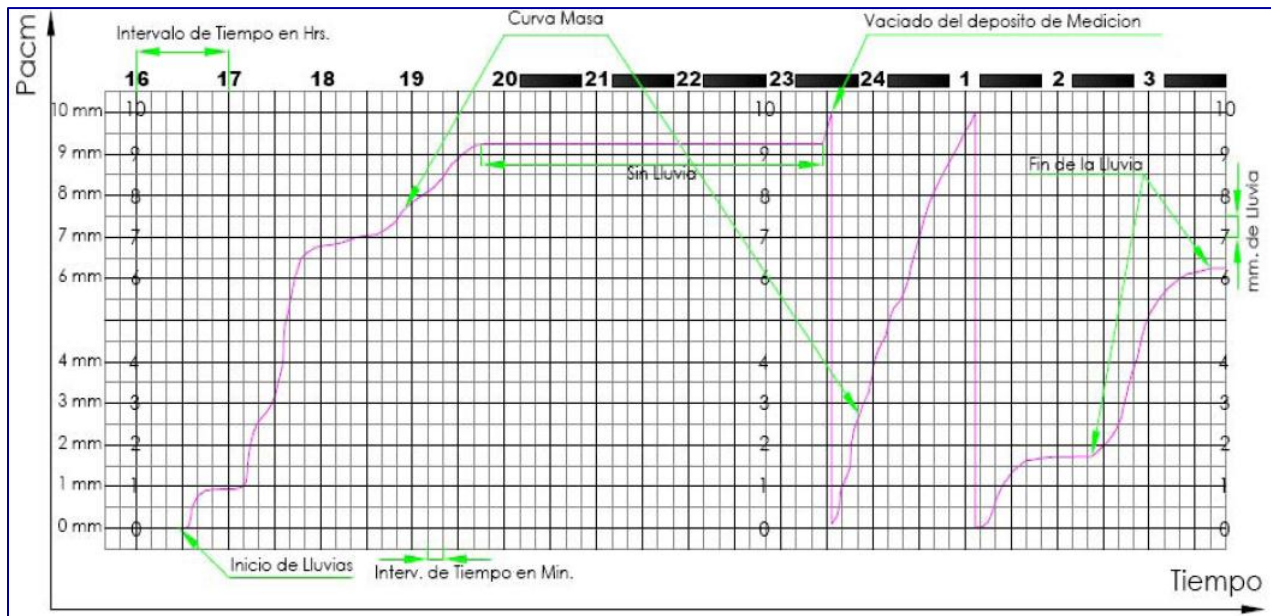


Fig. 2.6 Registro de un Pluviograma

Fuente: Curvas de IDF del Dr. José Luis Montaña

Este registro puede ser obtenido directamente con un Pluviógrafo con flotador y sifón, los descensos ocurren cuando se ha llenado el recipiente, esto es, cuando se han alcanzado 10 mm de precipitación, se desaloja el agua contenida en él, por medio del sifón. Es frecuente que el pluviógrafo tenga alguna falla y por ello los registros resultan defectuosos. Tanto para comprobar que el pluviógrafo funciona correctamente como para recuperar los datos de un registro defectuoso, conviene ayudarse del registro del pluviómetro.

2.3.- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN

La curva masa de precipitación, es la representación de la precipitación acumulada (diaria, mensual y anual) versus el tiempo y en orden cronológico. Esta curva se la obtiene directamente del pluviograma.

La curva de masa de precipitación, en una curva no decreciente, la pendiente de la tangente en cualquier punto de la curva representa la intensidad instantánea en ese tiempo.

Matemáticamente la curva masa de precipitación, representa la función $P=f(t)$ expresada por:

$$p = \int_0^{t_1} i * dt$$

Que se deduce de la relación:

$$i = \frac{dp}{dt}$$

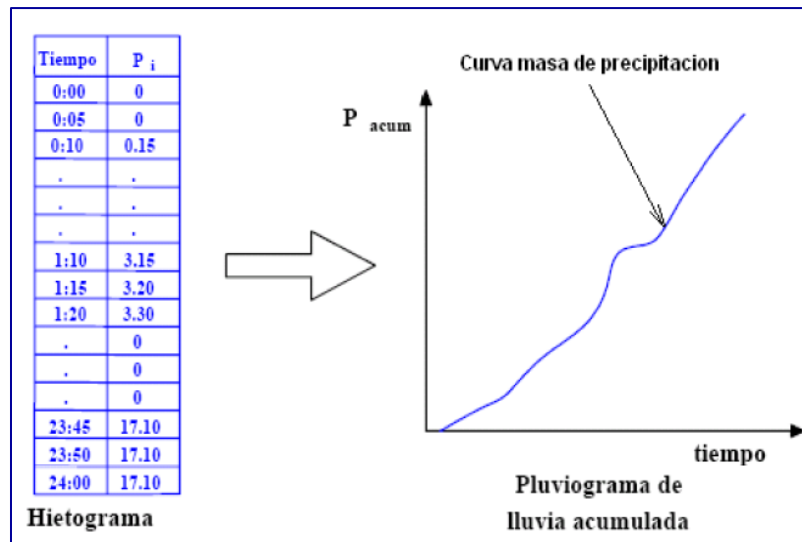


Fig. 2.7 Curva masa de precipitación

Fuente: Hidrología de Aparicio Mijares

2.3.1.- HIETOGRAMA

Gráfico de barras que expresa precipitación en función del tiempo en intervalos regulares de tiempo hietograma de precipitación, referida a un día o a una tormenta concreta, se puede observar un hietograma de intensidades que corresponde a una tormenta registrada por un pluviograma.

El intervalo de tiempo depende del tamaño de la cuenca. Por ejemplo para cuencas pequeñas, se usan intervalos de minutos, y para cuencas grandes, los intervalos son generalmente de horas.

Los hietogramas son muy utilizados en el diseño de tormentas, para el estudio de caudales máximos, y se deriva de la curva de masa. El área bajo el hietograma representa la precipitación total recibida en ese período.

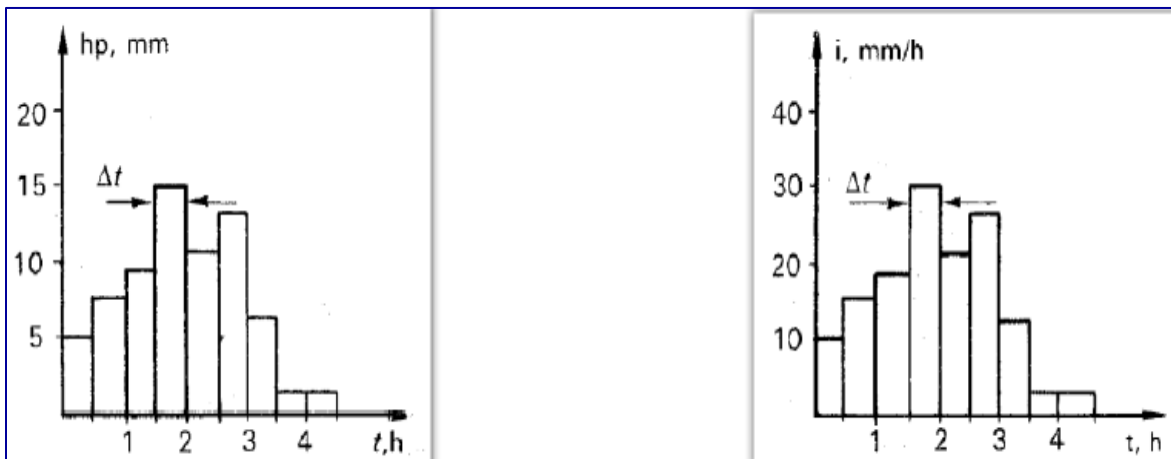


Fig. 2.8 Hietograma de alturas de precipitación

Fuente: Hidrología de Aparicio Mijares

Fig. 2.9 Hietograma de intensidades

Fuente: Hidrología de Aparicio Mijares

2.3.2.- ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

La información pluviométrica o pluviográfica antes de ser estudiada en su comportamiento debe ser revisada y analizada en tres aspectos importante: si los datos de la estación es **completa**, si es **consistente** y si es de **extensión suficiente**.



2.4.- PRUEBA ESTADÍSTICA DE HOMOGENEIDAD

El test o prueba estadística de homogeneidad presenta una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla en base a su probabilidad de ocurrencia. Si dicha probabilidad es pequeña, se concluye que la serie es no homogénea, si es grande, se dice que la serie es homogénea.

2.4.1.- TEST DE MANN-KENDALL

La prueba de Homogeneidad de Mann-Kendall es un test no paramétrico, tiene una hipótesis nula sencilla y fácil de satisfacer. Este test detecta cualquier forma de tendencia, ya sean lineales o en forma de saltos, siempre que den una tendencia global, este test no es adecuado para series que presentan un componente estacional. La prueba de Homogeneidad de Mann-Kendall es en realidad un test estadístico que conduce a elegir alguna de las siguientes respuestas:

- ✓ **Hipótesis nula:** Todos los valores de la serie son datos aleatorios de una sola población (Es una serie Homogénea).
- ✓ **Hipótesis alternativa:** Es una serie no homogénea con tendencia monótona.

La prueba consiste en calcular un índice de desviación S de la serie, y a partir de este valor calcular el valor de V mediante la relación:

$$\begin{aligned} &\Rightarrow V = \frac{S - 1}{\sqrt{\frac{n * (n - 1) * (2 * n + 5)}{18}}} \\ &\Rightarrow S = T - I \\ &\Rightarrow T = \sum_{i=1}^{n-1} s_i \qquad \Rightarrow I = \sum_{i=1}^{n-1} t_i \end{aligned}$$

Dónde: n = Número de registros

S = Índice de desviación calculado

X_i = Precipitaciones máximas en 24 horas; de la estación pluviométrica en estudio.

S_i = Número de valores de $X_j > X_i$ para $i < j < n$

T_i = Número de valores de $X_j < X_i$ para $i < j < n$

Luego se elige un nivel de significancia α o valor de confiabilidad en función al cuál se definirá la condición de homogeneidad de la serie. Este índice se relaciona con un valor de V_{crit} a través de la función de distribución normal, que se muestra a continuación en la siguiente Tabla:

α	0,005	0,010	0,025	0,050	0,100
V_{crit}	2,58	2,33	1,96	1,64	1,28

Tabla 2.1 V_{crit} para diferentes niveles de significación de alfa

Fuente: Hidrología en la Ingeniería de German Monsalve Sáenz

2.5.- ANÁLISIS DE CONSISTENCIA CURVA DOBLE MASA

El análisis de consistencia de doble masa, relaciona la precipitación anual acumulada de una estación X (estación que se analiza) con el correspondiente valor medio de la precipitación anual acumulada de un grupo de estaciones vecinas. Si la estación que se analiza ha sido bien observada, los puntos deberán alinearse en una recta, pero si existe algún quiebre, o cambio de pendiente en la recta, ello indicará que la estadística de la estación analizada debe ser corregida. Los registros a corregir serán, por lo general, los más antiguos y se harán con base en los registros más recientes, ya que se considera que los datos de los últimos años son realizados con una mejor técnica que la empleada en sus predecesores. Los casos más frecuentes se ilustran a continuación:

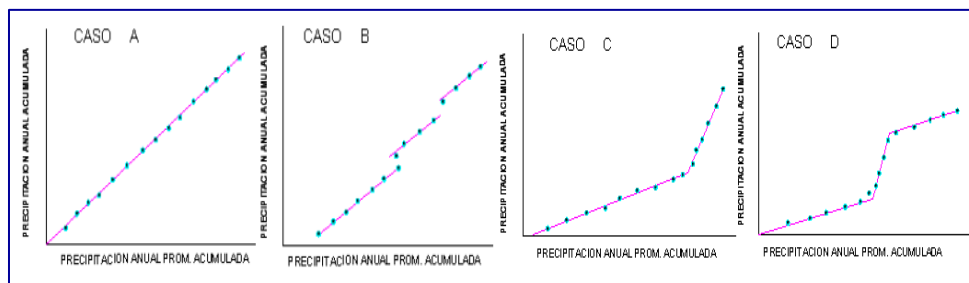


Fig.- 2.10 Análisis de la curva Doble Masa

Fuente: Hidrología en la Ingeniería de German Monsalve Sáenz



Caso A: La serie de puntos encaja perfectamente en una línea recta, lo que indica proporcionalidad, y por lo tanto, la estación que se analiza es consistente.

Caso B: Series de rectas paralelas. Lo cual nos indica proporcionalidad, aunque existan años que estén medidos por exceso o defecto.

Caso C: Cuando se forman dos rectas de diferentes pendientes, se tiene un caso típico de error sistemático. La corrección se realiza por la relación de pendientes del tramo más antiguo ya que la experiencia demuestra en un 80% el periodo más moderno es el correcto.

Caso D: La estación presenta un tramo central de mayor o menor pendiente; en el 95 % de los casos, dicho tramo se midió incorrectamente, por lo que habrá que corregirlo para homogeneizar la serie. Cuando se emplea la técnica de doble masa, para contrastar todas las estaciones pluviométricas en una cuenca, se deben situar las mismas en un plano indicando su nombre, altitud, lluvia media anual y número de años de registro. Posteriormente, se deben distribuir las mismas en grupos afines teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1.- Los grupos deben tener de 3 a 10 estaciones.
- 2.- La lluvia media anual de las estaciones de cada grupo debe ser semejante.
- 3.- Cada grupo debe incluir, por lo menos, una estación con amplio registro (25 años como mínimo).
- 4.- La altitud de las estaciones del grupo debe ser similar, no debiendo existir una diferencia de más de 300 m.
- 5.- Las estaciones deben estar relativamente próximas, no debiéndose exceder una distancia de 50 km.

En principio, la estación con más amplio registro se considera modelo y se inician las comparaciones por parejas de estaciones con la estación modelo.

En el transcurso de las comparaciones, se obtienen conclusiones acerca de la homogeneidad de cada estación y se realizan las correcciones necesarias hasta que todas las estaciones han sido verificadas y/o corregidas.



2.6.- RELACIONES PRECIPITACIÓN – DURACIÓN - FRECUENCIA

Una tormenta o evento lluvioso está definida por tres variables: Magnitud de la lluvia o lámina de agua, duración y frecuencia o periodo de retorno.

La magnitud de la lluvia.- Es la lámina total ocurrida en el lapso de duración de la tormenta, una forma de definir a la magnitud de la lluvia es mediante la intensidad.

Intensidad.- Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. De las tormentas interesa la intensidad máxima que se haya presentado. Es decir, la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo.

La duración.- Es el tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta, que varía según la distribución espacial.

La frecuencia.- Es el número de veces que se repite una tormenta de características de intensidad y duración definida en un período de tiempo más o menos largo, generalmente en años, se expresa por su periodo de retorno.

En nuestro país generalmente no se cuenta con información de precipitaciones de duraciones menores a un día, las precipitaciones diarias están más disponibles.

2.6.1.- ÍNDICES DE DESAGREGACIÓN

El método de los índices de desagregación o coeficientes de desagregación permiten determinar valores de precipitación para distintas duraciones de tormentas menores a 24 horas, a partir de registros de duración diaria de 24 horas.

Específicamente, los índices de desagregación se relacionan en función a una duración de referencia que existe entre las magnitudes de precipitación de diferentes duraciones.

Para lograr la determinación de los índices de desagregación se debe contar con datos de precipitación de diversas duraciones obtenidas con el uso de pluviógrafos.

Es importante notar que cuanto más largo sean los registros, más seguridad se tendrá de contar con índices de desagregación reales.

A continuación se detallan los pasos a seguir para determinar los coeficientes de desagregación:

- Se debe contar con datos de precipitaciones de diversas duraciones obtenidas de un pluviógrafo.
- Se determinan las precipitaciones máximas con un periodo de retorno de dos años, previamente ajustado a una ley (se puede adoptar la distribución Gumbell).
- Se determina los índices o coeficientes de desagregación tomando en cuenta la relación, empezando de la relación de la precipitación de 24 horas con la precipitación diaria es decir 24H/P DIARIA y posteriormente los demás en orden descendente.

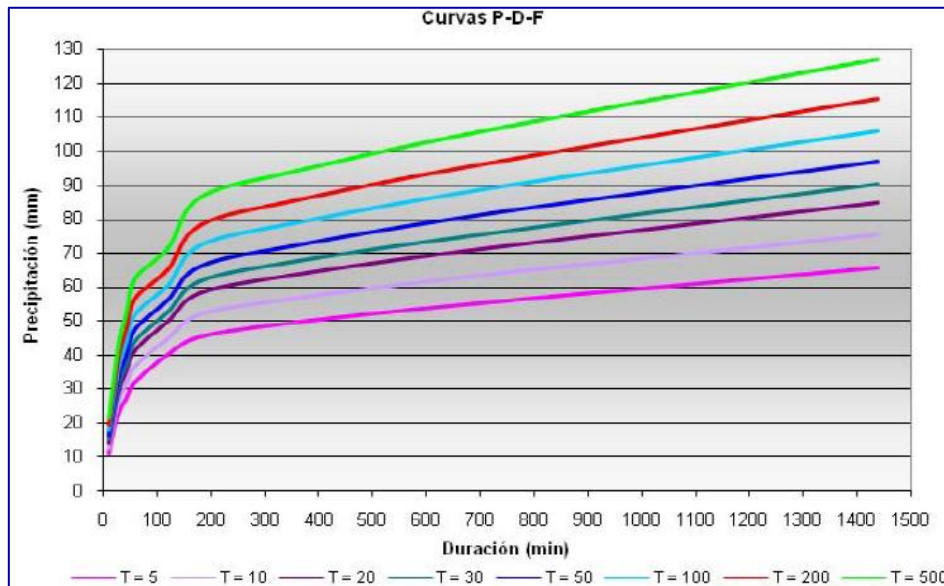


Fig. 2.11 CURVAS P-D-F

Fuente: Hidrología en la Ingeniería de German Monsalve Sáenz


Tal como se observa en la figura 2.20, las curvas P-D-F se grafican en un plano cartesiano: La duración en el eje de las abscisas y la precipitación en el eje de las ordenadas. Las precipitaciones de diferentes duraciones y para un mismo periodo de retorno forman una curva.

2.7.- CURVAS INTENSIDAD – DURACION - FRECUENCIA

La irregular distribución espacial y temporal de las aguas, ha obligado a construir grandes obras de protección y drenaje, y de regulación capaces de compensar, estas últimas, la escasez y el exceso de las aguas.

Las curvas de Intensidad – Duracion – Frecuencia, son elementos que usualmente presenta la información de manera gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los periodos de retorno que se adopten para un diseño en particular.

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr o mm/día).


$$i = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

Dónde:

I = intensidad de precipitación (mm/h);

ΔP = diferencial de precipitación (mm);

Δt = diferencial de tiempo (h).


La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno “T” que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño.

Por otra parte considerar la variabilidad espacial y temporal se debe realizar el estudio de la distribución de la precipitación en la superficie de la cuenca, así como la distribución en el tiempo, de la misma.

Para tal efecto se deben tomar los registros pluviométricos de cada una de las estaciones determinando la distribución de la lluvia en el tiempo con un nivel de probabilidad dado.

Para cada una de las estaciones pluviométricas se escogieron los máximos registros por 2 metodologías: La de excedencias anuales y las de máximas anuales, para cada año de las series disponibles. Seleccionadas las precipitaciones se procede a la toma de datos; se toma como dato inicial la máxima precipitación en un intervalo de tiempo y se continúa con la precipitación máxima consecutiva en orden descendente para dicho intervalo. Los datos ya seleccionados se descartan, continuando con la selección a lado y lado tomando la precipitación máxima.

A estas láminas precipitadas en cada intervalo de tiempo se les hizo un análisis de frecuencia, ajustándoles a una distribución empírica general, la cual tiene la siguiente expresión:


$$F_{n(x)} = \frac{n}{N + 1}$$

Dónde:

$F_n(X)$ = frecuencia observada acumulada;

n = número de orden;

N = número total de datos.

2.7.1.- SELECCIÓN DE INTENSIDADES MÁXIMAS

En Bolivia el método más validado para la construcción gráfica de las curvas IDF, es el propuesto por Témez (1978), que consiste en analizar las bandas de registros pluviográficos, seleccionando los valores extremos de precipitación para tiempos determinados.

A continuación se debe seleccionar los valores extremos de precipitación para cada año y distintas duraciones, luego se calculara la intensidad horaria, la cual se logra dividiendo los valores de cada una de las series por su duración, obteniendo intensidades en mm/h, como se muestra en la siguiente expresión:

$$i = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

Dónde:

I = intensidad de precipitación (mm/h);

ΔP = diferencial de precipitación (mm);

Δt = diferencial de tiempo (h).

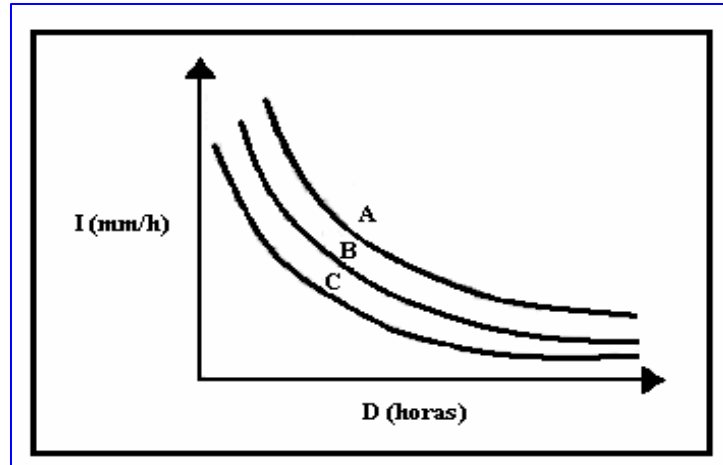


Fig. 2.12 Curva Intensidad – Duración - Frecuencia

Fuente: WWW.Monografias.Hidrologia.com/es

En la figura 2.21 es posible apreciar que el valor de I (intensidad) aumenta al disminuir D (duración), de tal manera que presenta una forma exponencial negativa.

Esto se explica debido a que la probabilidad de encontrar intensidades mayores aumenta a medida que las duraciones disminuyen; por el contrario, las menores intensidades se encuentran vinculadas a las mayores duraciones.

2.7.2.- AJUSTE DE LOS DATOS A UNA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD (GUMBELL)


Cuando la información de precipitación local está disponible, las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia; pueden desarrollarse utilizando análisis de frecuencia; es decir, para

cada una de las duraciones seleccionadas, se extraen las profundidades de lluvias máximas anuales de los registros históricos de lluvias y luego se aplica el análisis de frecuencia.

Para la aplicación del análisis de frecuencia se requiere de una función de distribución de probabilidades. Al respecto, la distribución de Gumbell ha sido empleada con buenos resultados en el estudio de eventos meteorológicos de valores máximos, obteniéndose ajustes muy precisos para valores máximos diarios y anuales. A su vez, Stol (1971), citado por Dickinson (1977), señala que la función de Gumbell resulta ser la más adecuada para representar lluvias anuales extremas.

La aplicación de la función de distribución de Gumbell en estudios que contemplen eventos de valores extremos no sólo es avalada por los autores mencionados anteriormente. La literatura especializada en el tema cita siempre a la función de distribución de Gumbell debido a la calidad de ajuste que presenta en eventos máximos.

El siguiente paso, luego de analizar las estaciones pluviométricas, en busca de los valores extremos de precipitación para determinadas duraciones, consiste en el ajuste de los datos de intensidad a la función de distribución de probabilidad de Gumbell, definida por la expresión que se señala a continuación.


$$F_X = P[\varepsilon \leq X] = e^{-e^{-\sigma(x-\mu)}}; -\infty \leq X \leq \infty$$



Dónde:

X_i = valor a asumir por la variable aleatoria;

e = base de los logaritmos neperianos;

μ y σ = parámetros a estimar en función de la muestra.

Los parámetros μ y σ , se determinan con las siguientes expresiones:


$$\mu = \chi - 0.450047 * S$$

$$\sigma = \frac{1}{0.779696 * S}$$



Dónde:

S = desviación estándar de la muestra.

X = media de la muestra.

2.7.3.- PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

La bondad de ajuste es la asimilación de datos observados de una variable, a una función matemática previamente establecida y reconocida. A través de ésta es posible interpolar y extrapolar información; en otras palabras, predecir el comportamiento de la variable en estudio.


Es por ello que una vez ajustada la función de Gumbell, se llevaron a cabo las pruebas de bondad de ajuste, utilizándose como medidas de bondad el test de Kolmogorov – Smirnov.

2.7.3.1.- TEST DE KOLMOGOROV – SMIRNOV

El test de Kolmogorov – Smirnov es una prueba no paramétrica que compara la frecuencia observada acumulada, con la frecuencia teórica acumulada y determina el punto en el que estas dos distribuciones muestran la mayor divergencia, es decir, mide la desviación máxima de ambas frecuencias en la distribución.

De esta definición se desprende que es necesario determinar tanto la frecuencia observada acumulada, como la frecuencia teórica acumulada.

En el primer caso, para determinar la frecuencia observada acumulada de la serie, se ordenan los datos de menor a mayor y se trabaja con la probabilidad de excedencia asignada a cada valor de la muestra, cuya expresión más usada es la de Weibull:


$$F_{n(x)} = \frac{n}{N + 1}$$



Dónde:


$F_n(x)$ = frecuencia observada acumulada;

n = número de orden;

N = número total de datos.

Por otra parte, la frecuencia teórica acumulada se determina a través de la función de Gumbell, que fue indicada anteriormente.

Cuando han sido obtenidas ambas frecuencias, se selecciona el supremo de las diferencias entre ambas, en la n -ésima posición de orden, definido por la siguiente expresión:



$$Dc = \text{Max} \| F_{n(\chi)i} - F_{(\chi)i} \|$$

Dónde:

Dc = supremo de las diferencias entre la frecuencia observada y teórica acumulada;

$F_n(X)_i$ = frecuencia observada acumulada;

$F(X)_i$ = frecuencia teórica acumulada.


$$Dc_{\text{tabla}} = \frac{1.36}{\sqrt{N}}$$

Esta expresión que se encuentra en función del número de datos que tiene la muestra; se la utiliza para realizar la comparación para un nivel de significancia del 5%; es decir para una probabilidad del 95%.

Una vez obtenido el valor de Dc , se recurre a la tabla de valores críticos de D en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, con un tamaño de muestra “ n ” y asumiendo un 95% de confianza. Luego se decide si el ajuste es o no adecuado, considerando las siguientes afirmaciones:

- Si el valor D calculado $<$ D tabla, se acepta H_0 (H_0 : el ajuste es adecuado);
- Si el valor D calculado $>$ D tabla, se rechaza H_0 (H_a : el ajuste no es adecuado).



Luego de ajustar los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbell y de validarlos, a través de las pruebas de bondad de ajuste, se graficaron las respectivas intensidades y duraciones de precipitación, para cada uno de los períodos de retorno determinados y para cada una de las estaciones pluviométricas.

Los períodos de retorno a considerar en el presente proyecto son: $T = 2$ años, $T = 5$ años, $T = 10$ años, $T = 25$ años, $T = 50$ años, $T = 75$ años, $T = 100$ años, $T = 150$ años, $T = 200$ años y $T = 250$ años.

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DEL PROYECTO

3.1.- REGIONALIZACIÓN DE LAS CURVAS IDF

Como las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, son indispensables para el diseño hidrológico, es necesaria su elaboración a partir de metodologías de regionalización o con base en el análisis de registros diarios, para las zonas donde no se tiene información de pluviografos.

Para este fin se utilizó la metodología de análisis estadístico de la información. Se contó con un estudio del SENAMHI (2001), teniendo en cuenta la siguiente variable.

- ✓ Mapa de Ubicación de las Estaciones Pluviométricas en todo el departamento.
- ✓ Mapa de Isoyetas de las provincias del departamento de Tarija.

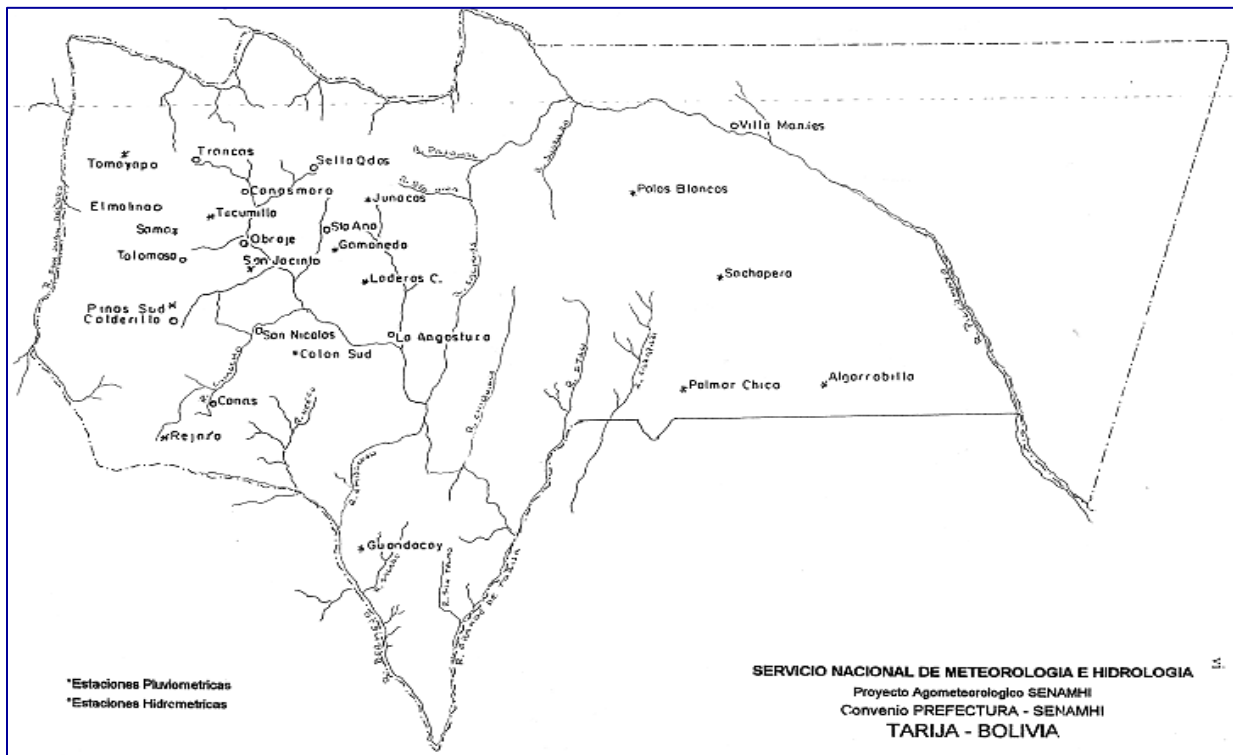


Fig. 3.1 Mapa de Ubicación de Estaciones Pluviométricas

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

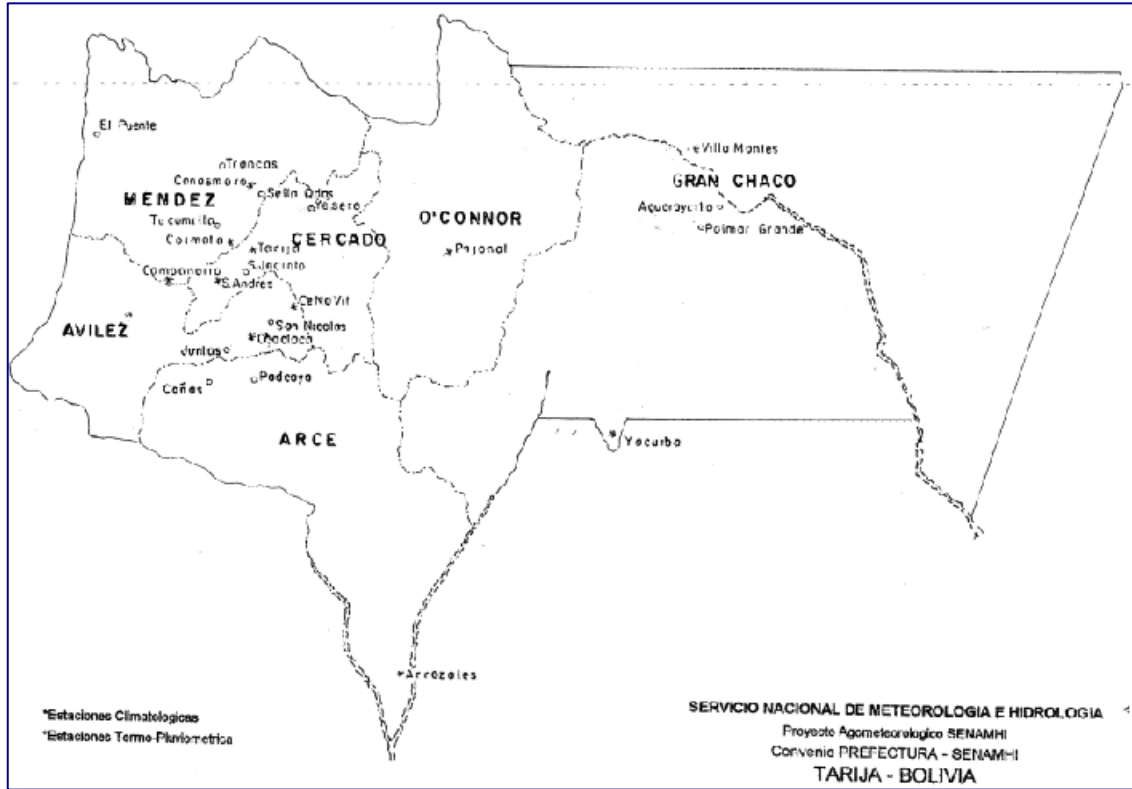


Fig. 3.2 Mapa de Ubicación de Estaciones Pluviométricas

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

Zona Geográfica Homogénea	Municipios	Sección de Provincia
Zona Andina	El Puente	2da Sección Prov. Méndez
	Yunchara	3ra Sección Prov. Avilés
	San Lorenzo	1ra Sección Prov. Méndez
Zona del Valle Central	Cercado	Prov. Cercado
	San Lorenzo	1ra Sección Prov. Méndez
	Uriondo	1ra Sección Prov. Avilés
	Padcaya	1ra Sección Prov. Arce
Zona Sub-Andina	Bermejo	2da Sección Prov. Arce
	Padcaya	1ra Sección Prov. Arce
	Entre Ríos	Prov. O'Connor
Zona Chaqueña	Yacuiba	1ra Sección Prov. Gran Chaco
	Caraparí	2da Sección Prov. Gran Chaco
	Villamontes	3ra Sección Prov. Gran Chaco

Tabla 3.1.- Municipios y Zonas Geográficas Homogéneas

Fuente: Atlas Universal Bruno de Bolivia



Casi todo su territorio presenta serranías que se dependen de la Cordillera de Lípez (quinta sección de la Cordillera Central o Real) que, de occidente a oriente, las más importantes son: Quebrada Honda, Tasjsara, Yunchará, de Tarija, Chorcoya y Sama, hasta Cerro Negro. La topografía continúa con una serie de serranías que encierran los valles de Tarija, San Lorenzo, Concepción y Padcaya, donde se destacan los cerros Camarón, Jeuques, Angoso y Lámina, por el Norte; Ancón, Filo Grande, Belén Cruz, Rumi Concho, Bramadero, Altomira, Tambillo y Nogal, por el Sur. Posteriormente se enfilan varios macizos comenzando con los cerros Oray Punta y Campanario en el Norte, hasta los cerros La Mamora y La Puñalada en el Sur. En los llanos del Chaco; se encuentran también las serranías de Capirenda e Ibibobo.

Fisiográficamente se encuentra constituido por paisajes de serranías altas, bajas, con grado moderado, además de que se hallan formando angostos valles, donde se práctica una agricultura intensiva; más al Este se sitúa el paisaje de las serranías del subandino, caracterizado por la presencia de serranías alargadas y paralelas; con una orientación Norte-Sur, que forman valles angostos; posteriormente en el límite con el paisaje de las llanuras del Chaco, se observa un angosto pie de monte ligeramente ondulado, inclinado, donde se practica una agricultura más de consumo familiar y pastoreo extensivo; el paisaje chaqueño es una amplia llanura con suaves ondulaciones que permiten el desarrollo de un bosque y de áreas de pastos y arbustos que conforman en monte espinoso, donde se práctica pastoreo de tipo intensivo.

La región Sud de Tarija presenta las llanuras aluviales recientes de los ríos Bermejo y Grande de Tarija, conformada por amplias terrazas cuyo uso principal es el de áreas de cultivos intensivos de caña. Los principales valles existentes en toda la región de Tarija son Mochigua, Cabrera, Cerrillos, San Thelmo, Del Condado, Las Cañas, Suaruro, Copirendi, San Lorenzo, Padcaya, Carapari, Entre Ríos, etc. Hidrográficamente, Tarija es tributaria de la Cuenca del Plata mediante los ríos Pilcomayo y Bermejo.

Su clima es variable; frío y seco en el sector occidental, propicio para actividades agrícolas



y pecuarias de puna (Pampas de Tajsara y zonas de Chorcoya e Iscayachi), con una cubierta vegetal de pasto y arbustos espinosos, y temperatura media anual de 14° C. La zona de los valles, de clima templado y temporalmente húmedo, con temperatura media anual de 24| C, desarrolla una de las actividades frutícolas y hortícolas más intensas del país. Las serranías del subandino, de temperaturas que sobrepasan los 20° C como media anual, los índices de humedad van aumentando hacia la región de Bermejo (donde se desarrollan cultivos de caña) y permiten una cubierta vegetal boscosa que temporalmente pierde el follaje. Finalmente los llanos del Chaco, con temperaturas anuales que llegan a 28° C, con ambiente seco.

DATOS GENERALES DE LA CIUDAD DE TARIJA				
Fundación :	1574			
Altura :	1866	m.s.n.m.		
Ubicación Geográfica:	21°23'07"	Lat. S.	64°50'49"	Long. O.
	21°47'50"	Lat. S.	64°42'12"	Long. O.
Precipitación Anual :	614	mm		
Año más lluvioso :	1945	con Panual :	960	mm
Año menos lluvioso :	1983	con Panual :	315	mm
Temperaturas Ambiente (media aritmética)				
Verano :	20.5 °C	Otoño :	17.7 °C	
Invierno :	13.7 °C	Primavera :	18.6 °C	
Temperatura Máxima Extrema :	39.3 °C en octubre de 1977			
Temperatura Mínima Extrema :	-7.8 °C en Julio de 1975			
Los vientos predominantes son los Suroeste con 4 nudos				

Tabla 3.2.- Datos Generales de la ciudad de Tarija

Fuente: Instituto Geográfico Militar IGM

3.1.1.- CIUDADES DE LA PROVINCIA CERCADO

3.1.1.1.- CIUDAD DE TARIJA

Se ubica al sur del país entre las coordenadas 21°33'07'' – 21°47'50'' de latitud sur y los 64°42'12'' – 63°50'49'' de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Creada por Decreto

Supremo el 24 de septiembre de 1831.

Tiene una altura de 1866 m.s.n.m. además la temperatura media es de 18 °C, cuenta con una densidad poblacional de 91 Hab/Km². Su precipitación media anual según el mapa de isoyetas es de 800 mm en promedio.

La Sección de Tarija tiene los siguientes cantones San Mateo, Yesera, Alto España, Junacas, Santa Ana, San Agustín, Tolomosa, Lazareto, Cieneguillas, Turumayo, Sella Cercado y San Andrés.

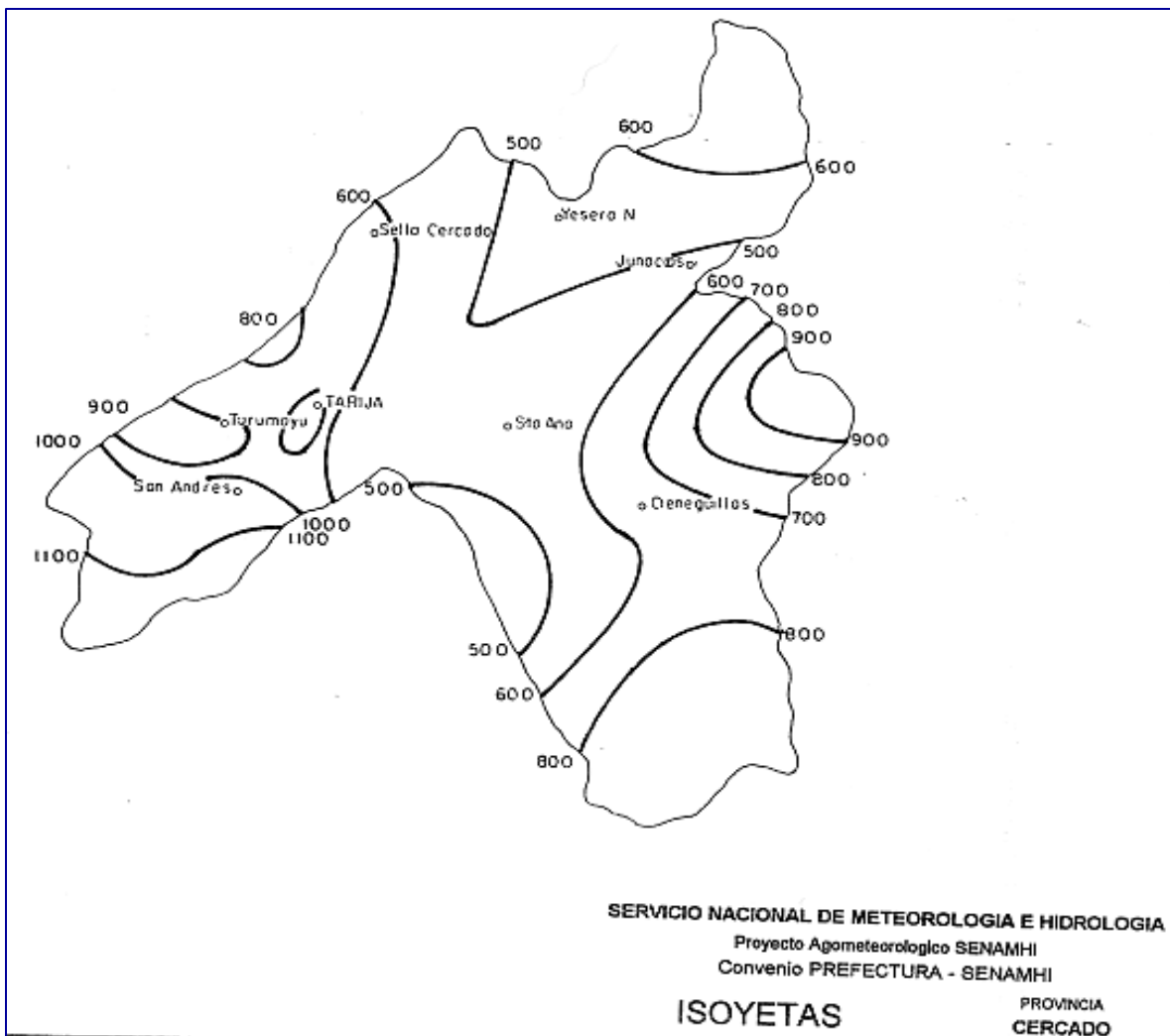


Fig. 3.4 Isoyetas de la Provincia Cercado

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

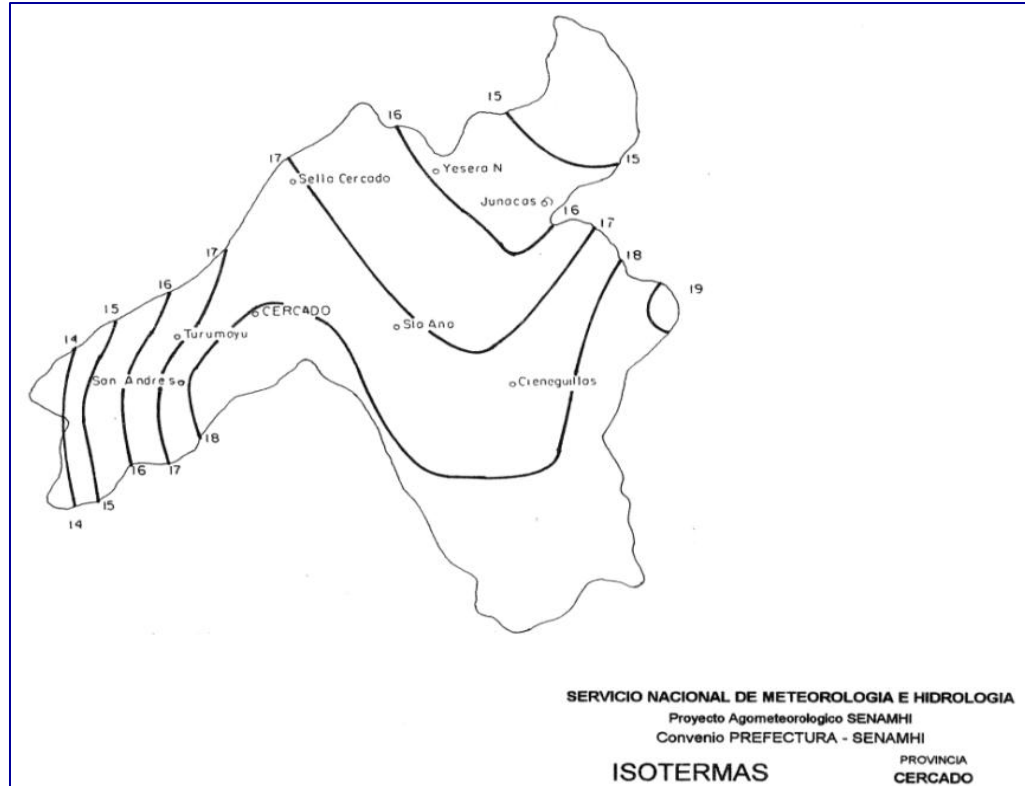


Fig. 3.3 Isothermas de la Provincia Cercado

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

3.1.2.- CIUDADES DE LA PROVINCIA ARCE

3.1.2.1.- CIUDAD DE BERMEJO

Bermejo es una ciudad en el extremo sur del departamento de Tarija - Bolivia , cuyo nombre original es Pozo del Bermejo. Tiene 26059 hab. Y está a 208 km de la ciudad de Tarija, en la frontera con la República Argentina. Es una zona rica en hidrocarburos (petróleo y gas natural).

La ciudad de Bermejo geográficamente se encuentra ubicada entre los paralelos $22^{\circ}35'24''$ - $22^{\circ}52'09''$ de latitud sud. Y $64^{\circ}26'30''$ - $64^{\circ}14'16''$ de longitud oeste y una altitud media de 400 m.s.n.m. La extensión del municipio de Bermejo es aproximadamente 380,9 km² la que se divide en área urbana y rural.

Esta ciudad pertenece a la zona de los valles existe una zona climática predominante: La zona de clima cálido semi-húmedo que comprende toda el área. Se observa que las mayores



temperaturas corresponden a los meses de enero, febrero y noviembre mientras que las temperaturas medias menores corresponden a los meses de junio, julio y agosto y una temperatura media anual de 22.5 °C.

Bermejo se encuentra situada a una altura de 415 msnm, con una temperatura media anual de 22,53 °C; sin embargo, el clima de Bermejo se caracteriza por tener temperaturas extremas: Muy altas entre septiembre a mayo, llegando a alcanzar los 45 °C, mientras que entre junio a agosto las temperaturas descienden hasta los 10 C.

Los meses de lluvias se concentran entre marzo y mayo, por lo que existe un alto grado de humedad. El período de lluvias empieza en octubre y se extiende hasta abril, con una precipitación anual de 1323,1 mm. Por otra parte, es una zona con bastante vegetación, fauna y flora.

Triángulo de Bermejo.- Pertenece a la segunda sección de la provincia Arce del departamento de Tarija, la misma que se encuentra ubicada en el extremo sur del departamento, entre las coordenadas geográficas 22°35'24'' – 22°52'09'' de latitud sud y 64°26'30'' – 64°14'16'' de longitud oeste. Limita al norte con la serranía de San Telmo (río Tarija) y colonia Ismael Montes, al sur con el río Bermejo y la República Argentina; al este con el río grande de Tarija y la República Argentina, al oeste con la comunidad de San Telmo (río Bermejo) y la República Argentina.

La sección de Bermejo tiene los siguientes cantones Arrozales, Candaditos y Porcelana.

3.1.2.2.- CIUDAD DE PADCAYA

Padcaya es una localidad y municipio capital de la Provincia de Aniceto Arce del Departamento de Tarija, al sur de Bolivia, ubicada a 45 km. de la capital del departamento, Tarija.

Se encuentra situada en el valle del río Orosas, afluente del río Bermejo, y flanqueada por el Cerro Huancani, que corona el valle en que está ubicada la villa.

La ciudad de Padcaya se encuentra en la zona del valle central, es así cuenta con un clima templado semi-árido con una temperatura promedio de 17.5 °C. Con una altitud media de 1200 y 2000 m.s.n.m.

Pero también se la puede situar en la zona sub-andina, es así que, su clima puede variar a semi árido-húmedo, con una temperatura promedio oscilando entre los 20.9 °C con una altura sobre el nivel del mar de 560 a 2600 m.s.n.m.

La ciudad se encuentra situada entre las coordenadas 21° 53' 14" - 21°14'55" de latitud sud y 64° 42' 46" - 64°03'24" de longitud oeste a una altitud 2041 m.s.n.m. y con una Población aproximada de 7133 habitantes.

La Sección de Padcaya tiene los siguientes cantones Chaguaya, Tacuara, Camacho, Rejara, Cañas, Rosillas, Mecoya, San Francisco, Orozas, La Merced y Tariquia.

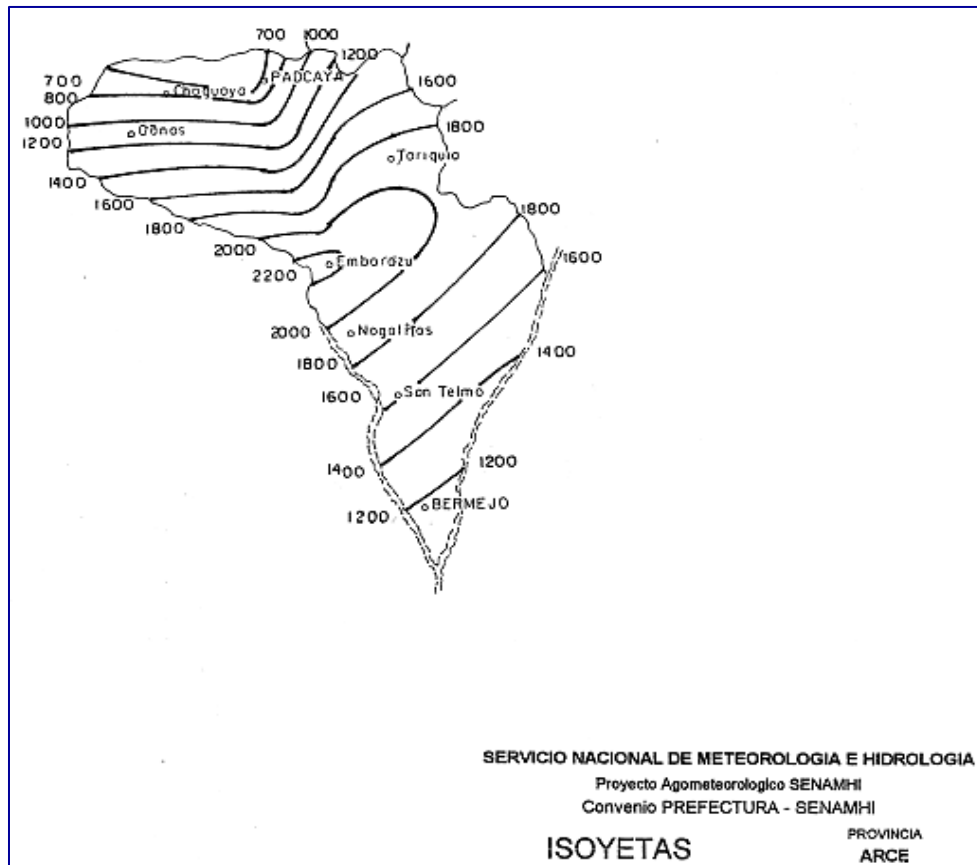


Fig. 3.5. Isoyetas de la Provincia Arce

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

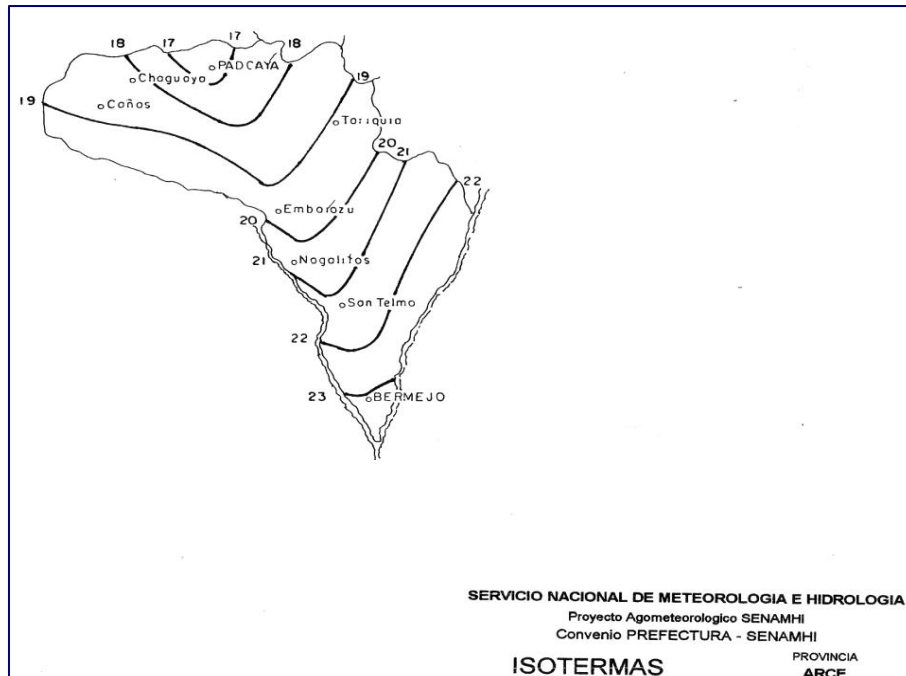


Fig. 3.6 Isothermas de la Provincia Arce

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

3.1.3.- CIUDADES DE LA PROVINCIA GRAN CHACO

3.1.3.1.- CIUDAD DE YACUIBA

Yacuiba es una ciudad del sur de Bolivia, en el departamento de Tarija. Es capital de la provincia Gran Chaco. Está ubicada a unos 3 kilómetros de la frontera con la Argentina, y se ubica a orillas de la extremidad sur de la Serranía del Aguaragüé.

Cuenta con una población de unos 90.000 habitantes. Si se suma la población de San José de Pocitos, la población estimada en el 2011 es de 225000 habitantes, lo que la convierte en la segunda ciudad más importante del departamento, después de la ciudad de Tarija.

Se encuentra en la zona geográfica de las serranías y la llanura chaqueña, a una altura entre los 620 y 680 msnm.

El clima del chaco por lo general es seco y caluroso, con una evaporación intensa. Las temperaturas oscilan entre los 7 °C a 43 °C. Los veranos son muy calurosos. El área de la



ciudad de Yacuiba se distribuye en 2 paisajes fisiográficos las serranías y la llanura chaqueña y una altitud entre 620 – 680 m.s.n.m. Y una precipitación media anual de 1136,6 mm

Se encuentra ubicada entre las coordenadas de 22°02'22" - 21°20'27" de latitud sud y longitud 63°40'54" - 62°50'57" de longitud oeste. La sección de Yacuiba tiene como cantones a Aguayrenda, San José de Pocitos y Caiza.

3.1.3.2.- CIUDAD DE VILLAMONTES

Villamontes es una ciudad del sur de Bolivia, en el departamento de Tarija, dentro de la 1er región autónoma de Bolivia, el Gran Chaco. Ubicada en las laderas de la cordillera del Aguarague.

Villamontes es el centro administrativo del Municipio de Villamontes, denominada 3ra sección municipal de la provincia del Gran Chaco, y está situada entre las coordenadas 21°15'39" - 20°25'42" de latitud sud y 63°28'34" - 62°35'52" de longitud oeste. Y a una altitud 390 m sobre el nivel de mar, a la banda izquierda del Río Pilcomayo que cruza la sierra del Aguarague y baja hacia el sudeste rumbo a la planicie del Gran Chaco.

Villamontes es atravesada por la Quebrada Caiguamí que vierte sus aguas al río Pilcomayo. Villamontes no tiene cantones como las otras 2 secciones.

3.1.3.3.- CIUDAD DE CARAPARI

Fue creada mediante ley el 19 de octubre de 1980 se encuentra ubicada al sureste de Tarija a unos 232 km.

Se encuentra ubicada entre las coordenadas de 21°10'39" – 22°19'58" de latitud sud y 63°33'34" – 64°18'24" de longitud oeste. A una altitud de 760 m.s.n.m. distante a 32 km de la ciudad de Yacuiba.

El municipio presenta una temperatura media anual de 20.2 °C. Las temperaturas máximas registradas por la estación de Itau son de 28° C y la temperatura promedio mínima registrada por la misma estación es de 12,4 °C. Sin embargo es importante hacer notar que registren temperaturas extremas como la máxima alcanzada 32,4 °C en el mes de enero y una mínima de 6.2 °C en el mes de julio.

El periodo seco abarca desde mediados del mes de abril hasta mediados de octubre sumando una precipitación acumulada de 183,8 mm. En el mes de julio no supera los 5,5 mm. Por otro lado el periodo húmedo comprende los meses de mediados de noviembre hasta mediados del mes de abril con 800 mm, concentrándose el 90 % de la precipitación anual.

La precipitación media anual alcanza un valor de 954 mm. Existe déficit hídrico en invierno lo que sería insuficiente para el desarrollo de los cultivos en esta época del año, mientras en la época de lluvias se pueden garantizar y sustentar el desarrollo de los cultivos de maíz, papa y otros.

El área del municipio de Carapari se distribuye en 2 paisajes fisiográficos. Las serranías y la llanura chaqueña. La sección de Carapari tiene como cantones a Itau, Sachapera y el Saladillo.

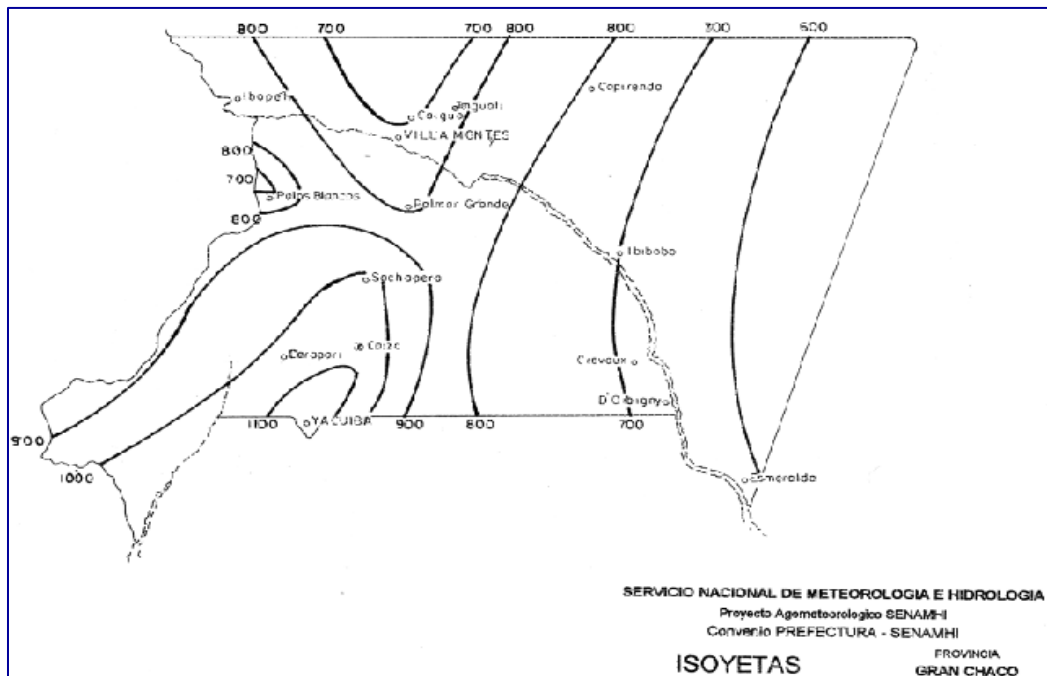


Fig. 3.7. Isoyetas de la Provincia Gran Chaco

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

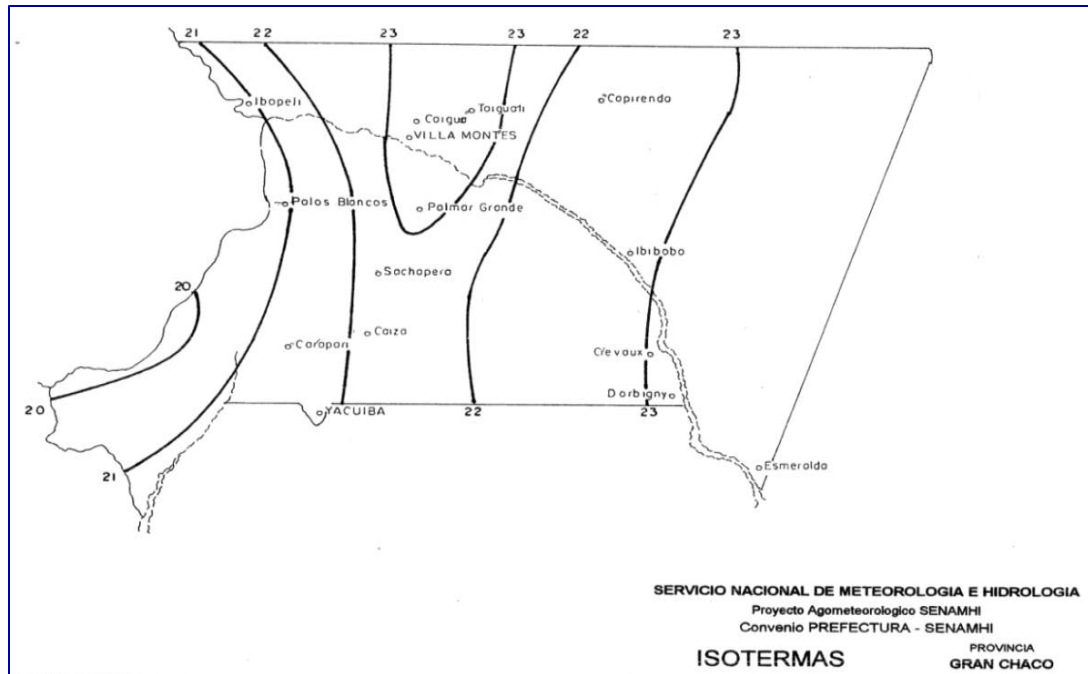


Fig. 3.8 Isothermas de la Provincia Gran Chaco

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

3.1.4.- CIUDADES DE LA PROVINCIA O'CONNOR

3.1.4.1.- CIUDAD DE ENTRE RIOS

Entre Ríos es la capital de la provincia de O'Connor, del departamento de Tarija de Bolivia. Se encuentra a 110 km de Tarija, la capital del departamento.

Se localiza a 1230 msnm, en la confluencia del río Tambo y uno de sus afluentes. La ciudad está bordeada por una sierra montañosa de norte a sur y emplazada en un valle con forma de triángulo alargado de 10 km de longitud.

La temperatura media anual de Entre Ríos es de 20,9 °C y las precipitaciones anuales rondan los 1300 mm, concentrándose fundamentalmente en verano, de enero a marzo.

Su población, según el censo de 2001, era de 4413 personas; en 2007 se ha elevado a aproximadamente 2800.

La región de Entre Ríos es uno de las principales zonas de asentamiento del pueblo

Guaraní, que han habitado la cuenca del Paraná desde hace miles de años.

La ciudad de Entre Ríos se encuentra ubicado entre las coordenadas $20^{\circ}51'57''$ - $21^{\circ}56'51''$ de latitud sud y $63^{\circ}40'23''$ - $64^{\circ}25'06''$ de longitud oeste.

La sección de Entre Ríos tiene como cantones a Salinas, La cueva, Chiquiaca, Suaruro, Ipaguazu, Chimeo, Tapurayu, San Diego, Huayco y Narváez.

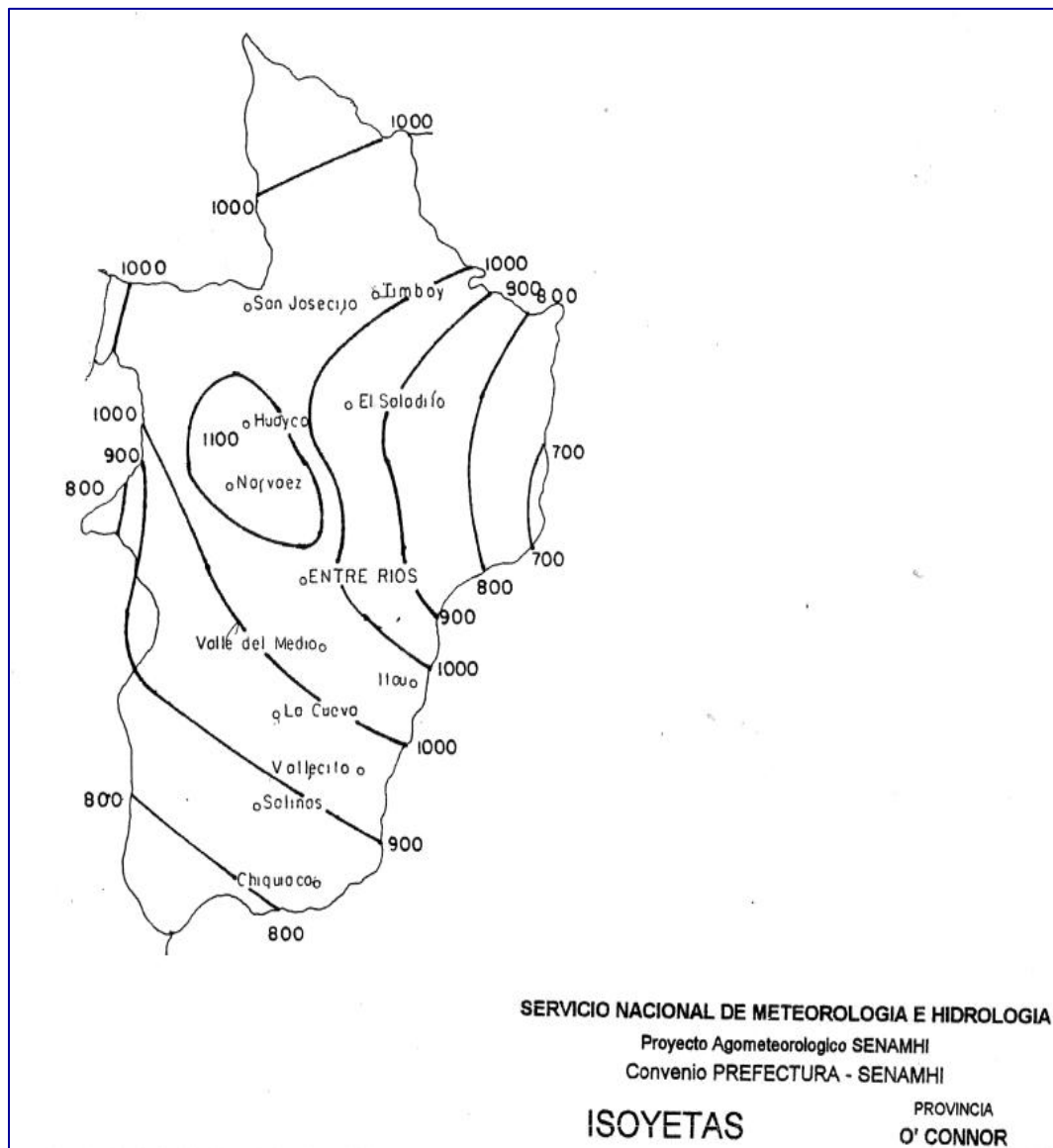


Fig. 3.9. Isoyetas de la Provincia O'Connor

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

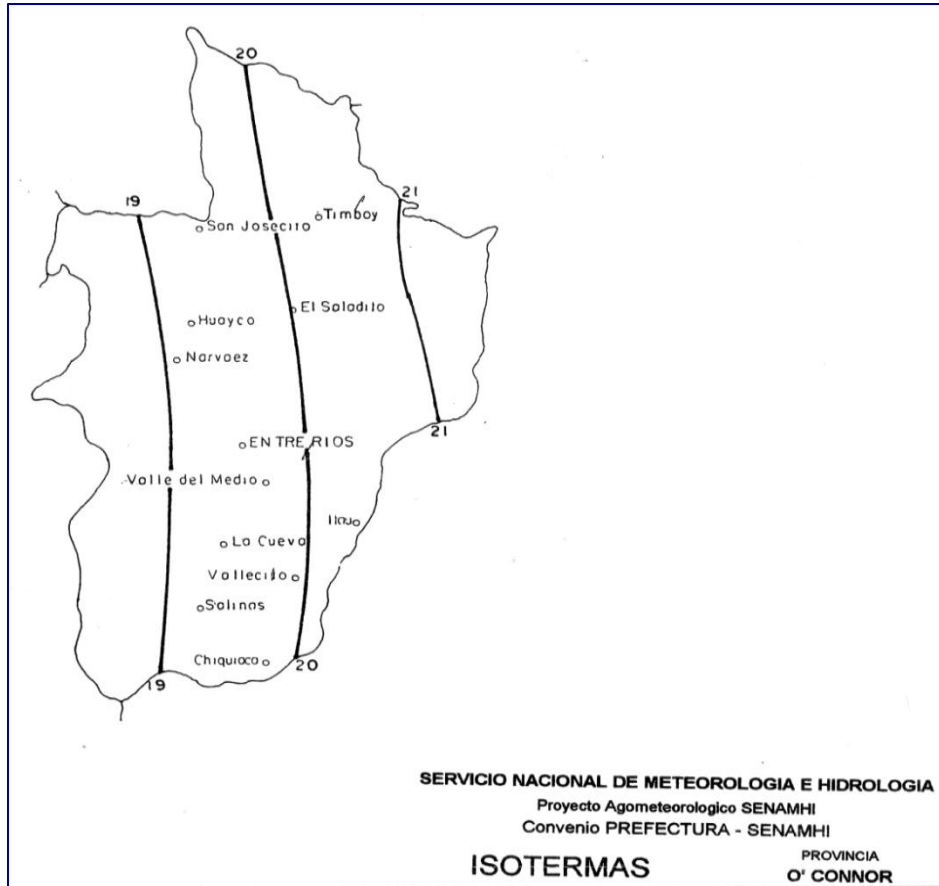


Fig. 3.10 Isothermas de la Provincia O'Connor

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

3.1.5.- CIUDADES DE LA PROVINCIA MENDEZ

3.1.5.1.- CIUDAD DE ISCAYACHI

Iscayachi es el lugar central de cantón Iscayachi en el distrito. El Puente esta en la provincia Eustaquio Méndez. La población de esta ciudad se encuentra en una altura de 2406 m.s.n.m. Esta en el punto medio del camino troncal entre Potosi y Tarija, distando a 187 km de la ciudad de Tarija. Esta ubicado geograficamente entre los $19^{\circ}40'15''$ – $21^{\circ}33'11''$ de latitud sud y entre los $64^{\circ}02'09''$ – $65^{\circ}30'01''$ de longitud oeste.

Iscayachi se Caracteriza por ubicarse en la zona andina del departamento de Tarija, esta zona se caracteriza por contar con los siguientes componentes:

La zona se encuentra entre los 2300 a 3600 m.s.n.m. Es una region de altas montañas, cerranias y planicies interandinas con clima frio y arido. Deste el punto de vista paisajistico



y ecológico, la region tiene la singular belleza típica de los ecosistemas de altura. En la zona se encuentra la reserva Biológica de Sama con humedades, lagunas de agua salada y variedad de fauna entre las que resaltaremos la población de garzas, gaviotas y patos. Además de llamas, vicuñas y ovejas. En esta zona se pueden encontrar hermosos tejidos artesanales en pelo de animales de belleza y coloridos impresionantes

El clima en el área debido a la altura es frío y seco, los cambios de temperatura entre el día y la noche son generalmente más bruscos que los cambios de temperatura entre temporada.

La temperatura media anual es de 11 °C y varía levemente a 6 °C en junio a julio y en 14 °C entre los meses de noviembre a marzo.

La precipitación anual es de solo 400 mm, con una marcada estación seca de abril a octubre, con precipitaciones mensuales inferiores a 15 mm, y en época húmeda que comprende de diciembre a febrero con 80 a 95 mm de lluvia por mes.

3.1.5.2.- CIUDAD DE EL PUENTE

El Puente es el lugar central del distrito El Puente en la provincia Eustaquio Méndez. La población se encuentra a una altura de 2335 m en la orilla derecha de río San Juan del Oro que lleva en el otro desarrollo al río Pilaya y más lejos se convierte en el río Pilcomayo.

Este municipio se encuentra ubicado entre las coordenadas de 21°15'01" – 20°32'44" de latitud sur y 65°12'54" – 64°29'54" de longitud oeste.

El Puente está en la parte del sur con respecto al altiplano boliviano en el margen de nordeste de cordillera de Lipez. El clima es semi-árido.

La temperatura de promedio media de la región está en aproximadamente 18°C y tiembla en el desarrollo del año entre poco menos de 14 °C en junio / julio y 21 °C en enero.

Las precipitaciones del año hacen apenas más que 400 mm y las precipitaciones mensuales son en la temporada seca de menos de 20 mm y consiguen sólo en el invierno que sus

valores estén un poco menos de 100 mm.

3.1.5.3.- CIUDAD DE SAN LORENZO

San Lorenzo se encuentra ubicado a 15 km al norte de la ciudad de Tarija, en la provincia Méndez, que pertenece a la zona de los valles.

Geográficamente se localiza con las coordenadas de $20^{\circ}57'02''$ – $21^{\circ}36'01''$ de latitud sur y $61^{\circ}18'01''$ – $62^{\circ}35'01''$ de longitud oeste. Al ser una zona topográficamente variada presenta altitudes variadas desde 1400 hasta los 1900 m.s.n.m.

El clima de la ciudad de San Lorenzo es templado y temporalmente húmedo con una temperatura media anual de 20°C .

Generalmente se presentan precipitaciones que varían de 500 a 800 mm/año. Según estudios tiene un nivel freático medio debido a las características del suelo.

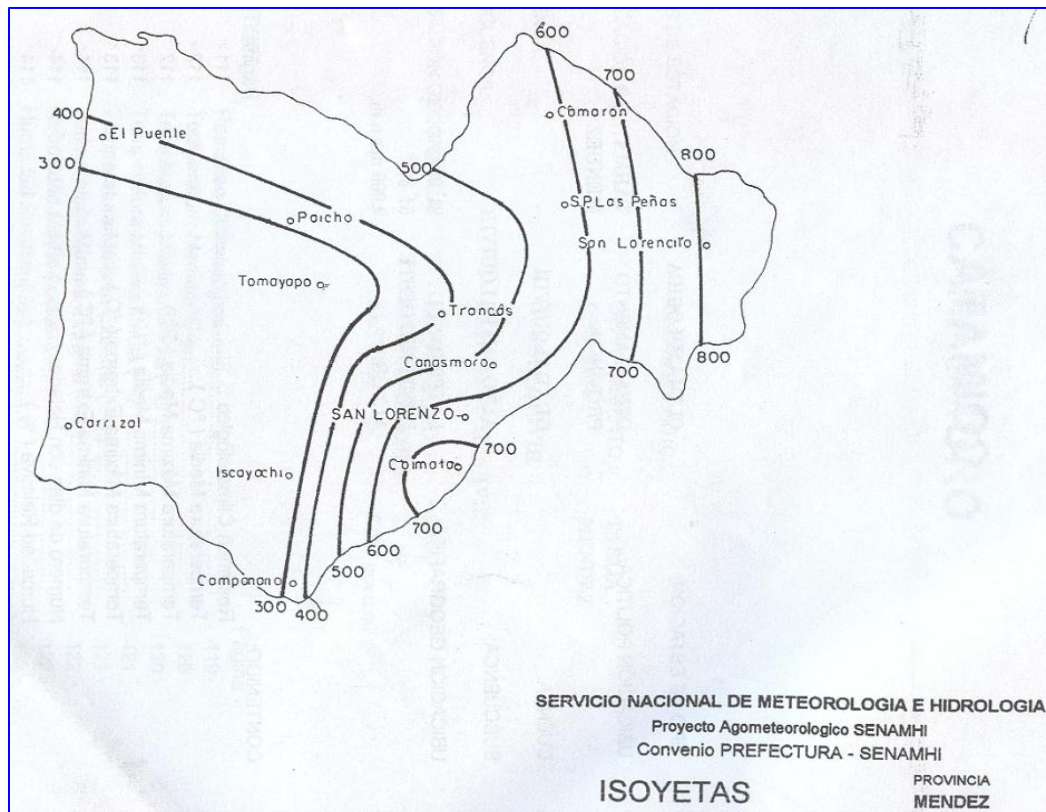


Fig. 3.11 Isoyetas de la Provincia Méndez

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

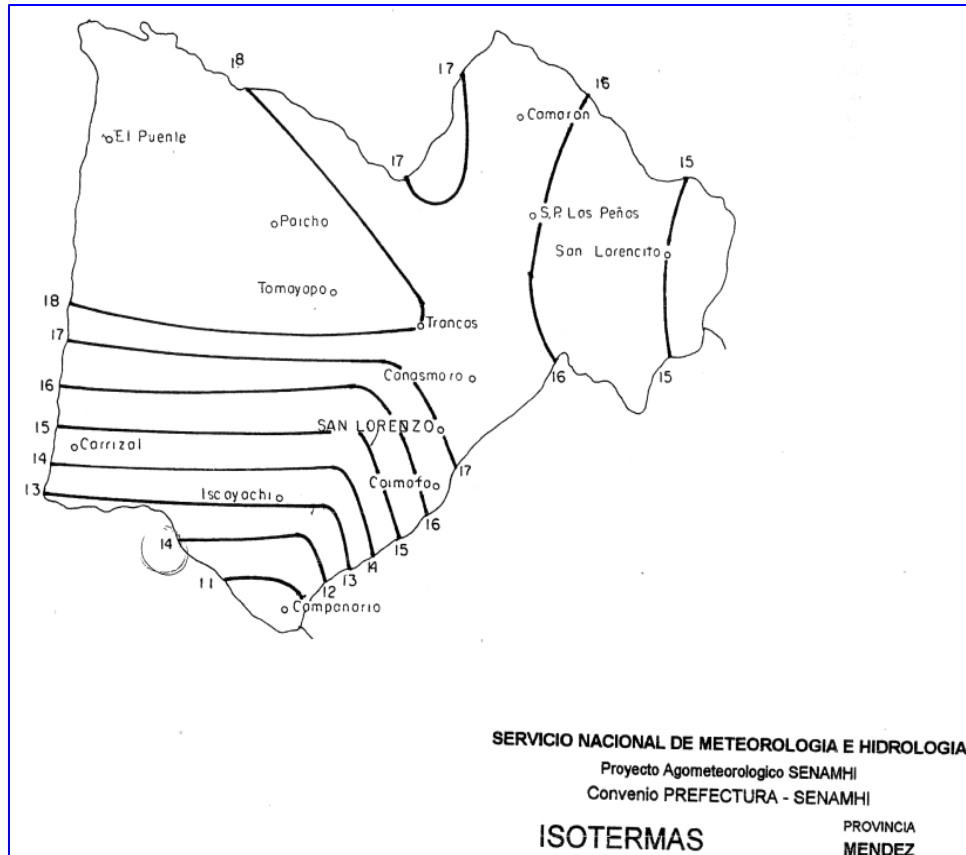


Fig. 3.12 Isoyetas de la Provincia Méndez

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI

3.1.6.- CIUDADES DE LA PROVINCIA AVILEZ

En esta provincia tenemos como poblaciones principales Juntas, Chocloca, Copacabana, Churquis, Tojo, Buena Vista, San Pedro, Palqui, Noquera y otros.

3.1.6.1.- CIUDAD VALLE DE LA CONCEPCION

El valle se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, es la primera sección de la provincia Avilés. Está situada en las coordenadas $21^{\circ}41'02''$ – $22^{\circ}25'45''$ de latitud sud y $64^{\circ}38'11''$ – $63^{\circ}42'18''$ de longitud oeste. A una altura promedio de 1200 – 1500 m.s.n.m.

Tiene una población de 12331 habitantes (Censo INE 2001). El valle de la Concepción se encuentra en la zona del valle central, que cuenta con un clima templado-semiárido y una temperatura promedio de 17.5°C .

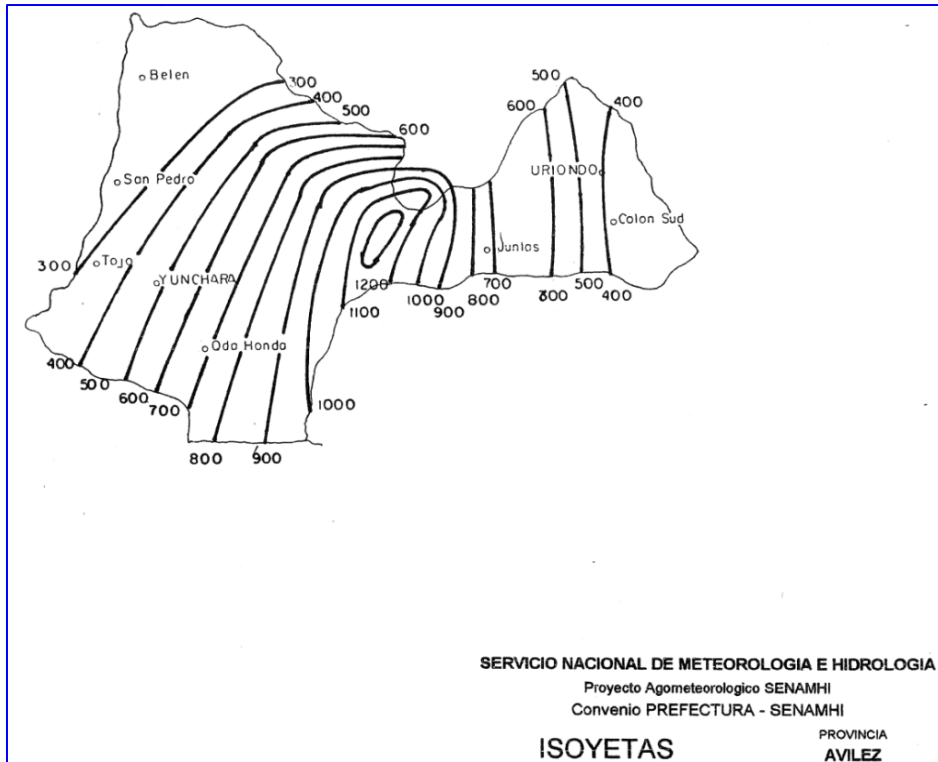


Fig. 3.13 Isoyetas de la Provincia Avilés

Fuente: Proyecto Agro Meteorológico SENAMHI

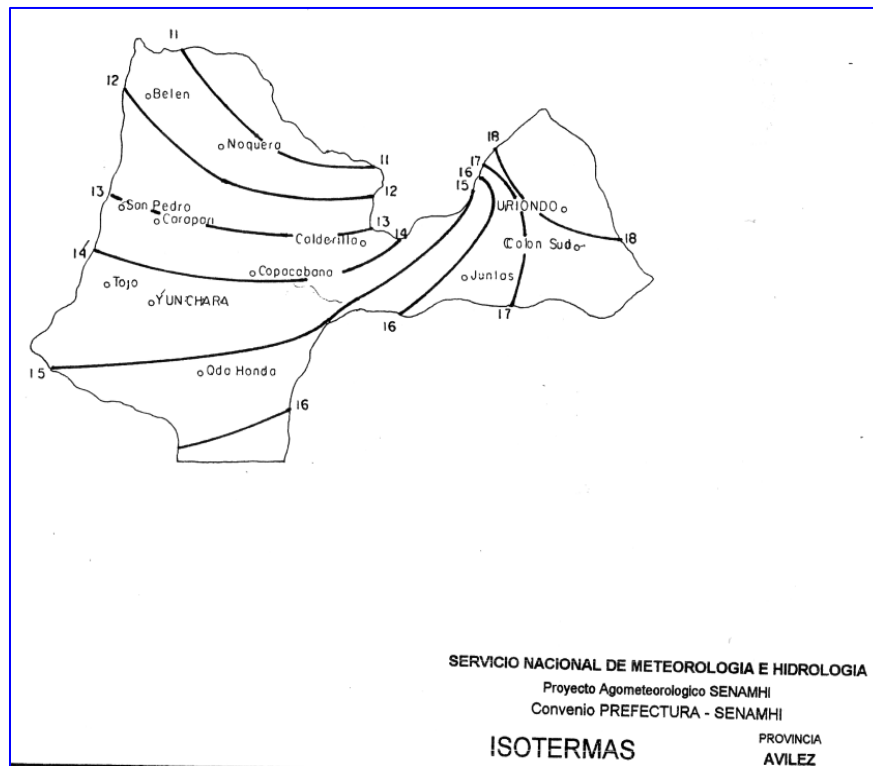


Fig. 3.14 Isotermas de la Provincia Avilés

Fuente: Proyecto Agro-meteorológico SENAMHI



3.2.- ZONIFICACIÓN PLUVIOMÉTRICA

Para una determinada estación genérica se usarán los siguientes símbolos:

h = Altura de lluvia anual en mm.

h_i = Altura de lluvia caída en el año i en mm ($i \leq i \leq n$).

n = Duración de años del periodo de observación.

h_{med} = Valores medios de la población "h"

$\sigma(h)$ = Desviación típica de la población "h".

$\sigma^2(h)$ = Varianza de la población.

$S(h)$ = Desviación típica de la muestra "h".

$S^2(h)$ = Varianza de la muestra "h".

k = número de estaciones de observación.

Se deducen los valores que asumen h_{med} ; $\sigma(h)$ y $\sigma^2(h)$ para cada pluviómetro y se observa las variaciones de estos, de estación en estación. Si se clasifican los valores de $S^2(h)$ y de h_{med} , tomando intervalos de clase y se caracterizan los pluviómetros correspondientes, según la clase y se caracterizan los pluviómetros correspondientes, según la clase a la que pertenecen por lo valores de sus $S^2(h)$ y de h_{med} .

La delimitación de las zonas pluviométricas se la efectúa a través de la prueba X^2 (chi-cuadrado) de la distribución de $S^2(h)$ con $(n-1)$ grados de libertad, dentro de la franja de control de 0.025 y 0.975 de probabilidad que definen las curvas:

$$\Rightarrow S^2_{0.025(h)} = \sigma^2(h) * \frac{0.025 * X^2}{n-1}$$

$$\Rightarrow S^2_{0.975(h)} = \sigma^2(h) * \frac{0.975 * X^2}{n-1}$$

Con:

$$\Rightarrow \sigma^2(h) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i * S^2(h)}{\sum_{j=1}^k n_i}$$



Siendo la varianza que caracteriza la zona pluviométrica, donde se agrupan los k pluviómetros. Si las k estaciones pertenecen a una misma zona pluviométrica, los k puntos definidos por las coordenadas $(n_i; S^2(h))$ deberán recaer en el interior de la franja de control.

Verificando dicha prueba se podrá admitir, desde el punto de vista estadístico que, se cumple que $\sigma'^2(h) = \sigma^2(h)$ y que las variaciones de $S^2(h)$ respecto de que $\sigma'^2(h)$, se deben a errores de muestreo, aceptándose, entonces que $\sigma(h)$ es constante en toda la zona.

Si los puntos ploteados no caen dentro las franjas se dividen en zonas que tengan varianzas parecidas y se encuentren geográficamente cerca y se vuelve a realizar los pasos citados anteriormente.

Se define una sola zona pluviométrica ya que, en el área, no hay algún accidente orográfico significativo que, permita una variación importante en las precipitaciones.

En el presente proyecto se presenta el cálculo de la zonificación realizada a las ciudades en estudio del departamento de Tarija, Para ver si sus precipitaciones medias mensuales son parecidas entre sí o existe algún accidente orográfico entre las estaciones en estudio. Esta zonificación se realizó teniendo en cuenta la cercanía geográfica a la ciudad de las estaciones pluviométricas y la similitud altitud de la estación escogida para la ciudad en estudio. (Ver anexo N°2).



CAPÍTULO IV

ESTUDIO DE ECUACIONES INTENSIDAD – DURACION - FRECUENCIA

4.1.- CONCEPTOS GENERALES:

La lluvia, como cualquier otro fenómeno, se presenta cíclicamente y su ocurrencia es de tipo aleatorio, es decir no es posible predecir su magnitud.

Por otra parte, se pueden relacionar los valores de la intensidad de la lluvia con su tiempo de duración y su periodo de ocurrencia, a partir de las curvas de intensidad de lluvia-duración-periodo de retorno.

Antes de entrar en materia es conveniente definir que es la intensidad de la lluvia. La intensidad de la lluvia se define como la cantidad de agua de lluvia que cae, en un punto, por unidad de tiempo, y ésta es inversamente proporcional a la duración de la tormenta. La duración de la tormenta es el tiempo que transcurre desde que inicia la precipitación de la tormenta hasta que ésta cesa.

Willems (2000) define a las curvas intensidad-duración-periodo de retorno (i-d-T) como la relación que existe entre la intensidad de lluvia media, su duración la frecuencia de ocurrencia (inverso del período de retorno); estas curvas son herramientas ampliamente utilizadas en la ingeniería hidrológica para fines de planeación, diseño, revisión y operación de los proyectos hidráulicos, así como para la protección de obras de ingeniería contra avenidas máximas (Koutsoyiannis et al, 1998).

De acuerdo con Smith (1993) el análisis de frecuencia de la precipitación es usado ampliamente para diseño de obras de ingeniería que controlan los escurrimientos generados por las tormentas.



Además, incluye los sistemas de alcantarillado pluvial, vertedores, puentes y sistemas de drenaje agrícola. Willems (2000) menciona también que la relación intensidad-duración-frecuencia es ampliamente usada para estimar las avenidas de diseño en los sitios donde se construirán las obras hidráulicas.

Ahora bien, el planteamiento de las primeras relaciones matemáticas datan desde el inicio de la década de los treinta, del siglo pasado, con los desarrollos y aplicaciones de Sherman (1931) y Bernard (1932). Desde entonces varios conjuntos de relaciones han sido desarrollados para varias cuencas hidrológicas del mundo.

Posteriormente, a partir de la década de los sesenta, la distribución geográfica de la relación entre la variables intensidad-duración-periodo de retorno (i-d-T) ha sido estudiada en varios países y algunos mapas han sido construidos para conocer la intensidad de la lluvia o la lámina de lluvia (esta última se define como la cantidad de lluvia acumulada durante una tormenta y se mide generalmente en milímetros) para varios períodos de retorno y duraciones.

De acuerdo con Koutsoyiannis et al (1998) en Estados Unidos de América los mapas han sido desarrollados desde 1961 por el US Weather Bureau y posteriormente por la NOAA para el Oeste, Este y Centro. Estos mapas han sido reproducidos en algunos manuales y libros de texto de hidrología como en Chow (1964), Linsley et al (1977), Viessman et al (1989), Ponce (1989), Maidment (1993) y Chow et al (1994).

Koutsoyiannis et al (1998) también menciona que en el Reino Unido e Irlanda los mapas han sido realizados por el Instituto de Hidrología y que mapas similares han sido construidos para Australia, India, Namibia e Italia.

Genovés y Pegoraro (2001) realizaron un estudio validando y ajustando las ecuaciones de Bell y Chen, para lluvias intensas generalizadas, con registros pluviométricos de

23 ciudades del estado de Sao Pablo, Brasil. En ambos casos se obtuvieron resultados satisfactorios.

4.2.- MODELOS MATEMÁTICOS PARA REPRESENTAR LAS CURVAS I-D-F

Las curvas de i-d-f también pueden expresarse como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de la lluvia de diseño, en una gráfica (Chow et al, 1994).

A continuación se presentan los modelos matemáticos más conocidos, a nivel mundial, que se utilizan para estimar las curvas de la Intensidad – Duración – Frecuencia. (I-D-F).

4.2.1.- ECUACIONES QUE RELACIONAN LA INTENSIDAD Y SU DURACIÓN

Una ecuación que relaciona la altura o lámina de lluvia, generada por una tormenta, con su duración, es:

$$\Rightarrow h_p = C * d^n$$

Dónde:

H_p = es la altura o lámina de lluvia registrada, en cm ó mm;

d = es la duración de la tormenta, en horas;

c = es un coeficiente; y n es un exponente positivo menor que la unidad y varía entre 0.2 y 0.5 (Ponce, 1989).


Ahora bien, se sabe que la intensidad y duración de una tormenta están inversamente relacionadas, por lo que de la ecuación anterior se puede obtener la intensidad de la lluvia diferenciando la altura de lluvia con respecto al tiempo. Al llevar a cabo este proceso se obtiene:

$$\Rightarrow \frac{dh}{dt} = i = C * n * d^{n-1}$$

Dónde:

i = es la intensidad de la tormenta, en mm/h.

Por su parte, simplificando la ecuación se obtiene:



$$i = \frac{\lambda}{d^n}$$

Dónde:

$\lambda = cn$; y $\eta = 1 - n$.

De acuerdo con aplicaciones de diversa cuencas hidrológicas del planeta, se sabe que "n" es menor que 1; por lo que también "η" también es menor que 1.

Por su parte, otro modelo que interrelaciona la intensidad de la lluvia y la duración ha sido desarrollado por Ponce (1989) y su estructura general está representada por:


$$i = \frac{\lambda}{d + \theta}$$


Dónde:

i= es la intensidad de la lluvia;

d= es la duración de la tormenta;

λ Y θ son parámetros que se determinan por análisis de regresión.


Un modelo general que combina las ecuaciones anteriores es el siguiente:


$$i = \frac{\lambda}{(d + \theta)^\eta}$$

Para $\theta = 0$, la ecuación se reduce a la primera ecuación; para $\eta = 1$ la ecuación se reduce a la segunda ecuación.

4.2.2.- ECUACIONES QUE ASOCIAN INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA

El modelo propuesto por Bernard (1932) relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno con una familia de curvas representada por la ecuación siguiente:


$$i = \frac{\lambda * T^\psi}{d^n}$$



Dónde:

i = Es la intensidad de la lluvia, en mm/h;


T = Periodo de retorno en años;

d = Es la duración de la tormenta, en min;


η , ψ y λ son parámetros que se determinan al ajustar los datos de la ecuación.

Por su parte, este tipo de ecuaciones que asocian las variables de la intensidad de la lluvia, su duración y el periodo de retorno han sido desarrolladas por autores tales como Sherman (1931), Wenzel (1982), Chow et al (1994), Koutsoyiannis et al (1998) y otros más.


Sherman (1931) propuso para la ciudad de Boston, USA el modelo representado por la expresión:


$$i = \frac{\lambda * T^\psi}{(d + \theta)^\eta}$$

Por su parte, Wenzel (1982) estimó los valores de los coeficientes η , θ y ψ . Para algunas ciudades de los Estados Unidos de América y para estimar la intensidad propuso la ecuación:



$$i = \frac{\lambda}{d^\eta + \theta}$$

Asimismo, el modelo propuesto por Chow et al (1994), el cual consiste en incluir el período de retorno T_r a la ecuación propuesta por Wenzel (1982), tiene la estructura matemática siguiente:


$$i = \frac{\lambda * T^\psi}{d^\eta + \theta}$$

El modelo propuesto por Koutsoyiannis et al (1998) fue ajustado para la ciudad de Atenas, Grecia y considera que la variable intensidad " i ", tiene una distribución doble exponencial o Gumbell, con el parámetro adimensional ψ constante e independiente de la duración, y el parámetro de escala varía con la duración " d " como $1/(d+\theta)^\eta$.

La ecuación que permite estimar la intensidad de lluvia está representada por la expresión:


$$i = \lambda * \left[\frac{\psi - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + \theta)^\eta} \right]$$

Dónde:

i = es la intensidad de la lluvia en mm/h;

T = Periodo de retorno en años;

d= es la duración de la tormenta, en horas;

ψ , η y θ son parámetros que varían con el lugar, y cuyos valores se estiman al ajustar los datos a la ecuación mediante aproximaciones sucesivas.

4.3.- COMPONENTES DE LAS CURVAS I-D-F

En este tipo de curvas, las intensidades de lluvia se representan en el eje de las ordenadas, mientras que las duraciones en el eje de las abscisas. Si se unen los puntos para cada una de las parejas de datos seleccionados, se obtendrá una curva que relaciona la intensidad de lluvia con su duración.

Por su parte, las curvas de intensidad de lluvia-duración-periodo de retorno, sirven de apoyo en la hidrología urbana para revisar o diseñar un sistema de alcantarillado pluvial.


Por lo general para ajustar los datos a este tipo de curvas se pueden utilizar métodos probabilísticos o bien por regresión lineal múltiple.

4.3.1.- PERIODO DE RETORNO Y FRECUENCIA

Para ajustar los datos, a los modelos que permite estimar los valores de las intensidades, es necesario definir previamente el periodo de retorno de cada uno de los datos registrados en las estaciones pluviográficas y pluviométricas.

El periodo de retorno se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual un evento de magnitud dada x puede ser igualada o excedida por lo menos una vez en promedio.

La expresión más común para estimar el periodo de retorno, a partir de valores de datos, es la desarrollada por Weibull:


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

Donde T_r es el periodo de retorno, en años; n el número total de datos de la muestra a analizar; y m el valor de rango de cada valor. El valor de rango se obtiene de los datos de altura de precipitación o de intensidad que han sido acomodados de mayor a menor, si es análisis de máximos, o de menor a mayor, si es de mínimos.

Si el objetivo es analizar los máximos de lluvia, se seleccionan las tormentas más intensas y/o cuantiosas de cada año, y de sus respectivas curvas masa se obtienen el máximo valor de altura de precipitación o de intensidad para cada intervalo

Una vez obtenidos los valores máximos por cada duración y por año, se acomodan de mayor a menor, asignando al valor más grande el rango $m=1$, al siguiente $m=2$ y al más pequeño el rango es $m=n$.

Asignado el rango de cada evento, se procede a estimar el periodo de retorno por la ecuación mostrada anteriormente

La frecuencia, es el número de veces que se repite una tormenta de características de intensidad y duración definida en un período de tiempo más o menos largo, generalmente en años, se expresa por su periodo de retorno.



4.3.2.- DURACIÓN DE LA LLUVIA

La duración, es el tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta, que varía según la distribución espacial.

4.3.3.- INTENSIDAD DE LA LLUVIA

La magnitud de la lluvia, es la lámina total ocurrida en el lapso de duración de la tormenta, una forma de definir a la magnitud de la lluvia es mediante la intensidad por lo tanto:

La intensidad, es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. De las tormentas interesa la intensidad máxima que se haya presentado. Es decir, la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo.

4.4.- DESARROLLO DE LAS METODOLOGIAS PROPUESTAS

4.4.1- PROCESO DE RECOLECCION DE EVENTOS EXTREMOS DE LLUVIAS:

La recolección de los datos de las intensidades máximas de lluvia se lleva a cabo con el procedimiento que se describe a continuación:

- ✓ Se selecciona un conjunto de duraciones asociadas a cortas duraciones y que por lo regular son 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 min.
- ✓ De los registros anuales se eligen las 10 tormentas de mayor magnitud.
- ✓ Se selecciona la intensidad máxima de lluvia para las 10 duraciones de interés.
- ✓ Este proceso se realiza para cada año de registro disponible.
- ✓ Se obtiene un registro que contiene los valores de las intensidades máximas de lluvia para diferentes duraciones y durante un periodo de tiempo.
- ✓ A cada conjunto de datos, asociados a una duración, se le asigna su periodo de retorno (T) a partir de la ecuación.
- ✓ En la fase final, con el registro de datos obtenidos se procede a estimar el valor de los parámetros λ , ψ y η de la ecuación, con el método de la regresión lineal múltiple.

- ✓ La información para generar las curvas IDF, se resumió en cuadros donde aparecen, para cada estación, las intensidades máximas de precipitación en mm/h, para las distintas duraciones:

Tabla 4.1 Intensidades máximas anuales de precipitación (mm/h), para cada duración.

Año	Duraciones (h)				
	1	2	6	12	24
1	I_{11}	I_{21}	I_{61}	I_{121}	I_{241}
2	I_{12}	I_{22}	I_{62}	I_{122}	I_{242}
3	I_{13}	I_{23}	I_{63}	I_{123}	I_{243}
N	I_{1n}	I_{2n}	I_{6n}	I_{12n}	I_{24n}
Media	$\bar{X}_1 \dots \dots \dots \bar{X}_n$				
Desviación estándar	$S_1 \dots \dots \dots S_n$				

Fuente: www.monografias/hidrología/tormentasdediseño/es/com

4.4.2.- DETERMINACIÓN MATEMÁTICA DE LAS CURVAS IDF

Et al.- El término “et al” se refiere a un grupo de investigación.

Chow et al (1994), señalan que las curvas IDF no solo se construyen de manera gráfica, sino que también pueden expresarse como ecuaciones con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica.

Al respecto, el planteamiento de las primeras relaciones matemáticas, que modelaron dichas curvas, data del inicio de los años treinta en el siglo pasado, y fueron realizadas por Sherman (1931) y Bernard (1932). Estos modelos condujeron a numerosos investigadores del mundo a generar nuevas expresiones matemáticas que representan las curvas IDF (Linsley et al, 1949; Bell, 1969; Wenzel, 1982; Chen, 1983; Varas y Sánchez ,1983; Aparicio, 1997; Koutsoyiannis et al, 1998).

$$i = \frac{K * T^m}{(D + b)^n}$$

Modelo Propuesto por Sherman (1931)



→
$$i = \frac{K * T^m}{D^n}$$
 Modelo Propuesto por Bernard (1931)

→
$$i = \frac{a}{D + b}$$
 Modelo Propuesto por Talbot et al, (1949), para duraciones entre 5 y 20 minutos

→
$$i = \frac{c}{D^n}$$
 Modelo Propuesto por Linsley et al, (1949), para duraciones superiores a 60 minutos.

→
$$i = \frac{K}{D^n + b}$$
 Modelo Propuesto por Wenzel, (1982)

→
$$i = i_1^T * \frac{a}{(D+b)^c}$$
 Modelo Propuesto por Chen (1943).

→
$$i = \frac{K * T^m}{D^n + b}$$
 Modelo Propuesto por Chow et al, (1998)

→
$$i = K * \left[\frac{m - \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)}{(D+b)^n} \right]$$
 Modelo Propuesto por Koytsoyiannis et al, (1998).

Para la elaboración de las ecuaciones matemáticas, que represente la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones, para cada una de las estaciones, se optó por la expresión propuesta por Bernard (1932) y validada por Aparicio (1997) para zonas de los valles, definida de la siguiente manera:

→
$$i = \frac{K * T_{retorno}^m}{D_{lluvia}^n}$$

Dónde:

i = Intensidad de precipitación (mm/hrs).

T = Periodo de retorno (años).

D = duración (horas);

K, m, n = parámetros a estimar a través de un análisis de regresión lineal múltiple.



4.4.3.- PROCEDENCIA DE LOS MODELOS DE LAS ECUACIONES IDF:

4.4.3.1.- MODELO DE BERNARD

Este modelo fue desarrollado para la ciudad de Sevilla–España por un cuerpo de ingenieros hidrólogos en el año 1998 y aplicado a ciudades americanas de similar característica climática. Este modelo fue elaborado en especial para las zonas de los valles. Y que actualmente es aplicado en muchas ciudades debido a su alta correlación.

El clima de Sevilla es mediterráneo levemente continentalizado, con precipitaciones variables, veranos secos muy cálidos e inviernos suaves. La temperatura media anual es de 18,6 °C, una de las mayores de Europa. Enero es el mes más frío con una media de temperaturas mínimas de 5,2 °C; y julio es el mes más caluroso, con una media de temperaturas máximas diarias de 36,3 °C. Se superan los 45 °C varias veces al año.

Las precipitaciones, con una media de 534 mm al año, se concentran entre octubre y abril; siendo diciembre el mes más lluvioso, con 95 mm. Hay un promedio de 52 días de lluvia al año, 2898 horas de sol y varios días de heladas.

En el invierno de 2005 llegaron a contabilizarse cerca de 20 días de heladas, con mínimas de hasta -5,8 °C durante una ola de frío. En el área metropolitana de Sevilla las temperaturas mínimas bajaron aún más el 28 de enero, registrándose -6.8 °C en la estación meteorológica de Sanlúcar la Mayor y hasta -8.2 °C en la de Aznalcázar, ambas de la Junta de Andalucía.

4.4.3.2.- MODELO DE KOYTZOYIANNIS ET AL

Este modelo fue creado y aplicado en la ciudad de Atenas y posteriormente al obtener buenos resultados también fue aplicado a la ciudad de Esparta – Grecia.

Con respecto al clima en Grecia. Estas ciudades tienen un clima seco además de estar en una zona con clima generalmente frío donde las temperaturas en verano y primavera llegan a adquirir los 21 °C. Y en invierno alcanzan los -25 °C. Una recomendación de la



organización Koytsoyiannis et al sobre el modelo propuesto es que se aplique el mismo si se tiene características similares a las ciudades ya mencionadas donde fue aplicado y para que sea válido el modelo su correlación debe ser mayor al 90 % en comparación con las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia obtenidas vía datos pluviográficos usando como aplicación de preferencia la metodología de Gumbell.

4.4.3.3.- MODELO DE SHERMAN

Este modelo se creó en la ciudad de Miami – EEUU y fue aplicado en las ciudades chilenas de Antofagasta, Santiago, Concepción y Iquique – Chile donde los resultados obtenidos tenían un alta correlación por lo cual las ecuaciones fueron aceptadas.

Todas estas ciudades tienen un clima aproximadamente parecido entre ellas. Por ejemplo la ciudad de Iquique - Chile que tiene un clima de la zona es desértico costero, similar al de Arica, que es influenciado por la masa marina. Se caracteriza por los nublados abundantes, baja oscilación y amplitud térmica en otoño hasta invierno y parte inicial de la primavera, pero eso cambia en verano, cuando las temperaturas llegan a duplicarse y la oscilación aumenta, siendo la ciudad costera más calurosa y húmeda de Chile en la estación estival, potenciada por el farellón costero que convierte a la ciudad en una verdadera olla, concentrándose la humedad proveniente de la evaporación del mar. La ciudad recibe algunas precipitaciones en verano, especialmente entre Enero y Febrero debido a la Alta presión de Bolivia llamada comúnmente y para muchos mala aceptación invierno boliviano , Invierno Altiplánico o concretamente científico. Sin duda Iquique es una ciudad donde las temperaturas no son tan altas, pero es una de las ciudades donde el sol es verdadero dañino. Las máximas en verano son de 26 °C y en invierno de 16 °C a 18 °C.

4.4.3.4.- MODELO DE WENZEL

Este modelo fue creado para las ciudades de Estados Unidos por Wenzel, como una alternativa para las zonas que tienen alturas mayores a 2000 m.s.n.m. Es así que se aplicó a ciudades como Estocolmo – Suecia, Lisboa, Braga – Portugal y Quito, Guayaquil – Ecuador; con resultados donde su correlación alcanzo de 70% a 87 % de similitud en relación a los valores reales, Ahora bien en estas ciudades generalmente predomina el



clima frío. Por eso se recomienda que el modelo se ajuste más a ciudades de altura con respecto a nivel del mar.

4.4.3.5.- MODELO DE CHOW ET AL

Este modelo fue creado en la ciudad de Chicago y fue aplicado a zonas que tienen permanentemente climas fríos como es el caso de Chicago, es así que también se aplicó a las ciudades de París –Francia, Milán y Turín - Italia.

Hablando sobre el clima. Tenemos que el clima en Chicago se define como clima continental y por consiguiente es muy variado, ya que en verano se pueden registrar temperaturas máximas entre 15 y 25 °C, y mínimas desde -5 hasta 5 °C. En invierno las temperaturas máximas abarcan desde los -15° hasta los 5 °C y las mínimas desde los -25 °C hasta los -15 °C. El lago sólo atempera el clima levemente.

Las precipitaciones máximas se concentran en los meses de primavera y verano, siendo agosto el mes más húmedo en general; aunque las precipitaciones están repartidas a lo largo de todo el año. Las nevadas o ventiscas son frecuentes durante finales del otoño, y el invierno y pueden ser muy intensas, al encontrarse en pleno subcontinente norteamericano, y cerca de las tierras de Canadá. La recomendación sobre el modelo de Chow et al es de preferencia para ciudades altiplánicas.

4.4.3.6.- MODELO DE TALBOT

Este modelo sirve para lluvias de corta duración. Tiene una limitante que es para duraciones de 5 minutos a 20 minutos. Para lo cual se ha demostrado que esta ecuación arroja buenos resultados. Este modelo fue aplicado a las ciudades de Chicago, New York, y Los Ángeles obteniendo resultados satisfactorios.

Debido a su limitante de la duración, este modelo no está en función del clima ni tampoco de la altitud de la ciudad en estudio. Por lo tanto es de aplicación general sobre todo en el alcantarillado pluvial debido a que analiza las intensidades para duraciones cortas.

4.4.4.- MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE (BERNARD)

El método más común para estimar la intensidad de lluvia (i) en función de su duración (d) y del periodo de retorno (T_r) está representado por la función matemática del tipo siguiente:

$$i = \frac{K * T_r^m}{d^n}$$

Dónde:

i = Intensidad de la lluvia en mm/hrs.

T_r = Es el periodo de retorno en años.

D = Es la duración de la tormenta, en min.

K , m y n son parámetros que se calculan al ajustar los datos a la ecuación.

Por su parte con el método de regresión lineal múltiple se procede a estimar los valores de los parámetros k , m y n . Para llevar a cabo tal proceso la ecuación se transforma a una forma lineal tomando logaritmos y obteniendo la expresión siguiente:

$$\log I = \log K + m * \log T - n * \log D$$

O bien:

$$y = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2$$

Dónde:

$$Y = \log I \quad a_0 = \log k$$

$$X_1 = \log T \quad a_1 = m$$

$$X_2 = \log D \quad a_2 = -n$$

Para calcular los valores de los parámetros se resuelve la siguiente ecuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum Y = A * n + B * \sum X_1 + C * \sum X_2 \\ \sum X_1 * Y = A * \sum X_1 + B * \sum X_1^2 + C * \sum X_1 * X_2 \\ \sum X_2 * Y = A * \sum X_2 + B * \sum X_1 * X_2 + C * \sum X_2^2 \end{array} \right.$$



Donde "n" es el número de sumandos.

4.4.5.- MÉTODO DE TALBOT:

Para calcular la Ecuación Intensidad – Duración – Frecuencia es la fórmula empírica propuesta por Talbot que relaciona la intensidad máxima y la duración, para un periodo de retorno dado, que se expresa como:

$$\Rightarrow i = \frac{a}{b + D}$$

Dónde:

I = Intensidad máxima en mm/hora

a y b = Parámetros

D = Duración de la precipitación en minutos.

Los parámetros a y b se obtienen aplicando una regresión por mínimos cuadrados.

Otra expresión matemática similar a la de talbot y usada frecuentemente en proyectos es la fórmula que relaciona la intensidad con la duración para un periodo de retorno dado, que además servirá para validar los resultados es la que se muestra a continuación:

$$\Rightarrow i = \frac{a}{b + D^c}$$

Los parámetros a b y c fueron calculados por la empresa eléctrica ENDE.

Ahora desarrollando el método de Talbot tenemos:

$$\Rightarrow i = \frac{a}{b + D} \quad \Leftrightarrow \quad D = a * \frac{1}{i} - b$$

Sí $\Rightarrow Y = D$ $\Rightarrow X = \frac{1}{i}$ $\Rightarrow A = a$ $\Rightarrow B = -b$

Se tiene: $\Rightarrow Y = A * X + B$

Para determinar los parámetros A, B se deben resolver las ecuaciones de mínimo

cuadráticas que son las siguientes:

$$\Rightarrow \sum Y = A * n + B * \sum X ; \Rightarrow X * Y = A * \sum X + B * \sum X^2 ;$$

Y de esta forma tendremos todos los coeficientes para la ecuación Intensidad – Duración – Frecuencia de la zona en estudio en función del periodo de retorno.

4.4.6.- METODO DE SHERMAN:

$$\Rightarrow i = \frac{\lambda * T^\psi}{(d + \theta)^n}$$

Este modelo parte del modelo de Sherman y tiene la misma metodología de cálculo pero además se incluye un coeficiente que ayuda a ajustarse de mejor manera a la curva de Intensidad – Duración – Frecuencia.

Este coeficiente llamado “tita” se lo obtiene ajustando las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a una recta, donde el valor de “tita” se le debe sumar a la duración de la lluvia y en el momento en que la curva tiene la correlación lineal de uno se deja de iterar los valores de tita y se saca el promedio donde este promedio debe ser un número entero para la zona en estudio.

Los otros modelos como ser el modelo de Koytsoyiannis, el modelo de Chow et al y el modelo de Wenzel serán desarrollados directamente en el software puesto que estos modelos fueron desarrolladas en lugares altiplánicos. Las metodologías de cálculo de las ecuaciones Intensidad – Duración Frecuencia se pondrán observar en la bibliografía del presente proyecto.

4.4.7.- ESTIMACION DE LA ECUACION INTENSIDAD – DURACION PARA UN DETERMINADO PERIODO DE RETORNO

Bien visto los modelos anteriores también se puede calcular de manera rápida la ecuación de la intensidad en función de la duración de la lluvia para un respectivo periodo de retorno



con la siguiente expresión:

$$\longrightarrow i = a * d^b$$

Donde: i = intensidad en (mm/hrs).

d = Duracion de lluvia en (min).

a, b = Son coeficientes a calibrar para un determinado periodo de retorno.

aplicando logaritmos a ambos miembros para bajar el coeficiente "b" tenemos:

$$\longrightarrow \log i = \log(a * d^b)$$

desarrollando la ecuacion mediante las propiedades de los logaritmos tenemos que:

$$\longrightarrow \log i = \log a + b * \log d$$

haciendo un cambio de variable a la ecuacion obtenemos:

$$\text{Sea } \longrightarrow Y = \log i$$

$$\text{Sea } \longrightarrow X = \log d$$

Donde los valores de intensidad estarán en (mm/hrs) y la duración en (min) por lo cual la expresión queda de la siguiente forma:

$$\longrightarrow Y = \log a + b * X$$

Se realiza un cambio de variable parecido para los coeficientes a calibrar para lo cual se tiene la siguiente expresión:

$$\longrightarrow Y = A + B * X$$

$$\text{Dónde: } A = \log a; \quad B = b;$$

Ahora podemos observar que la expresión inicial se volvió lineal por lo cuál para determinar los coeficientes A y B se resuelve el siguiente sistema de mínimos cuadrados:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum Y = A * n + B * \sum X \\ \sum (Y * X) = A * \sum X + B * \sum X^2 \end{array} \right.$$

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones se debe reemplazar el cambio de variable hecho anteriormente para así hallar los verdaderos coeficientes es decir:

$$\Rightarrow a = 10^A \quad \Rightarrow b = B$$

Y de esta forma se hallan los coeficientes “a” y “b” que pertenecen a un determinado periodo de retorno. Este modelo no engloba a la familia de curvas como los modelos de Bernard, Sherman propuestos en el presente proyecto.

4.4.8.- ECUACIONES PARA VALIDAR LOS MODELOS DE BERNARD Y SHERMAN EN LA CIUDAD DE TARIJA

4.4.8.1- ECUACIÓN DEL ALCANTARILLADO PLUVIAL

$$\Rightarrow I = \frac{197.2 * T^{0.1457}}{(t + 3)^{0.443}}$$

Dónde: I = Intensidad en (mm/hrs).

T = Periodo de retorno en (años).

t = Duración de la lluvia en (min).

La ecuación mostrada anteriormente fue elaborada por el grupo de ingenieros hidrólogos en La Paz pertenecientes a la consultora MTCB en un estudio hecho a nivel nacional denominado “Estimación de ecuaciones matemáticas de Intensidad – Duración – Frecuencia para las principales ciudades de Bolivia” entre estas ciudades podemos nombrar a La Paz, Santa Cruz, Trinidad, Tarija, El Alto, Sucre, Oruro, Potosí, Cobija y Cochabamba. Así por ejemplo mostraremos algunas ecuaciones extraídas de este estudio:

$$\Rightarrow I = \frac{209.8 * T^{0.504}}{t^{0.637}} \quad \text{Para la Ciudad de Trinidad}$$

$$\Rightarrow I = \frac{393.70 * T^{0.3556}}{t^{0.7016}} \quad \text{Para la ciudad de Santa Cruz}$$

$$\begin{aligned} & \Rightarrow I = \frac{101.3006 * T^{0.2897}}{t^{0.6670}} \quad \text{Para la ciudad de El Alto} \\ & \Rightarrow I = \frac{180.2457 * T^{0.33096}}{t^{0.70310}} \quad \text{Para la ciudad de Sucre} \end{aligned}$$

4.4.8.2.- ECUACIÓN REALIZADA POR LA EMPRESA ELECTRICA ENDE

$$\Rightarrow I = \frac{A}{(t + B)^C}$$

Dónde: A, B y C son parámetros de ajuste de la función adoptada.

t = duración del evento en minutos.

I= Intensidad en (mm/hrs).

El ajuste para las recurrencias que van desde 2 y hasta 50 años ha tomado como punto de referencia el trabajo realizado por el Ing. César Litwin (Consultora Berger, "Proyecto de desagües pluviales de las Avenidas Chaco y Mc Lean para la ciudad de Cochabamba", Programa Municipios, 2002), mientras que la función para TR = 100 años ha sido calibrada con el Programa Solver de Excel (Microsoft Corp.), y sus resultados se presentan en la tabla siguiente:

T	A	B	C
2	668	9.4	0.9
5	761	4.31	0.8709
10	828	0.483	0.8584
20	1016.77	-1.3066	0.8681
50	1312.19	-3.3982	0.884
100	1523.37	-4.9508	0.8892

Tabla 4.2 Coeficientes de la ecuación de ENDE

Fuente: Proyecto elaborado por la empresa eléctrica ENDE

Otra forma que emplearemos para validar los coeficientes calculados mediante los modelos Bernard, Sherman para la ciudad de Tarija será la utilización de bandas pluviográficas. En nuestro caso existen las estaciones pluviográficas de El Tejar y AASANA en el aeropuerto de la ciudad. (Ver anexo N° 10)

CAPÍTULO V

INGENIERIA DEL PROYECTO

5.1.- ESTUDIO ESTADÍSTICO:

Cuando disponemos de series pluviométricas largas (en General, de más de 20 años) podemos calcular la probabilidad que existe de las precipitaciones de los próximos años superen un determinado valor, o al revés, qué precipitación se supera (por ejemplo) un 10% de años.

Este cálculo puede realizarse con series de precipitaciones anuales, mensuales o diarias máximas. Por ejemplo, calcularíamos, respectivamente, que probabilidad existe de que se produzca un precipitación anual mayor de 950 mm/año, que el próximo mes de abril se superen los 140 mm o bien que el día más lluvioso de próximo año se recojan más de 65 mm/día (O inversamente: que precipitación anual, mensual o diaria máxima se alcanzara o superara con una probabilidad del 2 %). En cualquiera de los casos, debe ajustarse la serie de datos a una ley estadística (Gauss, Galton, Gumbell, Log- Pearson tipo III; Ver anexo N°3 y anexo N°4).

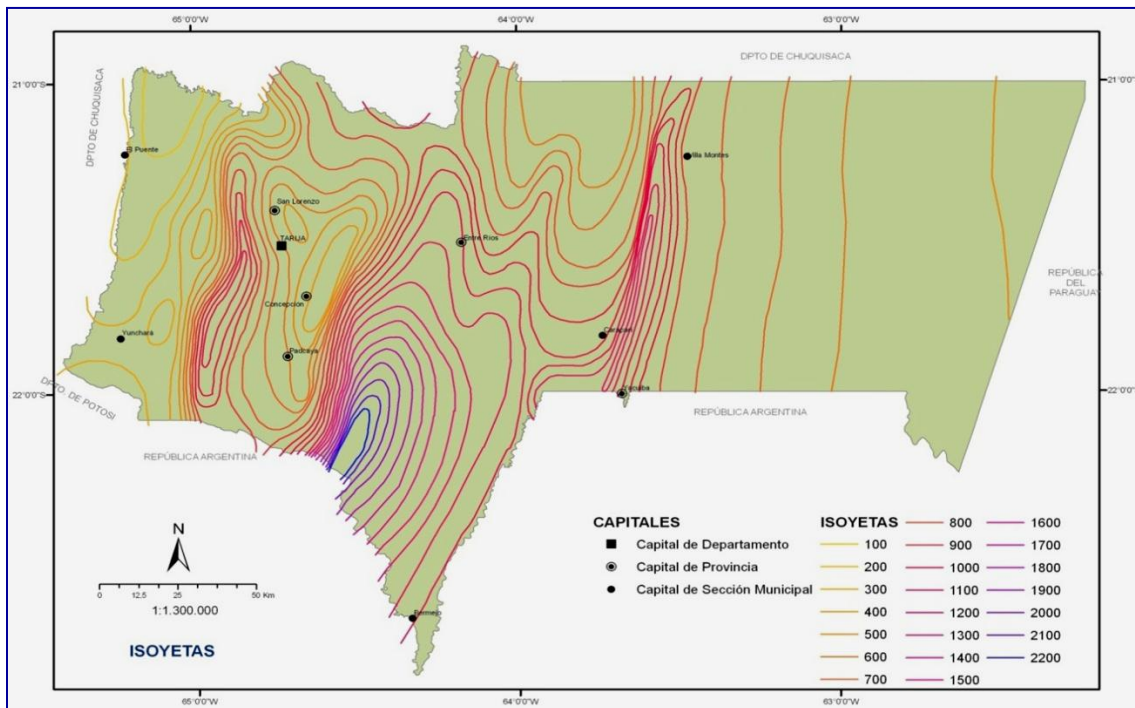


Fig. 5.1 Mapa de Isoyetas a nivel departamental

Fuente: Congreso de Riego Tarija Octubre - 2011



5.2.- ESTIMACIÓN DE CURVAS “P-D-F” PARA LAS PRINCIPALES CIUDADES Y POBLACIONES DEL DEPARTAMENTO DE TARIJA

Previo a la estimación de las Curvas Precipitación – Duración – Frecuencia se determinó para cada estación en estudio la curva doble masa mostrada en el anexo N°5 para así ver la confiabilidad de los datos con relación a una estación patrón. Posteriormente a este cálculo se hizo también la prueba de homogeneidad de los datos de eventos extremos que se puede observar en el anexo N° 6. Donde se dio un nivel de significancia del 5 %. Para así determinar el V_{crit} y ver si la hipótesis es válida o no es válida. Pero luego de realizar todas estas pruebas pudimos comprobar que los datos son válidos para el presente proyecto.

5.2.1.- CRITERIO DE LA ELECCIÓN DE “ α ” Y “ β ”

Para el desarrollo de las ecuaciones IDF, previo a esto se estimó las lluvias máximas diarias y horarias mediante la metodología de Gumbell, esto es:

$$\Rightarrow h_{dT} = Ed * (1 + kd * \log(T))$$

$$\Rightarrow h_{tT} = Ed * \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta * [1 + Kd * \log(T)]$$

h_{dT} = Altura de lluvia Máxima Diaria

E_d = Moda Ponderada

K_d = Característica Ponderada

T = Periodo de Retorno

h_{tT} = Altura de lluvia Máxima Horaria

t = Tiempo de Duración de la Lluvia

β = Constante que en nuestro medio se adopta generalmente 0.2

α = Equivalente de lluvia Diaria que depende de la Magnitud de la cuenca

5.2.1.1.- EQUIVALENTE DE LLUVIA DIARIA “ α ”

Según la bibliografía revisada existe un criterio para adoptar el valor de “ α ”



- * Para $A_c > 20 \text{ km}^2$ $\alpha = 12 \text{ hrs}$
- * Para $A_c < 20 \text{ km}^2$ $\alpha = 2 \text{ hrs}$

El coeficiente “ α ” en si es la duración máxima que tubo lluvia en un día, por lo tanto este valor se lo puede medir en función a un registro de datos pluviográficos. Según lo averiguado en el SENAMHI se constató en Tarija el 2 de febrero del 2000 una lluvia concentrada de 8 a 9 hrs donde debido a evento ocurrió el colapso el puente de Santa Ana. Bien pero también nos informaron que la lluvia puede alcanzar una duración de hasta 18 hrs pero considerando las lluvias bajitas como las lloviznas y no a una verdadera tormenta. Pero generalmente una tormenta aquí en Tarija dura de 2 a 3 hrs.

El equivalente de lluvia diaria depende también de las características de la precipitación en la zona, que puede influir en la duración máxima de una lluvia en la zona. Por lo tanto en función a la bibliografía y por lo averiguado por el SENAMHI se considero el valor de 12 hrs para “ α ” como el critico. Ahora bien respetando el criterio de otros ingenieros que optan por adoptar como valor de $\alpha = 18 \text{ hrs}$, $\alpha = 22 \text{ hrs}$ y inclusive $\alpha = 24 \text{ hrs}$. Donde este criterio no es compartido por mi persona porque una lluvia nunca duro 22 hrs. Pero algo importante que cabe notar, es que mayor valor de la altura de lluvia horaria es menor y viceversa, esto se debe a que es inversamente proporcional por lo tanto se respeta el valor de “ α ” adoptado en el proyecto.

5.2.1.2.- GRADIENTE DE PRECIPITACIÓN “ β ”

El valor de “ β ” es una pendiente o gradiente de la precipitación, mientras el valor de β entonces la pendiente es más parada por lo tanto la altura de lluvia máxima horaria es menor y las curvas PDF tendrán a ser una recta. La experiencia nos ha demostrado la variación de los valores de “ β ” entre 0.2 a 0.3, para el caso de nuestro estudio y por lo que se ha demostrado que para cuencas de Bolivia $\beta = 0.2$ y también por lo visto en muchos proyectos se adoptó este valor.

Ahora bien el comportamiento de esta ecuación es razonable hasta un límite inferior de mayor a 2 hrs. En el caso de las lluvias con tiempos menores a 2 hrs. Se obtiene del



método gráfico donde se grafica las alturas de precipitación con tiempos menores a 2 hrs. Se obtiene del método gráfico donde se grafica las alturas de precipitación con sus respectivos tiempos y periodos de retorno en un papel logarítmico, tal y como se muestra en la gráfica de la parte de anexos.

Después se procedió a determinar las Curvas Precipitación – Duración – Frecuencia mediante la metodología de Gumbell. Debido a que este modelo se recomienda más para los eventos extremos es así que calculamos las alturas de lluvia diaria para un periodo de retorno determinado. Y posterior a este cálculo se determinó la altura de lluvia horaria donde los coeficientes alfa y beta fueron adoptados. El coeficiente alfa fue determinado en función al área de estudio. El valor que considere en el proyecto fue de $\alpha=12$ hrs. Donde este valor me da a entender que no llueve de forma uniforme en la zona. El valor de beta fue adoptado por recomendación de proyecto observados entre estos tenemos el proyecto de programa estratégico de acción de la cuenca binacional del río Bermejo; donde se adopta el valor de $\beta= 0.2$. Luego de obtener la altura de lluvia horaria se grafica la misma con su duración respectiva. (Ver anexo N° 7). Como hemos dicho para lluvia de duraciones menores a 2 hrs. Estas se deben ajustar a una hoja probabilística de Gumbell donde con solo unir 2 puntos ya se obtiene la recta que une el origen con el punto de altura de lluvia horaria para 2 hrs. (Ver anexo N°7).

5.3.- ESTIMACIÓN DE CURVAS “I-D-F” PARA LAS PRINCIPALES CIUDADES Y POBLACIONES DEL DEPARTAMENTO DE TARIJA

Luego de realizar las alturas de lluvia horaria se procede a dividir la misma entre la duración considerada para un determinado periodo de retorno. Y estas curvas generalmente se ajustan a curvas potenciales.

Cada serie de datos para una duración se considera una serie separada, cuyo procesamiento también se realizara por separado. Esto significa que se tiene un conjunto de datos que representan una muestra y como tal permiten considerarlas como variables aleatorias.

Por lo mencionado en párrafo anterior se obtiene las curvas para cada duración una curva de frecuencia, con la distribución empírica y teórica. El procedimiento consiste en emplear la familia de curvas de frecuencia, de tal modo de obtener para cada periodo de retorno o probabilidad una curva que Intensidad – Duración. (Ver anexo N°8)

5.4.- ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA PARA LAS CIUDADES EN ESTUDIO

Como sabemos las curvas de Intensidad – Duración – frecuencia, pueden formularse en dos formas:

- ✓ Mediante ecuaciones individuales para cada frecuencia o periodo de retorno dado.
- ✓ Mediante ecuaciones generales que comprendan a toda la familia de curvas en su conjunto.

Ambos procedimientos consisten en encontrar curvas teóricas mediante algún método de ajuste, como es el método de mínimos cuadrados. De este modo es posible obtener una expresión teórica que relaciones las tres variables.

En el presente proyecto se ajustó a una ecuación general para cada ciudad que involucre a toda la familia de curvas IDF.

5.4.1.- MODELO PROPUESTO POR BERNARD

$$\Rightarrow i = \frac{\lambda * T^{\psi}}{d^n}$$

Es uno que se ha demostrado que tiene mayor aplicabilidad debido a que tiene una correlación alta y se ajusta a la zona. (Ver anexo N°9)

Luego de obtener las lluvias máximas para diferentes periodos de retorno y calcular las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia en función a estos se procedió a aplicar metodologías propuestas para el presente proyecto mediante aproximaciones de métodos numéricos como el ajuste de curvas o aproximación de curvas por regresión múltiple para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados: (Ver Anexo N° 10)

Ciudad en Estudio	ψ	η	λ
Tarija	0.162751	0.80	896.1416
Yacuiba	0.173453	0.80	1713.1456
Bermejo	0.159804	0.80	1496.2761
Padcaya	0.200696	0.80	838.9521
Iscayachi	0.130236	0.80	593.4699
Villamontes	0.155675	0.80	1646.4446
Carapari	0.164920	0.80	1450.0212
Valle de la Concepción	0.158729	0.80	732.4949
Entre Ríos	0.150840	0.80	1242.9759
San Lorenzo	0.125369	0.80	782.8759
El Puento	0.170281	0.80	465.5254

Tabla 5.1 Resultados del modelo de Bernard

Fuente: Elaboración Propia

5.4.2.- MODELO PROPUESTO POR SHERMAN

$$i = \frac{\lambda * T^\psi}{(d + \theta)^\eta}$$


El modelo de Sherman parte del modelo de Bernard donde aparte de calcular los coeficientes ψ, λ y η calcula además un coeficiente que "θ" que trata de ajustar de mejor manera la familia de curvas. Por lo tanto luego de calibrar este coeficiente para cada ciudad se obtuvo los siguientes resultados: (Ver anexo N°10)

Ciudad en Estudio	θ	ψ	η	λ
Tarija	3	0.162751	0.80	896.1416
Yacuiba	2	0.173453	0.80	1713.1456
Bermejo	2	0.159804	0.80	1496.2761
Padcaya	2	0.200696	0.80	838.9521
Iscayachi	3	0.130236	0.80	593.4699
Villamontes	2	0.155675	0.80	1646.4446
Carapari	2	0.164920	0.80	1450.0212
Valle de la Concepción	3	0.158729	0.80	732.4949
Entre Ríos	2	0.150840	0.80	1242.9759
San Lorenzo	3	0.125369	0.80	782.8759
El Puento	4	0.170281	0.80	465.5254

Tabla 5.2 Resultados del modelo de Sherman

Fuente: Elaboración Propia

5.4.3.- MODELO PROPUESTO POR TALBOT


$$i = \frac{a}{b + D}$$

Este modelo fue creado para duraciones inferiores a los 20 minutos y superior a los 5 minutos. El modelo parte previo la estimación de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia.

Es un modelo se lo calibra por mínimos cuadrados, donde el coeficiente “a, b” depende del periodo de retorno. Es así que se llegaron a los siguientes resultados: (Ver anexo N° 11).

5.4.3.1.- CIUDAD DE TARIJA

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de Tarija:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	1936.61970	2.6941
5	2397.19596	2.6941
10	2665.60575	2.5619
25	3206.18471	2.6941
50	3554.59720	2.6941
75	3758.40544	2.6941
100	3903.00969	2.6941

Tabla 5.3 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia



5.4.3.2.- CIUDAD DE YACUIBA

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de Yacuiba:

Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	3699.04952	2.6941
5	4670.13986	2.6941
10	5404.74133	2.6941
25	6375.83166	2.6941
50	7110.43314	2.6941
75	7540.14746	2.6941
100	7845.03462	2.6941

Tabla 5.4 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia

5.4.3.3.- CIUDAD DE BERMEJO

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de Bermejo:

Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	3233.94678	2.6941
5	3981.94857	2.6941
10	4547.79008	2.6941
25	5295.79186	2.6941
50	5861.63337	2.6941
75	6192.62944	2.6941
100	6427.47488	2.6941

Tabla 5.5 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia



5.4.3.4.- CIUDAD DE PADCAYA

**Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de
Padcaya:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)**

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	1802.12599	2.6941
5	2402.47088	2.6941
10	2856.61425	2.6941
25	3456.95914	2.6941
50	3911.10251	2.6941
75	4176.75936	2.6941
100	4365.24589	2.6941

Tabla 5.6 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia

5.4.3.5.- CIUDAD DE ISCAYACHI

**Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de
Iscaiyachi:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)**

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	1280.93674	2.6941
5	1500.86261	2.6941
10	1667.23011	2.6941
25	1887.15598	2.6941
50	2053.52348	2.6941
75	2150.84223	2.6941
100	2219.89098	2.6941

Tabla 5.7 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia



5.4.3.6.- CIUDAD DE VILLAMONTES

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de Villamontes:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	3558.83703	2.6941
5	4350.11241	2.6941
10	4948.68913	2.6941
25	5739.96452	2.6941
50	6338.54124	2.6941
75	6688.68617	2.6941
100	6937.11796	2.6941

Tabla 5.8 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia

5.4.3.7.- CIUDAD DE CAPARARI

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de Carapari:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	3050.67370	2.6941
5	3807.00599	2.6941
10	4379.14928	2.6941
25	5135.48158	2.6941
50	5707.62487	2.6941
75	6042.30724	2.6941
100	6279.76816	2.6941

Tabla 5.9 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia



5.4.3.8.- CIUDAD VALLE DE LA CONCEPCIÓN

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad del Valle de la Concepción:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	1583.21556	2.6941
5	1945.68399	2.6941
10	2219.88076	2.6941
25	2582.34918	2.6941
50	2856.54596	2.6941
75	3016.94079	2.6941
100	3130.74273	2.6941

Tabla 5.10 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia

5.4.3.9.- CIUDAD DE ENTRE RIOS

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de Entre Ríos:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	2686.69833	2.6941
5	3256.61460	2.6941
10	3687.73962	2.6941
25	4257.65590	2.6941
50	4688.78092	2.6941
75	4940.97289	2.6941
100	5119.90594	2.6941

Tabla 5.11 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia



5.4.3.10.- CIUDAD DE SAN LORENZO

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de San Lorenzo:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	1688.62734	2.6941
5	1963.57290	2.6941
10	2171.56119	2.6941
25	2446.50675	2.6941
50	2654.49504	2.6941
75	2776.16039	2.6941
100	2862.48333	2.6941

Tabla 5.12 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia

5.4.3.11.- CIUDAD DE EL PUENTE

Modelo de Talbot aplicado a la Ciudad de El Puente:
Para lluvias de corta Duración (5 min - 20 min)

Periodo de Retorno	Coeficientes	
	a	b
2	1005.49246	2.6941
5	1261.92994	2.6941
10	1455.91740	2.6941
25	1712.35488	2.6941
50	1906.34234	2.6941
75	2019.81774	2.6941
100	2100.32981	2.6941

Tabla 5.13 Resultados del modelo de Talbot

Fuente: Elaboración Propia



Algo importante que debemos hacer notar en la zonificación de las estaciones de trabajo para cada ciudad. Por ejemplo para la ciudad de Yacuiba se tiene que las estaciones de Algarrobillas, y Palmar Chico no entran en la franja de control por lo cual la construcción de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia solo se la hará con la estación de Yacuiba que es la única que entra en la franja esto debido a que por el lugar hay un accidente orográfico que en este caso es la serranía del Aguarague. Lo mismo sucede en la zonificación de las ciudades El Puente y de la Ciudad del Valle de la Concepción donde aquí también se aplicó el mismo criterio; solo se considerara las estaciones que estén en la franja de control. Por lo tanto tenemos los siguientes resultados finales:

Ciudad en Estudio	ψ	η	λ
Tarija	0.162751	0.80	896.1416
Yacuiba	0.178261	0.80	1622.3812
Bermejo	0.159804	0.80	1496.2761
Padcaya	0.200696	0.80	838.9521
Iscayachi	0.130236	0.80	593.4699
Villamontes	0.155675	0.80	1646.4446
Carapari	0.167209	0.80	1412.0461
Valle de la Concepción	0.154788	0.80	746.4157
Entre Ríos	0.150840	0.80	1242.9759
San Lorenzo	0.125369	0.80	782.8759
El Puente	0.186157	0.80	495.3705

Tabla 5.14 Resultados del modelo de Bernard

Fuente: Elaboración Propia

Ciudad en Estudio	θ	ψ	η	λ
Tarija	3	0.162751	0.80	896.1416
Yacuiba	2	0.178261	0.80	1622.3812
Bermejo	2	0.159804	0.80	1496.2761
Padcaya	2	0.200696	0.80	838.9521
Iscayachi	3	0.130236	0.80	593.4699
Villamontes	2	0.155675	0.80	1646.4446
Carapari	2	0.167209	0.80	1412.0461
Valle de la Concepción	3	0.154788	0.80	746.4157
Entre Ríos	2	0.150840	0.80	1242.9759
San Lorenzo	3	0.125369	0.80	782.8759
El Puente	4	0.186157	0.80	495.3705

Tabla 5.15 Resultados del modelo de Sherman

Fuente: Elaboración Propia



Como sabemos que para duraciones cortas la intensidad es más difícil de calibrar, por tal motivo se realizó el modelo de Talbot para las ciudades en estudio puesto que se demostró que este modelo provee buenos resultados para intensidades de 5 minutos a 20 minutos.

Es así que se aplicó el modelo y se obtuvo los coeficientes de este modelo para cada ciudad en estudio y por ejemplo para la ciudad de Tarija se obtuvo su curva de Intensidad – Duración – Frecuencia mediante sus respectivos coeficientes y se llegó a la siguiente tabla 5.16.

La presente tabla mostrada nos muestra las intensidades para lluvias de duración corta (5 min – 20 min) puesto que es lo difícil de poder estimar. Esta explicación se la puede observar en la curva de Intensidad – Duración – Frecuencia donde en la gráfica a duraciones largas las intensidades tienden a juntarse asintóticamente y no sucede lo mismo con las intensidades de duración corta sino que ahí las intensidades más dispersos para diferentes periodos. (Ver anexo N°9).

Estos valores de Intensidad de la tabla 5.16; servirá como un parámetro fundamental para la determinación del caudal de diseño en proyectos. Pero el cual se dejara como criterio para el diseñador la adopción de dichas intensidades para la ciudad de Tarija en proyectos como los sistemas de alcantarillado pluvial y todos sus componentes del mismo.

Período de Retorno (años)	Duración de lluvia en (min)										
	5	7	9	10	11	12	13	14	15	17.5	20
2	251.70	199.77	165.61	152.56	141.42	131.80	123.40	116.01	109.45	95.90	85.34
5	311.56	247.28	204.99	188.84	175.05	163.14	152.75	143.60	135.48	118.71	105.63
10	352.51	278.77	230.55	212.20	196.55	183.05	171.29	160.95	151.78	132.87	118.15
25	416.71	330.74	274.17	252.57	234.13	218.20	204.29	192.06	181.20	158.77	141.28
50	461.99	366.68	303.97	280.02	259.57	241.91	226.49	212.93	200.89	176.02	156.63
75	488.48	387.70	321.39	296.08	274.45	255.78	239.48	225.13	212.41	186.11	165.61
100	507.28	402.62	333.76	307.47	285.01	265.62	248.69	233.80	220.58	193.28	171.98

Tabla 5.16 Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia para la ciudad de Tarija

Fuente: Elaboración Propia

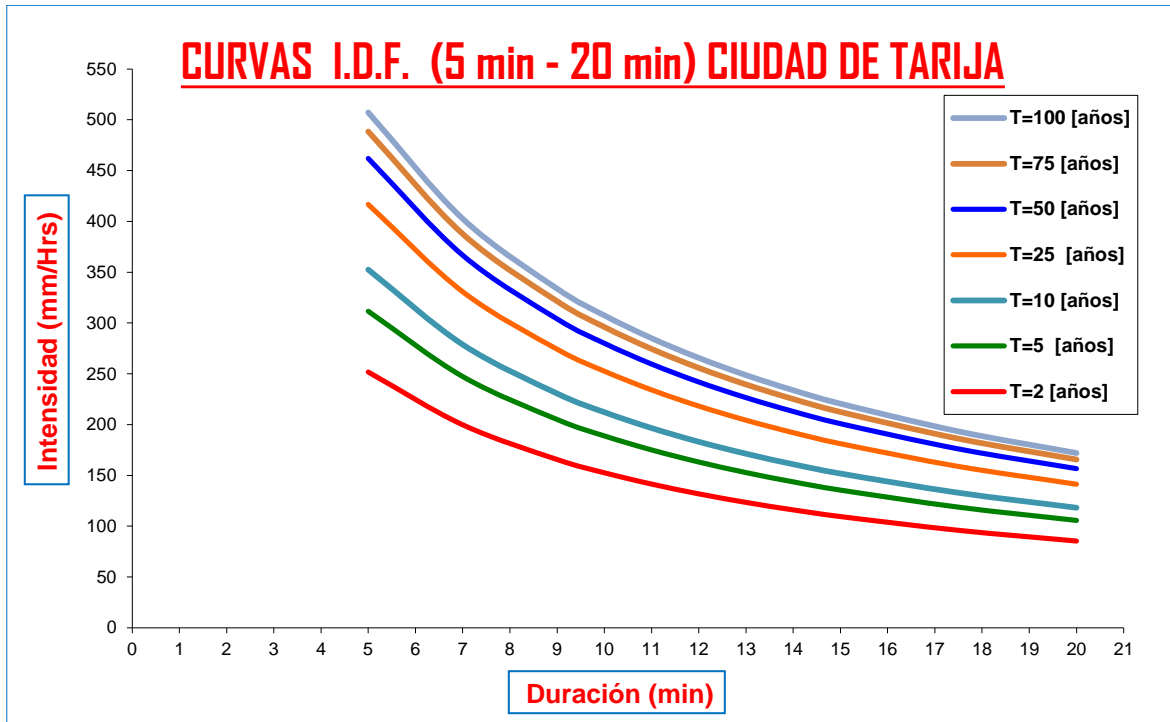


Fig. 5.17 Curvas de Intensidad Duración Frecuencia para la ciudad de Tarija por Talbot

Fuente: Elaboración Propia

5.5.- ECUACIONES INTENSIDAD – DURACIÓN - FRECUENCIA PARA LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL DEPARTAMENTO DE TARIJA

Al desarrollar la metodología ya explicada en el capítulo IV de los modelos Sherman, Bernard y Talbot, se obtuvieron las siguientes ecuaciones IDF, las cuales describen a continuación:

5.5.1.- ECUACIONES I-D-F MEDIANTE EL MODELO DE BERNARD

Para la Ciudad de Tarija $\Rightarrow I = \frac{1646,4446 * T^{0,155675}}{D^{0,799995949}}$

Para la Ciudad de Yacuiba $\Rightarrow I = \frac{1412,0461 * T^{0,167209}}{D^{0,7999959578}}$



Para la Ciudad de Bermejo $\Rightarrow I = \frac{746,4157 * T^{0,154788}}{D^{0,7999975849}}$

Para la Ciudad de Padcaya $\Rightarrow I = \frac{1242,9759 * T^{0,150840}}{D^{0,7999978578}}$

Para la Ciudad de Iscayachi $\Rightarrow I = \frac{782,8759 * T^{0,125369}}{D^{0,7999977577}}$

Para la Ciudad de Villamontes $\Rightarrow I = \frac{495,3705 * T^{0,186157}}{D^{0,7999988568}}$

Para la Ciudad de Caraparí $\Rightarrow I = \frac{1412,0461 * T^{0,167209}}{D^{0,7999959578}}$

Para la Ciudad del Valle de la Concepción $\Rightarrow I = \frac{746,4157 * T^{0,154788}}{D^{0,7999975849}}$

Para la Ciudad de Entre Ríos $\Rightarrow I = \frac{1242,9759 * T^{0,150840}}{D^{0,7999978578}}$

Para la Ciudad de San Lorenzo $\Rightarrow I = \frac{782,8759 * T^{0,125369}}{D^{0,7999977577}}$

Para la Ciudad de El Puento $\Rightarrow I = \frac{495,3705 * T^{0,186157}}{D^{0,7999988568}}$

Dónde: I = Intensidad en (mm/hrs)

T = Periodo de Retorno en (años)

D = Duración de la lluvia en (minutos)

**5.5.2.- ECUACIONES I-D-F MEDIANTE EL MODELO DE SHERMAN**

Para la Ciudad de Tarija $\Rightarrow I = \frac{896,1416 * T^{0,162751}}{(D + 3)^{0,79999457}}$

Para la Ciudad de Yacuiba $\Rightarrow I = \frac{1622,3812 * T^{0,178261}}{(D + 2)^{0,79999587}}$

Para la Ciudad de Bermejo $\Rightarrow I = \frac{1496,2761 * T^{0,159804}}{(D + 2)^{0,79998977}}$

Para la Ciudad de Padcaya $\Rightarrow I = \frac{838,9521 * T^{0,200696}}{(D + 2)^{0,799998895}}$

Para la Ciudad de Iscayachi $\Rightarrow I = \frac{593,4699 * T^{0,130236}}{(D + 3)^{0,79999498}}$

Para la Ciudad de Villamontes $\Rightarrow I = \frac{1646,4446 * T^{0,155675}}{(D + 2)^{0,799995949}}$

Para la Ciudad de Caraparí $\Rightarrow I = \frac{1412,0461 * T^{0,167209}}{(D + 2)^{0,7999959578}}$

Para la Ciudad del Valle de la Concepción $\Rightarrow I = \frac{746,4157 * T^{0,154788}}{(D + 3)^{0,7999975849}}$

Para la Ciudad de Entre Ríos $\Rightarrow I = \frac{1242,9759 * T^{0,150840}}{(D + 2)^{0,7999978578}}$



Para la Ciudad de San Lorenzo



$$I = \frac{782,8759 * T^{0,125369}}{(D + 3)^{0,7999977577}}$$

Para la Ciudad de El Puento



$$I = \frac{495,3705 * T^{0,186157}}{(D + 4)^{0,7999988568}}$$

Dónde: I = Intensidad en (mm/hrs)

T = Periodo de Retorno en (años)

D = Duración de la lluvia en (minutos)

- ✓ En el modelo de Talbot los coeficientes se encuentran en función al periodo de Retorno adoptado tal como se mostró en las tablas anteriores.

CAPÍTULO VI VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1.- VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES IDF MEDIANTE LA UTILIZACION DE LAS BANDAS PLUVIOGRAFICAS PARA LA CIUDAD DE TARIJA:

En el presente capitulo se validara las ecuaciones de Bernard y Sherman mediante la comparación de un estudio realizado por el ingeniero Gonzalo Trigo Frigerio en su tesis "Validación de métodos para la estimación de caudales máximos aplicados a cuencas regionales" en la que realizo la interpretación de bandas pluviográficas para la estación de El Tejar con datos pluviográficos (1976-1998) que se muestra a continuación:

INTERPRETACIÓN DE LAS BANDAS PLUVIOGRÁFICAS (1976 - 1997) EL TEJAR
Intensidades Máximas para diferentes Duraciones (mm/Hrs)
y Periodos de Retorno

T	Duración (Hrs)							
	0.5	1	2	3	4	5	6	9
2	51.54	29.60	17.00	12.29	9.77	8.17	7.06	5.10
5	67.54	38.79	22.28	16.11	12.80	10.71	9.25	6.69
10	79.65	45.75	26.28	19.00	15.09	12.62	10.91	7.89
20	95.66	54.94	31.55	22.81	18.12	15.16	13.10	9.47
50	107.76	61.89	35.55	25.70	20.42	17.08	14.76	10.67
100	119.87	68.85	39.54	28.59	22.71	19.00	16.42	11.87

Tabla N° 6.1 Interpretación de la banda pluviográfica de El Tejar (1976 - 1998)

Fuente: Validación de métodos para la estimación de caudales máximos aplicados a cuencas regionales de Gonzalo Trigo Frigerio

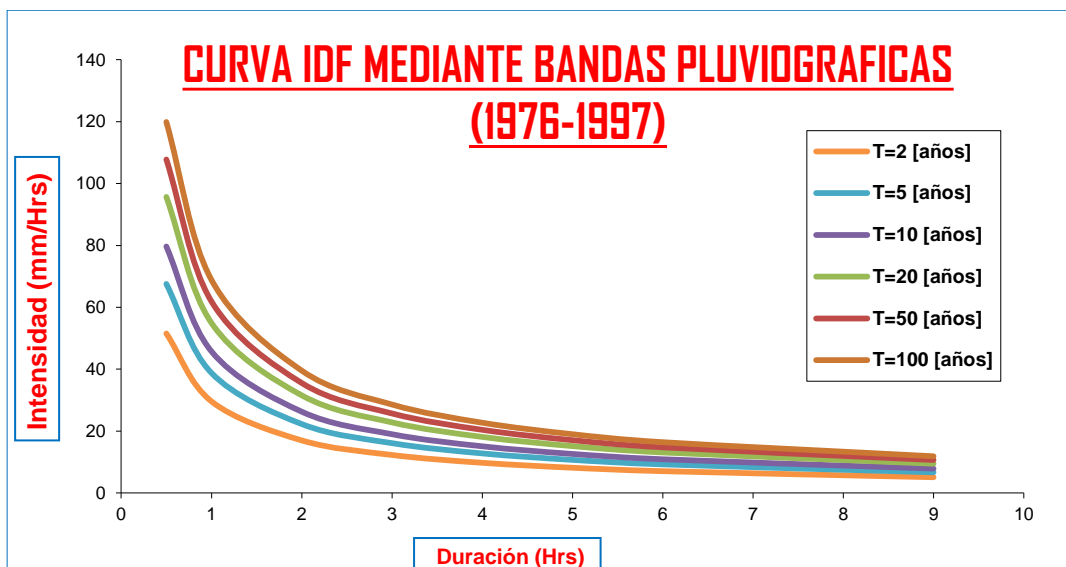


Figura N°6.1 Interpretación de la banda pluviográfica de El Tejar

Fuente: Validación de métodos para la estimación de caudales máximos aplicados a cuencas regionales de Gonzalo Trigo Frigerio

Ahora bien al comparar con los resultados de los modelos tanto de Bernard como de Sherman mediante las bandas pluviográficas de El Tejar tenemos los siguientes resultados para la ciudad de Tarija.

CURVAS IDF POR BERNARD							
Periodo de Retorno (años)	Duración de lluvia en (Hrs)						
	0.5	0.75	1	1.5	5	8	12
2	66.02	47.73	37.92	27.41	10.46	7.18	5.19
5	76.64	55.41	44.02	31.82	12.15	8.34	6.03
10	85.79	62.02	49.27	35.62	13.60	9.34	6.75
20	96.03	69.43	55.16	39.88	15.22	10.45	7.56
50	111.48	80.60	64.03	46.29	17.67	12.13	8.77
75	119.08	86.09	68.39	49.45	18.87	12.96	9.37
100	124.79	90.22	71.67	51.82	19.78	13.58	9.82

Tabla N° 6.2 Intensidades estimadas por la ecuación de Bernard para la ciudad de Tarija

Fuente: Elaboración Propia

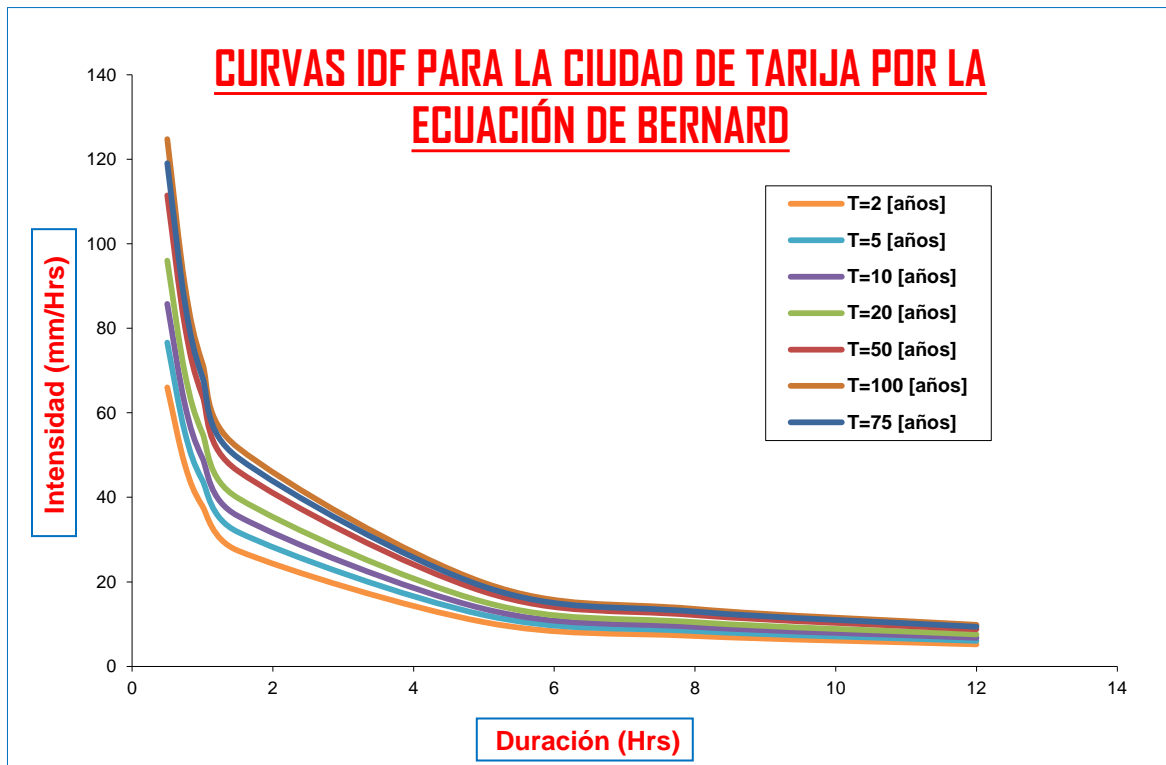


Figura N°6.2 Estimación de la curva IDF para la ciudad de Tarija por Bernard

Fuente: Elaboración Propia



CURVAS IDF POR SHERMAN							
Periodo de Retorno (años)	Duración de lluvia en (Hrs)						
	0.5	0.75	1	1.5	5	8	12
2	61.17	45.33	36.47	26.70	10.38	7.15	5.18
5	71.01	52.62	42.33	31.00	12.05	8.30	6.01
10	79.49	58.90	47.39	34.70	13.49	9.29	6.73
20	88.98	65.94	53.05	38.84	15.10	10.40	7.53
50	103.29	76.54	61.58	45.09	17.53	12.07	8.74
75	110.34	81.76	65.78	48.17	18.72	12.89	9.34
100	115.63	85.68	68.93	50.48	19.62	13.51	9.79

Tabla N° 6.3 Intensidades estimadas por la ecuación de Sherman para la ciudad de Tarija

Fuente: Elaboración Propia

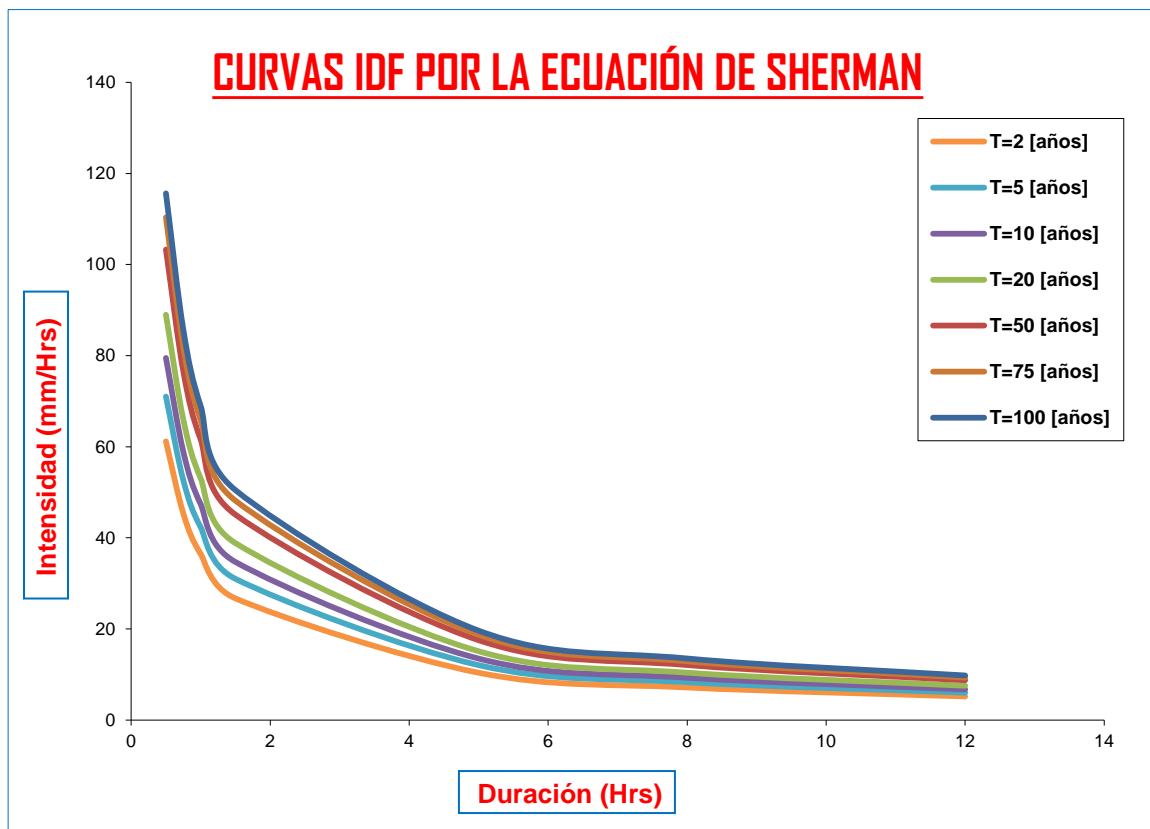


Figura N°6.3 Estimación de la curva IDF para la ciudad de Tarija por Sherman

Fuente: Elaboración Propia

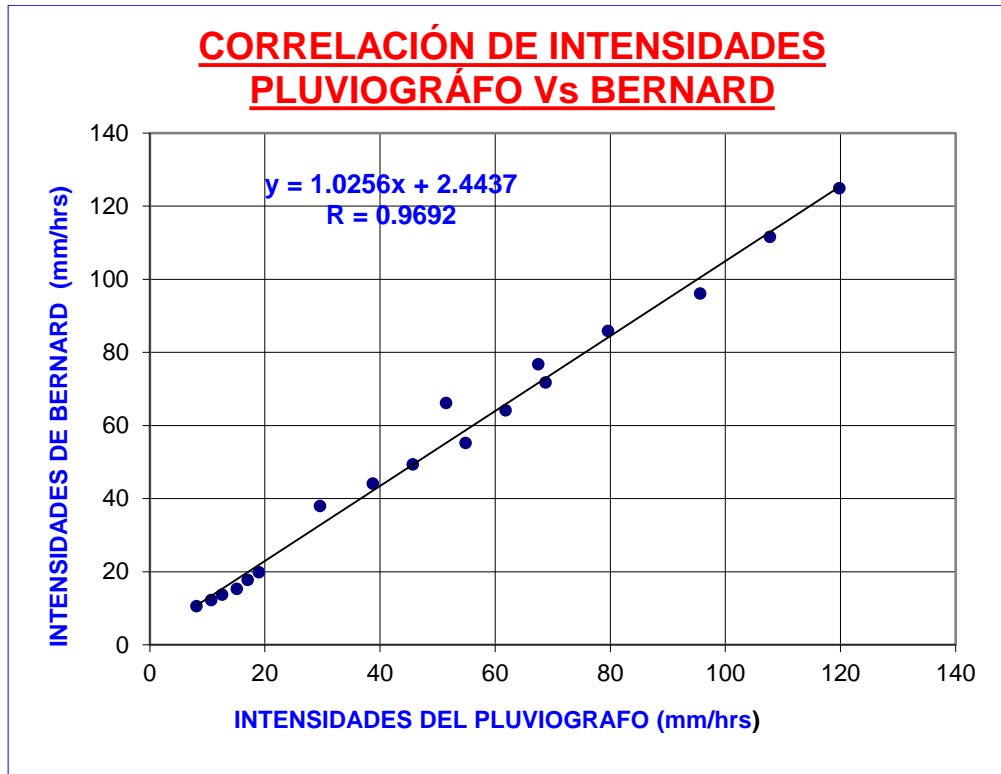


Figura N°6.4 Correlación de datos del Pluviógrafo y Bernard

Fuente: Elaboración Propia

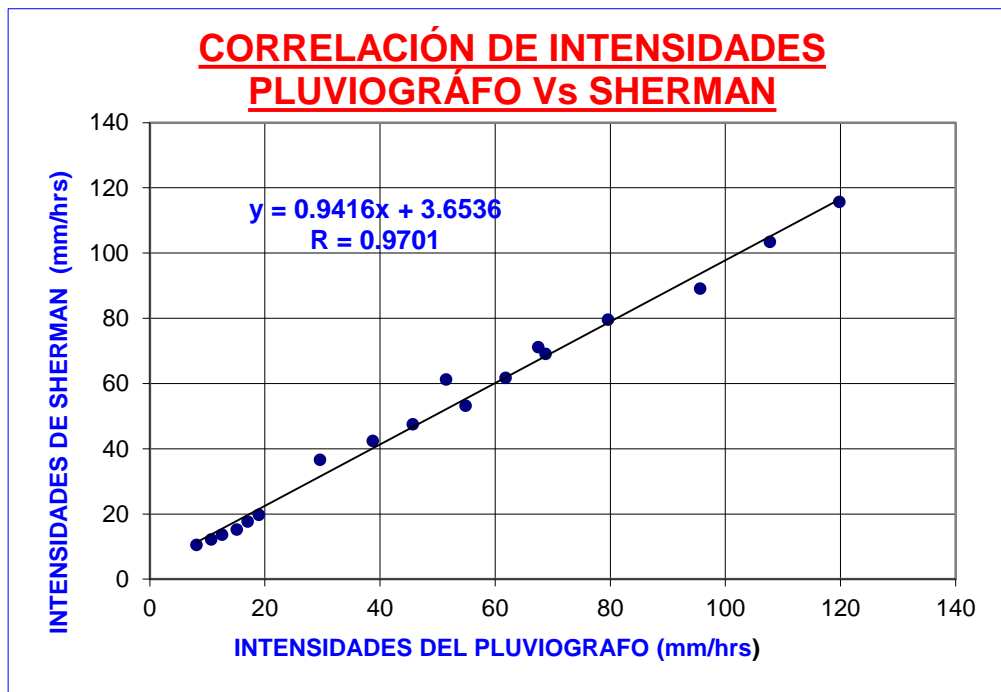


Figura N°6.5 Correlación de datos del Pluviógrafo y Sherman

Fuente: Elaboración Propia

Podemos observar que las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia estimadas con los métodos de Bernard y Sherman varían en general entre un 96 % a 98 % de correlación. Por lo cuál se concluye que ambos métodos tienen una buena aceptación.

Ahora Procederemos a comparar los datos pluviográficos de la Estación de AASANA que es una estación independiente del SENAMHI. Esta institución nos proporcionó los lecturas diarias dadas por el pluviógrafo del periodo de los años (1998 – 2008) puesto que a inicios del 2009 el pluviógrafo deajo de funcionar. De esta estación se extrajo las interpretaciones de la Banda Pluviográfica: (Ver Anexo N° 10)

Interpretación de las Bandas Pluviográficas (1998 - 2008)
Intensidades (mm/Hrs)
ESTACION AASANA TARIJA

T (años)	Duración (Hrs)											
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	9
2	71.15	40.86	29.54	23.47	19.63	16.97	15.00	13.48	12.27	11.28	9.75	7.05
5	85.45	49.08	35.48	28.19	23.58	20.38	18.02	16.19	14.73	13.54	11.71	8.46
10	96.27	55.29	39.98	31.76	26.57	22.96	20.30	18.24	16.60	15.26	13.19	9.53
25	110.58	63.51	45.92	36.48	30.51	26.37	23.31	20.95	19.07	17.53	15.15	10.95
50	121.40	69.73	50.41	40.05	33.50	28.95	25.59	23.00	20.93	19.24	16.63	12.02
75	127.73	73.36	53.04	42.13	35.25	30.46	26.93	24.20	22.02	20.24	17.50	12.65
100	132.22	75.94	54.90	43.62	36.49	31.53	27.88	25.05	22.80	20.96	18.11	13.09

Tabla N° 6.4 Interpretación de la Banda Pluviográfica AASANA

Fuente: Servicio Meteorológico e Hidrológico AASANA

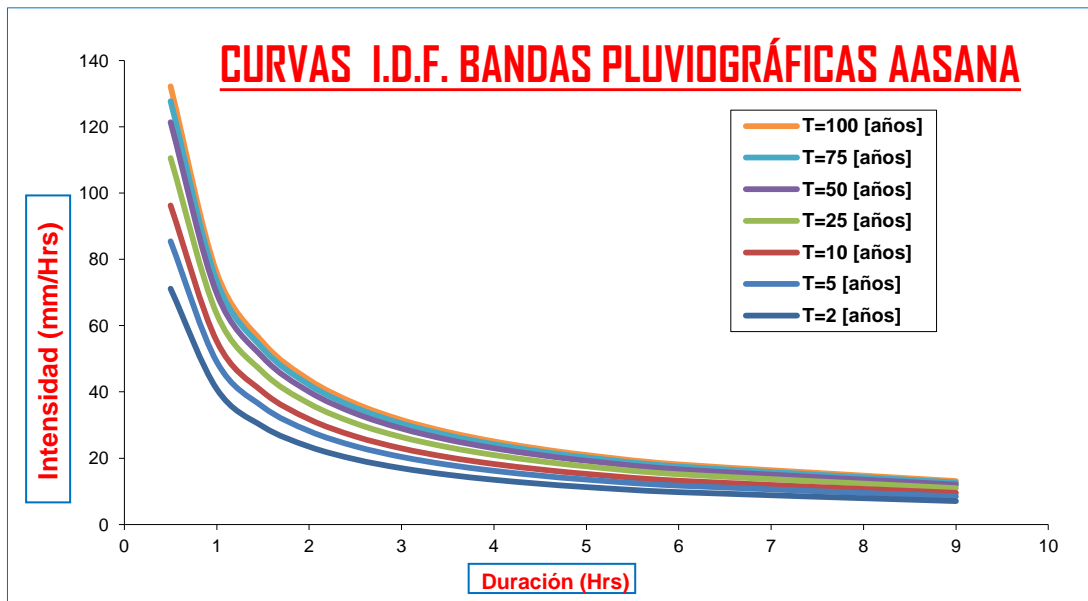


Figura N°6.6 Interpretación de la banda pluviográfica AASANA (1998 - 2008)

Fuente: Servicio Meteorológico e Hidrológico AASANA

De la misma forma que comparamos los resultados de los modelos de Bernard y Sherman con la interpretación de la banda pluviográfica de la estación de El Tejar (1976-1997), ahora procederemos a comparar con la interpretación de la banda pluviográfica de la estación de AASANA (1998 - 2008), para lo cual obtenemos las siguientes resultados que se muestra a continuación:

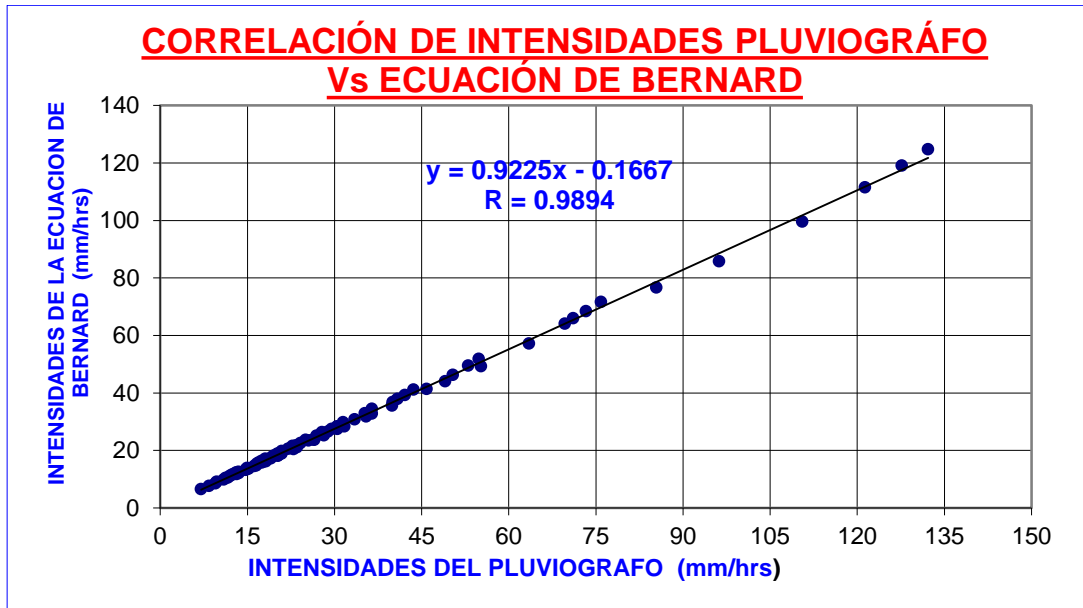


Figura N°6.7 Correlación de datos del Pluviógrafo y Bernard

Fuente: Elaboración Propia

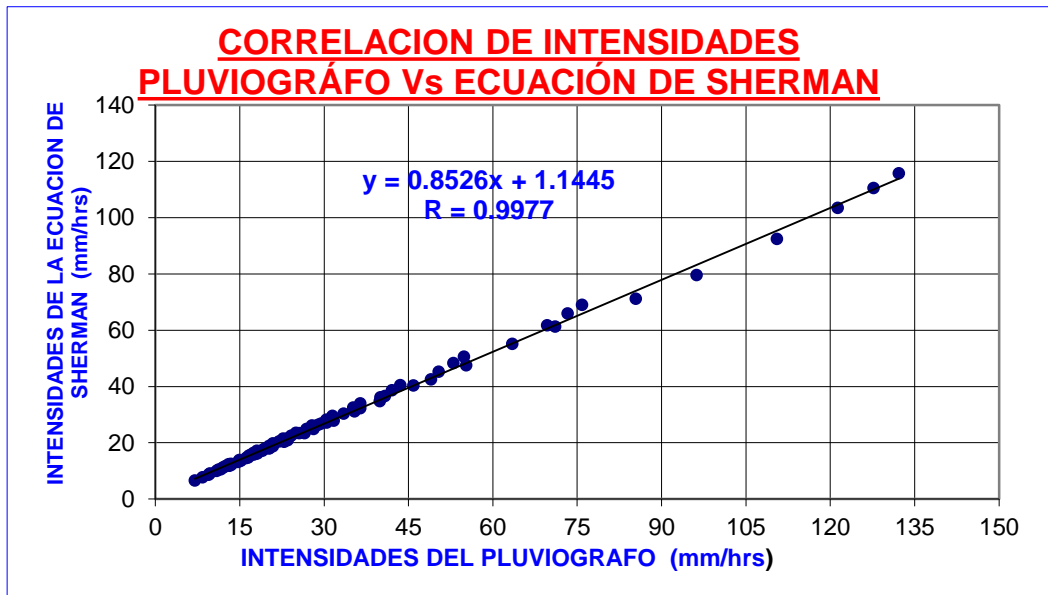


Figura N°6.8 Correlación de datos del Pluviógrafo y Sherman


Fuente: Elaboración Propia

Podemos observar que los modelos de Bernard y Sherman se ajustan en gran manera a las interpretaciones de las bandas pluviográficas. Siendo que el modelo de Sherman tiene mayor coeficiente de correlación en comparación al modelo de Bernard, pero ambos tienen un coeficiente de correlación arriba de noventa y ocho por ciento por lo cual estas ecuaciones son válidas.

También en el presente proyecto se comparó los modelos de Bernard y Sherman calculados con ecuaciones como ser el del alcantarillado pluvial y la ecuación elaborada por ENDE para así poder observar diferenciación de resultados que se obtienen al calcular la intensidad.

6.2.- VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES IDF MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL ALCANTARILLADO PLUVIAL PARA TARIJA:

Tenemos para la ciudad de Tarija la ecuación del alcantarillado pluvial elaborado por la consultoría MTCB Consultores Asociados en un estudio hecho a nivel nacional.


$$I = \frac{197.2 * T^{0.1457}}{(t + 3)^{0.443}}$$

Dónde: I = Intensidad en mm/Hrs

T = Periodo de Retorno en año

t = Duración de la lluvia en min

CURVAS IDF							
Periodo de Retorno (años)	Duración de lluvia en (Hrs)						
	0.5	0.75	1	1.5	5	8	12
2	46.35	39.26	34.81	29.29	17.36	14.12	11.81
5	52.97	44.87	39.78	33.47	19.84	16.13	13.49
10	58.60	49.64	44.00	37.03	21.94	17.85	14.93
20	64.83	54.91	48.68	40.97	24.28	19.75	16.51
50	74.09	62.76	55.63	46.82	27.74	22.57	18.87
75	78.60	66.58	59.02	49.67	29.43	23.94	20.02
100	81.96	69.43	61.55	51.79	30.69	24.96	20.88

Tabla 6.5 Intensidades determinadas por la fórmula del Alcantarillado Pluvial

Fuente: Elaboración Propia

Primero compararemos los valores de la intensidad que arroja la ecuación del alcantarillado pluvial con los datos del pluviógrafo en este caso de El Tejar. Y después también compararemos con los modelos de Bernard y Sherman.

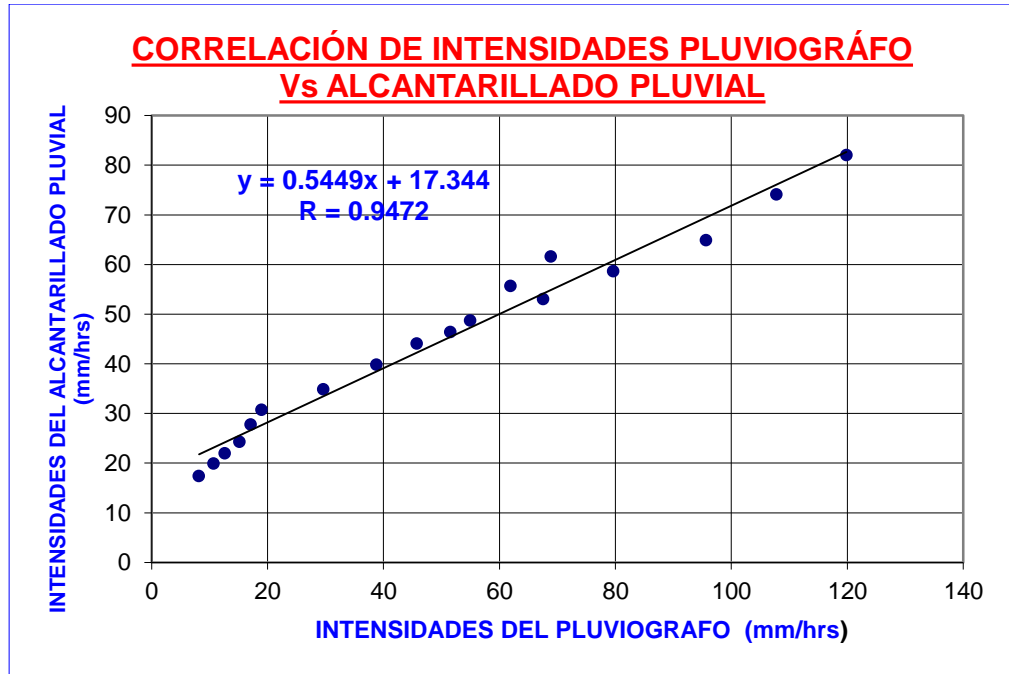


Figura N°6.9 Correlación entre la fórmula del A.P. y el pluviógrafo de El Tejar

Fuente: Elaboración Propia

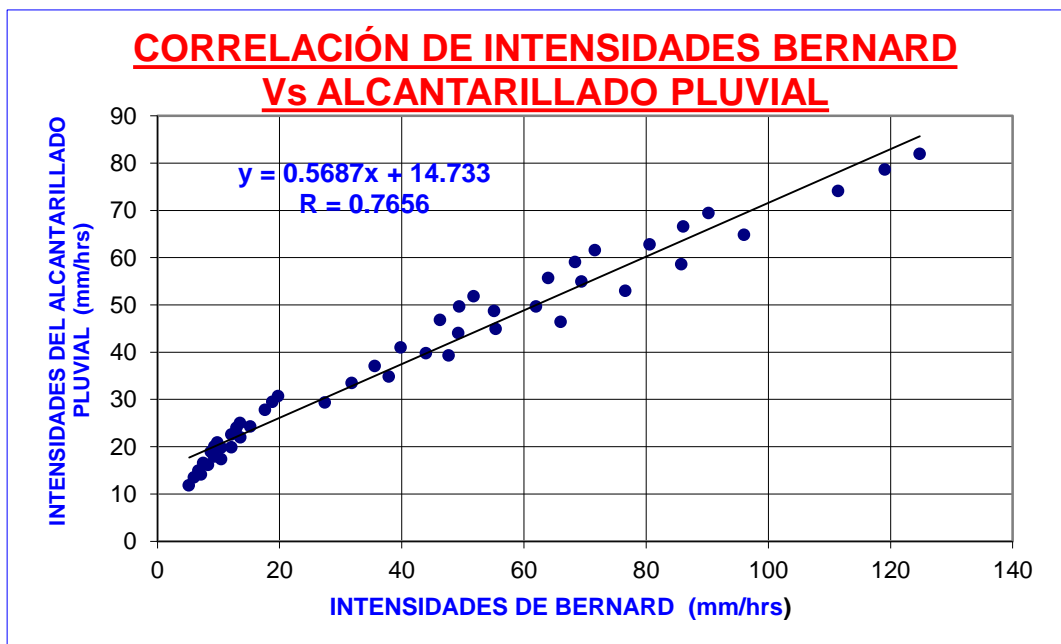


Figura N°6.10 Correlación entre la fórmula del A.P. y Bernard

Fuente: Elaboración Propia

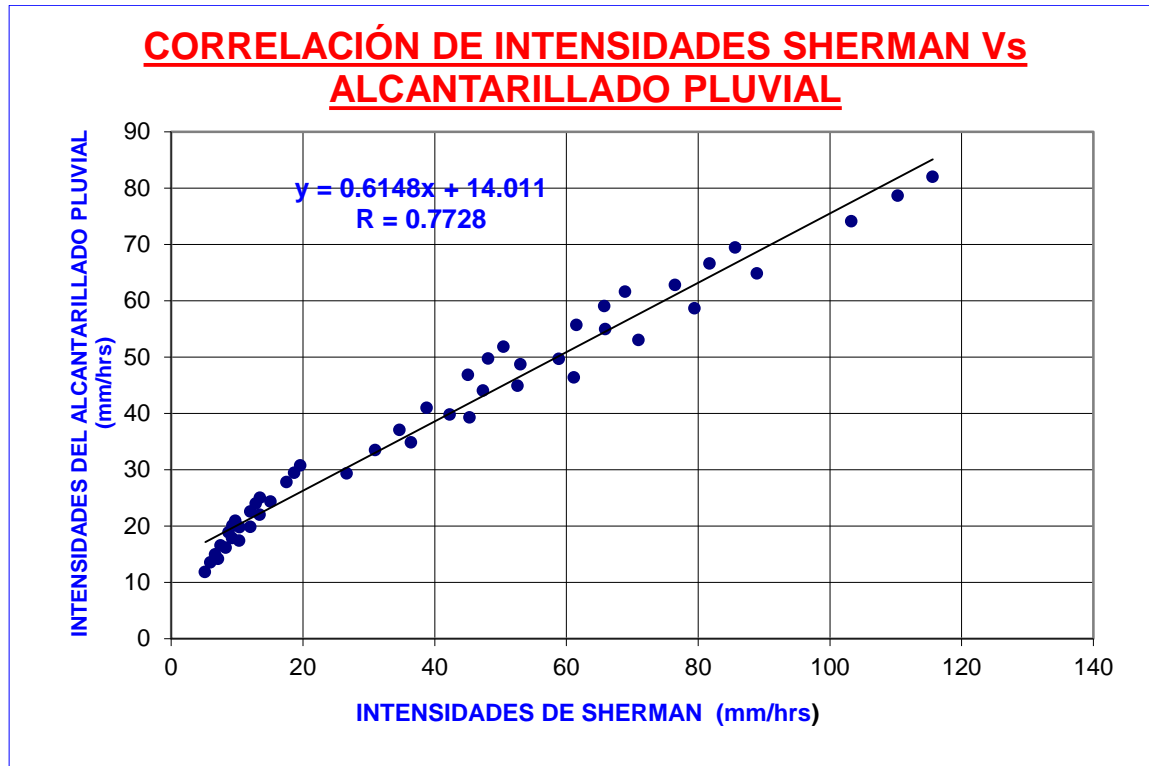


Figura N°6.11 Correlación entre la fórmula del A.P. y Sherman

Fuente: Elaboración Propia

6.3.- VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES IDF MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ECUACIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA ENDE PARA TARIJA:

$$I = \frac{A}{(t + B)^C}$$

Dónde: Los Coeficiente A, B y C son determinados en función al periodo de retorno.

I es la Intensidad en (mm/Hrs) y t es la duración de la lluvia en (min)

T	A	B	C
2	668	9.4	0.9
5	761	4.31	0.8709
10	828	0.483	0.8584
20	1016.77	-1.3066	0.8681
50	1312.19	-3.3982	0.884
100	1523.37	-4.9508	0.8892

Tabla 6.6 Coeficientes estimados para la ecuación IDF de ENDE

Fuente: Proyecto elaborado en Cochabamba- Bolivia por el empresa eléctrica ENDE



CURVAS IDF							
Periodo de Retorno (años)	Duración de lluvia en (Hrs)						
	0.5	0.75	1	1.5	5	8	12
2	24.48	18.31	14.71	10.64	3.83	2.54	1.77
5	35.01	25.53	20.26	14.51	5.23	3.49	2.46
10	44.07	31.26	24.47	17.32	6.18	4.13	2.92
20	55.17	38.30	29.64	20.71	7.22	4.79	3.37
50	72.17	48.61	37.02	25.42	8.56	5.63	3.93
100	86.90	57.25	43.14	29.31	9.70	6.35	4.41

Tabla 6.7 Intensidades determinada por la fórmula de la empresa eléctrica ENDE

Fuente: Elaboración Propia

De la misma forma que realizamos anteriormente para la ecuación del alcantarillado pluvial ahora haremos para la ecuación de ENDE; donde primero compararemos los valores de la intensidad con los datos del pluviógrafo en este caso de El Tejar. Y después también compararemos con los modelos de Bernard y Sherman.

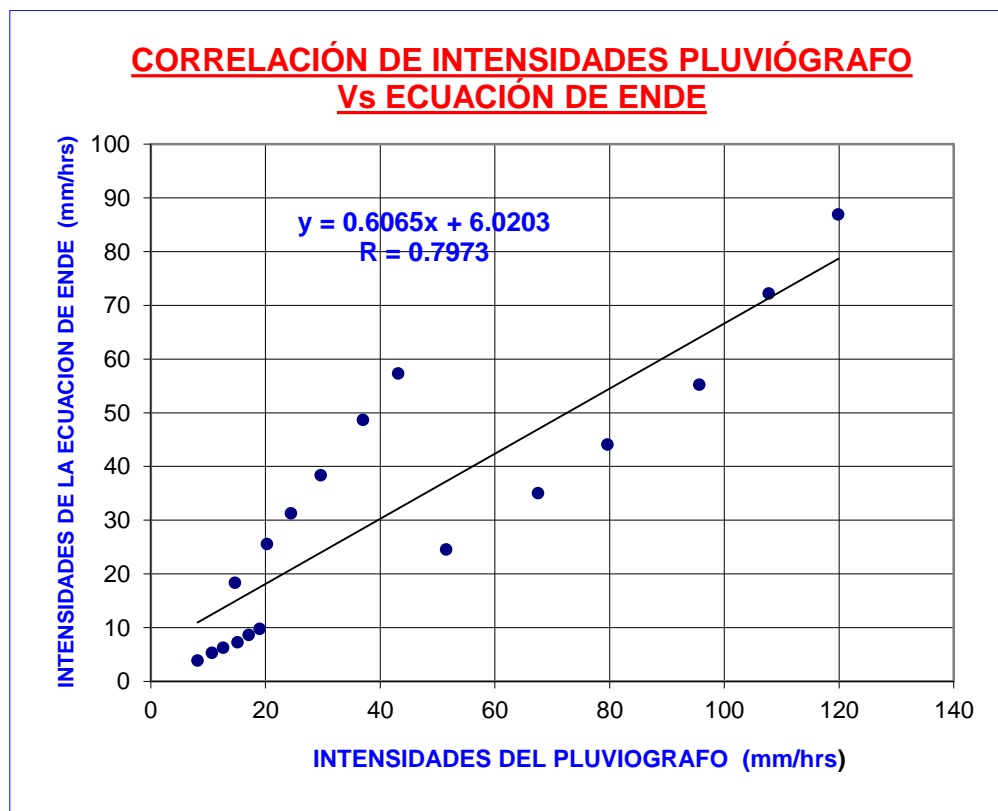


Figura N°6.12 Correlación entre la fórmula de ENDE y el pluviógrafo de El Tejar

Fuente: Elaboración Propia

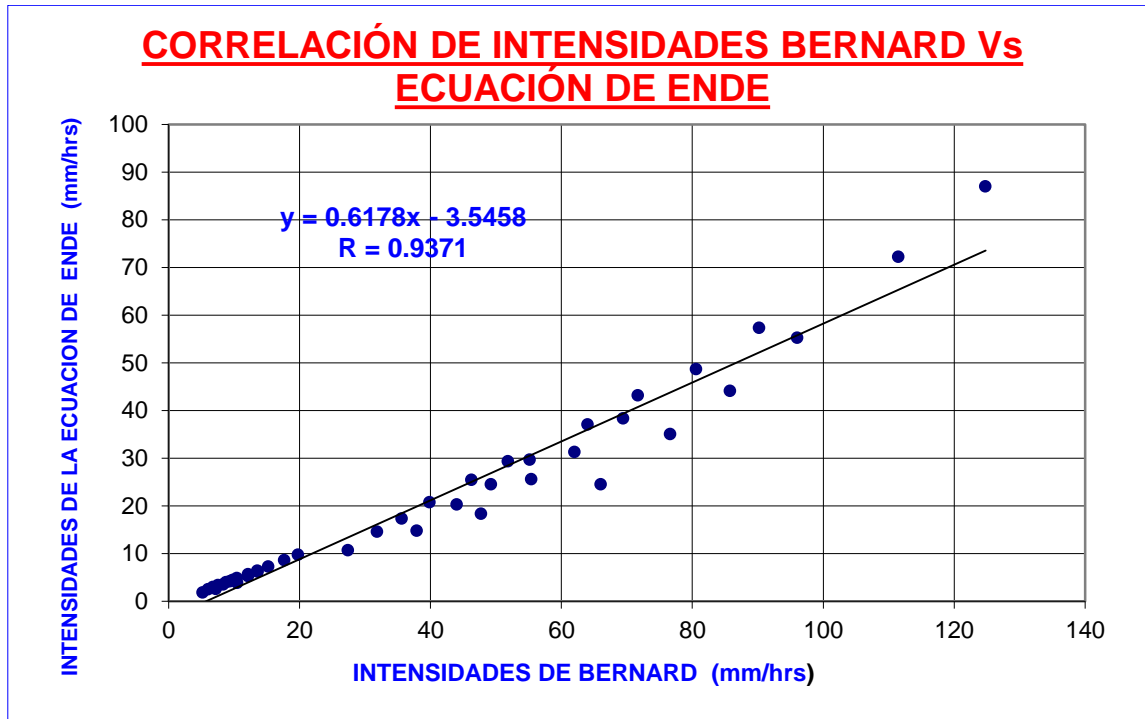


Figura N°6.13 Correlación entre la fórmula de ENDE y Bernard

Fuente: Elaboración Propia

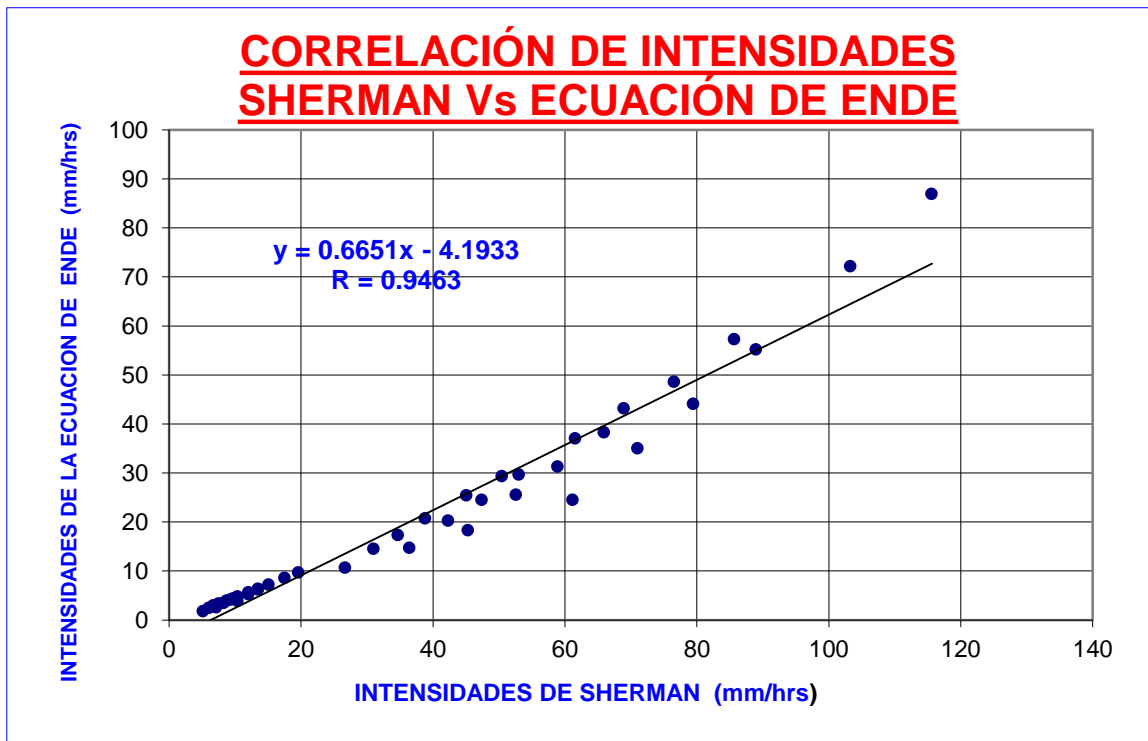


Figura N°6.14 Correlación entre la fórmula de ENDE y Sherman

Fuente: Elaboración Propia

6.4.- COMPARACIÓN DE LAS CURVAS IDF DE LOS MODELOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

Haciendo un análisis a nivel de cada periodo de retorno entre las ecuaciones de Bernard, Sherman y la interpretación de la banda pluviográfica. Tenemos en general la siguiente gráfica: (Ver anexo N°11)

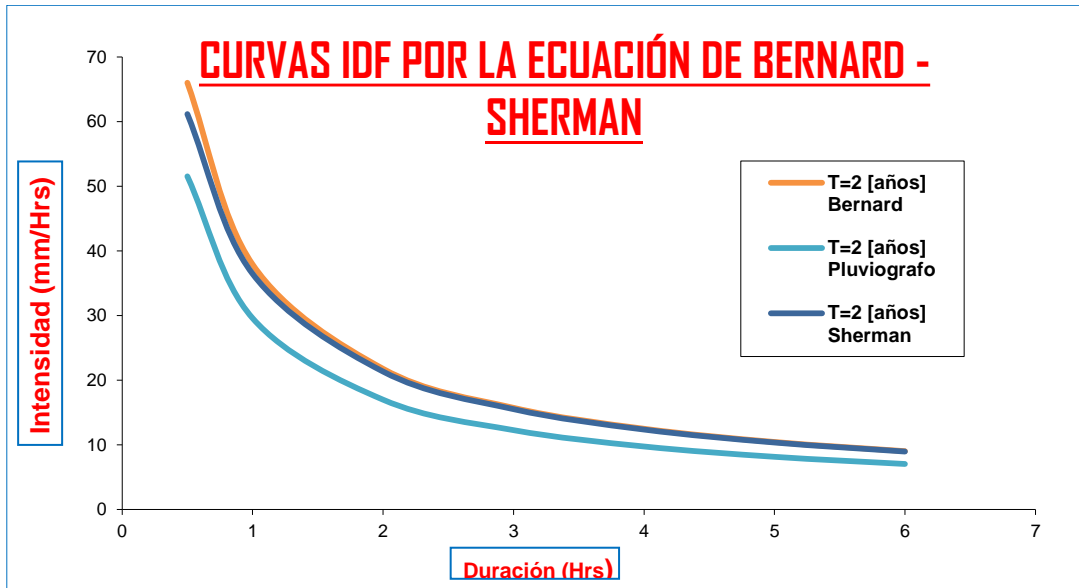


Figura N°6.15 Curva IDF del pluviógrafo Vs la ecuación de Bernard y Sherman para T=2 años

Fuente: Elaboración Propia

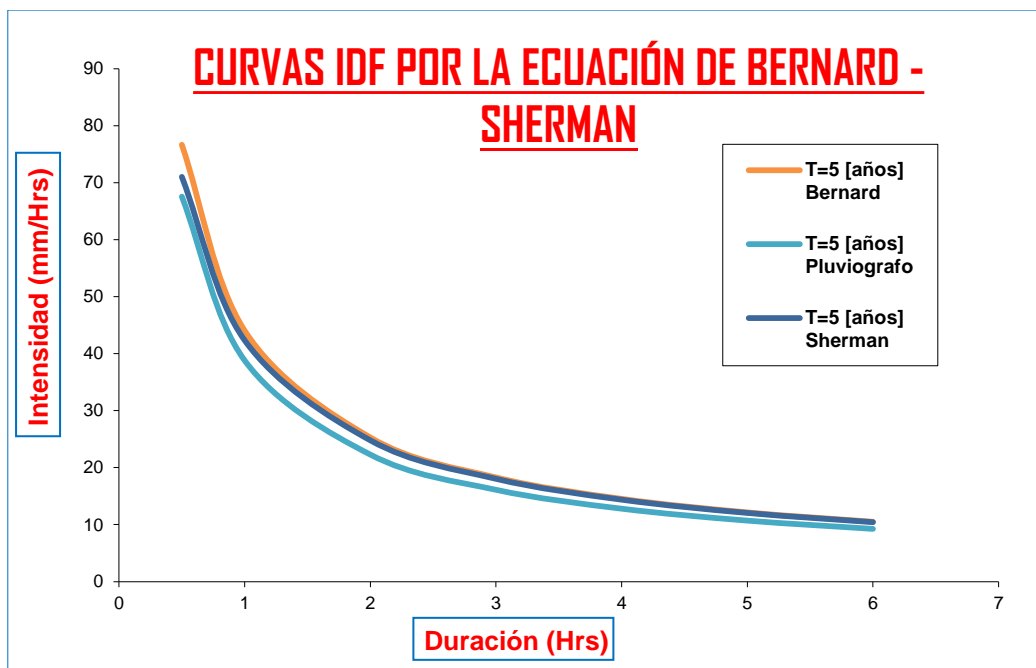


Figura N°6.16 Curva IDF del pluviógrafo Vs la ecuación de Bernard y Sherman para T=5 años

Fuente: Elaboración Propia

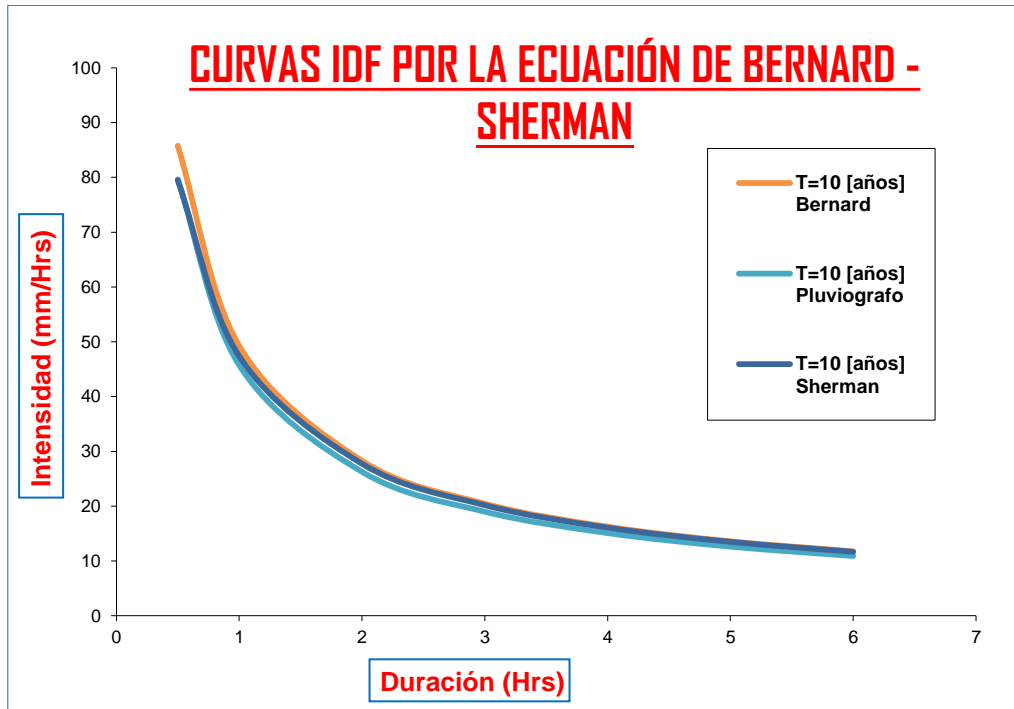


Figura N°6.17 Curva IDF del pluviógrafo Vs la ecuación de Bernard y Sherman para T=10 años

Fuente: Elaboración Propia

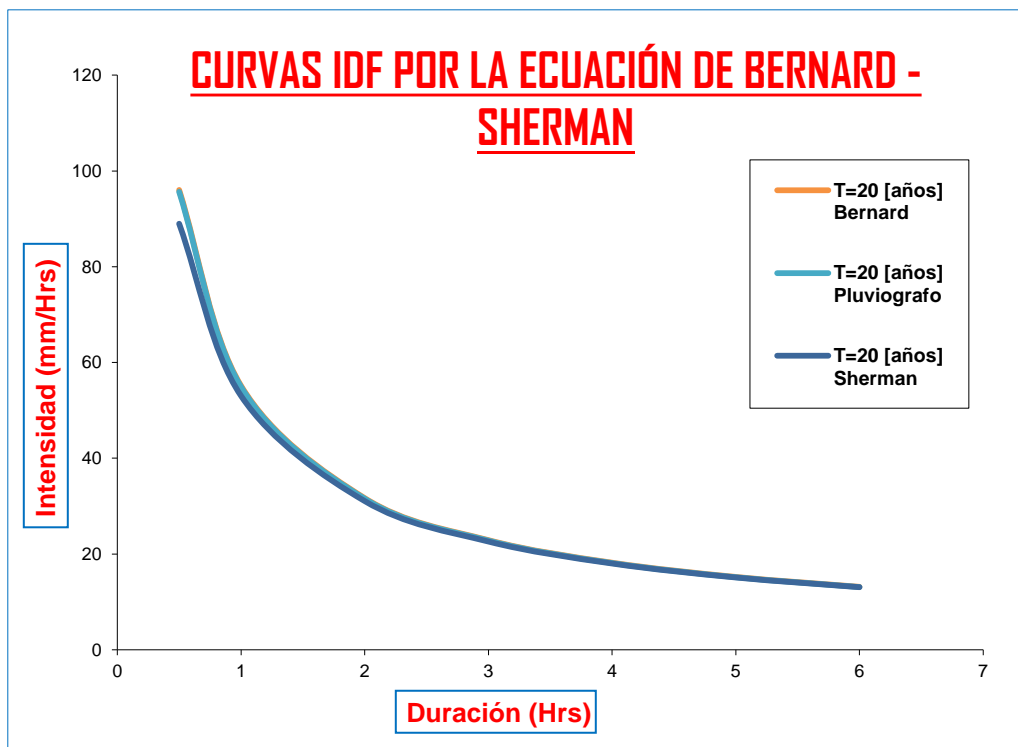


Figura N°6.18 Curva IDF del pluviógrafo Vs la ecuación de Bernard y Sherman para T=20 años

Fuente: Elaboración Propia

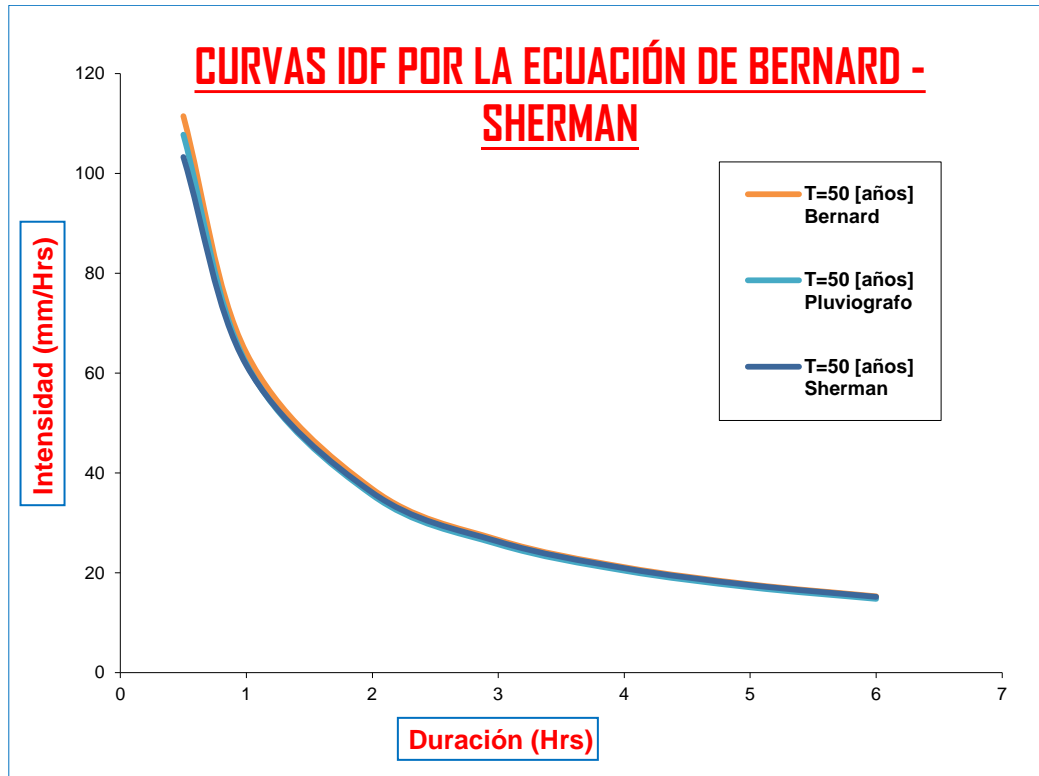


Figura N°6.19 Curva IDF del pluviógrafo Vs la ecuación de Bernard y Sherman para T=50 años

Fuente: Elaboración Propia

Podemos deducir en función a todas las gráficas de correlación mostradas anteriormente que la ecuación Intensidad Duración Frecuencia estimada tanto por Bernard como por Sherman arrojan buenos resultados, con respecto a las intensidades del pluviógrafo eso quiere decir que la variación que hay no es en gran magnitud, debido a su alta correlación. Pero comparando con otras ecuaciones Intensidad Duración Frecuencia (Alcantarillado Pluvial y ENDE) con la interpretación de las bandas pluviográficas podemos ver que la diferencia es un poco más grande en función a su coeficiente de correlación que tienen estas ecuaciones.

En cuanto a los resultados debido a que es más difícil calibrar ecuaciones para lluvias de duración corta pero en fin tenemos también en el presente proyecto hemos construido una ecuación que es válida para duraciones cortas (5 minutos a 20 minutos), que es el modelo de Talbot, para el cual se calculó los respectivos coeficientes del modelo en el presente proyecto para cada ciudad en estudio.



6.5.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El departamento de Tarija posee un gran número estaciones pluviométricas, lo que motivó a seleccionar las estaciones, tomando como criterio de selección, el periodo de registro de los datos, la cercanía a la zona de estudio y lo que es más importante, una alta representatividad geográfica, considerando el efecto orográfico y el patrón pluviométrico de la zona en estudio.

También en el departamento de Tarija debemos recalcar que cuenta con distintas estaciones pluviométricas que recogen este tipo de información. Existe un gran número considerable de estaciones en todo el departamento, pero debido a la falta de cultura en el país para el análisis de esta información, la gran mayoría de las estaciones se encuentran fuera de servicio o los datos obtenidos de estas no son confiables. Por tal motivo se calculó la curva doble masa para ver la consistencia y confiabilidad de los datos pluviométricos del SENAMHI.

El grado de confiabilidad de los resultados depende en gran medida de la lectura de los registros, y de la interpretación de los datos pluviográficos que se les hace a los eventos máximos medidos por el pluviógrafo.

Se pretende que con la zonificación, hacer una regionalización de las zonas buscando la mayor homogeneidad hidrológica y geográfica entre las estaciones, para así tener herramientas confiables para estudios hidrológicos en las diferentes zonas donde se encuentre ubicadas las estaciones pluviométricas.

De los modelos ajustados en este estudio, resultó que el de Sherman es el mejor con $R=0,9979$ y error estándar de estimación $\Delta = 17,971$. Este resultado es congruente con el obtenido por Sherman para la ciudad de Tarija, cuando compararon su ecuación con el pluviógrafo. Este modelo puede ser utilizado si se cuenta con una PC que tenga un paquete estadístico que resuelva ecuaciones por aproximaciones sucesivas.

Además del modelo de Sherman también el propuesto por Bernard mostró un buen ajuste, R

= 0,987. Y un error estándar de estimación $\Delta = 18,539$. Por lo que también se recomienda en el cálculo de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.


Como se mencionó anteriormente, el presente estudio muestra la necesidad de contar con registros de precipitación, en especial para las principales ciudades del país, con el fin de utilizar las precipitaciones extremas en el diseño urbano.

A pesar de no contar con un número mayor de años de análisis, la estadística utilizada permite asegurar que la metodología seguida para la obtención de la información considerada, es lógica y confiable, en un contexto hidrológico.

Y observando los resultados de la validación de resultados podemos contemplar que hay una buena correlación (98% - 99%) entre las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, estimadas por los modelos propuestos y las interpretaciones del pluviógrafo en la ciudad de Tarija.

Con los resultados de las curvas IDF determinadas para cada ciudad en estudio estas sirven a la vez para obtener la intensidad máxima de la lluvia. La misma que se las obtiene en función a las curvas Intensidad Duración Frecuencia para una duración igual al tiempo de concentración, ya que cuando la lluvia tiene una duración igual al tiempo de concentración es cuando se alcanza el gasto máximo porque toda la cuenca está aportando al punto a la salida. Desde luego que se elige un periodo de retorno de acuerdo al nivel de seguridad deseado y tamaño de la obra hidráulica.

Como sabemos que el tiempo de concentración es el tiempo en el cual se tarda en viajar el agua desde el punto hidráulicamente más distante de la cuenca hasta su salida. Una ecuación que generalmente se utiliza es la ecuación de Kirpich:


$$T_c = \left(\frac{0.871 * L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Tc= tiempo de concentración en horas.



L = longitud cauce principal en Kilómetros.

H = Desnivel del cauce principal de inicio a final, en metros.

6.6.- CONCLUSIONES DEL PROYECTO

En función de los resultados obtenidos, es posible plantear las siguientes conclusiones:

- ✓ El estudio demostró que con la metodología propuesta por Bernard y Sherman, es posible conseguir la modelación de las curvas IDF en las ciudades en estudio y en base a la información disponible.
- ✓ Según el coeficiente de correlación R, los resultados casi no manifiestan diferencias entre los modelos ajustados. Esto en el caso de la ciudad de Tarija debido a que en otras ciudades no se cuenta con registros pluviográficos.
- ✓ Los modelos utilizados para explicar la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia, poseen una muy buena calidad de ajuste, lo que asegura una buena estimación y pronóstico de intensidades máximas de precipitación.
- ✓ Con respecto a los coeficientes α y β para el cálculo de las lluvias máximas horarias por la metodología de Gumbell tenemos que los valores adoptados fueron en función a la revisión de proyectos, tesis. Pero con la elaboración del software se deja al criterio del diseñador la adopción de dichos coeficientes.
- ✓ En cuanto al diseño de las curvas IDF definidas para cada ciudad, se puede concluir que, no existen diferencias en cuanto al tipo y forma de la gráfica.
- ✓ En relación a la construcción de las curvas y ecuaciones IDF, se puede concluir que en general no se presentaron grandes problemas en el diseño y construcción de las curvas para las distintas ciudades, salvo en las ciudades de Yacuiba y El Puento en la cual fue necesario realizar dos tipos de curvas, debido a que por ejemplo en la zonificación de Yacuiba donde las estaciones de Palmar Chico y Algarrobillas no



caen en la misma franja que Yacuiba, donde se debe a que ahí se encuentra la serranía del Aguarague, que es un accidente orográfico.


- ✓ Los coeficientes obtenidos para las ecuaciones Intensidad – Duración – Frecuencia, calculados por los tres modelos en el presente proyecto son válidos únicamente para las estaciones con las que fueron calculados.
- ✓ Para la aplicación del software elaborado únicamente para el departamento de Tarija en el presente proyecto se recomienda utilización de los modelos y en especial para el cálculo de intensidades de lluvias de duración corta se sugiere Talbot porque se demostró que explican con más exactitud la intensidad para una duración corta y cabe aclarar que dicho modelo tiene una limitante en su utilización de la fórmula que es en la duración de la lluvia. (5 - 20 minutos)

6.7.- RECOMENDACIONES DEL PROYECTO

- ✓ Se deja al buen criterio del diseñador el empleo de los resultados obtenidos por los métodos de Sherman, Bernard y Talbot para lluvias de corta duración, en la búsqueda de los parámetros de diseño, que como el caudal, es básico para dimensionar las estructuras encargadas de transportar y retener el recurso agua, cuando es necesario disponer de él, para el empleo en diversos fines y completar la posibilidad de que se presente en exceso, para prevenir efectos indeseables.
- ✓ Los modelos ajustados en este estudio (Sherman, Bernard y Talbot) pueden ser utilizados en el diseño urbano, con cierta reserva, para otra ciudad donde se presenten lluvias que tenga características climáticas similares a la ciudad de Tarija, San Lorenzo, El Valle de la Concepción, Caraparí, Villamontes, Yacuiba, Padcaya, Bermejo, Entre Ríos; si es que no se cuenta con registros continuos de precipitación para validarlos.
- ✓ Aunque el departamento de Tarija posee muchas estaciones pluviométricas y no así

pluviográficas, pero con respecto a las estaciones pluviométricas el número de las que en la actualidad sirven es muy poco, por lo tanto la obtención de parámetros confiables para el diseño de las obras es muy reducido. Por lo expuesto anteriormente es recomendable que las entidades que tengan necesidad de estos parámetros se preocupen, tanto en completar la red general de estaciones, como en operarlas adecuadamente.

- ✓ Si para la ciudad en estudio sólo existe información pluviométrica, es decir, duraciones de precipitación de veinticuatro horas. Se tomará todas aquellas que tengan un registro mayor a los cinco años de registro.
- ✓ Se recomienda el uso de los modelos ajustados en esta investigación, para cada ciudad estudiada. Asimismo, estos modelos pueden ser elegidos en función con régimen climático es decir que deben aplicar si se tiene características similares.
- ✓ Es recomendable, que este estudio sea complementado, revisado y actualizado en un plazo máximo de cinco años, con el fin de añadirle nueva información, para que a la vez se modifiquen y actualicen los coeficientes de la ciudad en estudio, lo cual se logrará mediante la utilización del software.
- ✓ A su vez, un importante hidrólogo de Chile, el Sr. Andrés Benítez, recomienda realizar un análisis que permita poder calcular las intensidades de cualquier punto de la cuenca o ciudad. Por ejemplo, utilizando la ecuación:


$$I = \frac{\lambda * T^{\psi}}{D^{\eta}}$$

Calculando los parámetros η , ψ , λ ; se podrá utilizar la fórmula para calcular la intensidad para la zona. Además, recomienda, comparar los resultados obtenidos en esta investigación con otros estudios de similar temática.

- ✓ Finalmente, esta investigación abarcó 11 ciudades y poblaciones principales



existentes en el departamento de Tarija, donde para cada ciudad se estimaron sus respectivos coeficientes. Además con el presente software se busca dar facilidad de calcular los coeficientes y actualizarlos con el fin de favorecer una mejor gestión de los recursos hídricos, con el consiguiente beneficio de desarrollo de muchos proyectos debido a la escasa disponibilidad de aforos.

6.8.- BIBLIOGRAFÍA DEL PROYECTO

- ✓ APARICIO, Fernando. "Fundamentos de hidrología de superficie". Editorial Limusa, México, 1996.
- ✓ CHOW Ven Te, MAIDMENT-MAYS. "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill. Bogotá, 1994.
- ✓ SENAMHI. "Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Regional". Tarija, 2010.
- ✓ DR. ING. JOSÉ LUIS MONTAÑO V. "Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia". Abril, 1992 UMSA-La Paz.
- ✓ GARCÍA-MARÍN A P. 2000. Análisis regional de las precipitaciones máximas en Andalucía. Estimación de las relaciones IDF. Trabajo Profesional Fin de Carrera. Universidad de Córdoba.
- ✓ MÁXIMO VILLÓN BÉJAR (2002), Hidrología Estadística. Segunda edición, enero 2002, Editorial Villón, Lima-Perú. [17] VARAS C. EDUARDO; BOIS PHILIPPE, (1998), Hidrología Probabilística, Universidad Católica de Chile.
- ✓ MONTENEGRO, EDGAR, Prado O. Caracterización y uso de las variables hidrometeorológicas medidas en la cuenca Taquiña desde agosto de 1992. LHUMSS-PROMIC.
- ✓ SILVA, G. (1998), Hidrología Básica. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional. Bogotá



- ✓ FARIÁS DE REYES MARINA, 2005, Apuntes de Hidrología Modulo I: Variables Hidrológicas, Universidad de Piura-Perú
- ✓ ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS, Manual de Carreteras Volumen 2. Hidrología, Hidráulica y Drenaje.
- ✓ F. JAVIER SÁNCHEZ SAN RAMÓN, (2003) Hidrología Superficial II Univ. Salamanca
- ✓ PEÑA J. IGNACIO, Problemas de homogeneidad en modelos de series temporales.
- ✓ LINSLEY-KOHLER-PAULHUS, (1977) Hidrología para Ingenieros. Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. Bogotá Colombia.
- ✓ FRIGERIO TRIGO GONZALO, Tesis: Validación de métodos para la estimación de caudales máximos aplicados a cuencas regionales Biblioteca de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho – Tarija.
- ✓ GOMEZ TOBON LUIS ARTURO, Obtención de curvas de intensidad – frecuencia – duración para el departamento de Caldas – Colombia.
- ✓ <http://www.Monografías/Hidrologia/Tormentasdediseño.com>
- ✓ <http://www.umss.edu.bo/epubs/earts/downloads/65.pdf>
- ✓ http://www.ing.udep.edu.pe/civil/material/vial/Tercer%20Trimestre/HDA/Capitulo_3/presentacion3a.pdf