

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

Las cuencas hidrográficas siguen siendo consideradas como la unidad del territorio fundamental para la planeación, aprovechamiento y el manejo de recursos naturales; sin embargo, uno de los principales problemas para los científicos y tomadores de decisiones es la falta de información que muestre la descripción detallada de la cuenca en base a sus diferentes características y dimensiones, su respuesta hidrológica y su delimitación consensuada al interior de un país Barrow, (1998).

Una de las herramientas más importantes para el análisis hídrico es la morfometría de cuencas; ya que nos permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región Maidment, (1992).

Dicha herramienta puede servir también como análisis espacial ayudando en el manejo y planeación de uso de los recursos naturales López, (2002) ya que permite, en el marco de una unidad bien definida del paisaje, conocer diversos componentes como el tamaño de la cuenca, la red de drenaje, la pendiente media, el escurrimiento, etc.

Además de contar con la información biofísica de las cuencas, es necesario también considerar los aspectos socioeconómicos de los pobladores, porque el manejo de los recursos de la cuenca se deben orientar al beneficio de la gente que habita la misma, en este aspecto, es necesario conocer los problemas que afectan la cuenca, tales como la erosión, deforestación, pobreza, etc., de modo que la intervención está orientada a la sostenibilidad y al desarrollo sostenible de la región.

De modo que el presente estudio pretende generar información morfométrico e hidrológica en la cuenca del río Tolomosa, por ser uno de los afluentes más importantes del embalse San Jacinto que es considerada como foco de desarrollo en el Valle Central de Tarija, con sus particularidades, ya que es una fuente generadora de electricidad y de agua para riego para las comunidades que se encuentran agua abajo de la represa.

## **JUSTIFICACIÓN**

La necesidad de obtener información, hace necesario que a nivel regional se cuente con el análisis de los parámetros morfométricos e hidrológicos de la cuenca del río Tolomosa, para así en un futuro implementar un posible plan de manejo de cuencas que permita un mejor manejo de la misma.

La problemática de erosión y degradación ambiental que se evidencia en la cuenca del río del Tolomosa, es de significación tanto para la población que está directamente relacionada con la cuenca, como también para aquellos que no son beneficiarios directos.

Por un lado, el efecto de los activos procesos erosivos, se genera y transportan importantes volúmenes de sedimentos, que se depositan en el embalse San Jacinto y disminuyen su capacidad de almacenamiento y su vida útil.

Por otro lado, los procesos de erosión se originan en una combinación de factores de orden natural y socioeconómico, es decir, que existe una interdependencia entre las características de la zona (geomorfología, régimen hidrológico e hidráulico) y las formas de uso de los recursos naturales por parte de la población de la cuenca a través de la (agricultura-ganadería).

Finalmente, enfatizando la alta demanda del agua para consumo, uso pecuario y agrícola, justifica efectuar el análisis hidrológico para coadyuvar al uso sostenible de los recursos naturales de la cuenca y por medio de estas acciones, mejorar la calidad de vida de los habitantes de la zona. De modo que se hace evidente la demanda de proyectos que ayuden a mejorar el aprovechamiento y almacenamiento del recurso agua y conservación de los suelos mediante, muros de contención para la sedimentación en las riberas de ríos y quebradas, forestación, atajados, construcción de zanjas de infiltración y en especial considerar el componente hídrico que contribuya de manera directa a encarar acciones para aumentar las condiciones de control de sedimentación y detención de aguas de lluvia, como también a futuro considerar la construcción de acciones para cosechar agua sobre el río Tolomosa.

**OBJETIVOS:****OBJETIVO GENERAL**

- Determinar los parámetros morfométricos e hidrológicos de la cuenca del río Tolomosa, orientados a generar información que permita implementar un posible plan de manejo integral de cuencas hidrográficas.

**OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Realizar los cálculos geométricos y de relieve a fin de generar información especializada que contribuya al Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.
- Analizar el régimen pluviométrico para determinar los valores de intensidad, frecuencia y duración.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua; también se define como la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca “divisoras de aguas” se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río.

También se define como un ecosistema en el cual interactúan y se interrelacionan variables biofísicas y socioeconómicas que funcionan como un todo.

Sánchez y Artieda, (2004).

A este respecto, Tapia (2001), dice que la cuenca hidrográfica está constituida por el territorio que delimita el curso de un río y el espacio donde se colecta el agua que converge hacia un mismo cauce. La cuenca hidrográfica, sus recursos naturales y sus habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que les confieren características particulares a cada una, importantes para considerarlas como unidades de planificación.

#### 2.1.1. Clasificación de cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios, tales como tamaño geográfico, los ecosistemas que contienen, recursos que aporta y relieve, entre otros. PEA, (2004).

Por su tamaño, las cuencas hidrográficas pueden ser grandes, medianas o pequeñas, por ejemplo, la cuenca del río Pilcomayo (Bolivia, Argentina y Paraguay), la cuenca del río Bermejo (Bolivia y Argentina) pueden considerarse cuencas grandes, sin embargo, en tamaño estas son pequeñas si se comparan con la cuenca del río Amazonas o la cuenca del Plata. En cuanto, a tamaño y complejidad, los conceptos de pequeñas cuencas o microcuencas, pueden ser muy relativos. Se recomienda

entonces, utilizar criterios conjuntos de comunidades o unidades territoriales manejables desde el punto de vista hidrográfico.

Atendiendo al medio o el ecosistema que predomina en ellas, pueden ser cuencas áridas, cuencas tropicales, cuencas húmedas y cuencas frías. Por la capacidad natural de sus recursos, objetivos y características, las cuencas pueden denominarse, hidroenergéticas, para agua poblacional, agua para riego, agua para navegación, ganaderas, hortícolas y municipales. Considerando el relieve y accidentes del terreno, pueden denominarse planas, cuencas de alta montaña, cuencas accidentadas o quebradas.

Desde el punto de vista del desembogue de sus aguas, las cuencas pueden ser: Exorreicas, que drenan sus aguas al mar o al océano, como es el caso de la cuenca del Río Amazonas en Sudamérica. Endorreicas, que desembocan en lagos, lagunas o salares que no tienen comunicación salida fluvial al mar, como, por ejemplo, la cuenca del río desaguadero en Bolivia. Endorreicas, las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encausarse a una red de drenaje o a un cuerpo hidrográfico de importancia.

### **2.1.2. Partes de una cuenca**

Si el criterio utilizado es la altimetría del terreno se distingue la parte alta, media y baja, sucesivamente, en función de los rangos de altura que tenga la cuenca. Si la diferencia de altura es significativa y varía de 0 a 2,500 msnm, es factible diferenciar las tres partes, si esta diferencia es menor, por ejemplo, de 0 a 1000 msnm, posiblemente solo se distingan dos partes, y si la cuenca es casi plana será menos probable establecer partes. Generalmente este criterio de la altura, se relaciona con el clima y puede ser una forma de establecer las partes de una cuenca. Vásquez, (2000) Otro criterio similar al anterior, es la relación con el relieve y la forma del terreno, las partes accidentadas forman las montañas y laderas, las partes onduladas, casi planas y planas, forman los valles; y finalmente otra parte es la zona por donde discurre el río principal y sus afluentes, a esta se le denomina cauce.



Figura N° 1. Partes de una Cuenca hidrográfica

### 2.1.3. Componentes de una cuenca hidrográfica

Según Faustino, (2006) los componentes de una cuenca hidrográfica son:

#### ➤ **Biológicos**

Los bosques, los cultivos y en general los vegetales conforman la flora, constituyendo junto con la fauna el componente biológico.

#### ➤ **Físicos**

El agua, el suelo, el subsuelo, y el aire constituyen el componente físico de la cuenca.

#### ➤ **Socioeconómicos**

Son las comunidades que habitan en la cuenca, las que aprovechan y transforman los recursos naturales para su beneficio, construyen obras de infraestructura, de servicio y de producción, los cuales elevan nivel de vida de estos habitantes.

### 2.1.4. Funciones de una cuenca hidrográfica

Recordemos que la cuenca funciona como un todo, si bien tiene componentes, estos de forma separada no son funcionales. La cuenca cumple diversas funciones, tales como:

#### ➤ **Hidrológica**

a) Captación de agua de las diferentes fuentes de para formar manantiales, manantiales, ríos y arroyos.

b) Almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración.

c) Descarga del agua como escurrimiento.

➤ **Ecológica**

a) Provee diversidad de sitios y rutas a lo largo de la cual se llevan a cabo interacciones entre las características de calidad física y química del agua. (Permiten que el agua intercambie elementos con el suelo).

b) Provee de hábitat para la flora y fauna que constituyen los elementos biológicos del ecosistema y tienen interacciones con las características físicas y biológicas del agua.

➤ **Ambiental**

a) Constituyen sumideros de CO<sub>2</sub>. (Capturan y retienen carbono)

b) Alberga bancos de germoplasma.

c) Regula la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos.

d) Conserva la biodiversidad.

➤ **Socioeconómica**

a) Suministra recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas que dan sustento a la población.

b) Provee de un espacio para el desarrollo social y cultural de la sociedad.

Faustino (2006).

### **2.1.5. Importancia de una cuenca hidrográfica**

Las cuencas hidrográficas son algo más que sólo áreas de desagüe en o alrededor de nuestras comunidades. Son necesarias para brindar un hábitat a plantas y animales, y proporcionan agua potable para la gente, sus cultivos, animales e industrias. También nos proporcionan la oportunidad para divertirnos y disfrutar de la naturaleza. La protección de los recursos naturales en nuestras cuencas es esencial para mantener la salud y el bienestar de todos los seres vivos, tanto en el presente como en el futuro Villegas, (2004).

Según Durojeanni, (1999) manifiestan que es importante proteger y manejar una cuenca adecuadamente.

#### **2.1.6. Por qué es importante proteger las cuencas hidrográficas**

Las cuencas recogen el agua que necesitamos para el consumo humano. El agua es esencial para todas las formas de vida.

El agua que usamos normalmente proviene de lagos que están localizados en las cuencas hidrográficas. Los lagos son cuerpos de agua represados por el hombre en aquellas áreas donde existen varios ríos y quebradas.

Las cuencas hidrográficas mantienen el equilibrio entre los organismos y el ambiente y nos proveen de los recursos necesarios para que se lleve a cabo el ciclo de agua, por el cual se genera la lluvia.

#### **2.1.7. Por qué se debe manejar adecuadamente una cuenca**

En la cuenca se producen, relaciones, interacciones e interrelaciones y es un sistema natural dinámico de elementos físicos, biológicos, sociales, económicos y políticos que se relacionan entre sí, evolucionando permanentemente en función de las actividades antrópicas.

Constituye el espacio indicado para combinar adecuadamente: el manejo forestal con el ordenamiento integral de los recursos naturales donde se hagan compatibles las demandas sociales con las capacidades o soporte de la naturaleza y en donde el hombre juega un rol principal ya que con sus decisiones y comportamiento, puede producir cambios positivos o negativos en las cuencas.

#### **2.1.8. Porqué la cuenca se considera como un sistema**

Como se ha dicho, la cuenca la conforman componentes biofísicos como el agua, los suelos biológicos como la flora y la fauna y antropocéntricos que se refieren a las actividades socioeconómicas y culturales que desarrolla el hombre como principal actor.

Todos estos componentes están interrelacionados y deben de estar en equilibrio ya que al afectarse uno de ellos pone en peligro todo el sistema.

Esto significa que es necesario estudiar y conocer cada uno de estos componentes pero la mejor manera es hacerlo considerando todo el sistema que en este caso es la cuenca. Por otro lado, de los recursos naturales que se tienen en la cuenca, unos pueden ser renovables (el agua, la biodiversidad, el suelo agrícola) siempre que pueden reemplazarse por vía natural o mediante la intervención humana; pero también pueden ser no renovable cuando no se pueden reemplazar en un período de tiempo significativo, en términos de las actividades humanas a las que están sometidos. Dourojeanni, (1999).

### **2.1.9. Manejo de cuencas**

El tema de manejo de cuencas como disciplina académica y como parte de las acciones fomentadas por los gobiernos, esta poco desarrollado especialmente en Bolivia. Esto no implica que no se hubieran creado autoridades dentro de las cuencas del país. Estas autoridades sin embargo no tenían dentro de sus acciones “manejar” las cuencas aun cuando si manejaban el agua, pues el concepto de cuenca como un todo integral estaba muy poco desarrollado. En la década de los 60 primaba la necesidad de “desarrollar” las cuencas en el sentido de habilitarlas para aprovechar sus recursos, controlar inundaciones, utilizar las tierras con fines agrícolas, pecuarios, forestales y establecer poblaciones, industrias y explotaciones mineras en las mismas pero en forma atomizada y no integrada. MDSP – SNRNMA, (1997).

En América Latina, en general, se realizaron trabajos tomando en cuenta la cuenca hidrográfica para resolver problemas puntuales y demandas específicas o sectoriales de agua: garantizar la navegación y mejorarla, abastecer de agua a poblaciones y zonas de riego, controlar inundaciones, mitigar sequías y muchas veces aportar energía. FAO – MDSP, (2001).

Esta gestión se limitaba a ocuparse de los sistemas construidos sin mayor interés ni por el uso múltiple del agua ni por el manejo de la cuenca. Así en la región se implementaron una serie de sistemas de gestión del agua por cuencas, gran parte de los

cuales sólo se preocuparon del uso sectorial que le daban al agua como en el caso de riego. A partir de fines de 1940 y debido al surgimiento de las necesidades industriales se crearon corporaciones para el desarrollo integral de cuencas (desarrollo regional a nivel de cuencas). Estas corporaciones se sustentaron en la construcción de obras hidráulicas para abarcar extensos territorios bajo su jurisdicción y realizar inversiones en múltiples sectores. FAO – MDSP, (2001).

En Bolivia, los proyectos relacionados con los recursos hídricos, se iniciaron con el fin de mejorar la provisión de agua para riego, para esto se construyeron sistemas de riego de considerable magnitud con un enfoque netamente técnico ignorando la participación de usuarios y comunidades campesinas. VRHR, (2007).

En épocas más recientes, al inicio de la década de 1980, apareció la temática de “manejo de cuencas” pero no como un concepto integral sino con el fin de mitigar el aporte de sedimentos a los embalses construidos y controlar deslizamientos o inundaciones o lograr producciones industriales en lo que se llamaron los polos de desarrollo. En esta década se llevaron adelante grandes inversiones de construcción de infraestructura de utilización del agua a gran escala asumiendo que los actores de las cuencas simplemente debían aceptar lo que venía impuesto por el gobierno central. En estos casos el concepto de integralidad simplemente no existía y son pocos los casos en que se manejan todos los recursos naturales de la cuenca: flora, fauna, bosques y tierras para aprovecharlos y conservarlos. Así se puede observar grandes proyectos de riego de gran envergadura en las áreas rurales del país, pero que los mismos no cumplieron ni cumplen su función en términos de eficiencia tanto en operación distribución y aplicación.

Desafortunadamente el tiempo mostró que cualquier proyecto que no incluya una activa participación de los actores de las Cuencas llevaba con seguridad al fracaso del proyecto y en casos peores la inversión no solo fue sin sentido, sino que ocasionó destrozos irreversibles en el medio ambiente. En este periodo aparecen en sus etapas germinales los proyectos que incorporaban los sistemas agrosilvopastoriles o de producción integral que de ningún modo llegaron a llenar la carencia de un sistema de coordinación para el manejo de los recursos naturales por cuencas. VRHR, (2007)

Por otra parte, la temática ambiental surge más tarde en América Latina (5 a 7 años después de la reunión de Estocolmo, 1972), lo cual también tuvo su efecto en Bolivia a finales de los 70's e inicios de los 80's. Empezaron los estudios de impacto ambiental y análisis ambientales aunque sin una norma reguladora, estos estudios solo produjeron indiferencia en los actores. En gran medida la gestión ambiental a nivel de cuencas en ese periodo no ha pasado de los estudios y propuestas.

Con estos antecedentes, el manejo de cuencas se refiere a la gestión que el hombre realiza a nivel de la cuenca para aprovechar, proteger y conservar los recursos naturales que le ofrece, con el fin de obtener una producción óptima y sostenida para lograr una calidad de vida acorde con sus necesidades".

#### **2.1.10 Manejo integral de cuencas**

Es el uso espacial de la cuenca para potenciar y emplear racional y adecuadamente todos los recursos naturales existentes dentro de la cuenca, aplicando tecnologías que se refiere al aprovechamiento y conservación de los recursos naturales, la infraestructura básica rural y la protección de las ciudades. Todo a fin de que sirva en forma eficiente y equitativa a las sociedades y al desarrollo de su medio, de tal manera que haya un equilibrio entre el hombre y la naturaleza. Rodríguez, (1998).

Vásquez (2000) en correspondencia con lo anterior, dice que el manejo de cuencas se refiere a todas las acciones técnicas conducentes al buen uso del espacio de la cuenca y en especial del recurso agua, el cual genera la sostenibilidad del medio y la satisfacción máxima de las necesidades humanas. Todo ello, en función de la demanda inmediata de agua de los múltiples actores sociales que la usan (agricultores, ganaderos, consumidores urbanos) o la demanda de los que operan dentro de las cuencas con otros fines (empresas públicas y privadas de agua potable, electricidad, turismo, recreación y otros).

En consecuencia el uso y aprovechamiento racional de los recursos naturales se logrará a través de la ejecución de medidas conducentes a activar el ciclo hidrológico y estarán orientadas a garantizar su sostenibilidad en el tiempo, entre ellos se destaca los siguientes:

- Generar más agua o captar la misma (terrazas o andenes, bosques, lagunas artificiales para reservar el agua de lluvia o de las inundaciones, presas, zanjas o acequias de infiltración, camellones, etc.), de tal modo que sea posible cubrir la demanda de la agricultura, ganadería y del consumo de agua potable de las comunidades.
- Conseguir una dosificación del uso del agua, en otras palabras la racionalización del uso del agua, sea ésta potable, de los reservorios, transvases, drenajes, zanjas de desviación, manejo del agua de riego u otras.
- Distribuir equitativamente el volumen del agua en toda la cuenca de tal manera que haya una satisfacción adecuada de la demanda de todos los actores, trasladando el agua de donde haya exceso y no se requiera, a donde se necesite con mayor urgencia.
- Mantener la calidad del agua, evitando su contaminación, para así tener una agricultura y ganadería sostenidas, amparar la salud de la población humana y animal, y asegurar la conservación de la infraestructura básica instalada en la cuenca.
- Evitar la contaminación de los suelos y las aguas; evitar o disminuir la erosión de los suelos; y evitar o disminuir la deforestación y el sobre pastoreo, mediante la promoción y el desarrollo de trabajos dirigidos a la conservación de suelos, conservación de praderas naturales, incentivando la reforestación y forestación. Promover la formación y toma de conciencia conservacionista por parte de toda la sociedad involucrada en el área de la cuenca.

Es decir, la ordenación de cuencas es el proceso de planificación sistemático, de previsión, continuo e integral, conducente al uso y manejo sostenible de los recursos naturales y condiciones de una cuenca, de manera que se mantenga o restablezca un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura y función físico biótica de la cuenca. La ordenación así concebida constituye el marco para planificar el uso sostenible de la cuenca y la ejecución de programas y proyectos específicos dirigidos a aprovechar

adecuadamente, conservar, preservar, prevenir el deterioro y restaurar la cuenca hidrográfica. PEA, (2004).

## **2.2. Parámetros Morfométricos**

### **2.2.1. Área**

Es el tamaño de la superficie de cada cuenca en  $\text{km}^2$ . Se obtiene automáticamente a partir de la digitalización y poligonización de las cuencas en el software de sistema de información geográfica. El área de una cuenca en general, se encuentra relacionada con los procesos que en ella ocurren. Villon, (2002).

**2.2.1.1. Cuenca grande.** Es aquella cuenca en la que predominan las características fisiográficas de la misma (pendiente, elevación, área, cauce). Una cuenca, para fines prácticos, se considera grande, cuando el área es mayor de  $250 \text{ km}^2$ .

**2.2.1.2. Cuenca pequeña.** Es aquella cuenca que responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y en la cual las características físicas (tipo de suelo, vegetación) son más importantes que las del cauce. Se considera cuenca pequeña aquella cuya área varía desde unas pocas hectáreas hasta un límite, que para propósitos prácticos, se considera  $250 \text{ km}^2$ . Villon, (2002).

### **2.2.2. Longitud, perímetro y ancho.**

La longitud, L, de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea de divorcio de la hoya es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca. Usualmente este parámetro físico es simbolizado por la letra mayúscula P (Figura1).

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) y se designa por la letra W. Villon, (2002).

$$W = \frac{A}{L}$$

Donde:

W=Ancho de la cuenca

A = Área de la cuenca

L= Longitud de la cuenca

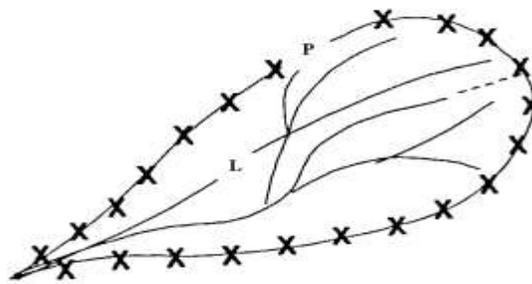


Figura N° 2. Longitud y perímetro de la cuenca.

### 2.2.3. Parámetro de forma

#### 2.2.3.1. Factor de forma (F)

Expresa la relación entre el ancho promedio de la cuenca ( $w$ ) y la longitud ( $L$ )

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, se trata de cuantificar estas características por medio de índices o coeficientes, los cuales relacionan el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento

Parece claro que existe una fuerte componente probabilística en la determinación de una cuenca mediante sus parámetros y las características de la red de drenaje principal  
factor de forma es:

$$Rf = \frac{A}{(L)^2}$$

Donde:

$R_f$  = Factor de forma

L = Longitud Máxima

A = Área

Cuadro N° 1. Forma de la cuenca en función al factor de forma.

<b>Clases de valores de forma</b>	
<b>Rangos de Kf</b>	<b>Clases de forma</b>
0 - 1,8	Muy poco achatada
1,8 - 3,6	Ligeramente achatada
3,6 - 5,4	Moderadamente achatada
>1	Muy achatada

Fuente: (INE) Instituto Nacional de Ecología

### 2.2.3.2. Índice o coeficiente de compacidad

El índice o coeficiente de compacidad  $K_c$  se debe a Gravelius, y es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca. Llamas (1993) da la siguiente expresión:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

$K_c$  = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro

A = Área

Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular tendrá un coeficiente de compacidad mínimo, igual a 1.

Existen tres categorías para la clasificación según el valor de este parámetro:

Cuadro N° 2. Índice de Gravelius para la evaluación de la forma.

Clase	Rango	Descripción
Kc 1	1 a 1,25	Forma casi redonda a oval-redonda
Kc 2	1,25 a 1,5	Forma oval- redonda a oval- alargada.
Kc 3	1,5 a 1,75	Forma oval- alargada a alargada

Fuente: Ortiz (2004).

#### 2.2.3.4. Radio o relación de elongación

El radio o la relación de elongación ( $R_f$ ) Definido por Schumm, es la relación entre el diámetro de un círculo de área igual a la cuenca y la longitud de la cuenca (L). Expresando el diámetro en función del área de la cuenca (A) queda:

$$R_f = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$$

Donde:

$R_f$ = Radio de elongación

L = Longitud Máxima

A = Área de la cuenca

#### 2.2.3.5. Rectángulo equivalente

Para poder comparar el comportamiento hidrológico de dos cuencas, se utiliza la noción de rectángulo equivalente o rectángulo de Gravelius. Se trata de una transformación puramente geométrica en virtud de la cual se asimila la cuenca a un rectángulo que tenga el mismo perímetro y superficie, y, por tanto, igual coeficiente de Gravelius (coeficiente de compacidad, Kc). Así, las curvas de nivel se transforman en rectas paralelas al lado menor del rectángulo, y el desagüe de la cuenca, que es un punto, queda convertido en el lado menor del rectángulo.

Para la construcción del rectángulo, se parte del perímetro, P, y el área de la cuenca, A. Si los lados menores y mayor del rectángulo son, respectivamente, L1 y L2, entonces:

Perímetro del rectángulo:

$$P = 2(L_1 + L_2) = \frac{K_c \sqrt{A}}{0.28}$$

Siendo  $L_1 L_2 = A$

La solución de este sistema de ecuaciones es:

Lado  $L_1$  del Rectángulo: lado mayor del rectángulo

$$L_1 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Lado  $l_1$  del Rectángulo: lado menor del rectángulo

$$l_1 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$L_1$ = Lado mayor del rectángulo

$l_1$ = Lado menor de la rectángulo

$K_c$ = Coeficiente de compacidad

$A$ = Área de la cuenca

## 2.2.4. Parámetros relativos al relieve

### 2.2.4.1. Pendiente de la cuenca hidrográfica

La pendiente de la cuenca, es un parámetro muy importante en el estudio de toda la cuenca, tiene una relación importante y compleja con la infiltración del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación a las crecidas.

La pendiente de la cuenca es la relación del desnivel que existe entre los extremos de la cuenca, siendo la cota mayor y la cota menor, y la proyección horizontal de su longitud, siendo el lado más largo de la cuenca. Villon, (2002)

### 2.2.4.2. Pendiente media de la cuenca

$$S = \frac{2H}{P}$$

Donde:

S= Pendiente media de la cuenca

H = Diferencia de cota

P = Perímetro de la cuenca

Cuadro N° 3 Clasificación de la pendiente

<b>Clases de valores de pendiente media de la cuenca (%)</b>	
<b>Rangos de pendiente</b>	<b>Clases</b>
0 - 2	Plano o casi a nivel
2 - 4	Ligeramente inclinado
4- 8	Moderadamente inclinado
8- 15	Fuerte mente inclinado
15 - 25	Moderadamente empinado
25 - 50	Empinado
50 - 75	Muy empinado
>75	Extremadamente empinado

Fuente: (INE) Instituto Nacional de Ecología

### 2.2.4.3. Pendiente del cauce principal

El conocimiento de la pendiente del cauce principal de una cuenca, es un parámetro importante, en el estudio del comportamiento de recurso hídrico, como por ejemplo, para la determinación de las características óptimas de su aprovechamiento hidroeléctrico, o en la solución de problemas de inundaciones.

Se determina según la relación entre el desnivel que hay entre los extremos el cauce y la proyección horizontal de su longitud. Villon, (2002).

$$S = \frac{H}{L}$$

Donde:

S: Pendiente media del cauce

H: Desnivel entre los puntos más elevado y más bajo

L: Longitud del cauce

Cuadro N° 4. Clasificación de la pendiente del cauce principal

<b>Rango</b>	<b>Termino Descriptivo</b>
0-2%	Plano o casi a nivel
2 - 4 %	Ligeramente inclinado
4 - 8 %	Moderadamente inclinado
8 - 15 %	Fuertemente inclinado
15 - 25 %	Moderadamente empinado
25 - 50 %	Empinado
50 - 75 %	Muy empinado
> 75 %	Extremadamente empinado

Fuente: EL PERUANO 2009

La forma de cuantificar el relieve de una cuenca es mediante la curva hipsométrica, definida por la distribución de las elevaciones de la cuenca utilizando curvas de igual

altitud. Se caracterizara la proporción de la superficie total de la cuenca comprendida entre 2 curvas adyacentes Benítez Chunga, (1978).

De esta forma se refleja el estado de equilibrio dinámico y el potencial erosivo del sistema.

#### **2.2.4.4. La relación de relieve**

Schumm (1956) propone una expresión muy simple para la descripción del relieve, (Relif Ratio) la Relación de Relieve ( $R_r$ ) en función de la longitud de la cuenca  $L$  y de la diferencia de altura entre la salida de la cuenca y el punto más alto en la divisoria de la cuenca ( $h$ ):

$$R_r = \frac{h}{L}$$

Donde:

$R_r$  = Relación de Relieve

$h$  = Diferencia de altura entre la salida y el punto más alto en la divisoria

$L$  = Longitud de la cuenca

#### **2.2.4.5. Relación hipsométrica**

$$Rh = \frac{S_s}{S_i}$$

Donde:

$Rh$  = Relación hipsométrica

$S_s$  y  $S_i$  = Las áreas sobre y bajo la curva hipsométrica.

Según Strahler LLamas, (1993), la importancia de esta relación reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Así, cuando  $Rh = 1$ , se trata de una cuenca en equilibrio morfológico.

### 2.2.4.6. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico tomándose los valores en porcentajes del área que están por debajo de una determinada altura, que inicialmente serán la del punto más bajo de la cuenca e irá aumentando de acuerdo a los valores de las cotas de la curva de nivel que encierra las franjas de terreno por ellas definidas y el punto de salida que es generalmente el sitio más bajo de la cuenca. Villon, (2002).

Se divide en tres zonas (Figura 3):

- 1.- Zona donde predomina la producción de sedimentos y aguas (Ríos jóvenes).
  - 2.- Zona donde predomina el transporte de ambos (Ríos maduros)
  - 3.- Zona caracterizada por la deposición de sedimentos (Ríos en etapa de vejez)
- Llamas, (1993).

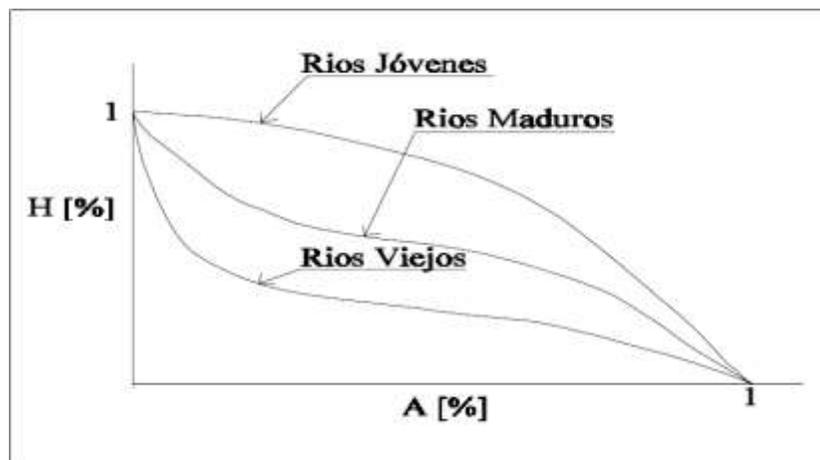


Figura N°3 Clasificación de los ríos de acuerdo a la curva Hipsométrica.

## 2.2.5. Parámetros relativos al drenaje

### 2.2.5.1. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje, es un parámetro que indica la posible naturaleza de los suelos, que se encuentran en la cuenca. También da una idea sobre el grado de cobertura que existe en la cuenca. Valores altos de drenaje, representan zonas con poca cobertura vegetal, suelos fácilmente erosionables o impermeables. Por el contrario, valores bajos,

indican suelos duros, poco erosionables o muy permeables y coberturas vegetales densa Villon, (2002). Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua dentro de la cuenca y el área total de ésta:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde

$D_d$ = Densidad de drenaje

$L$ = Longitud total de las corrientes

$A$ = Área total de la cuenca

Cuadro N ° 5 Clasificación de la densidad de drenaje

Clases de densidad de drenaje	
Rangos de densidad	Clases
1-1.8	Baja
1.9-3.6	Moderada
3.7-5.6	Alta

Fuente: (INE) Instituto Nacional de Ecología

#### 2.2.5.2. Densidad hidrográfica

Se define como el cociente entre el número de segmentos de canal de la cuenca y la superficie de la misma:

$$F = \frac{NT}{A}$$

Donde:

$F$ =Densidad hidrográfica.

$NT$ = la suma de todos los segmentos de canal que forman la red hidrográfica de la cuenca.

$A$ =Área de la cuenca.

#### **2.2.5.2.1. Modelo de ordenación de Horton – Strahler**

Horton (1945) propuso un esquema de ordenamiento para la red de drenaje, con base en este ordenamiento, encontró algunas regularidades existentes en la red de drenaje, relacionadas con la estructura de bifurcación, y su distribución espacial. Los primeros resultados empíricos sobre estas regularidades se conocen como las Leyes de Horton: las llamadas ley de los números de corriente y ley de las longitudes de corriente.

#### **2.2.5.2.2. Modelo de ordenación de Horton – Strahler**

Strahler (1952, 1957), revisó y perfeccionó el esquema de Horton dando lugar al esquema de ordenación o de clasificación de Horton-Strahler, hoy en día el más utilizado en hidrología (hay otros modelos, como el de Shreve (1966), Mock (1971), etc.).

Las redes de drenaje pueden ser modeladas o representadas como árboles, los cuales están conformados por un conjunto de nodos conectados unos a otros por segmentos de recta de manera que cada nodo tiene solo una ruta hacia la salida. Los nodos que se conectan a un solo segmento son llamados fuentes y los que conectan a más de uno son llamados uniones. Además los segmentos que se conectan a una fuente y a una unión se los denomina tramos exteriores o externos y a aquellos que se conectan a dos uniones se les denomina tramos interiores o internos.

Se considera que la cuenca tiene una única salida o punto de desagüe; Los puntos en los que se unen dos segmentos de canal son los nudos internos; Los nudos externos son aquellos a partir de los cuales se origina un segmento de canal (es decir, la cabecera de todos los tributarios de la cuenca

Según Strahler una corriente puede tener uno o más segmentos. Un canal es una unión arbitraria de segmentos (ej. canal principal). Strahler ordena las corrientes de acuerdo los siguientes criterios:

1. Los segmentos que se originan en un nudo externo son definidos como tramos de primer orden. Los segmentos que están unidos a una fuente (los que no tienen tributarios), son definidos como de primer orden.
2. Cuando dos segmentos del mismo orden,  $i$ , se unen en un nudo interior dan lugar a un segmento de orden superior,  $i+1$ , aguas abajo. Cuando se unen dos corrientes de orden  $i$  crean una corriente de orden  $i+1$ .
3. Cuando se unen dos tramos de distinto orden en un nudo interior dan lugar a un tramo que conserva el mayor de los órdenes. Cuando se unen dos tramos de distinto orden el orden del segmento resultante es el máximo orden de los segmentos que la preceden. Cuando a una corriente se le une otra de menor orden, la primera continúa y conserva su número de orden.
4. El orden de la cuenca, es el de la corriente de mayor orden.

En la ilustración siguiente, se muestra un sencillo ejemplo de ordenación de una red hidrográfica según el criterio de Strahler.

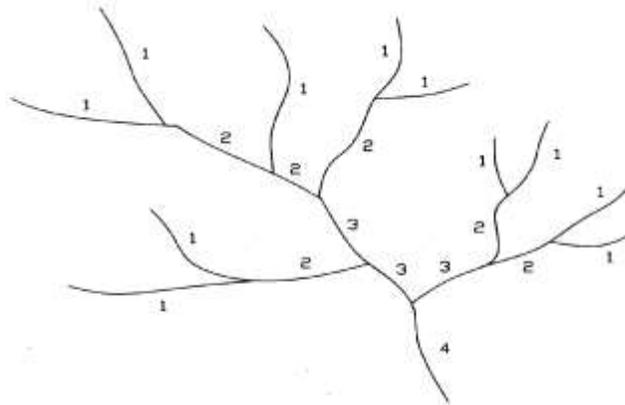


Fig. N° 4 Ordenación de una red de canales según Strahler.

Cuadro N° 6 Clasificación de orden de corrientes

<b>Clases de orden de corriente</b>	
<b>Rangos de ordenes</b>	<b>Clases de orden</b>
1-2	Bajo
2.1-4	Medio
4.1-6	Alto

Fuente: (INE) Instituto Nacional de Ecología

### **2.3. Los sistemas de información geográfica en la evaluación física de las cuencas hidrográficas**

Los sistemas de información geográfica son definidos como un sistema computarizado que permite la entrada, almacenamiento, representación y salida eficiente de datos espaciales (mapas) y atributos (descriptores) de acuerdo a especificaciones y requerimientos concretos, también se lo considera como una combinación de software y hardware capaz de manipular entidades que contengan propiedades de localización y atributos. Según la FAO (1994), entre las ventajas de esta herramienta SIG están su adaptabilidad a una gran variedad de modelamiento con una mínima inversión de tiempo y dinero; los datos espaciales y no espaciales pueden ser analizados simultáneamente en una forma relacional; gran diversidad de modelos conceptuales pueden ser probados rápidamente y repetidos varias veces facilitando su ajuste y evaluación Valenzuela, (1989).

### **2.4. Hidrología**

La hidrología es una rama de las ciencias de la tierra que estudia el agua, su distribución, circulación, y propiedades físicas, químicas y mecánicas en los océanos, atmosfera y superficie terrestre, esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares.

La Hidrología, según Dingman (1994), es “La ciencia que se enfoca al ciclo hidrológico global y a los procesos involucrados en la parte continental de dicho ciclo, es decir, es la geociencia que describe y predice:

- Las variaciones espaciales y temporales del agua en las etapas terrestre, oceánica y atmosférica del sistema hídrico global y;
- El movimiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, incluyendo los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar a lo largo de su trayectoria”.

#### **2.4.1. Estudio hidrológico de las cuencas**

Según Nanía (2003), el objetivo de los estudios hidrológicos es acercar el recurso al usuario en el momento que sea necesario, esto es en el caso de sequías o de lugares donde el agua es escasa, creando embalses, canales, acueductos, redes de tuberías, zonas de regadío y defender al hombre de los efectos devastadores de las avenidas, creando obras de defensa y drenaje. En este sentido, el alcance y los propósitos de los estudios hidrológicos en las cuencas son:

- La medida, registro y publicación de los datos de base.
- El análisis de esos datos para desarrollar y ampliar las teorías fundamentales.
- La aplicación de esas teorías y datos a los múltiples problemas prácticos.

En términos de ciclo hidrológico, el alcance de la hidrología puede definirse como la parte del ciclo hidrológico que abarca desde la precipitación a la evaporación o retorno de las aguas al mar. Las restantes fases del ciclo son tratadas por otras ciencias tales como la oceanografía y la meteorología. La hidrología también incluye dentro de su alcance, a las aguas de origen interno que serán parte de los recursos hidráulicos disponibles de la tierra.

La hidrología necesita el apoyo de otras ciencias básicas tales como la física, la química, la biología, la geología, la mecánica de los fluidos, la matemática, la estadística. Por otro lado, dado que el ciclo hidrológico se desarrolla en la atmósfera, la hidrología atraviesa el dominio de la meteorología y climatología. Dentro de la hidrosfera, la hidrología cruza o forma parte de la potamología (cauces superficiales), limnología (lagos), criología (nieve y hielo), glaciología y oceanología. En la litosfera, la hidrología se relaciona con la agronomía, hidrogeología (énfasis en aspectos

hidrológicos), geo-hidrología (énfasis en aspectos geológicos) y geomorfología. Aparicio, (1999).

#### **2.4.2. Análisis de las precipitaciones**

La estimación de la lluvia con un determinado periodo de retorno se realiza a partir de los valores de lluvia diarias en la cuenca. La designación de los periodos de retorno a las lluvias se hace mediante cálculos estadísticos, y el modelo que se use y la forma de estimar sus parámetros son determinantes a la hora de obtener los resultados. Los cálculos se realizan con los datos de caudales máximos anuales instantáneos obtenidos de la estación meteorológica, a los cuales es necesario aplicar una serie de métodos estadísticos para el cálculo de los caudales de avenida. En nuestro caso hemos aplicado el método de Gumbel.

La distribución Gumbel se utiliza para el cálculo de valores extremos de variables meteorológicas (entre ellas precipitaciones y caudales máximos) y es uno de los métodos más empleados para el estudio de las precipitaciones máximas en 24 horas.

El “valor máximo” que se quiere determinar para un determinado período de retorno se determina por medio de la expresión:

$$X_t = ms + Kt * S$$

Donde:

$X_t$  = Valor máximo (caudal o precipitación) para un periodo de retorno.

$Ms$  = Media de la muestra.

$Kt$  = Factor de frecuencia.

$S$  = Desviación típica de la muestra

#### **2.4.3. Análisis estadístico de precipitaciones máximas**

Estudiar las precipitaciones y conocer su distribución temporal es con diversos fines como meteorológicos y edafológicos como también hidrológicos al tiempo de cual se pueden proporcionar índices de precipitación esorrentía que permitan realizar un adecuado diseño de diferentes obras de conservación de suelos, para esto es necesario

conocer las intensidades de la precipitación para distintos periodos de retorno. También se necesita conocer el comportamiento a través de una curva en función a la duración y frecuencia cuyo fin será aportar patrones de conductas de las lluvias de tal manera que permitan realizar diseños confiables y efectivos. Pizarro, (1998)

El análisis de extremos se aplica sobre las series de máximos mensuales de precipitación diaria en la totalidad de las estaciones pluviométricas consideradas. Se trata de un análisis que tiene por objetivo establecer en varios puntos geográficos representativos de la cuenca, una estimación de las precipitaciones máximas diarias asociadas a distintos niveles de probabilidad o periodos de retorno.

Conforme a su definición, si  $x_t$  es un valor asociado a un periodo de retorno  $T$  en años, la probabilidad de que ocurra una precipitación de magnitud superior a  $x_t$  un año dado es  $1/T$ . Para  $T=100$ , por ejemplo, las probabilidades de que se supere el valor  $x/100$ ; una, dos o más de dos veces durante un siglo son 37.0%, 18.5% y 7.9%, y la probabilidad de no ser superado ese valor durante ese periodo es del 36.6%.

El procedimiento empleado para la determinación de los valores  $x_t$  es el ya clásico análisis de frecuencia de extremos mediante la función de distribución extrema tipo I de Gumbel. Se considera que los valores de precipitación máximos mensuales se ajustan a esta distribución, que tiene la siguiente expresión:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Los parámetros de la distribución  $\alpha$  y  $\beta$ , en función de la media y distribución típica poblacionales son:

$$\mu = \beta + \frac{0.572}{\alpha} \qquad \sigma = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$$

Para la estimación de estos parámetros utilizamos el método de los momentos, que consiste en igualar los valores muestrales de los estadísticos con los valores teóricos poblacionales. De este modo se obtiene una función de distribución para cada una de las series correspondientes a las diferentes estaciones pluviométricas. Entonces, el

valor  $x_T$  de la precipitación asociada a un determinado periodo de retorno T, viene dado por la expresión:

$$x_T = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]$$

Mediante la aplicación de esta expresión se hallan los valores de máxima precipitación diaria asociados a los distintos periodos de retorno.

#### **2.4.4. Definiciones de las Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF).**

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

Témez, (1978).

Las curvas IDF son la representación gráfica de la relación que existe entre la intensidad y la duración de un evento máximo de lluvia, asociado a la frecuencia o periodo de retorno, donde para cada periodo de retorno se tiene una curva diferente Nanía, (2003); Pizarro *et al.*, (2001).

Mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas intensas de distintas duraciones y para diferentes periodos de retorno.

La metodología tradicional usada para el cálculo de las curvas IDF consiste básicamente en realizar un análisis de frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidas para cada duración.

#### **2.4.5. Aplicación de las curvas Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)**

Las curvas IDF son de gran ayuda en la construcción de obras de control de erosión y recuperación de suelos degradados. En obras como zanjas de infiltración, canales de desviación, diques de gravedad y otras destinadas al control de cárcavas y procesos erosivos en laderas, se hace necesario conocer los máximos valores de intensidades de precipitación que se pueden alcanzar, con el objetivo de estimar el monto máximo de escorrentía que se podría producir en la ladera de un cerro, en una quebrada o en una cárcava y así poder dimensionar dichas obras (Pizarro *et al.*, 2005)

## CAPÍTULO III

### 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

La cuenca del río Tolomosa, constituye uno de los principales afluentes de la cuenca del río Guadalquivir, desembocando sus aguas en la parte baja del Valle Central de Tarija.

La cuenca del río Tolomosa se encuentra, al sudoeste de la ciudad de Tarija, teniéndose como principales comunidades: San Jacinto, San Andrés, Lazareto, Turumayo, San Pedro de Sola, Pantipampa, Bella Vista, Pino Norte, Pino Sur, Tolomosa Sur, Tolomocita Oeste, Tolomosa Centro, Tolomosa Grande, Churquis, Pampa Redonda, etc.

La cuenca limita al norte con el embalse de San Jacinto, al Sud con la 2da Sección de Avilés, al este con la 1° Sección de Avilés y al oeste con la 2° Sección de Avilés.

La cuenca del río Tolomosa administrativamente se encuentra en el Municipio de Tarija o la Sección Municipal de Cercado y de la Subprefectura de Cercado. Geográficamente se encuentra ubicada entre los paralelos 21°46'50" y 64°58'28" de latitud sur y meridianos 21°33'52" y 64°43'49" de longitud oeste. PERTT, (2008).



que influye en todos los procesos geomorfológicos, la distribución de las lluvias, nubosidad, humedad ambiental, tipología de la vegetación, calidad de los suelos y procesos hidrológicos

El clima de la cuenca varía de acuerdo al gradiente altitudinal desde muy frío húmedo a semihúmedo en la zona montañosa hasta templado semiárido en la zona de Valle. INIBREH, (2011).

### **3.2.2. Geología**

La zona geológicamente corresponde al ordovícico, silúrico y devónico (areniscas, conglomerados, limolitas y lutitas), con un paisaje de pequeños valles, formados predominantemente por llanuras aluviales y abanicos de origen fluvial, llanuras aluviales y de pie de monte, compuestas por limos arcillas, arenas y gravas del cuaternario.

La cuenca del río Tolomosa se encuentra a alturas entre 2.200 y 3.500 msnm, comprende principalmente las estribaciones de la Cordillera de Sama, la cual presenta un complejo de serranías y laderas, surcadas con profundas quebradas y con la presencia de terrazas o mesetas, de origen fluvio lacustre, aluviales y abanicos de origen fluvial.

### **3.2.3. Suelos**

Esta zona se caracteriza por presentar suelos formados a partir de terrazas aluviales, coluviales y coluvio aluviales depositados durante el periodo terciario y cuaternario respectivamente, con diferentes niveles de terrazas, como consecuencia de la acumulación y posterior entallamiento y profundización de los ríos. Los suelos son del tipo Cambisoles, Lixisoles. PERTT,(2008)

**Tabla N° 1 Uso del Suelo**

<b>Clase de suelo</b>	<b>Características del suelo</b>	<b>Superficies (Has)</b>
<b>I</b>	Tierras muy buenas sin limitaciones.	0,00
<b>II</b>	Tierras aptas para uso agrícola con moderadas limitaciones.	107,00
<b>III</b>	Tierras agrícolas, con severas limitaciones.	2.830,00
<b>IV</b>	Tierras con muy severas limitaciones, aptas para uso agrícola.	1.213,00
<b>V</b>	Tierras sujetas a pequeñas o ninguna erosión, con limitaciones, aptas sin restricciones para el pastoreo.	1.139,00
<b>VI</b>	Tierras con ligeras limitaciones, para pastoreo, aptas para reforestación.	3.926,00
<b>VII</b>	Suelos con muy severas limitaciones, inadecuadas para cultivos, su uso se limita a la reforestación y vida silvestre.	7.200,00
<b>VIII</b>	Sólo deben ser usadas para recreación y vida silvestre y abastecimiento de agua.	29.664,00
<b>TOTAL</b>		<b>46.079,00</b>

Fuente: PERTT (2008)

Las encuestas y el trabajo de campo, dan un total de 9.215 has, de las cuales 5.289 son utilizadas, 3.926 no son utilizadas y en el sub sector agrícola se tienen 4.150 has.

### **3.2.4. Erosión**

La cuenca del Río Tolomosa alimenta el embalse de San Jacinto, que se encuentra afectado por un fuerte proceso de erosión y el arrastre de sedimentos de los diferentes ríos que desembocan en el mismo.

Para ver como se está comportando el aporte de sedimentos al embalse, se han realizado diferentes batimetrías, por ejemplo en el año 1995 por encargo de CODETAR, el Instituto Geográfico Militar realizó una batimetría del embalse de San Jacinto, cuyos resultados encontrados han permitido estimar el aporte promedio de sedimentos para toda la cuenca es de 1.690 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año. Este aporte es significativamente superior a los

618 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año que fueron estimados en la fase del estudio de factibilidad del proyecto.

El aporte significativo de sedimentos se traduce en una mayor colmatación del embalse y la consiguiente reducción de su vida útil: situación que tendría un impacto negativo en la economía de la región.

Además se han realizado diferentes intentos por realizar obras que puedan servir como colmatadores de sedimentos antes de que los mismos puedan entrar en el embalse. Este estudio difiere en la concepción, ya que no se diseñan colmatadores sino más bien se controla la velocidad del río para que el arrastre de sedimentos no implique el sedimento de fondo, puesto que el control de los sedimentos finos implica un manejo de la sub cuenca en las cabeceras.

Por estudios realizados con respecto a la erosión en el Valle Central de Tarija se han determinado que las pérdidas de suelo afectan entre 180 a 230 has/año.

Existen diversas causas que originan la erosión de los suelos en el departamento de Tarija, pero las más frecuentes en el Valle Central son:

- La inestabilidad geológica de los suelos, originados en los sedimentos que provienen de las deposiciones normales sedimentarias causadas por la evacuación de las aguas del lago de la época cuaternaria, por efecto de una falla geológica que produjo el desplazamiento de los pliegues y se fracturó, la zona que hoy se conoce con el nombre de la Angostura.
- Los procesos climáticos adversos, como la precipitación pluvial de máxima intensidad y corta duración con registros de 60 mm/hora, que produce una alta escorrentía superficial cuya corriente al no encontrar protección en el suelo comienza a transportar material granular del suelo produciendo la erosión.
- A través de la protección hidrológica que proporciona al suelo la única y eficaz protección con coberturas de vegetación, no solamente se protege del golpe de las gotas de agua de lluvia que cae con velocidad al suelo, sino que disminuye

la velocidad de escurrimiento del agua por la superficie evitando de esta manera que las partículas del suelo sean arrastradas.

- La insuficiencia densidad de vegetación superior y herbácea que deja al suelo en riesgo erosivo.
- La influencia del ganado especialmente caprino, que consume los renuevos o regeneración natural de las especies nativas, que impiden el establecimiento de una cobertura arbórea y vegetal con la densidad adecuada para proporcionar la protección hidrológica a los suelos, éste ganado ramonea en los períodos de producción de semilla que es consumida interrumpiendo el proceso de regeneración natural.
- El uso y abuso del aprovechamiento de especies nativas, producido por el hombre para consumo de leña, tanto doméstico como industrial (ladrilleras, panaderías), disminuyen las posibilidades de crecimiento de las especies vegetales cada vez más disminuidas en cantidad por estas actividades depredadoras.
- El sistema de dominio de las tierras de uso común o denominado comunales, que solamente permiten pastoreo, degradando la vegetación y exponiendo los suelos con riesgo de erosión.

De los factores que promueven hacia una incidencia económica y social por los resultados que ocasiona la erosión en un sistema productivo, generan nuevas cargas difíciles de solucionar ya que el problema erosivo es un problema multidisciplinario que requiere una atención especial en los planes de producción silvoagropecuaria, situación que podemos describir el siguiente modo.

- El proceso erosivo combinado con el tipo de explotación de subsistencia, desintegrado de la economía nacional convierte al Valle en una comunidad relativamente aislada con tendencia al estancamiento. La capacidad de depreciación del hombre no tiene límites, más aún cuando está influenciado por una economía de subsistencia, entonces hace uso de los recursos naturales que tiene cerca, aspecto este que intensifica la erosión.
- La Reforma Agraria ha permitido que la parcelación de las tierras sean de tal manera que el promedio mayor de las áreas de cultivos por familias sea de <1 ha, estos minifundios con el paso del tiempo se convierten en terrenos baldíos sin producción, erosionados y que no alcanzan para producir los insumos necesarios de alimentos básicos para una familia campesina.
- Al mismo tiempo esas parcelas pequeñas no alcanzan para ofrecer garantía al sistema bancario, con fines de crédito destinado a un programa de producción agrícola. De esta manera al no poder autoabastecer sus propias necesidades emigra temporalmente o en forma definitiva.
- La falta de una política regional y/o nacional sobre el manejo de las tierras erosionadas no permite que los planes gubernamentales tengan éxito. La deficiente concepción de autoridades sobre la problemática de erosión, impiden que los programas de mejoramiento y control de áreas degradadas se desarrollen con normalidad, las influencias de tipo político, son las que amenazan permanentemente las ya débiles estructuras de la administración pública para que se cumplan los planes de operación.

El principal desafío que presenta el valle central, es la pérdida del suelo causado por el problema erosivo al que están sometidas las áreas de valle y montaña. Del total de las 342.246 has del valle central, más del 43% es afectado por este fenómeno hídrico, (147.320 Has), de las cuales el 77% de los suelos de la zona baja se encuentran entre

mediano a severamente erosionados, las zonas montañosas se encuentran afectadas en un 13% del total. PERTT, (2008)

### 3.3. Características de la vegetación del área de estudio

La vegetación natural es muy variada, pues la zona tiene relativamente fuentes de agua superficiales. Entre la vegetación natural hay la presencia de gramíneas, arbustos y árboles, formando estratos arbóreos, arbustivos y herbáceos, a lo largo de las quebradas, ríos, torrentes y algunas laderas. Las especies predominantes son las siguientes:

**Tabla N° 2 Vegetación Natural**

N°	Nombre Vulgar	Nombre Botánico
1	Churqui	<i>Acacia caven</i>
2	Algarrobo blanco	<i>Prosopis alba</i>
3	Algarrobo negro	<i>Prosopis nigra</i>
4	Molle	<i>Schinus molle</i>
5	Sauces	<i>Salix humboldtiana</i>
6	Jarca	<i>Acacia visco</i>
7	Aliso	<i>Alnus sp.</i>
8	Chilca	<i>Bacharis sp.</i>
9	Tusca	<i>Acacia aroma</i>
10	Tola	<i>Parastrephia lepidophyllum</i>

Fuente: PERTT (Enero 2008)

En las quebradas y orillas del río se observa la presencia de helechos y abundante vegetación herbácea. También se cuenta con algunas especies implantadas como el Eucalipto sp, el Pinus sp. y Cupresus sp., provenientes de viveros forestales de la ciudad de Tarija, plantaciones que datan de varios años y de viveros de la propia comunidad, cuya producción venden a comunarios del lugar y de otras comunidades aledañas, como asimismo a ONGs de la capital del departamento.

Estas especies se encuentran sometidas a una fuerte presión para la obtención de leña y en muchos casos al ramoneo de ganado caprino, y aún en algunos casos como el del

molle, especie de gran interés por sus características de sobriedad y protectoras, a plagas como la rupa-rupa, lepidóptero que hace su puesta en las ramas.

El mayor problema con la cobertura forestal es que ha disminuido. El proceso viene de mucho tiempo atrás y se agudiza con el crecimiento de la población pecuaria y humana, particularmente en las zonas más secas de la cuenca, donde la recuperación natural de la vegetación es muy difícil por la baja humedad y sobre pastoreo. PERTT, (2008)

### 3.4. Características faunísticas

#### 3.4.1. Fauna y vida silvestre

Entre las especies más importantes y predominantes que se evidencia en la cuenca del río Tolomosa se tienen las siguientes:

**Tabla N° 3 Fauna Silvestre**

N°	Nombre Vulgar	Nombre Científico
1	Comadreja	<i>Didelphys albiventris</i>
2	Murciélago	<i>Desmodus rotundus</i>
3	Zorrillo	<i>Conepatus chinga</i>
4	Liebre	<i>Sylvilagus brasiliensis</i>
5	Vizcacha	<i>Lagidium viscaccia</i>
6	Hornero	<i>Furnarius rufus</i>
7	Patos de las torrenteras	<i>Merganetta armata</i>
8	Colibrí coludo azul	<i>Agelaiocercus kingi</i>
9	Perdiz	<i>Nothura maculosa</i>
10	Cardenal	<i>Paroaria coronata</i>

Fuente: Encuesta realizada por el PERTT – Enero 2008

### **3.5. Características Hidrológicas y Climáticas**

#### **3.5.1. Hidrología**

La cuenca del río Tolomosa cuenta con el río principal que lleva el mismo nombre, a su vez con los siguientes tributarios que son el río Sola, Pinos, Mena, Seco, La tablada y El Molino con sus diferentes quebradas que atraviesan por diferentes comunidades, donde el caudal de los ríos es considerable en la época de lluvia y disminuye considerablemente en la época de estiaje, llegando incluso a secarse en años de sequía en algunas de sus subcuencas no principales. PERTT, (2008)

#### **3.5.2. Caudales**

Los caudales dentro de la cuenca del río Tolomosa son variables a lo largo del año hidrológico que varía de noviembre a enero, presentan avenidas máximas que sobrepasan los 2100 m<sup>3</sup>/s como así también se presentan caudales mínimos a partir de los meses de mayo llegando a caudales mínimos a finales del periodo hidrológico en el mes de agosto a septiembre en años de estiaje. PERTT, (2008)

#### **3.5.3. Clima**

El relieve montañoso de la cuenca varía desde 4.610 m.s.n.m. en la cima del cerro Negro del Chiquirio, hasta aproximadamente los 1900 msnm. en el sitio del Embalse San Jacinto, determinando un gradiente altitudinal cerca de 2.700 m, aspecto que influye en los procesos geomorfológicos, distribución de las lluvias, nubosidad, humedad ambiental, tipología de la vegetación, calidad de los suelos y procesos hidrológicos.

Según el PEA (1998), el clima de la cuenca varía de acuerdo al gradiente altitudinal desde muy frío húmedo a semihúmedo en la zona montañosa hasta templado semiárido en la zona de valle. La geología comprende afloramientos desde los más antiguos del Cámbrico medio inferior, pasando por el Ordovícico inferior y superior, Silúrico inferior y superior, Devónico inferior y Cuaternario del Pleistoceno y Holoceno que es

el más reciente. Es una cuenca de origen tectónico con paisajes de montañas, serranías, colinas, piedemontes, llanuras aluviales y fluvio-lacustres. PERTT, (2008)

### 3.5.4. Precipitación

Por el término de precipitaciones debemos entender todas las aguas meteóricas que caen sobre la tierra ya sea en forma líquida como las lluvias, y en forma sólida como la nieve y el granizo principalmente, para su medición se ha desarrollado una gran variedad de instrumentos y técnicas para obtener información de las diferentes fases de la precipitación, estas precipitaciones se miden sobre la base de una columna vertical de agua, en el sistema métrico, la precipitación se mide en milímetros o su equivalencia de l/m<sup>2</sup>.

En las serranías del sector oeste de la cuenca del río Tolomosa las precipitaciones medias anuales son 800 a 1200 mm, en el sector noroeste y central son de 800 a 1000 mm y el este presenta precipitaciones medias de 700 a 800 mm. ZONISIG, (2001).

#### Cuadro N ° 7 Red de pluviómetros

	Provincia	Departamento	Altura	Coordenadas	
			m.s.n.m.	Latitud S	Longitud W
Aeropuerto	Cercado	Tarija	1849	21° 32' 48"	64° 42' 39"
San Andrés	Cercado	Tarija	1987	21° 37' 24"	64° 48' 54"
Calderillas	Avilés	Tarija	2800	21° 45'	64° 57'00"
Pinos Sud	Cercado	Tarija	2100	21° 44'	64° 53'00"
Pampa Redonda	Cercado	Tarija	1950	21° 42'	64° 49'00"
San Jacinto Sud	Cercado	Tarija	1820	21° 36' 37"	64° 43' 12"
Tucumillas	Méndez	Tarija	2557	21° 27' 40"	64° 49' 52"
Padcaya	Arce	Tarija	2010	21° 53'	64° 43'00"
Campanario	Méndez	Tarija	3460	21° 30' 45"	64° 58' 32"

Fuente: PERTT (2008)

### **3.5.5. Temperaturas**

La temperatura media de la cuenca es de 18° C con oscilaciones anuales entre 13,5° C a 20° C., con temperaturas máximas extremas que llegan a los 40° C y mínimas extremas en los meses de invierno el termómetro baja hasta los -9° C, con fríos que limitan en general la producción agrícola. Los meses más cálidos son octubre, noviembre, diciembre y enero; mientras que los más fríos son junio, julio y agosto.

### **3.5.6. Riesgos Climáticos**

En la zona, los meses de mayor frecuencia de heladas severas van desde junio y julio, época en que ningún cultivo puede desarrollarse; son las heladas tardías entre agosto y diciembre las que más afectan a los cultivos de papa, arveja, frutales, etc.

Los agricultores observan que uno de cada tres años es perjudicado por la ocurrencia de heladas en momentos críticos de la floración y formación de frutos.

Asimismo el régimen pluvial presenta limitaciones debido a su irregularidad anual (años húmedos y de sequía), dentro del ciclo hidrológico (meses con veranillos o meses muy húmedos entre noviembre y marzo) y a la presencia de lluvias muy intensas en un lapso muy corto, los cuales dan lugar a inundaciones en los terrenos. Igualmente con las lluvias que se producen con un gran enfriamiento atmosférico, dan lugar a granizadas que resultan perjudiciales no sólo para la agricultura sino también para la ganadería, con la muerte del ganado menor en muchos casos.

De acuerdo a la clasificación de zonas de vida este clima es característico del bioclima bosque seco templado que presenta temperaturas críticamente bajas o escarchas durante algún tiempo del año.

En la cuenca del río Tolomosa, los procesos erosivos del tipo laminar son mayores debido a una menor cobertura de sus suelos y a los suelos en pendientes que predominan en la misma. Por otro lado, la acción erosiva de las aguas es mayor en las zonas de media y baja debido a la mayor fuerza que tengan los torrentes de evacuación en la barrancas, canales de descarga y en las cárcavas. PERTT, (2008)

## **CAPÍTULO IV**

### **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **4.1.MATERIALES**

Para la realización del presente estudio se utilizó diferentes materiales entre ellos tenemos:

##### **4.1.1. Materiales de campo**

- Libreta de campo
- Cámara fotográfica

##### **4.1.2. Materiales de gabinete**

- Imágenes LANDSAT 8 TM de 15 metros de resolución espacial, generadas durante los años 2016.
- Empalmes de la carta nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN), a escala 1/50000.
- Software ArcGis 10.3
- Computadora

#### **4.2. METODOLOGÍA**

La metodología que se desarrolló en el presente trabajo se basó fundamentalmente en la determinación de parámetros morfométricos de la cuenca del río Tolomosa, para lo cual se utilizó como fuente de información planos, mapas topográficos del área de estudio. A partir de la cartografía digitalizada del área de estudio y empleando la herramienta SIG se calcularán los parámetros morfométricos, y para otros cálculos se utilizarán fórmulas específicas.

Se realizó la recopilación de la información, la interpretación preliminar, una verificación y evaluación en el campo y la compilación final que consistió en el procesamiento de los datos e información obtenida.

#### **4.2.1. Recopilación y acceso al material logístico**

De acuerdo a la grilla de Landsat 8, se procedió a descargar la imagen con resolución de 15 \*15 mejorada con código Path/Row 231/75.

#### **4.2.2. Análisis morfométrico**

Como primera actividad se realizó la delimitación de la cuenca la cual fue basada en un modelo digital de elevación (MDE) el cual fue generado a partir de un TIN (Red de triángulos irregulares) y este a partir de curvas de nivel elaborados por el IGM (Instituto Geográfico Militar), a escala 1 / 50000, luego se calculó los flujos de dirección que sirve para determinar la dirección en la que el agua fluye fuera de cada pixel o celda del (MDT), luego el flujo de acumulación ,de este modo es posible saber cuánta agua puede recibir una celda determinada, las líneas de drenaje que es un sistema jerarquizado de cauces desde pequeñas quebradas hasta los grandes ríos.

Para los parámetros relativos a la forma fue necesario calcular: el área de la cuenca, el perímetro, largo y ancho de la cuenca, finalmente se obtuvo el factor forma en relación al ancho y largo de la cuenca, y el índice de compacidad o coeficiente de Gravellius.

Seguidamente para calcular los parámetros relativos al relieve, la pendiente media de la cuenca y pendiente media del cauce principal se obtuvo en función de las cotas (cota mayor , cota menor) del modelo digital de elevación entre el desnivel que existe entre estas siendo el caso de la cuenca y cauce principal respectivamente.

Finalmente se determinó los parámetros relativos al drenaje tales como la densidad de drenaje en función de la longitud total de los tributarios en km y el área total de la cuenca en km<sup>2</sup>, así como también la curva hipsométrica, todos los resultados obtenidos se basan en la utilización y digitalización del software ArcGis 10.3.

#### **4.2.1. Análisis hidrológico**

Para nuestro caso se utilizaron los datos pluviométricos de las estaciones de “San Andrés”, “Pinos Sud”, “San Jacinto” registrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI,(2016) ya que dichas estaciones se encuentran

en la cuenca de estudio y las que se asemejan a las condiciones de la zona de esta investigación.

#### **4.2.1.1.Recolección de la Información Requerida**

Los datos pluviométricos e información necesaria para el desarrollo de esta investigación, fueron aportados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, (2016). Los datos pluviométricos facilitados por dicha institución, fueron los registros de las precipitaciones diarias.

#### **4.2.1.2.Selección de las Estaciones Pluviográficas**

Se tomaron como referencia 3 estaciones, las cuales son: “San Andrés”, “Pinos Sud” y “San Jacinto”. En dicha selección se tomó como criterio el tipo, cantidad y periodicidad de los datos, tomándose como referencia de análisis el período comprendido entre 1978-2014.

#### **4.2.1.3.Selección de intensidades máximas**

En esta etapa se analizaron los registros de precipitaciones, se seleccionó las precipitaciones máximas diarias anuales en 24 horas para cada año.

Posteriormente, se tomaron los valores de cada una de las precipitaciones y se dividieron por su duración  $D$  en 24 (horas), obteniéndose así las intensidades en mm/Hrs.

#### 4.2.1.4. Determinación de las Curvas IDF para distintos periodos de retorno

Por medio de la ecuación de Grunsky tenemos la intensidad en una duración cualquiera “t”:

$$i_{24} = \frac{P_d}{24}$$

$$i_t = i_{24} \sqrt{24/t}$$

Dónde:

$i_{24}$  = intensidad media en 24 hrs.

$i_t$  = intensidad en una duración cualquiera t.

t = duración en horas.

$P_d$  = Precipitación máxima diaria anual.

Se utilizó la ecuación  $i_t$ , con duraciones de aguaceros “t” cada 20 minutos durante 6 horas (360 minutos).

#### 4.2.1.5. Determinación de las Curvas IDF para distintos periodos de retorno

Se ajustó la intensidad de la lluvia calculada en el paso anterior, en función de periodos de retorno de 5, 25, 50, 75 y 100 años. Se utilizó la fórmula propuesta por Gumbel:

$$i_T = -c * \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) - A$$

$$C = 0.78 * \sigma_i$$

$$A = 0.577 \cdot C - \mu$$

Dónde:

$i_T$  = Intensidad para un periodo de retorno dado, en mm.

T = Periodo de retorno, en años.

C, A = Coeficientes.

$\sigma_{n-1}$  = Desviación estándar.

$\mu$  = Media

#### 4.2.1.6. Análisis Estadístico

Una vez definidas las tablas de uso práctico y diseñadas las curvas IDF para cada estación, se procedió a analizar el comportamiento de las variables involucradas en este estudio, relacionando simultáneamente las tres variables en una familia de curvas, a modo de representar la relación de la intensidad, duración y la frecuencia.

## CAPÍTULO V

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1. MAPA BASE

El mapa base fue elaborado a partir de una imagen Landsat, obteniéndose una superficie de 436,72 Km<sup>2</sup>. Y un perímetro de 105.69 Km.

##### 5.1.1. Subcuencas del río Tolomosa

Entre los principales afluentes del río Tolomosa se tiene: la subcuenca del río Pinos, río de Sola, río Mena, río la Tablada, río el Molino y subcuenca quebrada Pajcha. El afluente que ocupa mayor superficie es la subcuenca del río Sola.

Cuadro N° 8 Superficie de las subcuencas que conforman la Cuenca.

N°	Subcuencas	Superficie (Has)	porcentaje
1	Aguas arriba Embalse San Jacinto	3463	8
2	Subcuenca Río Pinos	8424	19,3
3	Subcuenca Río Mena	6553	15
4	Subcuenca Río Sola	15276	35
5	Subcuenca Río Seco	3119	7,1
6	Subcuenca Río El Molino	4168	9,5
7	Subcuenca Quebrada Pajcha	1108	2,5
8	Subcuenca Quebrada La Tablada	1101	2,5
9	Embalse San Jacinto	460	1,1
<b>TOTAL</b>		43672	100

## 5.2. MORFOMETRÍA DE CUENCAS

DATOS DE LA CUENCA	
Área	436.72 km <sup>2</sup>
Perímetro	105.69 km
Longitud de la cuenca	36.07 km
Longitud cauce	43.90 km
Ancho de la cuenca	18.23 km
Cota máxima	4607 msnm
Cota mínima	1849 msnm

### 5.2.1. Propiedades geométricas

#### a) Área y perímetro

El área de la cuenca del río Tolomosa es de 436.72 km<sup>2</sup>.

Los valores como el ancho y el largo de la cuenca sirvieron para calcular los datos morfométricos posteriores. Ver anexo “A” mapa N° 2 ancho y longitud de la cuenca.

El perímetro, es el contorno de la superficie considerada como límite máximo de la cuenca y este valor es de 105.69 Km. La longitud principal se considera al cauce de mayor longitud dentro de la cuenca, es decir, la longitud del río principal desde el punto más bajo hasta el punto más alto de la cuenca. Este valor es de 43.90 Km.

### 5.2.2. Parámetros de forma

La forma de la cuenca controla la velocidad con que el agua de la lluvia llega al cauce principal, cuando sigue su curso de su origen hasta la desembocadura. Los parámetros que miden la forma de la cuenca son: coeficiente de compacidad y factor forma.

**a) Factor fórmico de la cuenca**

La forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial. Para cuencas de igual superficie y formas diferentes se espera un comportamiento hidrológico también diferente.

$$Rf = \frac{A}{(L)^2}$$

$$Rf = \frac{436.72}{(36.07)^2} = 0.33$$

Este valor se encuentra entre 0-1, demostrándose que la cuenca tiene forma alargada, sin riesgos de crecidas considerables.

**b) Coeficiente de compacidad**

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área igual a la cuenca.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

El perímetro de la cuenca se mide en Km y el área de la cuenca en Km<sup>2</sup>. Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular tendrá un coeficiente de compacidad mínimo, igual a 1.

$$Kc = \frac{105.69}{\sqrt{436.72}} = 1.42$$

Este valor demuestra que la cuenca del río Tolomosa es una cuenca Oval - redonda a Oval alargada.

### c) Rectángulo Equivalente

Para poder comparar el comportamiento hidrológico de dos cuencas se utiliza la noción del rectángulo equivalente.

Lado  $L_1$ : lado mayor del rectángulo

$$L_1 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$L_1 = \frac{1.42 (20.90)}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{1.42} \right)^2} \right] = 36.81$$

Lado  $l_1$ : del rectángulo lado menor de la cuenca

$$l_1 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$l_1 = \frac{1.42 (20.90)}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{1.42} \right)^2} \right] = 16.54$$

### 5.2.3. Parámetros relativos del relieve

#### a) Curva hipsométrica

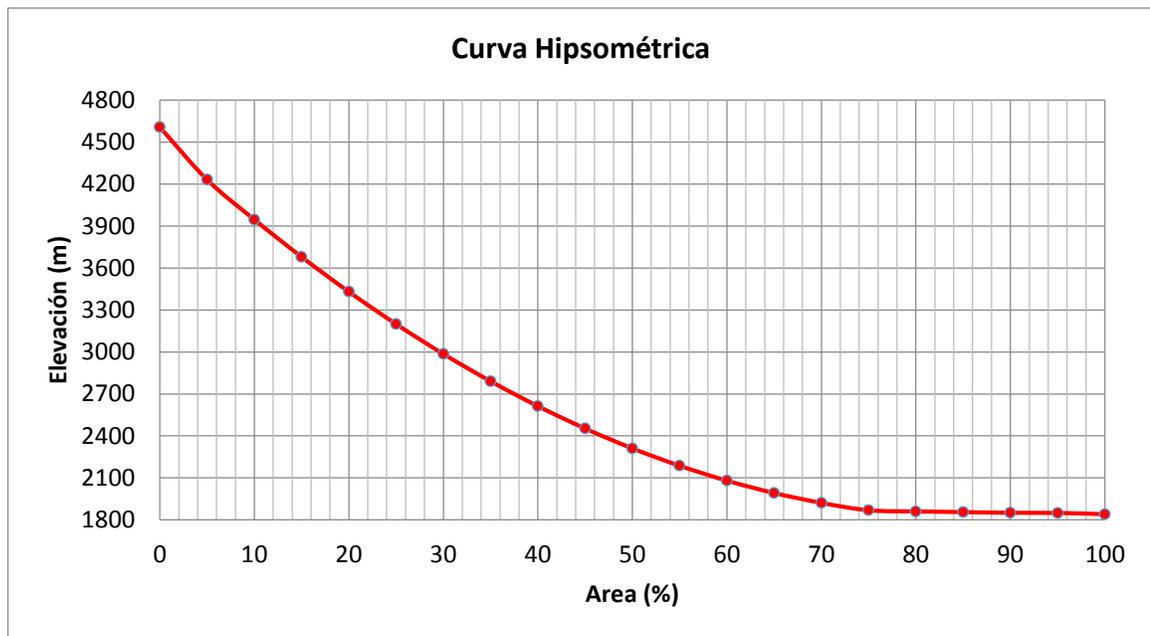
Es la representación gráfica de la cuenca, e indica el porcentaje de área de la cuenca en  $\text{Km}^2$  que existe por encima de una cota determinada.

Una curva hipsométrica puede darnos referencia sobre las características fisiográficas de la cuenca.

Cuadro N° 9 Porcentaje del área acumulada

VALUE	MIN	MAX	PROMEDIO	AREA	AREA-Km2	ACUM.	% AREA	% ACUM.
1	1849	2022	1935,5	134115899,8	134,1158998	438,1024371	27,7746322	100
2	2023	2189	2106	77576251,46	77,57625146	303,9865373	19,27200935	69,38709113
3	2190	2408	2299	46144486,62	46,14448662	226,4102858	14,35386312	51,67975949
4	2409	2664	2536,5	31506641,03	31,50664103	180,2657992	11,42841456	41,14695193
5	2665	2925	2795	32194960,78	32,19496078	148,7591582	9,430969915	33,95533683
6	2926	3180	3053	38816542,6	38,8165426	116,5641974	7,389887468	26,60660784
7	3181	3442	3311,5	28307713,35	28,30771335	77,7476548	4,929012791	17,74645567
8	3443	3732	3587,5	21761909,85	21,76190985	49,43994145	3,134372405	11,28501858
9	3733	4050	3891,5	19284680,47	19,28468047	27,67803159	1,754720089	6,317707743
10	4051	4607	4329	8393351,128	8,393351128	8,393351128	0,532118109	1,915842145
<b>TOTAL</b>					438,1024371	1577,347394	100	

Gráfico N° 1. Curva hipsométrica correspondiente a las elevaciones de la cuenca de Tolomosa, en donde la mediana de elevación es 2311 m.s.n.m



De acuerdo a la forma de la curva hipsométrica se deduce que la cuenca se encuentra en una fase de madurez, lo que significa que es una cuenca en equilibrio.

**b) Pendiente media del cauce principal**

$$S = \frac{\text{Elevacion en el nacimiento} - \text{Elevacion de la salida}}{\text{longitud de la corriente}}$$

$$S = \frac{H}{L}$$

$$S = \frac{4607 - 1849}{43900} = 0.062 \text{ m}$$

$$0.062 * 100 = 6.28 \%$$

La pendiente media del cauce principal de la cuenca es de 6,28 % por lo que se considera que la cuenca del río Tolomosa tiene una pendiente del cauce moderadamente inclinado.

**c) Pendiente Media de la Cuenca**

La pendiente media constituye un elemento importante en el efecto del agua al caer la superficie por la velocidad que adquiere y la erosión que produce. Por otro lado, la pendiente media toma importancia por su relación con la infiltración y la humedad del suelo.

$$S = \frac{2H}{P}$$

$$S = 2 \frac{2758}{105699.27} = 0.052 \text{ m}$$

$$0.052 * 100 = 5.20 \%$$

La pendiente media de la cuenca del río Tolomosa es de 5.20 % por lo que se lo considera una cuenca moderadamente inclinada.

La elevación media, es:

$$Em = \frac{Cota\ Max. - Cota\ Min.}{2}$$

$$Em = \frac{4607 - 1849}{2} = 1379\ msnm$$

#### 5.2.4. Propiedades de la red de drenaje

De acuerdo al sistema de Horton, una corriente que constituye la cabecera de un río y carece de afluentes pertenece a la primera categoría; dos corrientes de primera categoría se unen para formar una corriente de segunda categoría y así sucesivamente.

Cuadro N° 10 Clasificación de los tributarios que conforman la cuenca.

N° de ordenes	N° de tributarios	Área de la cuenca(km <sup>2</sup> )	Longitud Promedio (km)
1	3422	436.72	7,84
2	1667	436.72	3,82
3	789	436.72	1,81
4	449	436.72	1,02
5	273	436.72	0,62
<b>Total</b>	6600		15,12

De acuerdo al cuadro N° 10, la longitud promedio de los tributarios indica que los ríos pequeños son de mayor cantidad y en mayor longitud.

### a) Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se calcula dividiendo la longitud total de los canales por el área global de la cuenca es una medida de la textura de la red, y expresa el equilibrio entre el poder erosivo del caudal terrestre y la resistencia del suelo.

La densidad de drenaje por unidad de superficie depende también de la permeabilidad del suelo, de la densidad y tipo de cobertura vegetal además de la pendiente del terreno.

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Cuadro N° 11 Clasificación de la longitud de los tributarios de cada orden

N° de ordenes	N° de tributarios	Longitud de cada orden	Longitud Promedio
1 Nacientes	3422	450,20	0,13
2 Quebradas	1667	264,99	0,16
3 Terciarios	789	127,63	0,16
4.Secundarios	449	77.31	0,17
5 Principal	273	50.58	0,19
<b>Total</b>	6600	970,51	

$$D_d = \frac{970.51}{436.72} = 2.22 \text{ Km/Km}^2$$

La cuenca del río Tolomosa tiene una densidad de drenaje de (2,22 km/ km<sup>2</sup>) por lo que se lo considera una cuenca moderada, por lo que tendrá mayores volúmenes de escurrimiento al igual que mayores desplazamientos de las aguas lo que producirá asensos de las corrientes y en épocas de estiaje se espera valores más bajos del caudal. Como se aprecia en el anexo “A” del mapa N°5.

### 5.3. HIDROLOGÍA DE LA CUENCA

#### 5.3.1. Pluviometría de la cuenca

Precipitación es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre, esto incluye básicamente: lluvia y granizo. (También roció y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total).

El estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal entrada de agua en la cuenca.

También es fundamental en la previsión de avenidas, diseños de obras de protección, regulación de caudales, estudios de erosión, etc.

La curva de intensidad, duración y frecuencia (IDF), es importante para relacionar las precipitaciones con los caudales generados en los cauces superficiales por ejm para el diseño de obras relacionadas con la escorrentía superficial.

Cuadro N° 12 Promedio de los principales parámetros climáticos de la zona de estudio en periodo 2003 – 2015

<b>RESUMEN CLIMATOLÓGICO</b>														
Estación : San Andrés										Latitud S: 21°37' 24"				
Provincia: Cercado										Longitud W: 64°48' 54"				
Departamento: Tarija										Altura: 1987 m.s.n.m				
Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	25,6	25,3	24,9	24,7	24,4	25,3	25,3	26,7	26,8	26,9	26,1	25,8	25,7
Temp. Min. Media	°C	13,8	13,5	13,2	10,6	6,1	3,2	2,9	4,9	7,2	11,0	12,3	13,5	9,4
Temp. Media	°C	19,7	19,4	19,0	17,7	15,2	14,2	14,1	15,8	17,0	18,9	19,2	19,7	17,5
Temp.Max.Extr.	°C	36,0	36,0	36,0	39,0	39,0	37,0	38,0	39,0	39,0	39,0	39,0	38,0	39,0
Temp.Min.Extr.	°C	8,0	7,0	5,0	1,0	-4,0	-8,0	-10,0	-6,0	-5,0	0,0	2,0	4,0	-10,0
Dias con Helada		0	0	0	0	2	6	8	4	1	0	0	0	21
Humed. Relativa	%	73	74	75	73	66	59	55	56	57	65	69	71	66
Nubosidad Media	Octas	5	5	5	4	3	2	2	2	3	4	4	5	4
Evapo. Media	mm/dia	4,06	3,98	3,30	2,87	2,63	2,56	2,97	4,11	4,56	4,56	4,54	4,17	3,69
Precipitación	mm	210,2	194,3	172,5	44,2	8,4	2,2	2,1	7,0	15,9	80,4	132,3	205,0	1074,5
Pp. Max. Diaria	mm	88,0	108,5	98,0	47,1	19,5	11,5	10,6	25,0	32,7	150,3	81,0	106,5	150,3
Dias con Lluvia		15	15	14	6	2	1	1	2	3	8	11	14	92

Esta zona presenta precipitación media anual de 1074,5 mm, donde el año hidrológico se caracteriza por meses con presencia de lluvias y una época invernal relativamente seca. Para los meses de invierno se reporta un promedio de temperatura mínima media

de 9.4 °C, mientras que la temperatura media anual es 17.5 °C. Los meses más secos abarcan de mayo a septiembre y los meses de mayor precipitación corresponden al periodo noviembre a marzo (SENAMHI, 2015)

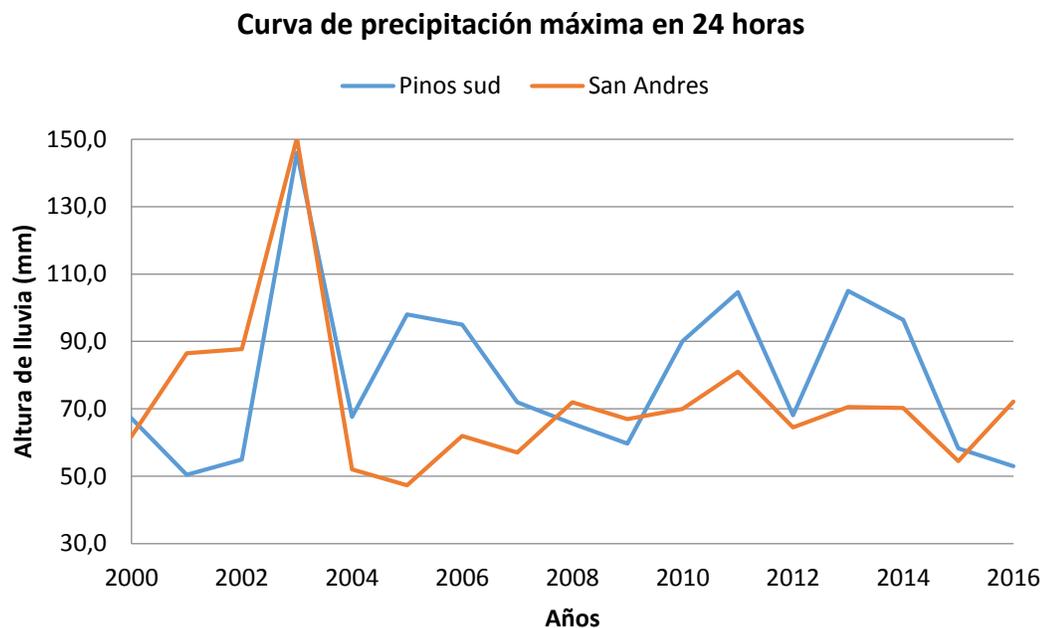
### **5.3.2. Análisis de precipitaciones**

El estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua al suelo. También es fundamental en la previsión de avenidas, diseño de obras de protección de riveras, regulación de caudales y obras de conservación de suelos.

En referencia a las características climáticas del lugar denotan un ambiente templado con una humedad relativamente moderada; factor que influye para que la zona se considere de escasa pluviosidad en áreas fluvio lacustres, y semihúmedo en los cañadones angostos al pie de la cordillera de Sama, estas condiciones, las lluvias de máximas intensidades se concentran en pocos meses del año, constituyéndose en un condicionante para las actividades productivas de los campesinos.

A través de la ley de distribución de Gumbell, se muestra el ajuste de valores máximos de caudales con precipitación en distintos periodos de tiempo, que son aportados a la cuenca por año. Esta prueba fue reforzada por la bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, asociado al coeficiente de determinación. El análisis asume que una variable aleatoria de precipitación máxima en 24 horas, sigue una distribución de probabilidad de Gumbel.

Gráfico N° 2 Altura de la lluvia máxima en 24 horas de las localidades de la Cuenca del Tolomosa



Con la gráfica es posible relacionar las precipitaciones con los caudales generados en los cauces superficiales, por ejemplo, el agua precipitada es demasiado variable de un año para otro, no muestra una homogeneidad en ninguna de las localidades, es decir en los años (2003 y 2004) se produce una caída en la curva, para luego experimentar una subida brusca en Pinos Sud y nuevamente se produce un descenso en la lluvia caída en 24 horas (2007 – 2009), eso quiere decir, que en algunos años puede haber agua suficiente para alimentar a los acuíferos, mientras que otros experimenta sequía y déficit de agua.

Cuadro N°13 Resumen de altura de lluvia máxima en 24 horas (mm) por localidades

Parámetro	Altura de lluvia máxima en 24 horas (mm)					
	Aeropuerto	Tarija	Pinos Sud	Represa S. Jacinto	San Jacinto Sud	San Andrés
Media	52,9	53,5	64,6	57,1	55,7	61,4
Desviación	12,72	14,35	16,96	14,33	14,49	18,13
alfa	0,10	0,09	0,08	0,09	0,09	0,07
Ed	47,15	47,00	56,94	50,61	49,17	53,24
Cd	0,48	0,55	0,53	0,51	0,53	0,61
Nº Años	22	33	27	27	38	19
H (m)	1820	1800	2100	1864	1829	1987
K	0,54					
Ed	50,69					
I <sub>tT</sub>	36 mm/h					

Para el análisis de lluvias máximas se ajustó a la ley de Gumbel modificada tomando como base los datos de estaciones cercanas al área de estudio, con las cuales se determinó la máxima cantidad de lluvia que puede precipitar en la duración del evento. Esto implica utilizar ajustes probabilísticos de altura de intensidad de lluvia máxima en 24 horas, aplicados a pluviómetros, cuya expresión es la siguiente:

$$I_{t;T} = \frac{E_d}{t} \cdot \left( \frac{t_i}{3} \right)^\beta \cdot (1 + K_t \log T)$$

Dónde:

$I_{t;T}$  = Altura de lluvia máxima para una determinada duración “t” y periodo de retorno “T” (mm).

$E_d$  = Valor modal para una determinada duración “t” del evento (mm).

$t_i$  = Duración del evento (horas)

$\beta$  = Coeficiente de la distribución probabilística (0,7)

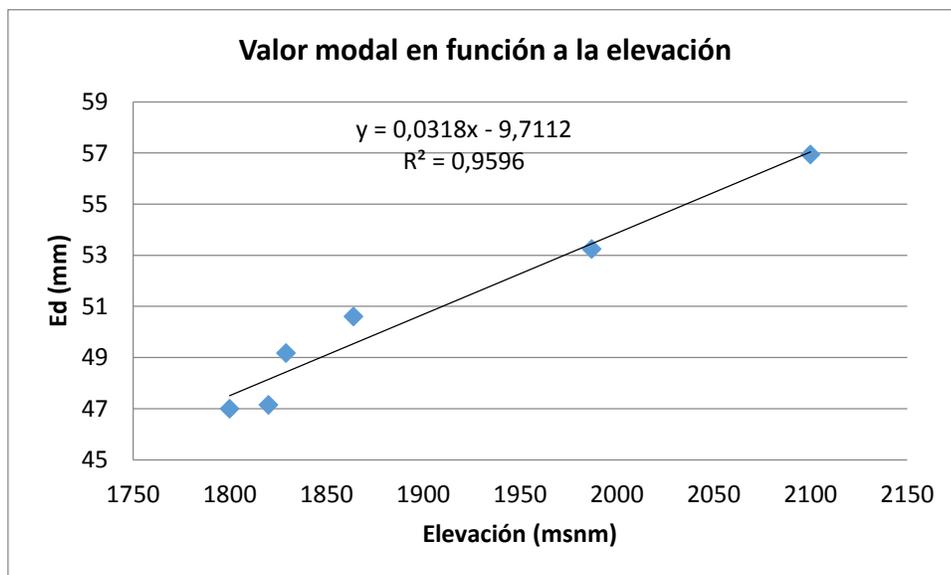
$K_t$  = Característica de la distribución probabilística

$\log T$  = Periodo de retorno del evento (años).

Considerando las alturas de lluvias máximas para las estaciones que se encuentran en la cuenca y las estaciones cercanas, se obtuvo la altura de lluvia que coincide con el valor de la lluvia de duración  $t_d$ . Para estimar los valores máximos de las precipitaciones correspondientes a lluvia diaria se calculó un  $t = 1h$  y un  $T = 10$  años, reemplazando los valores se alcanza una intensidad de lluvia de 36 mm/hora tomando como base los datos de las estaciones mencionadas.

En cuanto a la relación de la elevación con respecto al nivel de mar, se ajusta con una probabilidad del 95 % a una relación lineal, esto demuestra que la distribución e intensidad de precipitación está influenciada por la cordillera de Sama, es decir, a medida que se aleja del Valle Central hacia la Serranía las precipitaciones aumentan.

Gráfico N° 3 Valor modal en función a la altitud sobre el nivel del mar



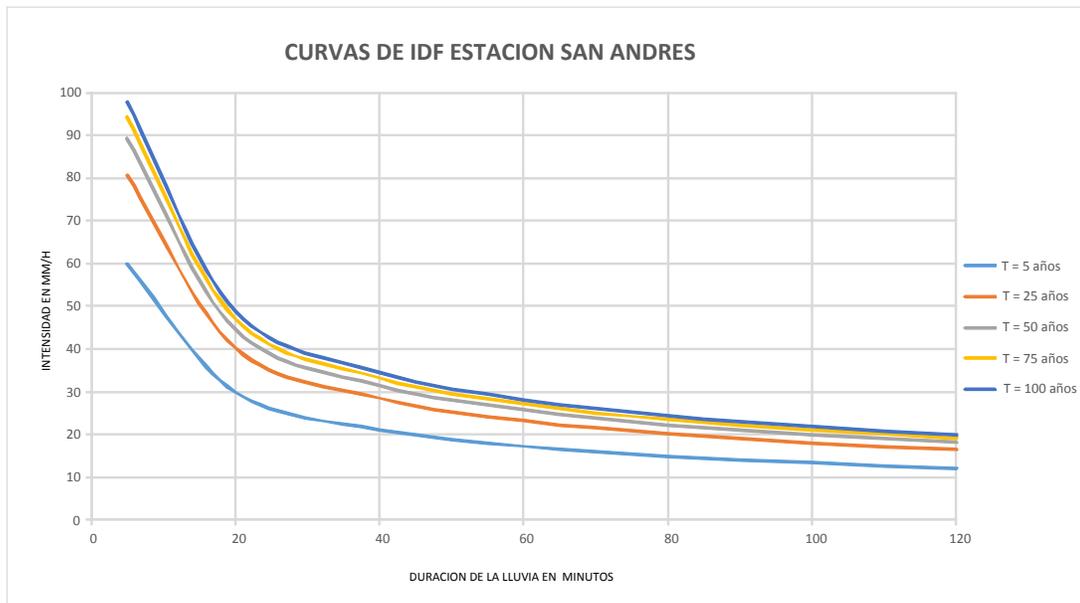
Cuadro N° 14 Valor Modal ajustado por localidades

<b>Estaciones</b>	<b>Elevación</b>	<b>Valor modal</b>	<b>Ed ajustado</b>
Aeropuerto	1820	47,15	48,2
Tarija	1800	47	47,5
Pinos Sud	2100	56,94	57,1
Represa S. Jacinto	1864	50,61	49,6
San Jacinto Sud	1829	49,17	48,5
San Andrés	1987	53,24	53,5
Promedio		50,7	50,7

Sobre la base de los resultados de la altura de lluvia máxima en 24 horas, se determinó la ecuación de regresión para la moda y esta tiende a una recta con un coeficiente de determinación de 0,95 de manera que aplicando la ecuación se obtiene un Ed ajustado de 50,7 que no difiere del promedio modal de las estaciones analizadas, tal como demuestran los cálculos efectuados.

La curva intensidad, duración y frecuencia (IDF), es importante para relacionar las precipitaciones con los caudales generados en los cauces superficiales de la cuenca, sobre todo cuando se trata de diseñar obras relacionadas con la conservación y recuperación de suelos erosionados. Para la elaboración de la curva Intensidad Duración y Frecuencia (IDF), se consideró la estación pluviométrica de San Andrés, por encontrarse en la zona central de la cuenca, seleccionando para cada año la intensidad las precipitaciones para 2 horas y diferentes periodos de retorno en años.

Gráfico N° 4 Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de precipitación pluvial para la comunidad de San Andrés



Cuadro N° 15 Intensidad de la precipitación para diferentes periodos de retorno

TR (años)	Duración de la lluvia, en minutos						
	5	20	40	60	80	100	120
5	59,9	30,0	21,2	17,3	15,0	13,4	12,2
25	80,6	40,3	28,5	23,3	20,2	18,0	16,5
50	89,2	44,6	31,5	25,8	22,3	19,9	18,2
75	94,2	47,1	33,3	27,2	23,5	21,1	19,2
100	97,7	48,9	34,6	28,2	24,4	21,9	19,9

Estas curvas muestran que a medida que aumenta la probabilidad de mantener una lluvia constante de 120 minutos, donde se demuestra que la intensidad de las precipitaciones disminuye a medida que el tiempo aumenta, dicho de otro modo, si se presenta una lluvia continua durante 60 minutos para 25 años periodo de retorno, la intensidad sería 23,3 mm/h, mientras que si la lluvia persistiría por 120 minutos para este mismo periodo de retorno, la intensidad sería 16,5 mm/h. Similar análisis, puede realizarse para todos los periodos de retorno. Ver anexo “C” 1.2.

Estos resultados, corroboran que las lluvias de alta intensidad son usualmente de corta duración, por el contrario, las lluvias de baja intensidad son típicamente de larga duración y cubren áreas grandes. Dependiendo de las condiciones de humedad existente y del área de cobertura de la tormenta, ambos tipos de lluvias, las de alta y baja intensidad; pueden producir eventos de escurrimiento de magnitud comparable.

### 5.3.3. Tiempo de concentración de una cuenca

El tiempo de concentración de una cuenca, se refiere al tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante.

El tiempo de concentración de la cuenca es muy importante porque en los modelos lluvia-escorrentía, la duración de la lluvia se asume igual al tiempo de concentración de la cuenca, puesto que es para esta duración cuando la totalidad de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía, por lo cual se espera que se presenten los caudales máximos.

Las diversas metodologías existentes para determinar el tiempo de concentración de una cuenca son a partir de sus parámetros morfométricos, mismos que se usan en el presente estudio:

Cuadro N° 16 Parámetros morfométricos de la cuenca

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Área de la cuenca	<i>A</i>	436.72	Km <sup>2</sup>
Longitud del río o curso principal	<i>L</i>	43.9004	Km
Pendiente media del río	<i>J</i>	0.0628	m/m
Desnivel máximo del curso de agua más largo	<i>H</i>	2758	m

Método	Expresión	Tiempo de Concentración
Fórmula Californiana	$T_c = 0.066 \left( \frac{L}{\sqrt{J}} \right)^{0.77}$	8,59 horas
Fórmula Ventura y Heras	$T_c = 0.005 \left( \frac{A}{\sqrt{J}} \right)$	8,71 horas
Fórmula de Chereque	$T_c = 0.871 * \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$	9,43 horas

Realizando el análisis comparativo entre las fórmulas aplicadas para determinar el tiempo de concentración se advierte que la fórmula Californiana y de Ventura y Heras no difieren, en cambio el método de Chereque sobreestima, por tanto, descartando el valor extremo, se obtiene un promedio de 8,65 horas de tiempo de concentración, es decir, si en la cuenca del río Tolomosa, llovería intensamente en las cabeceras, tardaría aproximadamente 8 horas y 39 minutos en llegar al desemboque.

### 5.3.3. Análisis de caudales máximos

Debido a que no se cuenta con datos de aforo para determinar los caudales, se recurrió a la forma sencilla de calcular utilizando en el presente estudio la fórmula racional para calcular los caudales máximos de escorrentía, cuya fórmula es:

$$Q = \frac{CIA}{360}$$

Q= Caudal máximo

C=Coficiente de escorrentía

I= Intensidad

A=Área de la cuenca

Para resolver la ecuación, se considera el área (**A**) determinado a partir del mapa generado mediante SIG. Para obtener el valor de la intensidad (**I**) se calculó el tiempo de recolección del área de captación, es decir, el tiempo máximo que tarda la escorrentía de superficie en pasar de cualquier punto de la cuenca a la salida. En nuestro caso se efectuó el cálculo a partir del gráfico IDF.

El coeficiente (**C**) es una medida de la proporción de la lluvia que se convierte en escorrentía. Cuando la cuenca tiene diferentes tipos de topografía, el método recomienda usar el valor de 0.35 por tratarse de una cuenca montañosa y poca cobertura vegetal.

Los datos necesarios para el cálculo son: Intensidad máxima en mm/hr; el tiempo de concentración que se determinó (8,65 hr); el área de la cuenca (43672 has.) y el valor del coeficiente de escorrentía es 0,35

Cuadro N° 17 Caudal máximo por el método racional asociada a diferentes periodos de retorno para la cuenca del Río Tolomosa

<b>Periodos de Retorno T (años)</b>	<b>Lluvia máxima (mm)</b>	<b>Intensidad máxima (mm/hr)</b>	<b>Área de la cuenca (Ha)</b>	<b>Coficiente de escorrentía</b>	<b>Caudal máximo (m<sup>3</sup>/seg)</b>
5	47,99	5,548	43672	0,35	235,55
10	57,61	6,660	43672	0,35	282,78
25	69,76	8,065	43672	0,35	342,44
50	78,78	9,108	43672	0,35	386,71
75	84,02	9,714	43672	0,35	412,44
100	87,73	10,143	43672	0,35	430,65

Según estos valores, el caudal máximo de la escorrentía provocada por las precipitaciones, sería por ejemplo, para un periodo de 10 años de retorno de 282,78 m<sup>3</sup>/seg.

## CAPITULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- La cuenca del río Tolomosa tiene un área de 436.72 Km<sup>2</sup> y está conformada por 6 subcuencas de diferentes tamaño.
- El factor de forma (0.23) y el coeficiente de compacidad (1.42) indican que la cuenca tiene forma oval\_ oblonga \_alargada. Teniendo en cuenta este resultado la cuenca no debería presentar riesgos de desbordamiento, sin embargo, debido a la escasa cobertura vegetal, extracción de áridos; la velocidad del agua de lluvia aumenta provocando desbordamientos y daños a los cultivos.
- De acuerdo a la curva hipsométrica se determinó que la cuenca del río Tolomosa encuentra en equilibrio y en una fase de madurez.
- Se elaboraron los mapas temáticos respectivos tales como mapa de ubicación, mapa del ancho y largo de la cuenca, mapa de pendientes mapa red de drenaje.
- El tiempo de aporte del agua de escorrentía es de 8.65 lo que significa que si lloviera en las cabeceras, el agua de escorrentía tardaría aproximadamente 8 Hrs en llegar al desemboque.
- Según los valores obtenidos el caudal máximo de escorrentía que se espera para un periodo de retorno de 5 años es de 235.55 m<sup>3</sup>/seg. y para un periodo de 100 años es de 430,60 m<sup>3</sup>/seg.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a las instituciones encargadas del desarrollo rural promover talleres informativos sobre la importancia de la preservación y conservación de los recursos naturales (agua, vegetación, suelos, etc.) en las cabeceras de la cuenca.
- Motivar el trabajo multidisciplinario para realizar la caracterización de las cuencas hidrográficas a nivel local con el apoyo de instituciones públicas y privadas, para así tener un plan de manejo y verificar cuales son las potencialidades y limitaciones de una cuenca.
- Identificar los espacios hidrográficos de otras localidades para saber qué es lo que tenemos disponibles para aprovechar y conservar de modo racional como zonas de recarga hídrica, porque la identificación de estos espacios hidrográficos, es el inicio para pensar en una restauración hidrológico forestal.
- Realizar la construcción de obras de control y protección de riberas para así proteger las áreas cultivables, de la zona.
- Elaborar un plan de manejo integral de la cuenca del río Tolomosa considerando la información generada en el presente estudio.