

## **Resumen**

En la presente investigación se realiza un análisis de los principales factores, tanto naturales, antrópicas, procesos erosivos que intervienen en la producción de sedimentos, ya que estos influyen sobre los suelos, degradando sus propiedades hidrofísicas, y tornándolos vulnerables ante la erosión.

Los ecosistemas tropicales en comparación con otros ecosistemas han sido sometidos a considerables cambios por deforestación para implementación de tierras para cultivos y pastos. Específicamente, en las zonas con topografías de montaña, en donde la litología juega un papel determinante, y especialmente cuando se trata de materiales de origen sedimentario y volcánico, el proceso de erosión se encuentra involucrado en el rompimiento y transporte de las partículas del suelo por impacto y por escorrentía, lo cual está relacionado a la intensidad de precipitación y a la pendiente, como es el caso de la microcuenca de Turupamba, en donde, los procesos de erosión estarían aumentando considerablemente acrecentando así la producción de sedimentos.

A través de la caracterización física e hidrológica de la microcuenca de Turupamba, y a partir de la recopilación, análisis e interpretación de información existente perteneciente a la microcuenca, se pretende comprender los agentes que prevalecen en la erosión del sector y por ende en la producción de sedimentos, a fin de identificar e implementar medidas correctivas para mejorar el uso protección y conservación del suelo, mitigar la producción de sedimentos y en si la erosión del suelo en la microcuenca investigada.

## **Palabras Claves**

Turupamba

Sedimentación

Erosión

Relieve

Precipitaciones

Caudal líquido

Caudal de sólidos

Concentración de sólidos.

# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

### **“CARACTERIZACION DEL PROCESO DE PRODUCCION DE SEDIMENTOS EN UNA MICROCUENCA DE MONTAÑA”**

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

ING. FELIPE CISNEROS E. PhD.

AUTORES:

EDGAR URGILES MENDIETA

DIANA GARCES VELECELA

CUENCA – ECUADOR

2009

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos primordialmente a Dios, por el permitirnos culminar una etapa más de nuestras vidas, brindándonos la fuerza, dedicación, paciencia y perseverancia en la elaboración del presente trabajo.

A los señores Ing. Felipe Cisneros PhD. Director de la tesis, Ing. Esteban Pacheco M.Sc Tutor de la Tesis, por el tiempo, dedicación y conocimientos brindados.

Al programa para el manejo de Agua y de Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, en la persona de su Director Ing. Felipe Cisneros PhD., por el apoyo técnico, logístico y económico para la realización de la presente investigación, y a todo su personal.

## DEDICATORIA

A mis padres, que su apoyo brindarme el necesario en aquellos momentos más importantes de mi vida, que su sacrificio, cariño y comprensión han sido la base fundamental en este nuevo logro tan esperado.

A mis hermanos, que con su paciencia, compañía y afecto han enmarcado mi vida en un lazo de amistad y fuerza necesario durante este largo y difícil camino. A la persona especial que con su comprensión, apoyo y cariño estuvo presente en cada paso seguido.

A mis compañeros, que supieron apreciar una verdadera amistad, compartiendo buenos y malos momentos que al final sirvieron para hacernos más fuertes, para alcanzar nuestra meta, en especial a mi compañera de tesis.

Edgar Rolando Urgilés Mendieta

A mis padres, que con su esfuerzo, dedicación y esmero han sabido darme el apoyo incondicional en todas las decisiones tomadas a lo largo de mi vida, quienes con sus sabios consejos me enseñaron a ser constante e hicieron posible la culminación de esta meta tan anhelada.

A mis hermanos cuya compañía y amor me impulsaron a seguir adelante y no decaer ante las adversidades.

A mis queridos compañeros quienes me apoyaron en mis buenos y malos momentos a lo largo de mi carrera estudiantil, de quienes llevare un grato recuerdo, de manera especial a mi compañero de tesis.

Diana Patricia Garcés Velecela

## PROLOGO

El presente trabajo de investigación está enfocado en el análisis de los principales factores que intervienen en la producción de sedimentos dentro de la microcuenca de Turupamba; debido a que la erosión del suelo es un extenso fenómeno en el sur de los Andes ecuatorianos, donde existen amplias zonas cubiertas por suelos sedimentarios y de origen volcánico; aproximadamente la mitad de la superficie de las cuencas hidrográficas interandinas estarían siendo afectadas por procesos de degradación de tierra. Por otro lado, en las partes altas, el ecosistema de nominado páramo, los suelos poseen alto contenido de materia orgánica y altas tasas de infiltración existiendo baja escorrentía y baja erosión por lo que se ha establecido, que la perturbación de estos suelos por pastoreo y quema causan una disminución de su materia orgánica de manera crítica a influir sobre sus propiedades hidrofísicas volviéndolos potencialmente erosionables.

Los ecosistemas tropicales en comparación con otros ecosistemas, han sido sometidos a considerables cambios por deforestación para implementación de tierras para cultivos y pastos. Específicamente, en las zonas con topografías de montaña, en donde la litología juega un papel determinante, y especialmente cuando se trata de materiales de origen sedimentario y volcánico el proceso de erosión se encuentra involucrado en el rompimiento y transporte de las partículas del suelo por impacto y por escorrentía, lo cual está relacionado a la intensidad de precipitación y a la pendiente, como es el caso de la microcuenca de Turupamba, en donde, debido a la actuación de los factores naturales y a impactos antropogénicos, los procesos de erosión estarían aumentando considerablemente acrecentando así la producción de sedimentos.

A través de la caracterización de la microcuenca de Turupamba en cuanto a sus características físicas e hidrológicas, y a partir de la recopilación, análisis e interpretación de información existente perteneciente a la microcuenca, se pretende comprender los agentes que prevalecen en la erosión del sector y por ende en la producción de sedimentos.

Los resultados obtenidos constituyen una base para toma de decisiones en cuanto a medidas para mejorar el uso y protección y conservación del suelo y optimizar rendimientos en lo que se refiere al aprovechamiento hidroeléctrico de los proyectos que se realizan dentro de la región.

## CONTENIDO

<b>PROLOGO</b>	<b>4</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>8</b>
<b>INCIDE DE FOTOS</b>	<b>9</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS</b>	<b>12</b>
<b>CAPITULO I</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>15</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES</b>	<b>15</b>
<b>1.2 ALCANCE</b>	<b>15</b>
<b>1.3 JUSTIFICACION</b>	<b>16</b>
<b>1.4 AUSPICIO</b>	<b>16</b>
<b>1.5 OBJETIVO PRINCIPAL</b>	<b>16</b>
<b>1.6 OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>17</b>
<b>CAPITULO II</b>	<b>18</b>
<b>MARCO TEORICO</b>	<b>18</b>
<b>2.1 LA CUENCA HIDROGRAFICA Y SU CARACTERIZACION</b>	<b>18</b>
<b>2.2 GEOMORFOLOGIA DE UNA CUENCA HIDROGRAFICA</b>	<b>19</b>
2.2.1. ÁREA DE DRENAJE	19
2.2.2 MORFOMETRÍA LINEAL	20
2.2.3 FORMA DE LA CUENCA	21
2.2.4 RELIEVE DE LA CUENCA	24
2.2.5 ORIENTACIÓN DE LA CUENCA	29
2.2.6 RED DE DRENAJE DE LA CUENCA	30
2.2.7 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA CUENCA	35
<b>2.3 PRODUCCION DE SEDIMENTOS</b>	<b>37</b>
2.3.1 FACTORES EROSIVOS QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCION DE SEDIMENTOS	39
2.3.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	44
2.3.2.1 FORMACION DEL LECHO	45
2.3.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS	47
2.3.2.3 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA	50
2.3.2.4 ÁNGULO DE REPOSO DE UNA PARTICULA	51
2.3.2.5 FUERZAS SOBRE UNA PARTICULA DE SEDIMENTO	52
2.3.2.6 UMBRAL DE MOVIMIENTO DE SEDIMENTOS EN EL LECHO	54
2.3.2.7 INICIO DEL MOVIMIENTO DE LA CARGA EN SUSPENSIÓN.	55
2.3.2.8 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	57
<b>2.4 OTRAS CONSIDERACIONES A LOS PROCESOS Y RIESGOS NATURALES EN CUENCAS</b>	<b>60</b>
2.4.1 PARAMETROS DE RIESGOS EN LA PRODUCCION DE SEDIMENTOS	62
EDGAR URGILES M. - DIANA GARCES V.	<b>5</b>
2009	

2.4.2 MÉTODOS DIRECTOS PARA DETERMINAR LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	64
2.4.2.1 FLUJO DE MUESTREO.	64
2.4.2.2. INVESTIGACIONES EN LOS EMBALSES DE SEDIMENTACIÓN.	73
2.4.2.3 ANÁLISIS REGIONAL.	75
2.4.3 MÉTODOS METAMÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE PRODUCCION DE SEDIMENTOS	76
2.4.3.1 TÉCNICAS DE ANÁLISIS	76
<b>CAPITULO III</b>	<b>80</b>
<b>MATERIALES Y METODOS</b>	<b>80</b>
<b>3.1 AREA DE ESTUDIO</b>	<b>80</b>
<b>3.2 GEOLOGÍA REGIONAL DE TURUPAMBA</b>	<b>82</b>
3.2.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	83
<b>3.3 ESTUDIOS IMPORTANTES EN LA MICROCUENCA DEL TURUPAMBA</b>	<b>85</b>
3.3.1 INECEL-UMACPA	85
3.3.2 PROYECTO PRECUPA, CSS (COOPERACIÓN ECUADOR-SUIZA)	88
<b>3.4 DESCRIPCION DE EQUIPOS UTILIZADOS</b>	<b>90</b>
3.4.1 EQUIPO DE MEDICION DE NIVELES Y TOMA DE MUESTRAS	90
3.4.2 EQUIPO DE MEDICION DE PRECIPITACION	92
3.4.3 EQUIPO PARA DEMARCAR COBERTURA VEGETAL	93
3.4.4 ESTRUCTURA DE AFORO PARA MEDICION DE CAUDALES.	95
<b>3.5 METODOLOGIA</b>	<b>98</b>
3.5.1 DELINEADO DE LA CUBIERTA VEGETAL	99
3.5.2 MEDICION DE PRECIPITACIONES	99
3.5.3 MEDICION DE NIVELES DE AGUA EN AFORADOR	100
3.5.4 DETERMINACION DEL CAUDAL DE SOLIDOS EN SUSPENSIÓN	100
3.5.4.1 RECOLECCION DE MUESTRAS.	101
3.5.4.2 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS	102
3.5.4.3 COSTRUCCION DE LA CURVA DE DESCARGA DE SEDIMENTOS	102
<b>3.6 LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN</b>	<b>102</b>
3.6.1 RECOLECCION DE DATOS DEL PLUVIOGRAFO	102
3.6.2 CAMPAÑA DE MUESTREO Y MEDICION DE NIVELES	103
<b>CAPITULO IV</b>	<b>104</b>
<b>RESULTADOS</b>	<b>104</b>
<b>4.1 CARACTERIZACIÓN HIDROLOGICA DE LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA</b>	<b>104</b>
<b>4.2 IDENTIFICACION DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA</b>	<b>113</b>
<b>4.3 REGISTROS OBTENIDOS EN LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA</b>	<b>113</b>
4.3.1 ANALISIS DE LAS PRECIPITACIONES REGISTRADAS EN LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA	116

4.3.2 ANALISIS DEL CAUDAL vs CONCENTRACIÓN DE SOLIDOS _____	117
4.3.3 ANALISIS DEL CAUDAL vs CAUDAL DE SOLIDOS _____	118
4.3.4 DE TERMINACION DE LOS CAUDALES DE SOLIDOS EN SUSPENSION PARA LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA. _____	119
<b>4.4 ANALISIS DE LA RESPUESTA HIDROLOGICA DE LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA _____</b>	<b>127</b>
4.4.1 CAUDALES BASE PARA LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA _____	128
<b>CAPITULO V _____</b>	<b>129</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____</b>	<b>129</b>
<b>CAPITULO VI _____</b>	<b>132</b>
<b>REFERENCIAS _____</b>	<b>132</b>
<b>ANEXOS _____</b>	<b>134</b>



## INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Formas de la Cuenca de acuerdo al Coeficiente de Compacidad.....	23
Tabla 2. 2: Clasificación del tamaño de sedimento.....	49
Tabla 2. 3: Angulo de reposo para material silíceo (Van Rijn) .....	52
Tabla 2. 4 : Tipo de flujo turbulento en función del Número de Reynolds y Esfuerzo Cortante Crítico. ....	55
Tabla 2. 5: Criterios para movimiento de carga en suspensión.....	56
Tabla 3. 1: Análisis de los Principales Flujos Detríticos, UMACPA.....	87
Tabla 3. 2: Cuadro de Resumen de las Tasas de Erosión.....	87
Tabla 3. 3: Cuadro de Evaluación de la Peligrosidad.....	89
Tabla 4. 1: Área de drenaje de la microcuenca del Turupamba. ....	104
Tabla 4. 2: Morfometría lineal de la microcuenca del Turupamba. ....	104
Tabla 4. 3: Parámetros de forma de la microcuenca del Turupamba. ....	105
Tabla 4. 4: Parámetros del relieve de la microcuenca del Turupamba.....	106
Tabla 4. 5: Parámetros del drenaje de la microcuenca del Turupamba.....	110
Tabla 4. 6: Tiempo de concentración de la microcuenca del Turupamba.....	112
Tabla 4. 7: Tipos de cobertura vegetal en la microcuenca del Turupamba.....	113
Tabla 4. 8: Datos recopilados de la microcuenca del Turupamba.....	114
Tabla 4. 9: Precipitaciones en la microcuenca del Turupamba. ....	116
Tabla 4. 10: Datos de concentración de sólidos no considerados para obtener una ecuación de tendencia de la concentración de sólidos en la microcuenca del Turupamba. ....	117
Tabla 4. 11: Producción de Sedimentos para el Periodo de Junio de 2005 a Abril de 2006 .....	121
Tabla 4. 12: Producción de Sedimentos para el Periodo de Enero de 2007 a Mayo de 2008 .....	123
Tabla 4. 13: Producción de sedimentos para el Periodo de Octubre de 2008 a Marzo de 2009 .....	126

Tabla 4. 14: Resumen de los eventos de lluvia más representativos ocurridos en la microcuenca del Turupamba. ....	127
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Tabla 4. 15: Determinación del caudal base en la microcuenca del Turupamba. ....	128
----------------------------------------------------------------------------------	-----

## INCIDE DE FOTOS

Foto 3. 1: Fuente de aporte de sedimentos .....	81
Foto 3. 2: Capas de lutitas negras, con capas de yeso. ....	84
Foto 3. 3: Deslizamiento Activo.....	84

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Efecto de balance hídrico.....	19
Figura 2. 2: Longitud de la cuenca. Cauce Principal. Recorrido principal de la Cuenca. .....	21
Figura 2. 3: Hidrogramas para cuencas con igual área y diferentes formas ante la misma precipitación. ....	22
Figura 2. 4: Curva hipsométrica tipo.....	26
Figura 2. 5: Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión (según Llamas)	27
Figura 2. 6: Histograma de frecuencias tipo.....	28
Figura 2. 7: Pendiente media según Benson.....	29
Figura 2. 8: Hidrograma según el perfil altimétrico del cauce principal. ....	32
Figura 2. 9: Orden de una cuenca según Strahler. ....	33
Figura 2. 10: Acción del viento sobre las partículas del suelo. ....	43
Figura 2. 11: Transporte de Carga Total de Sedimentos. ....	45
Figura 2. 12: Formas de fondo y su relación con las formas de la superficie libre.....	46
Figura 2. 13: Movimiento de la forma del lecho. ....	47
Figura 2. 14: Angulo de reposo .....	52
Figura 2. 15: Fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento. ....	53

Figura 2. 16: Diagrama de Shields.....	55
Figura 2. 17: Mecanismos del transporte de carga en suspensión. ....	58
Figura 2. 18: Movimiento del Sedimento.....	59
Figura 2. 19: Diagrama de Shields modificado. ....	59
Figura 2. 20: Curva de Descarga de Sedimentos.....	66
Figura 2. 21: Curva de duración de Caudales.....	67
Figura 2. 22: Relaciones de descarga .....	68
Figura 2. 23: Evento de tormenta. ....	69
Figura 2. 24 : Variación de transporte de carga de fondo con el caudal liquido a través del hidrograma de crecida. ....	69
Figura 2. 25 : Variación en la concentración de sedimentos en suspensión durante una serie de hidrogramas de tormentas. ....	70
Figura 2. 26: Relaciones concentración de sedimentos en suspensión-caudal, para cuatro ríos británicos. ....	70
Figura 3. 1: Estación ISCO.....	90
Figura 3. 2: Pluviógrafo.....	92
Figura 3. 3: GPS .....	93
Figura 3. 4: Vista Isométrica del Aforador.....	97
Figura 3. 5: Vistas de la sección del sistema manométrico de expulsión de gas.....	97
Figura 4. 1: Rectángulo Equivalente de Turupamba .....	107
Figura 4. 2: Curva de Distribución de Frecuencias .....	108
Figura 4. 3: Curva hipsométrica de Turupamba.....	109
Figura 4. 4: Perfil del cauce principal .....	111
Figura 4. 5: Orden de la Microcuenca .....	112
Figura 4. 6: Ecuación de tendencia para la concentración de sólidos en función del caudal en la microcuenca del Turupamba. ....	118
Figura 4. 7: Ecuación de tendencia para el caudal de sólidos en función del caudal en la microcuenca del Turupamba. ....	118

Figura 4. 8: Curva de Duración de Junio 2005 a Abril de 2006.....	119
Figura 4. 9: Curva de Descarga de Junio de 2005 a Abril de 2006, en base a Concentración de Sólidos .....	120
Figura 4. 10: Curva de Descarga de Junio de 2005 a Abril de 2006, en base a Ecuación aproximada .....	120
Figura 4. 11: Curva de Duración de Enero de 2007 a Mayo de 2008 .....	122
Figura 4. 12: Curva de Descarga de Enero de 2007 a Mayo de 2008, en base a Concentración de Sólidos .....	122
Figura 4. 13: Curva de Descarga de Enero de 2007 a Mayo de 2008, en base a Ecuación Aproximada .....	123
Figura 4. 14: Curva de Descarga para el Periodo de Octubre de 2008 a Marzo de 2009 .....	124
Figura 4. 15: Curva de Descarga de Octubre de 2008 a Marzo de 2009, en base a Concentración de Sólidos .....	125
Figura 4. 16: Curva de Descarga de Octubre de 2008 a Marzo de 2009, en base a Ecuación Aproximada .....	125


## **INDICE DE ANEXOS**

ANEXO 1 : MAPA DE UBICACIÓN REGIONAL Y GEOLOGICA DE TURUPAMBA.....	135
ANEXO 2: MAPA DE COBERTURA VEGETAL .....	136
ANEXO 3: REPRESENTACION GRAFICA DE INTENSIDADES DE LLUVIA Y CAUDALES EN LOS MESES DE REGISTRO.....	138
ANEXO 4: RESULTADOS DE LAS MUESTRAS DE CONCENTRACION DE SEDIMENTOS.....	165
ANEXO 5: EVENTOS DE LLUVIA ANALIZADOS.....	168

## LISTA DE SIMBOLOS

SIMBOLO	UNIDAD	DESCRIPCION
<b>A</b>	km <sup>2</sup> o mi <sup>2</sup>	Área de la cuenca.
<b>Ae</b>	Mi <sup>2</sup>	Área de drenaje contribuyente de la zona.
<b>A<sub>m</sub></b>	km	Ancho máximo de la cuenca.
<b>A<sub>max</sub></b>	Mi <sup>2</sup>	Área de drenaje estimada de la zona.
<b>A<sub>medio</sub></b>	km	Ancho medio de la cuenca.
<b>A<sub>s</sub></b>	mm <sup>2</sup>	Área de la sección transversal de una partícula característica.
<b>A<sub>suelo</sub></b>	tn/acre/año	Pérdida de suelo por unidad de superficie por período de tiempo.
<b>C</b>	Km	Constante de Estabilidad del Río.
<b>c</b>		Factor de Cubierta.
<b>C<sub>d</sub></b>		Coeficiente de arrastre.
<b>C<sub>s</sub></b>	gr/lt	Concentración de sedimentos.
<b>C<sub>L</sub></b>		Coeficiente de sustentación.
<b>D</b>	Km <sup>-1</sup>	Densidad de Drenaje.
<b>d</b>	m	Profundidad de flujo.
<b>d<sub>s</sub></b>	mm	Es el diámetro de la partícula
<b>F</b>	Km <sup>-1</sup>	Densidad hidrográfica.
<b>g</b>	m/s <sup>2</sup>	Es la constante de gravedad.
<b>h</b>	km	Diferencia de Cotas de Altitud.
<b>H</b>	km	Diferencia de Elevación Máxima y Mínima.
<b>H<sub>b</sub></b>	km	Altitud al 10% del la Longitud del Cauce Principal.
<b>H<sub>c</sub></b>	km	Altitud al 85% del la Longitud del Cauce Principal.
<b>I</b>	mm/h	Intensidad.
<b>J</b>	%	Pendiente promedio del cauce principal de la cuenca.
<b>K</b>		Factor de erodabilidad del suelo.
<b>K<sub>c</sub></b>		Coeficiente de Compacidad.
<b>L</b>	Km	Longitud máxima entre los extremos de la cuenca y el desagüe.
<b>L<sub>1</sub></b>	km	Longitud menor del Rectángulo Equivalente.
<b>L<sub>10-80</sub></b>	km	Longitud Intermedia.
<b>L<sub>2</sub></b>	km	Longitud mayor del Rectángulo Equivalente.
<b>L<sub>c</sub></b>	km	Longitud del Cauce Principal.
<b>L<sub>cn</sub></b>	km	Longitud de las Curvas de Nivel.
<b>L<sub>m</sub></b>	km	Longitud máxima entre los extremos de la cuenca.
<b>L<sub>mc</sub></b>	km	Longitud media de las corrientes.
<b>L<sub>o</sub></b>	km	Longitud media de los segmentos de un orden.
<b>L<sub>oi</sub></b>	km	Longitud media de los segmentos orden inferior.
<b>L<sub>p</sub></b>		Factor de longitud-pendiente.
<b>L<sub>T</sub></b>	km	Longitud total de los canales de flujo pertenecientes a su red de drenaje.
<b>L<sub>u</sub></b>	km	Longitud de las corrientes de orden u.
<b>N<sub>(u+1)</sub></b>	adimensional	Número de corrientes de orden superior siguiente.
<b>N<sub>T</sub></b>	adimensional	Número de segmentos del canal de la cuenca.

<b><math>N_u</math></b>	adimensional	Número de corrientes de orden u.
<b><math>P_c</math></b>	km	Perímetro de la Cuenca.
<b><math>p</math></b>		Factor de prácticas de conservación
<b><math>P</math></b>	mm	Precipitación.
<b><math>Q</math></b>	lt/s	Caudal.
<b><math>Q_m</math></b>	pulgadas	Media anual de agua de esorrentía de la cuenca.
<b><math>Q_s</math></b>	gr/s	Caudal de sólidos
<b><math>q</math></b>	m <sup>3</sup> /s	Caudal de agua por unidad de ancho.
<b><math>qp</math></b>	pies <sup>3</sup> /s	Pico de la esorrentía.
<b><math>q_s</math></b>	Kg/m*s	Tasa de transporte volumétrica de carga en suspensión por unidad de ancho.
<b><math>Q_{xx}</math></b>		Descarga de sedimentos variable en el tiempo,
<b><math>R</math></b>		Índice de erosión de las lluvias.
<b><math>R_b</math></b>	adimensional	Relación de Bifurcación.
<b><math>R_c</math></b>	adimensional	Radio de Circularidad.
<b><math>R_e</math></b>	adimensional	Radio de Elongación.
<b><math>R_f</math></b>	adimensional	Factor de Forma.
<b><math>R_h</math></b>	adimensional	Relación hipsométrica
<b><math>R_l</math></b>	adimensional	Relación de longitud.
<b><math>R_r</math></b>	adimensional	Relación de Relieve.
<b><math>S_t</math></b>	adimensional	Pendiente Media o altura media
<b><math>S</math></b>	adimensional	Coeficiente de distribución de los tamaños de las partículas
<b><math>s</math></b>	ton/mi <sup>2</sup> / año	Unidad de producción de sedimentos de la cuenca.
<b><math>SDR</math></b>	adimensional	Coeficiente de aporte de sedimentos
<b><math>SER</math></b>	adimensional	Coeficiente de enriquecimiento de los sedimentos.
<b><math>S_i</math></b>	km <sup>2</sup>	Área Bajo la Curva Hipsométrica.
<b><math>Sp</math></b>	adimensional	Pendiente-factor pendiente.
<b><math>Ss</math></b>		Gravedad específica de las partículas de sedimento.
<b><math>S_s</math></b>	km <sup>2</sup>	Área Sobre la Curva Hipsométrica.
<b><math>Sw</math></b>		Gravedad específica del agua
<b><math>T</math></b>	años	Periodo de retorno.
<b><math>t</math></b>		Tiempo.
<b><math>T_c</math></b>	min	Tiempo de concentración.
<b><math>V</math></b>	m/s	Velocidad media del flujo.
<b><math>v</math></b>	m/s	Velocidad local en una distancia, medida perpendicularmente al lecho del canal.
<b><math>V_s</math></b>	m <sup>3</sup>	Volumen de la partícula.
<b><math>w_o</math></b>	m/s	Velocidad de asentamiento.
<b><math>Y</math></b>	tn	Rendimiento individual de sedimentos a través de las tormentas y la erosión en surcos.
<b><math>Ya</math></b>	mm	Nivel del agua.
<b><math>Ye</math></b>	tn/año	Rendimiento total anual de sedimentos.
<b><math>Ym</math></b>	tn/año	Total de sedimentos al año, medidas en el sitio del reservorio
<b><math>\delta s</math></b>	m	Espesor de la capa de carga de lecho.
<b><math>\rho</math></b>	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del fluido.

$\phi_s$	grados	Angulo de reposo de la partícula.
$\gamma_s$	adimensional	Densidad relativa de una partícula de sedimento.
$\rho_s$	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del fluido o Peso específico de una partícula sólida.
		Escala Phi (parámetro de tamaño sedimentológico).
$P_o$	adimensional	Factor de porosidad.
$\tau_*$	adimensional	Parámetro critico de Shields.
$(\tau_o)_c$	Kg	Esfuerzo cortante critico.
$\tau_o$	Kg	Esfuerzo cortante.
$(\rho_{sed})_{mojado}$	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad específica de una mezcla húmeda de sedimentos
$(\rho_{sed})_{sec}$	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad específica de una mezcla seca de sedimentos.
$d_s$	mm	Tamaño característico.
$(C_s)_{media}$	gr/lit	Concentración media de sedimentos en suspensión.
$\Delta h$	km	Equidistancia Entre las Curvas de Nivel.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

Actualmente en nuestra región los trabajos de investigaciones sobre la producción y transporte de sedimentos en ríos de montaña no han recibido la atención que requieren, pese a la relevancia que tienen, tanto para el manejo del medio ambiente, como para el desarrollo de proyectos relacionados, y por ende de la economía de la región y país.

A futuro se emprenderán varios proyectos para generación hidroeléctrica (Mazar, Paute-Sopladora, Minas-La Unión, etc), que aportarán en beneficio de la colectividad y por ende se necesitará tener un conocimiento más explícito de la cantidad de sedimento que pueda afectar a dichos proyectos.

Mediante el presente estudio y caracterización de la microcuenca del Turupamba se pretende dar una idea en lo que se refiere a la cantidad de sedimentos que contribuye esta microcuenca a uno de los cauces de aporte para el embalse del Proyecto Hidroeléctrico Mazar y Amaluza, los cuales son gran importancia para el progreso y desarrollo económico del país.

#### 1.1 ANTECEDENTES

La Universidad de Cuenca mantiene actualmente un convenio interuniversitario con el Consejo interuniversitario Flamenco VLIR, dentro del cual se está desarrollando varios proyectos como el Integrated Water Quality Management IWQM. En este contexto se están emprendiendo esfuerzos para una mejor caracterización de los procesos hidrológicos y de contaminación del recurso hídrico en la cuenca del río Paute. Adicionalmente la KU Leuven de Bélgica ha participado en el desarrollo de proyectos de investigación como: Hacia un Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas de Montaña: Estudio del caso de la Cuenca del río Paute (VLIR 005) dentro del cual se ha llevado a cabo acciones de monitoreo y trabajos que dan a aporte a un mejor conocimiento del proceso erosivo y de producción de sedimento en la cuenca del río Paute a fin de lograr establecer para la región una base de información suficiente que permita disponer a futuro de los elementos necesarios para la identificación e implementación de medidas de control y recuperación.

#### 1.2 ALCANCE

A través del desarrollo del presente tema, se pretende dar pautas para la caracterización integral de los procesos hidrológicos de la producción de sedimentos a escala de microcuenca, que considere aspectos relacionados a geomorfología, cambios en uso e impacto antrópico, cobertura vegetal, suelos, y régimen hidrológico. Este trabajo formará parte de los esfuerzos que se vienen llevando a cabo para el establecimiento de metodologías para simulación y análisis de escenarios en hidrología y producción de sedimentos.



### **1.3 JUSTIFICACION**

La producción de sedimentos es un indicador de la cantidad de material erosionado mecánicamente sobre un área dada; los procesos erosivos que se presentan en la cuenca, el transporte de material erosionado hacia la red drenaje, así como la competencia del sistema fluvial inciden en la producción de sedimentos. Es por esto que la producción de sedimentos es una función de la interacción entre parámetros geomorfológicos, hidrológicos y climáticos, así como de los cambios introducidos por la actividad antrópica en el sistema fluvial.

Este estudio se ha orientado a identificar los parámetros naturales y la manera en que estos contribuyen en dicho proceso, ya que las variables tales como las altas pendientes, la red de drenaje, tipo de suelo, cobertura vegetal, la difícil geomorfología y el uso del suelo, ligado a los complejos procesos hidrológicos en cuencas de montaña deben ser tomadas en cuenta para efectos de caracterizar el comportamiento de la lluvia-escurrentía-infiltración-producción de sedimentos.

Con el presente tema se pretende dar una contribución a la caracterización de los principales procesos de producción de sedimentos en una microcuenca de montaña, con el fin de identificar las relaciones de aquellos agentes más importantes, caracterizando los procesos a escala de microcuenca a fin de identificar e implementar ideas sobre medidas correctivas o de beneficio para mitigar la producción de sedimentos y en sí la erosión del suelo en la microcuenca investigada.

### **1.4 AUSPICIO**

El presente tema se desarrolló en el marco de las actividades establecidas para el proyecto Integrated Water Quality Management IWQM con el apoyo del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca, y contó con el aporte de los resultados preliminares del proyecto de investigación VLIR OI: “Hacia un Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas de Montaña: Estudio de caso de la Cuenca del Río Paute” que se desarrolla en el marco del convenio interuniversitario con la Universidad Flamenca de La KU Leuven Bélgica.

### **1.5 OBJETIVO PRINCIPAL**

Dar un aporte al entendimiento de los procesos hidrológicos de producción y transporte de sedimentos en cuencas hidrográficas de montaña mediante la caracterización integral a escala de microcuenca.

## **1.6 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar la microcuenca de estudio y los principales procesos relacionados a la producción de sedimentos.
- Implementar y acondicionar una estación de toma de muestras de sedimentos en la microcuenca de estudio.
- Levantar información relacionada con aspectos de: cobertura vegetal, régimen hidrológico, sedimentos y a los principales parámetros de la microcuenca.
- Analizar la información y registros hidrológicos y los de concentración de sedimento en suspensión obtenida en la estación de medición respectiva.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1 LA CUENCA HIDROGRAFICA Y SU CARACTERIZACION

Generalmente se puede definir a una Cuenca Hidrográfica como una concavidad en la superficie de la tierra creada mediante las fuerzas tectónicas, la fuerza del agua y sus corrientes, los tipos de suelos y la vegetación, siendo limitada por la divisoria de aguas de las cumbres de dicha concavidad. Esta cuenca es alimentada exclusivamente por las precipitaciones y cuyos excedentes en agua o en materias sólidas transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura, una estación de aforo, o un punto arbitrario (Fundación Gonzalo Ríos Arioste. I.A.P. Centro virtual de información del agua).

Aunque en un concepto más amplio la divisoria de aguas que delimita una cuenca puede llegar a no ser muy bien definida debido a que puede existir dos divisorias: una para las aguas superficiales que sería la topográfica y otra para las aguas subterráneas, la misma que sería determinada en función de los perfiles de la estructura geológica, fundamentalmente por los pisos impermeables.

Para la caracterización de una Cuenca de montaña existen diversos factores a ser tomados en cuenta, siendo entre ellos las características físicas de la cuenca un conjunto de parámetros que influye profundamente en el comportamiento hidrológico de dicha zona tanto a nivel de las excitaciones como de las respuestas de la cuenca tomada como un sistema.

Dichas características físicas se clasifican en dos tipos según su impacto en el drenaje: las que condicionan el volumen de escurrimiento como el área y el tipo de suelo de la cuenca, y las que condicionan la velocidad de respuesta como el orden de corriente, la pendiente, la sección transversal, etc.

Así pues, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad práctica en la ingeniería de la Hidrología, pues con base en ellos se puede lograr una transferencia de información de un sitio a otro, donde exista poca información; bien sea que fallen datos o que haya carencia total de información de registros hidrológicos, siempre y cuando exista cierta semejanza geomorfológica y climática de las zonas en cuestión.

Por lo tanto los estudios morfo-métricos son de gran importancia en el estudio de cualquier cuenca, ya que ofrecen un parámetro de comparación y/o interpretación de los fenómenos que ocurren en ésta (Revista: Avances en recursos Hídricos N° 11. Oscar José Mesa).

## 2.2 GEOMORFOLOGIA DE UNA CUENCA HIDROGRAFICA

Tiene por objeto la descripción y la explicación del relieve de la cuenca pudiendo reducirla a una serie de unidades topográficas llamadas vertientes, dentro de las cuales podemos identificar ciertas características con unas que constituyen las formas de relieve.

Las Cuenca Hidrográficas están en constante modificación, su grado de alteración dependen de la intensidad de la erosión de los suelos, debido a las lluvias, a los procesos de degradación, etc.

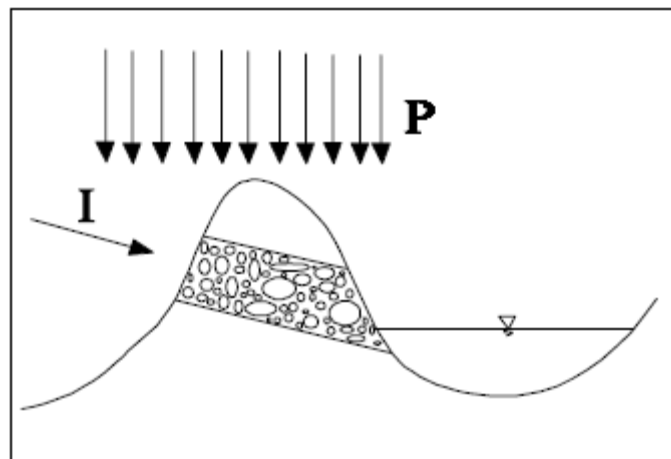
Teniendo como principales características geomorfológicas de una cuenca las descritas a continuación:

### 2.2.1. ÁREA DE DRENAJE

Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje delimitada por los puntos más elevados de la concavidad que conforma la cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta que para efectos de balance hídrico, como se indica en la Figura 2.1, el área superficial puede ser mucho menor que el área total contribuyente al caudal de un río. Si se presentan estructuras geológicas que favorecen la infiltración de aguas de otras cuencas, es necesario tener en cuenta estos aportes que pueden ser bastante significativos.

Por lo que el área de la cuenca es quizá el parámetro más importante, siendo determinante en la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc.

**Figura 2. 1:** Efecto de balance hídrico.



**Delimitación:** Se basa en 4 características:

- La línea divisoria corta ortogonalmente a las curvas de nivel.
- Cuando la divisoria se va trazando desde un nivel altitudinal mayor a un nivel altitudinal menor, esta línea corta a las curvas de nivel por su concavidad.

- Al cortar el terreno por el plano normal a la divisoria el punto de intersección de está corresponde al de mayor altitud del terreno.
- La línea divisoria nunca corta a un curso de agua natural, excepto en el punto de control o desembocadura.

El área es un parámetro geomorfológico muy importante. Su importancia radica en las siguientes razones:

- Es un valor que se utilizará para muchos cálculos en varios modelos hidrológicos.
- Para una misma región hidrológica o regiones similares, se puede decir que a mayor área mayor caudal medio.
- Bajo las mismas condiciones hidrológicas, cuencas con áreas mayores producen hidrogramas con variaciones en el tiempo más suaves y más llanas.

## 2.2.2 MORFOMETRÍA LINEAL

### ▪ **Perímetro de la cuenca ( $P_c$ )**

Es la longitud del límite exterior de la cuenca y depende principalmente del área y la forma de la cuenca, equivale al trazo que se realiza sobre la divisoria de la cuenca hidrográfica.

Esta medición puede obtenerse directamente por una consulta a la información que contiene el polígono que conforma la cuenca dentro de un Sistema de Información Geográfico (SIG). La medición del perímetro es útil para calcular otros parámetros de superficie y relieve de las cuencas.

Si bien el perímetro es una medida o parámetro que no indica nada por sí solo se convierte en un insumo fundamental para el cálculo de los parámetros de forma de la cuenca.

### ▪ **Longitud del lecho principal: ( $L_c$ )**

Distancia medida a lo largo del curso fluvial de mayor orden, desde las nacientes hasta el final del mismo.

### ▪ **Longitud máxima entre los extremos de la cuenca: ( $L_m$ )**

Longitud medida entre los puntos extremos de la cuenca que no necesariamente coincide uno de ellos con el desagüe. En dirección paralela al cauce principal.

### ▪ **Longitud máxima entre el extremo de la cuenca y el desagüe: ( $L$ )**

Distancia medida desde el desagüe hasta el límite más extremo de la cuenca.

- **Longitud intermedia: (L10- 85)**

Longitud medida a lo largo del canal principal, entre 2 puntos localizados a un 10 y 85 % respectivamente desde el desagüe.

- **Ancho máximo de la cuenca: (Amax)**

Longitud medida a partir de los extremos transversales de la cuenca perpendiculares al curso principal.

- **Ancho medio de la cuenca:  $A_{medio}$**

Es un parámetro promedio que se obtiene a partir del cociente entre el área de la cuenca y la longitud máxima (Lm) de la misma.

En la Figura 2.2 se ilustra la longitud de la cuenca, el cauce principal y recorrido principal de la cuenca, estas distintas longitudes son obtenidas generalmente de la medición en mapas topográficos, los resultados de las mediciones pueden tener variaciones dependiendo de las escalas de los mapas y la precisión de la medición.

**Figura 2. 2:** Longitud de la cuenca. Cauce Principal. Recorrido principal de la Cuenca.



### 2.2.3 FORMA DE LA CUENCA

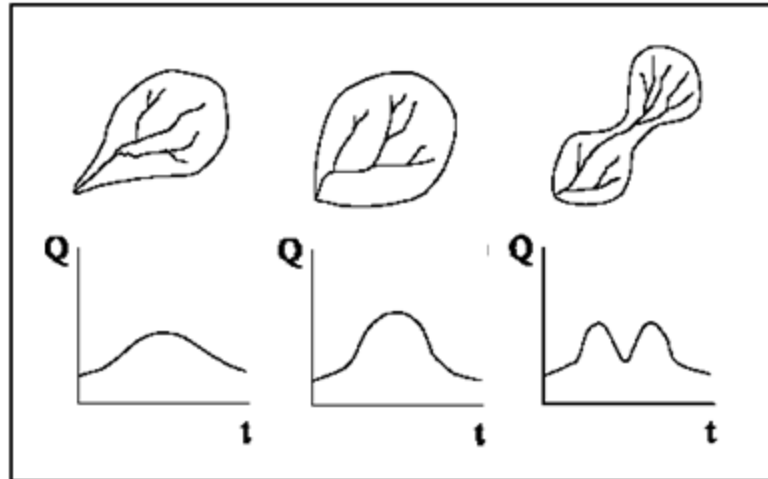
La forma de la cuenca es un elemento muy importante que depende de su tamaño, perímetro, longitud y anchura.

Los índices que se aplican para determinar la forma de la cuenca tienen como objetivo parametrizar la misma y a partir de las figuras geométricas resultantes, compararlas con patrones pre-establecidos que se orientan específicamente a determinar el riesgo de inundación que tiene la misma y en su función el riesgo de erosión.

Si los valores tienden a la unidad, el riesgo de crecientes es mayor así como su riesgo de erosión. Si los valores tienden a 0, el riesgo de inundación y erosión es menor.

En la Figura 2.3 se puede observar varios hidrogramas para cuencas con la misma área y de diferentes formas ante la misma precipitación.

**Figura 2. 3:** Hidrogramas para cuencas con igual área y diferentes formas ante la misma precipitación.



Los principales factores de forma son:

- **Factor Forma: ( Rf )**

Se define como el cociente entre el ancho medio de la cuenca  $A_{medio}$  y el largo máximo de la misma  $Lm$ . Este indicador pretende parametrizar la cuenca de tal manera que a través del mismo se obtenga una aproximación a su forma geométrica.

$$R_f = \frac{A_{medio}}{Lm^2} \quad (2.1)$$

Donde  $A_{medio}$  está en  $Km^2$  y  $Lm$  esta en  $km$ . Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según que su factor de forma tienda hacia valores extremos grandes o pequeños, respectivamente.

- **Radio de Circularidad: ( Rc )**

Se calcula a partir del cociente entre el área de la cuenca ( $A$ ) y el área de un círculo que tiene un perímetro igual al perímetro de la cuenca ( $Pc$ ).

$$Rc = \frac{4\pi A}{Pc^2} \quad (2.2)$$

Donde  $A$  y  $Pc^2$  tienen sus unidades en  $Km^2$  y  $Km$  respectivamente. Su valor es 1 para una cuenca circular.

▪ **Radio de Elongación: (Re)**

Se define como el cociente entre el diámetro de un círculo de área igual a la de la cuenca y el largo máximo (**Lm**) de la misma.

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Lm} \quad (2.3)$$

A y L deben tener las unidades en Km<sup>2</sup> y Km respectivamente. Los valores de l coeficiente Re fluctúan entre 1, para cuencas llanas y 0.6 para cuencas con relieve pronunciado.

▪ **Coeficiente de Compacidad: (Kc)**

Se obtiene a partir del cociente entre el perímetro de la cuenca (**Pc**) y el perímetro de un círculo de área igual al área de la cuenca. Determinado por la expresión:

$$Kc = 0.28 \frac{Pc}{\sqrt{A}} \quad (2.4)$$

Con Pc y A en Km y Km<sup>2</sup> respectivamente. El índice será mayor o igual a la unidad, de modo que cuanto más cercano a este valor se encuentre, más se aproximará su forma a la de l círculo, e n c uyo c a s o l a c u e n c a t e n d r á m a y o r e s p o s i b i l i d a d e s d e p r o d u c i r c r e c i e n t e s c o n m a y o r e s p i c o s ( c a u d a l e s ). P o r c o n t r a p a r t i d a , c u a n d o s e a l e j a m á s d e l v a l o r d e l a u n i d a d s i g n i f i c a u n m a y o r a l a r g a m i e n t o e n l a f o r m a d e l a c u e n c a . E n l a T a b l a 2.1 s e i l u s t r a l a s f o r m a s d e l a c u e n c a d e a c u e r d o a l c o e f i c i e n t e d e C o m p a c i d a d .

**Tabla 2. 1** Formas de la Cuenca de acuerdo al Coeficiente de Compacidad

Clase de Forma	Coeficiente de Compacidad (Kc)	Forma de la Cuenca
<b>Clase I</b>	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval - redonda
<b>Clase II</b>	1.26 a 1.50	Oval – redonda a oval - oblonga
<b>Clase III</b>	1.51 a 1.75	Oval – oblonga a rectangular - oblonga

▪ **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 de sagüe de la cuenca, que es un punto, queda convertido en el lado menor del rectángulo.

Para la construcción del rectángulo, se parte del perímetro,  $P_c$ , y el área de la cuenca,  $A$ . Si el lado menor es  $L_1$  y el lado mayor  $L_2$ , tenemos:

$$P_c = 2(L_1 + L_2) = \frac{Kc\sqrt{A}}{0.28} \quad (2.5)$$

Siendo:

$$L_1 L_2 = A \quad (2.6)$$

La solución de este sistema de ecuaciones es:

$$L_1 = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right) \quad (2.7)$$

$$L_2 = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right) \quad (2.8)$$

Para que esta representación sea posible es necesario que se cumpla la condición:

$$Kc \geq 1,12$$

En el caso de dos cuencas con rectángulos equivalentes similares, Martínez et al (1996), admite que poseen un comportamiento hidrológico análogo siempre que posean igual clima y que el tipo y la distribución de sus suelos, de su vegetación y de su red de drenaje sean comparables

#### 2.2.4 RELIEVE DE LA CUENCA

Las variables del relieve son consideradas las de mayor importancia debido a:

- La pendiente tiene influencia directa en el tipo de drenaje, forma de los canales, velocidad y tipo de escorrentía, potencial erosivo o de carga de las corrientes, formas del modelado resultantes, características de infiltración, depósitos en los lechos, etc. Puesto que a mayores pendientes corresponden mayores velocidades del agua en las corrientes, y menor será el tiempo de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal.

- La altitud media, el rango de alturas, la elevación de la cuenca, la altitud es determinante de la temperatura y la precipitación.

Las principales variables del relieve son:

- **Elevación Máxima:**

Está determinada por la cota superior que aparece dentro de la cuenca, indicada por las curvas de nivel o un valor de referencia altitudinal.

- **Elevación Mínima:**

Constituye la cota menor que aparece en el área de la cuenca no coincidiendo necesariamente con el punto de desagüe final del curso principal, por ejemplo en áreas de depresión.

- **Elevación Promedio:**

Se calcula a partir del promedio entre la elevación máxima y mínima existente dentro de la cuenca.

- **Desnivel absoluto:**

Se obtiene restando la elevación máxima y la elevación mínima dentro de la cuenca.

- **Pendiente del Canal:**

La pendiente del curso principal se calcula a partir del cociente entre la desnivelación entre los puntos definidos por las cotas que marcan la desembocadura y las nacientes del canal y la longitud del curso principal.

- **Relación de relieve: Rr**

Relaciona la diferencia de cotas de altitud, considerando el punto más alto de la cuenca, el más elevado de su perímetro y la longitud del cauce principal medida en dirección paralela al lecho del curso. Donde h y L deben tener las unidades comparables ya sean en metros o kilómetros.

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

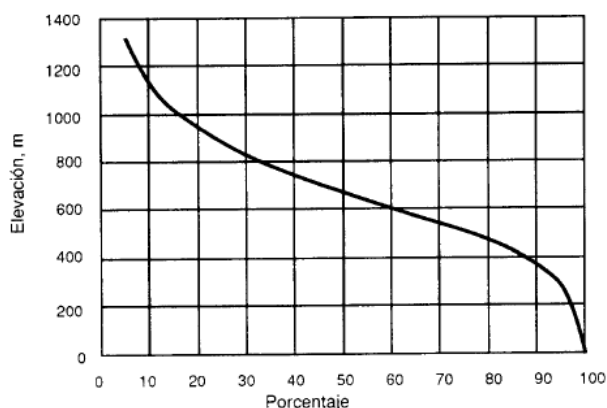
(2.9)

### ▪ La curva hipsométrica

La curva hipsométrica proporciona una información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura.

Dicha curva presenta, en ordenadas, las distintas cotas de altura de la cuenca, y en abscisas la superficie de la cuenca que se halla por encima de dichas cotas, bien en Km<sup>2</sup> o en tanto por cien de la superficie total de la cuenca. En la Figura 2.4 se muestra una curva hipsométrica tipo.

**Figura 2. 4:** Curva hipsométrica tipo.



López y Pérez (1983), señalan que: “La curva hipsométrica permite cualificar el relieve. Una pendiente fuerte en el origen, hacia cotas inferiores, indica llanuras o penillanuras; si la pendiente es muy fuerte, hay peligro de inundación e zonas extensas. Una pendiente fuerte hacia la parte media indica una gran meseta”.

### ▪ Relación hipsométrica

Según (Llamas, 1993)<sup>1</sup>

La importancia de esta relación reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Así, cuando  $R_h$  es igual a 1, se trata de una cuenca en equilibrio morfológico. En la Figura 2.5 se ilustra tres curvas hipsométricas correspondientes a otras tantas cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos.

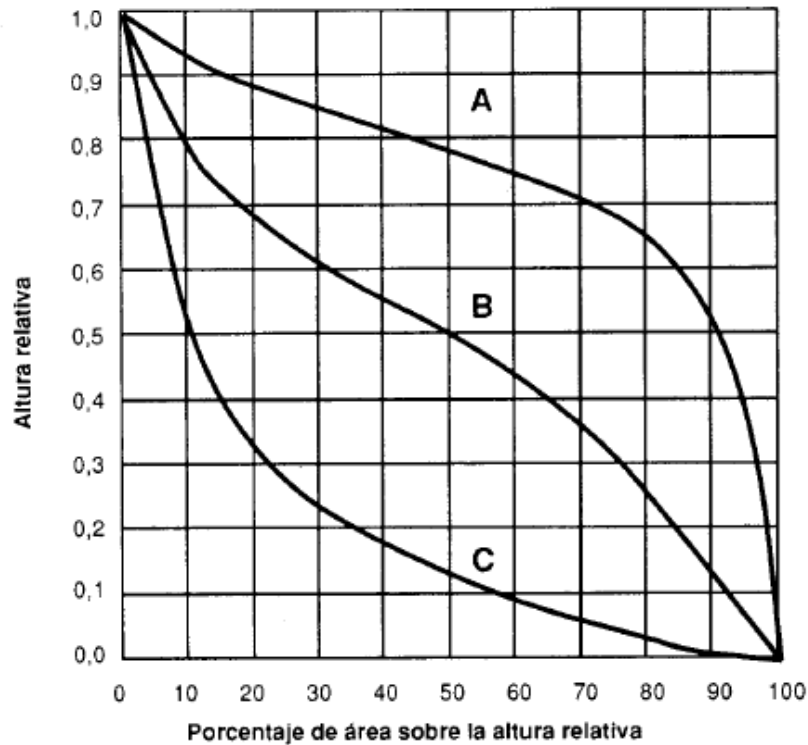
$$R_h = \frac{S_s}{S_i} \quad (2.10)$$

<sup>1</sup> Llamas, J., Hidrología General, Principios y Aplicaciones.

Donde:

Ss y Si son, las áreas sobre y bajo la curva hipsométrica respectivamente y que deben tener unidades similares.

**Figura 2. 5:** Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión (según Llamas)

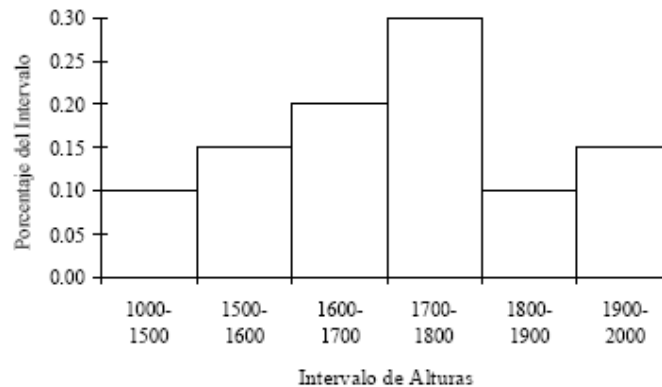


La curva superior (curva A: fase de juventud) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B: fase de madurez) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C: fase de vejez) es típica de una cuenca sedimentaria. Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos.

#### ▪ Histograma de frecuencias

Es la representación de la superficie, en  $\text{km}^2$  o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras puede ser obtenido de los mismos datos de la curva hipsométrica. Realmente contiene la misma información de ésta pero con una representación diferente, dándonos una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca, como se indica en la Figura 2.6.

**Figura 2. 6:** Histograma de frecuencias tipo.



▪ **Pendiente Media o altura media:**

**Según Heras (1972)**

Es la pendiente ponderada para toda la cuenca. Se obtiene a partir del cociente de la sumatoria del producto de la longitud de las curvas de nivel que aparecen en la cuenca por la equidistancia entre las mismas y la superficie total de la cuenca.

$$S_t = \frac{\sum(\Delta h \cdot L_{cn})}{A} \quad (2.11)$$

Donde:

S es la pendiente media de la cuenca.

$\Delta h$  La equidistancia entre curvas de nivel analizadas en Km.

$L_{cn}$  la longitud de las curvas de nivel analizadas en Km.

A el área total de la cuenca en  $Km^2$

**Según (Llamas, 1993) <sup>2</sup>**

También se puede obtener la pendiente media de una cuenca como el cociente entre la diferencia de elevación máxima medida entre el punto más alto del límite de la cuenca y la desembocadura del río principal, y la mitad del perímetro de la cuenca.

$$S_t = \frac{2H}{P_c} \quad (2.12)$$

Donde:

H es la citada diferencia de cota en Km.

$P_c$  el perímetro de la cuenca en Km.

<sup>2</sup> Llamas, J., Hidrología General, Principios y Aplicaciones.

### Según Benson (1959)

La pendiente media de una cuenca puede asimilarse a la pendiente de la recta trazada entre los puntos que se encuentran al 85 % y al 10 % de distancia a partir del punto más alejado del punto de desagüe siguiendo el curso principal.

De acuerdo a la Figura 2.7 La pendiente media de la cuenca es la pendiente entre los puntos B y C, y se determina mediante:

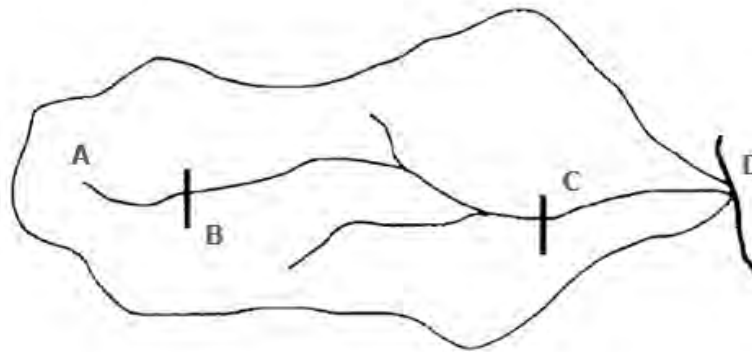
$$S_t = \frac{H_b - H_c}{BC} \quad (2.13)$$

Siendo:

$AB = 0.10 AD$ ;  $AC = 0.85 AD$

Las unidades de  $H_b$ ,  $H_c$  y  $BC$  están en Km.

**Figura 2. 7:** Pendiente media según Benson



Sin embargo, la pendiente media puede resultar un índice poco significativo, pues se pueden tener cuencas con igual valor de pendiente media pero con perfiles hipsométricos distintos. Es más descriptivo, y útil, tener una idea precisa de la distribución de las pendientes de una cuenca.

### 2.2.5 ORIENTACIÓN DE LA CUENCA

Por orientación de la cuenca, hay que entender su dirección geográfica según la resultante de la pendiente general.

Este concepto es importante por que distintos elementos pueden relacionarse con la orientación de la superficie y entre ellos se tienen:

- El número de horas que está soleada la cuenca. Este es un elemento bastante importante en la medida que aumenta la latitud de la cuenca. Puede ser el factor principal en el cálculo de la evaporación y la evapotranspiración.
- Las horas en las que incide el sol sobre la ladera de la cuenca.

- La dirección de los vientos dominantes
- La dirección del movimiento de los frentes de lluvia.
- Los flujos de humedad

## 2.2.6 RED DE DRENAJE DE LA CUENCA

Estas variables se reducen tan solo a índices, ya que todas ellas resultan de la combinación de varios parámetros.

Estas características están relacionadas con características climáticas, litológicas, edafológicas y de cobertura vegetal.

### ▪ Densidad de drenaje

Se define la densidad de drenaje de una cuenca como el cociente entre la longitud total de los canales de flujo pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca:

$$D = \frac{L_T}{A} \quad (2.14)$$

A y  $L_T$  deben tener unidades en  $\text{Km}^2$  y Km respectivamente. La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante un aguacero, y, por tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en el desagüe de la cuenca. A mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por tanto, un menor tiempo al pico del hidrograma.

Esta densidad está íntimamente ligada con la precipitación en intensidad y cantidad, depende también de la litología, de las características que el suelo posea, principalmente de la capacidad de infiltración del suelo, de la cobertura vegetal existente.

Una densidad alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación; una cuenca con baja densidad refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta.

### ▪ Constante de estabilidad del río

La constante de estabilidad de un río, propuesta por Schumm (1956) como el valor inverso de la densidad de drenaje:

$$C = \frac{A}{L_T} = \frac{1}{D} \quad (2.15)$$

Representa, físicamente, la superficie de cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. Puede considerarse, por tanto, como una medida de la erodabilidad de la cuenca. Así, regiones con suelo rocoso muy resistente, o con suelos altamente permeables que implican una elevada capacidad de

infiltración, o regiones con densa cobertura vegetal, tienen valores altos de la constante de estabilidad y bajos de densidad de drenaje. Por el contrario, una baja constante de estabilidad, o una elevada densidad de drenaje, es característica de cuencas con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.

#### ▪ **Densidad hidrográfica**

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

$$F = \frac{N_T}{A} \quad (2.16)$$

Donde:

$N_T$  es la suma de todos los segmentos de canal que forman la red hidrográfica de la cuenca, entendiendo como tales a todo tramo de canal que no sufre aporte alguno de otro canal, su unidad está en Km.

A es el área de la cuenca en  $Km^2$

Diversos autores coinciden en afirmar que entre más corrientes tributarias presente la red de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al presentar una densa red de drenaje, una gota de lluvia deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad del escurrimiento es mayor.

#### ▪ **Perfil del cauce principal**

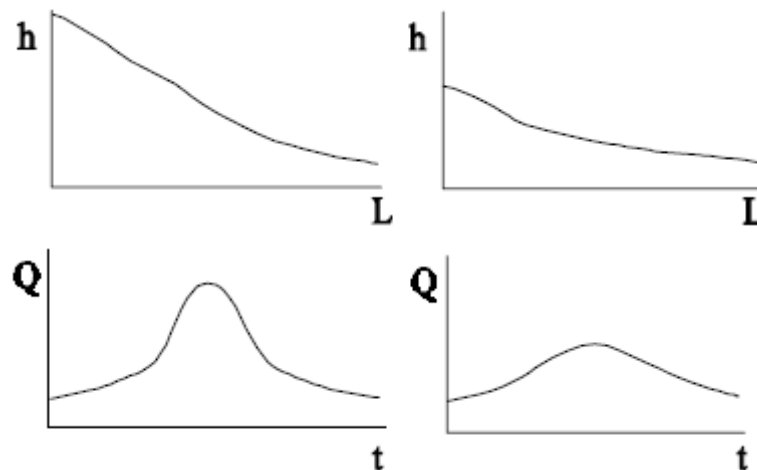
El perfil del cauce principal es simplemente el gráfico de la elevación a lo largo del cauce principal en función de la longitud del mismo.

Con base en la forma del perfil altimétrico del río se puede inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica de la cuenca en su expresión del hidrograma, o sea, la variación del caudal con el tiempo, como se muestra en la Figura 2.8.

También los perfiles se usan para estudios de prefactibilidad de proyectos hidroeléctricos, producción de sedimentos, ubicación de posibles sitios susceptibles de avalanchas, et c. Generalmente cuencas con pendientes altas en el cauce principal tienden a tener hidrogramas más pronunciadas y más cortas que cuencas con pendientes menores.



**Figura 2. 8:** Hidrograma según el perfil altimétrico del cauce principal.



#### ▪ Orden de la cuenca

El análisis cuantitativo de redes hidrográficas se basa en el método de (Horton, 1945)<sup>3</sup> de clasificación de la red de canales, basado en el sistema de Gravelius.

Horton 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.

#### Modelo de ordenación de Horton – Strahler

(Strahler; 1952, 1957)<sup>4</sup>, revisó y perfeccionó el esquema de Horton (1945) dando lugar al esquema de ordenación o de clasificación de Horton-Strahler, hoy en día el más utilizado en hidrología.

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 los 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

<sup>3</sup> HORTON R. E. Erosional Development of streams and their drainage basings

<sup>4</sup> STRAHLER. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology

aquellos a partir de los cuales se origina un segmento de canal (es decir, la cabecera de todos los tributarios de la cuenca).

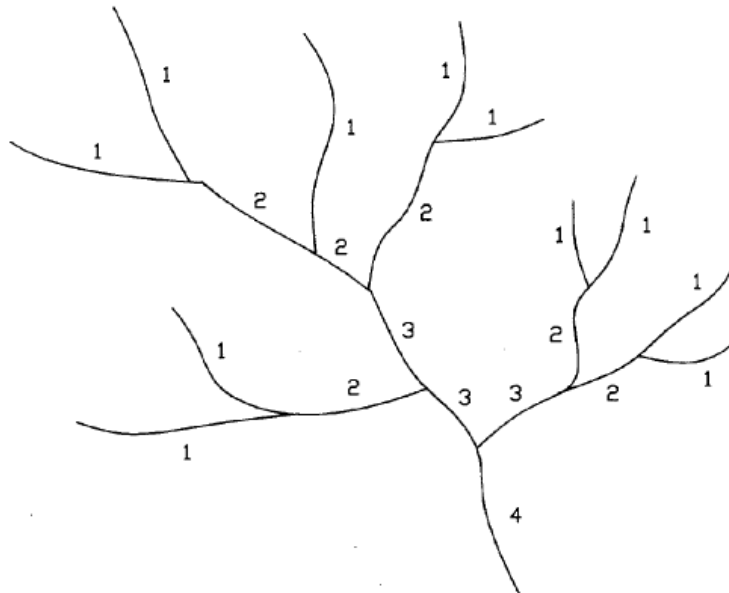
Según Strahler una corriente puede tener uno o más segmentos. Un canal es una unión arbitraria de segmentos (ejm. canal principal).

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,  $i + 1$ , a guisa de abajo. Cuando se unen dos corrientes de orden  $u$  crean una corriente de orden  $u+1$ .
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,  $u$ , es el de la corriente de mayor orden.

En la Figura 2.9 se muestra un sencillo ejemplo de ordenación de una red hidrográfica según el criterio de Strahler.

**Figura 2. 9:** Orden de una cuenca según Strahler.



### ▪ Relación de bifurcación

Definida como la relación existente entre el número de corrientes de un orden dado ( $u$ ) y el del orden superior siguiente ( $u+1$ ), mediante cuya operación se determina el radio de bifurcación entre órdenes y la sumatoria de los mismos determina el radio de bifurcación promedio, de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$Rb = \frac{Nu}{N(u+1)} \quad (2.17)$$

Donde:

$Nu$  = Número de corrientes de orden  $u$  (adimensional)

$N(u+1)$  = Número de corrientes de orden superior siguiente (adimensional)

$$Rb = \sum_{i=1}^{i=n} Rbi / n \quad (2.18)$$

Donde:

$i$  = Número de relaciones:  $i = 1, \dots, i = n$ . (adimensional)

Las relaciones de bifurcación dentro de una cuenca, tienden a ser de la misma magnitud, generando valores entre 2 y 4.

Valores de bifurcación próximos a 2 indican cuencas con escaso relieve, valores entre 3 a 5 definen a cuencas de montaña, pero en las cuales las estructuras geológicas no influyen considerablemente en la forma del drenaje, estando por lo general formados sobre rocas homogéneas. Los valores superiores a 5 y sobre todo aquellos que exceden de 10, indican cuencas donde los caracteres estructurales condicionan fuertemente la instalación de cuencas estrechas y alargadas.

### ▪ Longitud de los cauces

Normalmente la longitud de los cauces es similar para cada segmento de un mismo orden, y por regla general los cauces de orden inferior son más cortos que los de orden mayor.

La relación de longitud es igual a la longitud media de los segmentos de un orden dividido entre la longitud media de los segmentos de orden inferior.

$$Rl = \frac{Lo}{Loi} \quad (2.19)$$

Donde:

$Rl$  = Relación de longitud (adimensional)

$Lo$  = Longitud media de los segmentos de un orden en Km

$Loi$  = Longitud media de los segmentos orden inferior en Km

▪ **Longitud media de las corrientes (Lmc)**

Este parámetro es considerado como un indicador de las pendientes de una cuenca, de tal forma que cuencas con longitudes cortas reflejan pendientes muy escarpadas y las cuencas con longitudes largas reflejan pendientes suaves o planas. La fórmula para calcularlo es mediante la ecuación siguiente:

$$Lmc = \sum_{u=1}^{u=n} Lu / Nu \quad (2.20)$$

Donde:

Lu = Longitud de las corrientes de orden u en Km

Nu = Número de corrientes de orden u (adimensional)

Mediante la gráfica Log Lu vs. U se realiza el chequeo de la cuantificación de las longitudes de corrientes, esta gráfica debe corresponder a una recta con sentido positivo, en caso de existir quiebres, significa que los valores de longitud no fueron determinados correctamente y es necesario realizar una revisión.

## 2.2.7 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA CUENCA

También denominado tiempo de respuesta o de equilibrio, (Llamas, 1993)<sup>5</sup> lo define como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe.

Se atribuye muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una partícula de agua caída en el punto de la cuenca más alejado (según el recorrido de drenaje) del desagüe en llegar a éste. Esto no se corresponde con el fenómeno real, pues puede haber puntos de la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al desagüe que el más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante; depende, como indican Marco y Reyes (1992), de la intensidad del aguacero, aunque muy ligeramente.

Por tener el concepto de tiempo de concentración una cierta base física, han sido numerosos los autores que han obtenido formulaciones de mismo tipo, a partir de características morfológicas y geométricas de la cuenca. A continuación, se muestran algunas de esas fórmulas empíricas:

<sup>5</sup> Llamas, J., Hidrología General, Principios y Aplicaciones.

▪ **Fórmula de Kirpich.**

Aplicable a pequeñas cuencas agrícolas: Calcula el tiempo de concentración,  $T_c$ , en minutos, según la expresión:

$$T_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385} \quad (2.21)$$

Siendo:

$L$  la longitud del cauce principal de la cuenca, en metros.

$S$  la diferencia entre las dos elevaciones extremas de la cuenca, en metros, dividida por  $L$  (es decir, la pendiente promedio del recorrido principal en m/m).

▪ **Fórmula Californiana (del U.S.B.R.).**

Es la expresión utilizada para el tiempo de concentración en el cálculo del hidrograma triangular del U.S. Bureau of Reclamation. Obtiene el tiempo de concentración de la cuenca según la expresión:

$$T_c = 0.066 \left( \frac{L}{J^{1/2}} \right)^{0.77} \quad (2.22)$$

Donde:

$T_c$  es también en horas.

$L$  y  $J$  la longitud y la pendiente promedio del cauce principal de la cuenca, en Km y en m/m, respectivamente.

▪ **Fórmula de Giandotti.**

Su uso se recomienda para cuencas pequeñas con relieves accidentados. Proporciona el tiempo de concentración de la cuenca,  $T_c$ , en horas.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{JL}} \quad (2.23)$$

Siendo:

$L$  y  $J$  los definidos anteriormente

$A$  la superficie de la cuenca en  $\text{Km}^2$ .

▪ **Fórmula de Ventura-Heras.**

$$T_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{J} \quad 0.04 \leq \alpha \leq 0.13 \quad (2.24)$$

Siendo:

$T_c$  el tiempo de concentración en horas

$A$  y  $J$  los ya definidos anteriormente.

▪ **Fórmula de Passini.**

$$T_c = \frac{\alpha(AL)^{1/3}}{J^{0.5}} \quad 0.04 \leq \alpha \leq 0.13 \quad (2.25)$$

Donde:

T<sub>c</sub> el tiempo de concentración en horas.

A, L y J los definidos anteriormente.

▪ **Fórmula de Témez.**

Es la recomendada en España, para el método racional modificado. Se utiliza en el cálculo del hidrograma triangular de J.R.Témez.

$$T_c = 0.3 \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad (2.26)$$

Donde:

L es la longitud del cauce principal de la cuenca, en Km

J es la pendiente promedio de dicho recorrido en m/m, y T<sub>c</sub> es el tiempo de concentración de la cuenca, en horas.

▪ **Fórmula California Culvert Practice.** (Department of Public Works of California - 1960.)

$$T_c = 60 \left( \frac{11.9L^3}{H} \right) \quad (2.27)$$

Donde:

T<sub>c</sub> es el tiempo de concentración en minutos

L la longitud del curso de agua más largo, en millas.

H la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y el desagüe de la cuenca, en pies.

## 2.3 PRODUCCION DE SEDIMENTOS

La producción de sedimentos es un indicador de la cantidad de material erosionado mecánicamente sobre un área dada en un período específico de tiempo y promediado para una zona específica (Petts & Foster, 1985)<sup>6</sup>; puede ser calculada estableciendo la relación entre la carga sólida transportada por un río en un sitio de referencia y el área de drenaje aguas arriba de este sitio. Los procesos erosivos que se presentan en la cuenca, el transporte de material erosionado hacia la red drenaje, así como la competencia del sistema fluvial inciden en la producción de sedimentos. Por lo tanto, la producción de sedimentos es función de la interacción entre parámetros geológicos,

<sup>6</sup> Petts & Foster, Rivers and landscape. Edward Arnold (eds). London (1985)

hidrológicos y climáticos, así como de los cambios introducidos por la actividad antrópica en el sistema fluvial (Knighton, 1984)<sup>7</sup>.

El estudio sobre producción de sedimentos se ha orientado a identificar los parámetros naturales que controlan dicho proceso. Algunos autores como Ahnert (1970), Stallard, (1988), Pinet & Sourniau (1988), Milliman & Syvitski (1992), han señalado que la producción de sedimentos es función del relieve, en tanto que parámetros climáticos (i.e. precipitación, escorrentía y temperatura) presentan un papel secundario al explicar la variación en la producción de sedimentos. Otros autores Holeman (1968), Douglas (1967), Wilson (1973), Jansen & Painter (1974), afirman que la producción de sedimentos depende de la precipitación media anual, con una respuesta ampliamente regulada por la cobertura vegetal y el tipo de clima dominante.

Investigaciones recientes de Summerfield & Hulton (1994), Ludwig & Probst (1998) Hovius (1998), Harrison (2000), sugieren que la producción de sedimentos es más una función de un conjunto combinado de parámetros físicos que de un solo factor en particular. En un contexto global, Ludwig & Probst (1998) encontraron que la producción de sedimentos es controlada por la escorrentía, la variación estacional de la precipitación y la pendiente del terreno, mientras que Hovius (1998) indica que el conjunto de variables más eficientes al explicar la variación en la producción de sedimentos está conformado por el área de la cuenca, la altura máxima, la escorrentía, la temperatura promedio y la variación estacional de la temperatura.

Estadísticas globales de Milliman & Syvitski (1992), sobre producción de sedimentos muestran que las cuencas tropicales presentan magnitudes relativamente altas, comparadas con los valores reportados en cuencas de otras zonas geográficas. La producción de sedimentos en cuencas tropicales también se caracteriza por una fuerte variabilidad espacial y temporal, relacionada con los procesos tectónicos, geomorfológicos y climáticos que identifican estas zonas y particularmente con la ocurrencia de eventos de alta intensidad (i.e. sismos, fenómenos de remoción en masa, tormentas torrenciales) Stallard (1988), Thomas (1994).

Se ha estimado (Pedkov & Gusarov, 2006)<sup>8</sup> para Sudamérica una producción de sedimentos específica de alrededor de  $72 \text{ t ha}^{-1}$ , y aunque a los factores naturales les correspondería un 80%, los factores de orden antropogénico habrían producido un incremento de producción de sedimento del orden de 1.2 veces. Adicionalmente se ha estimado que el porcentaje de superficie que estaría presentando tendencia a incremento de producción de sedimentos para Sudamérica es del orden de 89 %.

Generalmente en la producción de sedimentos se especula que la conversión de bosques en áreas agrícolas y ganaderas genera incrementos en la producción de sedimentos; Dunne (1979), Braud et al. (2001), Krishnaswamy et al. (2001), Walling & Fang (2003). Además también de el desarrollo de actividades agrícolas en zonas de fuertes pendientes y la construcción y operación de obras de infraestructura. Sin embargo, aún no se ha

<sup>7</sup> KNIGHTON. D. Fluvial Forms and processes.

<sup>8</sup> Pedkov A.P., Gusarov A. V. (2006) Suspended sediment yield from continents into the World Ocean

cuantificado el efecto y la magnitud que las actividades antrópicas tienen directamente en el transporte y la producción de sedimentos.

### **Sedimento**

El sedimento es un material sólido de partículas no consolidadas, acumulado sobre la superficie terrestre (litosfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrósfera y en la biosfera (vientos, variaciones de temperatura, precipitaciones meteorológicas, circulación de aguas superficiales o subterráneas, desplazamiento de masas de agua en ambiente marino o lacustre, acciones de agentes químicos, acciones de organismos vivos).

### **Sedimentación**

La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Toda corriente de agua, caracterizada por su caudal, tirante de agua, velocidad y forma de la sección tiene una capacidad de transportar material sólido en suspensión. El cambio de alguna de estas características de la corriente puede hacer que el material transportado se sedimente; o el material existente en el fondo o márgenes del cauce sea erosionado.

La sedimentación es el proceso de acumulación de materiales después de haber sido erosionados y transportados. Es el último proceso de la morfogénesis. Las características de los depósitos dependen de la naturaleza del agente de transporte. En el caso de los ríos, mares o viento el material se deposita cuando el movimiento en el medio se reduce por debajo de la velocidad de deposición de la carga. En el caso del hielo la deposición se produce cuando encuentra un obstáculo o cuando la masa de hielo alcanza su máxima extensión espacial.

Puesto que la mayor parte de los procesos de sedimentación se producen bajo la acción de la gravedad, las áreas elevadas de la litosfera terrestre tienden a ser sujetas prevalentemente a fenómenos erosivos, mientras que las zonas deprimidas están sujetas prevalentemente a la sedimentación.

### **2.3.1 FACTORES EROSIVOS QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCION DE SEDIMENTOS**

Son condiciones naturales y/o antrópicas, que en el proceso de formación de sedimentos intervienen diversos elementos que pueden producir, aumentar o reducir la cantidad de sedimentos en suspensión y acarreo transportados por las corrientes. La acción de esos elementos se desarrolla en forma individual o combinada. Factores naturales como la intensidad y cantidad de precipitaciones, el relieve, las pendientes del terreno, deben tenerse muy en cuenta en el diseño de la investigación y la posible aplicación de medidas para reducir la sedimentación en la cuenca fluvial. Estos son:



- Geología, y geomorfología
- Tipos de Suelos
- Relieve de la Cuenca
- Erosión
- Régimen climatológico
- Red de drenaje y morfología de los cauces (tipo de material)
- Viento (intensidad, dirección)
- Cobertura vegetal
- Uso de la tierra
  - Agricultura y Ganadería
  - Urbanización

### **Descripción de los factores erosivos que Influyen en la Producción de Sedimentos.**

**Geología y geomorfología<sup>9</sup>.**- Se basa principalmente en el fenómeno de remoción en masa el cual comprende todo movimiento ladera abajo de material geológico debido a la fuerza de gravedad, incluyendo entre otros las caídas de rocas, flujo de lodos, reptaciones, o una subsidencia del terreno, también los flujos a lo largo de los cauces cuando el material que cae se mezcla con la corriente de agua, como es el caso de las llamadas avenidas torrenciales.

Generalmente este fenómeno se asocia a deslizamientos de grandes masas de material sólido que se han concentrado en sitios inestables. La inestabilidad es causada por factores geotécnicos que tienen que ver con las pendientes de los taludes, el manejo inadecuado del suelo, la tala de árboles y el almacenamiento de agua lluvia en los suelos.

Las masas de material permanecen por algún tiempo en un equilibrio precario en los sitios inestables, pero basta la presencia de un factor detonante para que se produzca el deslizamiento. Este factor detonante puede ser un sismo, un período prolongado de lluvias intensas o la pérdida de soporte en el pie de un talud.

Cuando el deslizamiento se produce directamente sobre una de las márgenes de una corriente natural el material deslizado se deposita sobre el lecho obstruyendo el paso libre del agua, pero a medida que pasa el tiempo el mismo flujo de agua se encarga de transportar el material hacia aguas abajo, parte como carga de fondo y parte en

---

<sup>9</sup> EDUARDO CASTRO MARIN. Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción de masa

suspensión. Si los deslizamientos se producen lejos de las corrientes de agua, entonces solamente una parte del material puede llegar a las corrientes por erosión hídrica.

**Tipos de Suelo.-** El suelo es un agregado de material rocoso fresco y erosionado, de minerales disueltos y redepositados, y de restos orgánicos. El tipo de suelo depende de la textura que posean (arena, limo y arcilla), su composición química y la naturaleza de su origen orgánico son importantes agentes que influyen en las características físicas del mismo, y que a la larga intervienen en la fácil erodibilidad del suelo frente a otros agentes (externos o internos), y por ende en la producción de sedimentos.

Esto debido a que cada tipo de suelo tiene una “dureza y propiedades” diferentes, lo que los hacen más susceptible o no a los procesos de degradación que los conlleva a convertirse en un sedimento a ser transportado mediante diferentes vías hacia los cauces de una cuenca.

**Relieve de la Cuenca.-** El relieve del territorio influye en la velocidad del agua por las laderas de la cuenca y por tanto aumenta o disminuye la erosión/arranque de partículas del suelo, en dependencia de su protección o cobertura vegetal. Las pendientes de la cuenca y del río son importantes componentes del relieve que determinan en mayor o menor grado el movimiento de materiales sólidos hacia los cauces y curso abajo.

Las regiones montañosas son las zonas más propensas a que se produzcan movimientos gravitacionales. No obstante, en ocasiones, y dependiendo de factores desencadenantes como cambios de las condiciones hidrológicas, acciones climáticas, etc., es suficiente una pendiente baja para que tengan lugar determinados tipos de inestabilidades, como movimientos de materiales geológicos<sup>10</sup>.

**Erosión.-** La erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción del viento o del agua. El proceso se presenta gracias a la presencia del agua en las formas: pluvial (lluvias) o de escorrentía (escurrimiento), que en contacto con el suelo (las primeras con impacto y las segundas con fuerzas tractivas), vencen la resistencia de las partículas (fricción o cohesión) del suelo generándose el proceso de erosión.

Los protagonistas principales de la erosión son: el impacto de las gotas de lluvia que genera el desprendimiento por salpicadura, compacta el suelo, reduciendo la infiltración y aumentando la escorrentía; la capacidad hidráulica del flujo superficial sobre una pendiente capaz de acarrear los sedimentos. Pero la comprensión del fenómeno se fundamenta en una separación entre la hidrología y la hidráulica, y en las propiedades del suelo que son importantes para cada una de ellas: las propiedades hidrológicas del suelo determinan la tasa de infiltración y de esta manera se fija la parte de la precipitación pluvial que contribuye al flujo superficial. Las propiedades hidráulicas del suelo determinan la resistencia del suelo al transporte por el flujo o por las gotas de lluvia.

---

<sup>10</sup> INGENIERIA GEOLOGICA. Luis I Gonzales de Vallejo.

**Régimen Climatológico.-** Fundamental dentro del aspecto de la erosión hídrica que afecta a la cuenca ya que esta se presenta por la acción de la lluvia y abarca la erosión provocada por el impacto de las gotas sobre el suelo desnudo, como también la acción hidráulica que arranca y transporta las partículas de suelo por el escurrimiento en laderas y taludes.

**Intensidad y cantidad de precipitaciones (lluvia).-** La erosión de los suelos es la fuente de producción de partículas, cuando tiene lugar intensas precipitaciones sobre tipos de suelos fácilmente erosionables, creando condiciones para que los sedimentos lleguen a los cauces, donde además se obstaculiza el flujo normal de la corriente si los sedimentos recibidos son considerables.

A este fenómeno se le llama Saltación pluvial, que es el impacto de las gotas de lluvia en el suelo desprovisto de vegetación y expuesto, que ocasiona el desalojo y arrastre del suelo fino. El impacto compacta el suelo disminuyendo la permeabilidad e incrementando la escorrentía.

**Escurrecimiento.-** Se da diferentes formas de erosión mediante escurrecimiento:

a.- Escurrecimiento superficial difuso.- Comprende la erosión laminar sobre laderas desprovistas de vegetación y afectadas por la saltación pluvial, que estimulan el escurrecimiento del agua arrastrando finos.

El escurrecimiento difuso ocurre cuando la velocidad del agua es menor de 30 cm/seg.

b.- Escurrecimiento superficial concentrado.- Produce dos formas, los surcos de erosión (canales bien definidos y pequeños), y las cárcavas, que son canales o zanjones de mayor magnitud.

El proceso se da en cuatro etapas: 1. Formación del canal. 2. Erosión remontante desde la base. 3. Cicatrización. 4. Estabilización.

c.- Escurrecimiento subsuperficial.- Las aguas infiltradas ocasionan la tubificación y el sifonamiento del suelo, formando cavidades, en donde la fuerza de infiltración ha superado la resistencia del suelo.

**Red de drenaje y morfología de los cauces.-** La red de drenaje es de gran importancia para entender el proceso de erosión fluvial que se da dentro de los canales existentes, modelando así el cauce principal debido a que la fuerza tractiva del agua que vence la resistencia de los materiales, produciéndose procesos de socavación lateral y de fondo. Los procesos movilizan además de arcillas y limos, otros materiales como arenas, gravas, cantos y bloques, en las formas de acarreo e disolución, suspensión y acarreo de fondo. Los volúmenes movilizados por erosión fluvial son altos, en cauces erosionados.

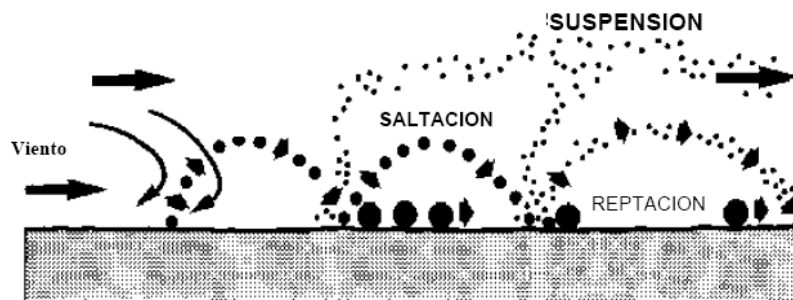
**Viento (intensidad, dirección).-** El viento es un agente modificador del entorno, principalmente cuando dicho entorno se encuentra desprotegido de la cobertura vegetal propiciando la fácil acción de la intensidad con que este azota la zona, produciendo así una erosión eólica al transportar partículas diminutas que chocan contra alguna roca y se

dividen en más partículas que van chocando con otras cosas. El viento es un eficiente agente de erosión y su acción, particularmente en zonas de climas áridos, semiáridos y desérticos, es responsable del transporte y deposición de grandes volúmenes de sedimentos con desarrollo de un paisaje eólico típico.

El viento actúa de tres maneras, ilustrado en la Figura 2.10:

- Por arrastre: las partículas más gruesas (500 - 2000 micrones).
- Por saltación: las partículas medianas (100 - 500 micrones).
- En suspensión: las partículas pequeñas o livianas (< 100 micrones).

**Figura 2. 10:** Acción del viento sobre las partículas del suelo.



La erosión eólica se ejerce mediante dos procesos: abrasión y deflación. Cuando las partículas sueltas que se hallan sobre la superficie del suelo son barridas, arrastradas o levantadas por el aire, estamos hablando de deflación; este proceso actúa donde la superficie del terreno está completamente seca y recubierta de pequeños granos de arena sueltos procedentes de la meteorización de la roca o previamente depositados por el agua en movimiento.

En cambio, cuando el viento arrastra arena y polvo contra las rocas y el suelo, se denomina a este proceso abrasión, ésta requiere del transporte de elementos cortantes por el viento.

Los principales factores actuantes en la erosión eólica son:

- Clima: Los factores climáticos - precipitación, temperatura, humedad atmosférica y vientos.
- Características del suelo: Textura y estabilidad estructural.
- Rugosidad de la superficie: Al aumentar la rugosidad de la superficie se reduce la velocidad del viento y, por lo tanto, disminuye la posibilidad de traslación de las partículas del suelo.
- Exposición a la acción eólica: Las exposiciones prominentes del relieve se encuentran considerablemente más expuestas a la acción del viento.
- Vegetación: Es uno de los factores más importantes de protección contra la acción del viento.

**Cobertura Vegetal.-** De todos los factores señalados éste es uno de los más importantes. Áreas de cuencas boscosas y cubiertas con espesa vegetación prácticamente no producirían sedimentos, ante la ocurrencia de intensas y copiosas precipitaciones. Sin embargo, la deforestación de estas áreas dejaría un suelo desprotegido que consecuentemente llegaría a la formación de cárcavas, surcos y amplia fuente de producción de sedimentos.

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo, lo que a su vez preserva el suelo de agentes externos (erosionables), tales como la lluvia, el viento, etc.

### **Uso de la tierra**

**Agricultura y Ganadería.-** Estas actividades humanas pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión del suelo, ya que la agricultura y ganadería convencional han provocado un gran aumento en el cambio del uso del suelo, que ligado a otros factores aceleran los problemas de erosión de suelos y por ende la producción de sedimentos.

Este cambio de uso del suelo está ligado a la deforestación de grandes zonas boscosas para ser convertidos en terrenos de cultivos o en pastizales, lo que conlleva al problema de la cobertura vegetal antes mencionada; además de una mala práctica del labrado del nuevo suelo (esto es no siguiendo las curvas de nivel), sino creando terrazas de cultivo que producen problemas de estabilidad de terrenos adyacentes a las mismas.

Así también el empleo del fuego para la “limpieza del terreno” dejando al mismo expuesto y en condiciones de baja humedad, lo que deteriora la estructura del suelo e incrementa su riesgo de erosión.

**Urbanización.-** El aumento de los límites urbanos de ciudades y pueblos crean el problema de soporte de los suelos a ser ocupados por las nuevas urbanizaciones e infraestructuras necesarias para el “progreso del hombre” lo que a la larga influye en una sobrecarga a los recursos naturales, teniendo problemas semejantes a los mencionados en la agricultura y ganadería, que de forma semejante se cambia el uso del suelo de una zona boscosa a una urbanizable, o también con la necesidad de materiales de construcción cercanos que producen la explotación de los mismos de manera no controlada causando una destrucción del suelo a mayor escala.

## **2.3.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

Las aguas que fluyen en corrientes naturales y ríos tienen la habilidad de socavar los lechos de los canales, de transportar partículas más pesadas que el agua y de depositar los materiales, modificando así la topografía del lecho. A pesar que el transporte de sedimentos es más visible en ríos montañosos, torrentes y riachuelos, los ríos grandes también son famosos por su capacidad para transportar carga de sedimentos, especialmente en periodos de creciente en donde se observan mayores tasas de transporte de sedimentos<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson,  
EDGAR URGILES M. - DIANA GARCES V.  
2009

La carga total de sedimentos que transporta una corriente natural es la suma de tres componentes que son:

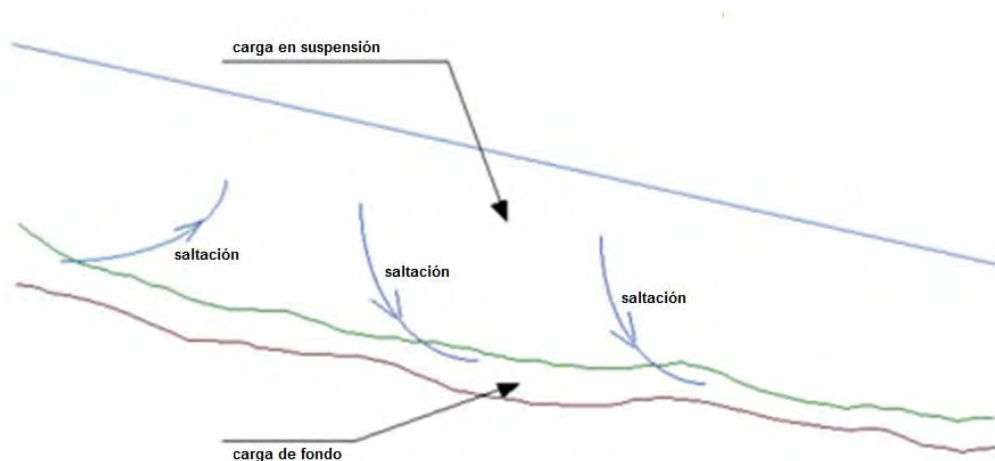
**1.- Carga de fondo.-** Ésta comprende por el material sólido que se mueve en proximidades del lecho de la corriente, es alimentada por los sedimentos que conforman el lecho y por los materiales gruesos que son transportados desde la cuenca por procesos de remoción de masa.

**2.- Sedimentos en suspensión.-** Son finos que llegan a la corriente por procesos de erosión pluvial de la cuenca vertiente o por lavado de material suelto de las márgenes. Se mantiene en suspensión mientras la fuerza ascensional que se genera por la velocidad del flujo sea mayor que su peso propio.

**3.- Sedimentos en saltación.-** El estado de saltación se produce por causas de las irregularidades del fondo. Parte de la carga de fondo, sube y se mantiene en suspensión por un periodo corto.

El mecanismo de transporte de carga de sedimentos se muestra en la Figura 2.11

**Figura 2. 11:** Transporte de Carga Total de Sedimentos.



### 2.3.2.1 FORMACION DEL LECHO

Generalmente los sedimentos se comportan como un material no cohesivo, y el flujo del fluido puede distorsionar el lecho en diferentes formas como resultado de las fuerzas de arrastre que se ejercen sobre el flujo al igual que el movimiento de sedimentos inducido por él sobre los granos de sedimento<sup>12</sup>.

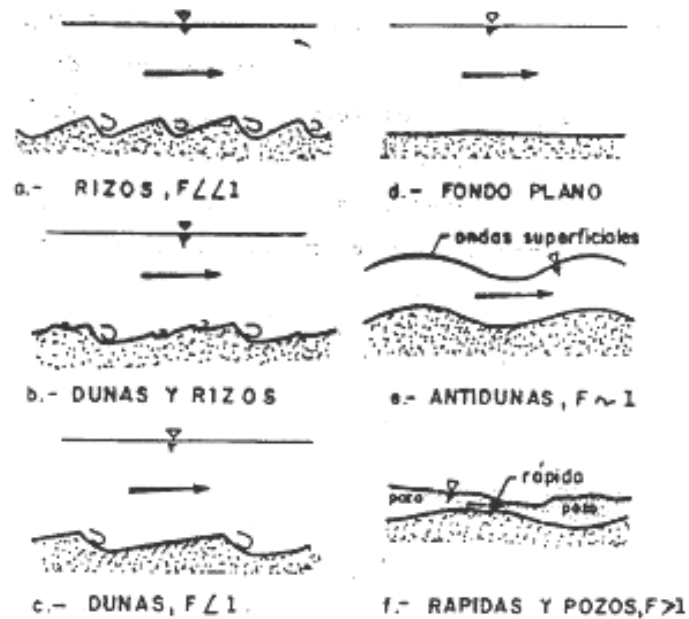
Los parámetros predominantes que afectan la forma del lecho son la pendiente del lecho, profundidad, velocidad del flujo, tamaño de los sedimentos y la velocidad de asentamiento de la partícula. Las formas básicas del lecho que pueden encontrarse son

<sup>12</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson

los r izos ( con a lturas menores qu e 0.1 m), l as duna s, e l l echo pl ano, l as onda s estacionarias y las antidunas.

A altas velocidades del flujo en corrientes montañosas o en torrentes, se pueden formar rápidas y cuencos, los cuales constan de una sucesión de rápidas y napas de caída libre (es decir, flujo supercrítico) conectados por cuencos o piscinas donde el flujo en general es subcrítico, como se indica en la Figura 2.12.

**Figura 2. 12:** Formas de fondo y su relación con las formas de la superficie libre.

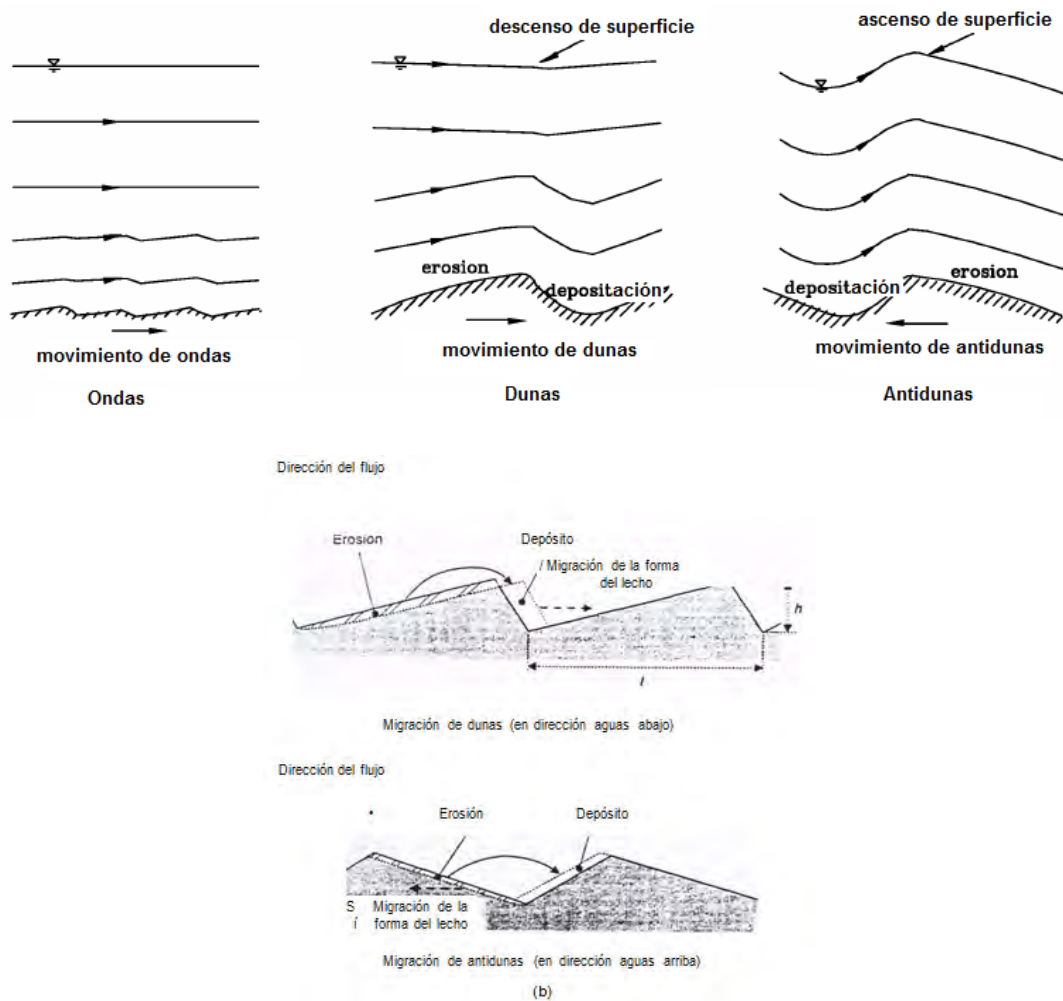


**Movimiento del Lecho.-** Los rizados y las dunas se mueven en dirección aguas abajo, se observan en arenas movidas por el viento y en flujo en canales abiertos, mientras que en ríos aluviales, las dunas se forman sólo en condiciones de flujo subcrítico.

Las antidunas y los cuencos que se observan en flujo supercrítico ( $Fr > 1$ ) migran en dirección de flujo aguas arriba, mientras que las ondas estacionarias son características de condiciones de flujo cercanas a la condición crítica, como se ilustra en la Figura 2.13.



**Figura 2. 13:** Movimiento de la forma del lecho.



### 2.3.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS

Existen dos categorías de sedimentos en función del tipo de material.

Sedimentos cohesivos: aquellos que presentan unión intrínseca entre sus partículas, ejemplo arcillas, limos. Y sedimentos no cohesivos: aquellos en los que sus partículas se encuentran sueltas, ejemplo arenas, gravas.<sup>13</sup>

#### Propiedades de partículas individuales

##### Densidad ( $\gamma_s$ )

La densidad del cuarzo y los minerales de las arcillas típicamente es:  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ . La mayoría de los sedimentos naturales tiene densidad similar a la del cuarzo.

<sup>13</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson  
EDGAR URGILES M. - DIANA GARCES V.  
2009



La densidad relativa de una partícula de sedimento, es adimensional, se conoce también como gravedad específica. Algunas veces se denota como  $\gamma_s$ , es igual a:

$$\gamma_s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (2.28)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido. Para una partícula de cuarzo en el agua en  $\text{kg/m}^3$ .

Los minerales pesados (por ejemplo, hierro, cobre) tienen valores de densidad mayores que el cuarzo. En la práctica, una partícula densa es más difícil de mover que una liviana.

### **Tamaño característico. ( $d_s$ )**

Se conoce como diámetro o tamaño del sedimento. En la práctica, las partículas naturales de sedimento no son esféricas sino que exhiben formas irregulares. Para definir el tamaño de sedimento se tiene los siguientes criterios:

El diámetro de tamiz: es el tamaño de la partícula que pasa a través de un tamiz de malla cuadrada de tamaño dado, pero no a través del siguiente tamiz de diámetro más pequeño: por ejemplo  $1 \text{ mm} < d_s < 2 \text{ mm}$ .

El diámetro de sedimentación: conocido también como diámetro estándar de sedimentación. Es el tamaño de una esfera de cuarzo que se va lentamente al fondo (en el mismo fluido) con una velocidad de asentamiento igual a la velocidad de la partícula de sedimento real.

El diámetro nominal es el tamaño de una esfera de la misma densidad y de la misma masa que la partícula real.

El tamaño del sedimento también puede expresarse como una función del parámetro de tamaño sedimentológico  $\Phi$  (o escala Phi) definida como:

$$d_s = 2^{-\Phi} \quad (2.29)$$

$$\Phi = -\frac{\ln(d_s)}{\ln(2)} \quad (2.30)$$

Es decir:

En donde  $d_s$  está en mm.

**Tabla 2. 2:** Clasificación del tamaño de sedimento.

Nombre de la clase	Rango de tamaño (mm)	Escala phi $\phi$	Notas
Arcilla	$d_s < 0.002$ a $0.004$ mm	$+ 8$ a $+ 9 < \phi$	
Limo	$0.002$ a $0.004 < d_s < 0.06$ mm	$+ 4 < \phi < + 8$ a $+ 9$	
Arena	$0.06 < d_s < 2.0$ mm	$- 1 < \phi < + 4$	Sílice
Grava	$2.0 < d_s < 64$ mm	$- 6 < \phi < - 1$	Fragmentos de roca
Guijarros	$64 < d_s < 256$ mm	$- 8 < \phi < - 6$	Rocas originales
Cantos rodados	$256 < d_s$	$\phi < - 8$	Rocas originales

### Propiedades de una mezcla de sedimentos

#### Densidad.

La densidad de una mezcla seca de sedimentos es igual a:

$$(\rho_{sed})_{sec} = (1 - P_o) \rho_s \quad (2.31)$$

La densidad del sedimento húmedo es igual a:

$$(\rho_{sed})_{mojado} = P_o \rho(1 - P_o) \rho_s \quad (2.32)$$

Donde

$(\rho_{sed})_{sec}$  Densidad específica de una mezcla seca de sedimentos en  $\text{kg/m}^3$

$(\rho_{sed})_{mojado}$  Densidad específica de una mezcla húmeda de sedimentos en  $\text{kg/m}^3$

$P_o$  Es el factor de porosidad.

$\rho_s$  Es el peso específico de una partícula sólida en  $\text{kg/m}^3$

En la práctica, la densidad específica húmeda tiene un valor de alrededor de 0.36 a 0.40.

La densidad de los sedimentos también puede expresarse como una función de la relación de vacíos: es decir, la relación entre el volumen de vacíos con respecto al volumen de sólidos.

El volumen de vacío está relacionado con la porosidad como:

$$\text{Relación de vacíos} = \frac{P_o}{1 - P_o} \quad (2.33)$$

### El tamaño del sedimento $d_{50}$

Conocido también como tamaño medio de granos. Se define como el tamaño para el cual 50% por peso del material es más fino.

De forma similar, los tamaños característicos  $d_{10}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{90}$ , son los valores de los tamaños de grano para los cuales 10%, 75% y 90% de peso del material es más fino, respectivamente.

$d_{50}$  Es por lo común utilizado como el tamaño de grano característico y el rango de tamaños de partículas se expresa a menudo en términos del coeficiente de distribución  $S$ , el cual da una idea del grado de distribución de los tamaños de las partículas, se determina por la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{\frac{d_{90}}{d_{10}}} \quad (2.34)$$

Otra descripción es la desviación estándar geométrica basada en una distribución log-normal de tamaños de grano:

$$\rho_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (2.35)$$

Valores pequeños de  $S$  y  $\rho_g$ , implican una distribución de tamaño de sedimentos casi uniformes. Un valor grande de  $S$  significa una amplia distribución de tamaños de sedimentos.

**Coefficiente de gradación:** sirve para caracterizar el rango de tamaño de partículas.

$$\text{Coeficiente de gradacion} = \frac{1}{2} \left( \frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \quad (2.36)$$

### 2.3.2.3 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE UNA PARTÍCULA

En corrientes naturales los sedimentos finos son transportados en suspensión, su velocidad se ve influenciada por la alta turbulencia que desarrollan sus cauces, mientras que los sedimentos gruesos son transportados como arrastre de fondo, y su velocidad terminal de sedimentación es la velocidad de la partícula en equilibrio, para la cual la suma de la fuerza gravitacional, la fuerza de empuje y la fuerza de arrastre es igual a cero<sup>14</sup>.

Algunas investigaciones realizadas en flujos turbulentos demuestran que la turbulencia puede afectar de manera drástica la velocidad de asentamiento y el movimiento de sedimentación de las partículas.

<sup>14</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson  
EDGAR URGILES M. - DIANA GARCES V.  
2009

Además, la velocidad de asentamiento de partículas de sedimento se incrementa o disminuye de acuerdo con la intensidad de la turbulencia, la densidad de la partícula, la escala de longitud característica y la escala de tiempo de la turbulencia.

Las partículas de sedimentos tienen formas irregulares y el coeficiente de arrastre es diferente del de las partículas esféricas. Su forma es con frecuencia angular, algunas veces en forma de disco, y el coeficiente de arrastre puede suponerse como mayor que el de las esferas. Para arenas y gravas, una aproximación simple para el coeficiente de arrastre es:

$$C_d = \frac{24\mu}{\rho|w_o|} + 1,5 \quad (2.37)$$

Para:  $Re < 1 * 10^{-4}$

Donde  $|w_o|$  es el valor absoluto de la velocidad de sedimentación de la partícula

$$Re < w_o = \sqrt{\frac{4gd_s}{3\left(\frac{24\mu}{\rho|w_o|} + 1,5\right)}} (S - 1) \quad (2.38)$$

La velocidad de asentamiento, en función del coeficiente de arrastre y las características de la partícula está determinada por:

$$w_o = -\sqrt{\frac{4gd_s}{3C_d} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)} \quad (2.39)$$

Donde:

$w_o$  Es la Velocidad de asentamiento en m/s

$d_s$  Es el diámetro de la partícula en m

$C_d$  Es el coeficiente de arrastre es adimensional

$\rho$  Es la densidad del fluido en Kg/m<sup>3</sup>

$g$  Es la constante de gravedad en m/s<sup>2</sup>

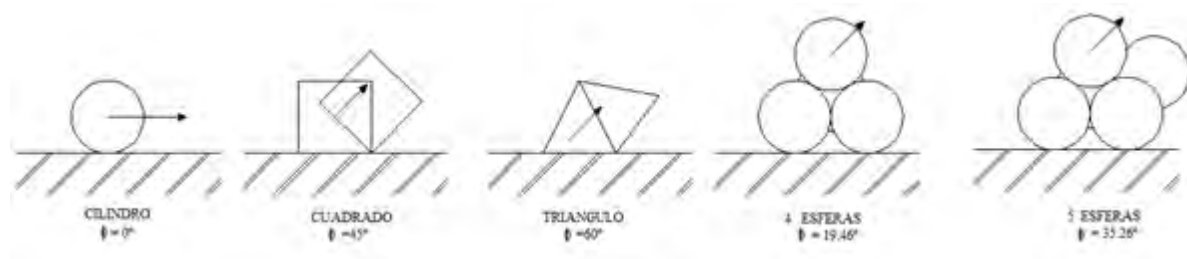
$\rho_s$  Es el peso específico de una partícula sólida en Kg/m<sup>3</sup>

#### 2.3.2.4 ÁNGULO DE REPOSO DE UNA PARTICULA

Considerando la estabilidad de una partícula individual en un plano horizontal, la condición de umbral (para movimiento) se alcanza cuando el centro de gravedad de la partícula se encuentra verticalmente por encima del punto de contacto. El ángulo crítico

en el cual ocurre el movimiento se conoce como ángulo de reposo  $\phi_s$ . En la Figura 2.14 se muestra los ángulos de reposo para algunas formas geométricas<sup>15</sup>.

Figura 2. 14: Angulo de reposo



El ángulo de reposo es función de la forma de la partícula y, en una superficie plana, se incrementa con la angularidad. Por ejemplo para partículas de sedimentos, el ángulo de reposo varía de  $26^\circ$  a  $42^\circ$ . Para arenas, se encuentra casi siempre entre  $26^\circ$  y  $34^\circ$ . La tabla 2.3, indica valores de  $\phi_s$  en función del diámetro de la partícula, para material silíceo (Van Rijn 1993).

Tabla 2. 3: Angulo de reposo para material silíceo (Van Rijn)

$\phi_s$ (grados)			
$d_s$	Partículas redondas	Partículas angulares	COMENTARIOS
<1	30	35	
5	32	37	Grava
10	35	40	Grava
50	37	42	Grava
>100	40	45	Guijarros, cantos rodados.

### 2.3.2.5 FUERZAS SOBRE UNA PARTICULA DE SEDIMENTO

Para un flujo en canal abierto con un lecho móvil, las fuerzas que actúan sobre cada partícula de sedimento son (Figura 2.15)<sup>16</sup>:

Fuerza de gravedad.  $\rho_s g V_s$

Fuerza de flotación  $\rho g V_s$

Fuerza de arrastre.  $C_d \rho A_s V^2 / 2$

<sup>15</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson

<sup>16</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson

Fuerza de sustentación  $C_L \rho A_s V^2 / 2$

Fuerzas de reacción de los granos que la rodean.

Donde:

$g$  Es la constante de gravedad en  $m/s^2$ .

$\rho_s$  Es el peso específico de una partícula sólida en  $Kg/m^3$ .

$V_s$  Es el volumen de la partícula en  $m^3$ .

$A_s$  Es el área de la sección transversal de una partícula característica.

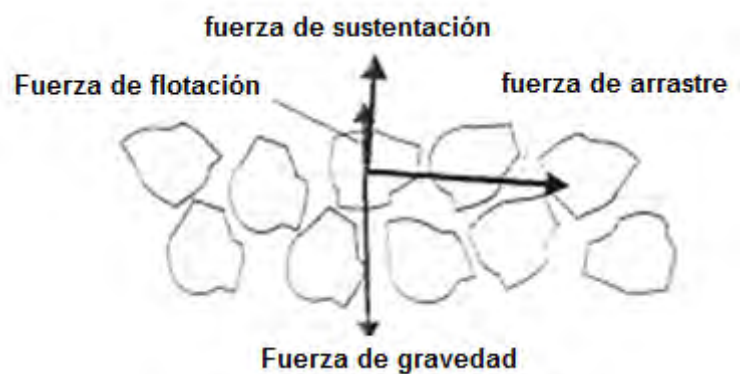
$C_d$  Es el coeficiente de arrastre es adimensional.

$C_s$  Es el coeficiente de sustentación es adimensional.

$V$  Es la velocidad característica cerca al lecho del canal en  $m/s$ .

**Figura 2. 15:** Fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento.

(No muestra las fuerzas intragranulares)



Tanto la fuerza de gravedad como la de flotación actúan en dirección vertical mientras que la fuerza de arrastre actúa en dirección del flujo y la fuerza de sustentación en dirección perpendicular a la dirección del flujo. Las fuerzas intergranulares están relacionadas con la disposición y el empaquetamiento de granos.

Las fuerzas de arrastre y sustentación sobre una partícula son la integración de la componente longitudinal y normal respectivamente de la distribución de presiones que actúan sobre la partícula.

La distribución de presiones sobre un grano se relaciona con el patrón de flujo que rodea la partícula, por tanto esta distribución de presiones alrededor de la partícula es diferente a la distribución hidrostática de presiones.

En muchos canales aluviales, el esfuerzo cortante no es uniforme alrededor del perímetro mojado y la fuerza inercial ocurre cada vez que el fluido se acelera.

### 2.3.2.6 UMBRAL DE MOVIMIENTO DE SEDIMENTOS EN EL LECHO

El término umbral de movimiento de sedimentos describe las condiciones de flujo y las condiciones de frontera para las cuales el transporte de sedimento empieza a ocurrir, este no puede definirse con una precisión exacta, pero la gran mayoría de las observaciones experimentales ha arrojado resultados razonablemente consistentes, los que destacan la importancia del parámetro de estabilidad<sup>17</sup>. (El cual puede ser deducido del análisis dimensional) definido como:

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{\rho(S-1)gd_s} \quad (2.40)$$

Se define un valor crítico del parámetro de estabilidad en el umbral de movimiento del lecho a una función del número de Reynolds de corte. El movimiento de la carga de lecho ocurre cuando el esfuerzo cortante de lecho es mayor que un valor crítico:

$$\begin{aligned} \tau_* &> (\tau_*)_c \\ (\tau_o)_c &= \rho(S-1)gd_s(\tau_*)_c \end{aligned} \quad (2.41)$$

Se conoce como: parámetro crítico de Shields.

Para un fluido, unas propiedades de sedimentos dadas  $(\nu, \rho, s)$  y un esfuerzo cortante de lecho dado  $(\tau_o)$ , el parámetro de Shields  $(\tau_*)$  disminuye con el incremento en el tamaño del sedimento: es decir:

$$\tau_o \propto \frac{1}{d_s}$$

Para condiciones de flujo dadas, puede ocurrir movimiento de sedimentos para los tamaños pequeños de partículas mientras que no lo habrá para tamaños de granos grandes.

Se debe notar que, para partículas de sedimento en agua, el diagrama de Shields exhibe diferentes tendencias correspondientes a diferentes regímenes de flujo turbulento. (Figura 2.16)

<sup>17</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson  
EDGAR URGILES M. - DIANA GARCES V.  
2009

Figura 2. 16: Diagrama de Shields

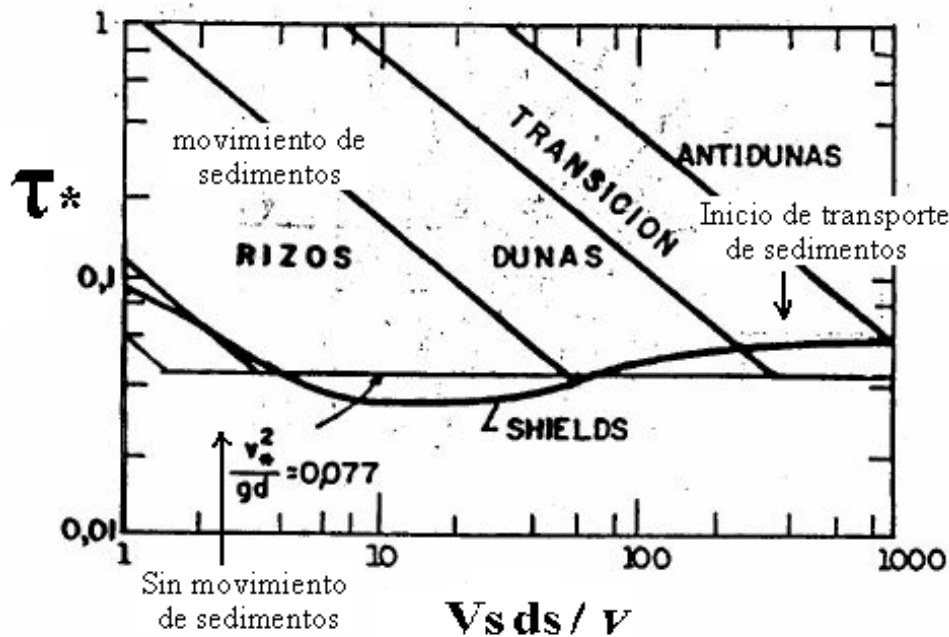


Tabla 2. 4: Tipo de flujo turbulento en función del Número de Reynolds y Esfuerzo Cortante Crítico.

Tipo de Flujo	Número de Reynolds	Esfuerzo cortante Crítico
Flujo turbulento liso	$Re, < 4$ a 5	$0.035 < (\tau_o)_c$
Régimen de transición	$4$ a $5 < Re. < 75$ a 100	$0.03 < (\tau_o)_c < 0.04$
Flujo turbulento completamente rugoso	$75$ a $100 < Re.$	$0.03 < (\tau_o)_c < 0.06$

Para flujos turbulentos completamente rugosos, el parámetro crítico de Shields es c así constante, y el esfuerzo cortante crítico del lecho para movimiento de carga de lecho se vuelve literalmente proporcional al tamaño del sedimento:

$$(\tau_o)_c \propto d_s$$

### 2.3.2.7 INICIO DEL MOVIMIENTO DE LA CARGA EN SUSPENSIÓN.

Si se consideran un canal y un material de lecho dados, no se observa movimiento de sedimentos para esfuerzos cortantes de lecho muy bajos hasta que  $\tau_o$  excede un valor crítico. Para  $\tau_o$  mayor que el valor crítico, ocurre movimiento de carga de lecho. El movimiento del grano a lo largo del lecho no es suave, y algunas partículas chocan y saltan sobre las otras. Cuando se incrementan las velocidades de corte, el número de partículas que rebotan y chocan se incrementa hasta que la nube de partículas entra en



suspensión. El inicio del sedimento en suspensión no es una condición con claridad definida<sup>18</sup>.

Cuando las partículas se encuentran en movimiento a lo largo del lecho con saltos y rebotes, algunas veces el modo de transporte de sedimento se conoce como saltación.

### Inicio de la suspensión y esfuerzo cortante crítico de lecho

Si se considera una partícula en suspensión, el movimiento de la partícula en la dirección perpendicular al lecho se relaciona con el balance entre la componente de velocidad de caída de la partícula ( $w_o \cos \theta$ ) y la fluctuación de la velocidad turbulenta en la dirección perpendicular al lecho. Los estudios sobre turbulencia sugieren que la fluctuación de la velocidad turbulenta es del mismo orden de magnitud que la velocidad de corte. Con este razonamiento, un criterio simple para el inicio de la suspensión, el cual no toma en cuenta el efecto de la pendiente del lecho es:

$$\frac{V_*}{w_o} > \text{valor}_{\text{critico}} \quad (2.42)$$

La carga de sedimentos en suspensión ocurre para:

$$\frac{V_*}{w_o} > 0,2 \text{ a } 2$$

Algunos investigadores propusieron criterios para el inicio de la suspensión, como una primera aproximación, estos criterios se ilustran en la Tabla 2.5.

**Tabla 2. 5:** Criterios para movimiento de carga en suspensión

Referencia	Criterio para suspensión	Notas
Bagnold (1966)	$\frac{V_*}{w_o} > 1 \quad (2.43)$	Como fue dado por Van Rijn (1993)
Van Rijn (1984b)	$\frac{V_*}{w_o} > \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{(S-1)g}{v^2} d_s}} \quad (2.44)$	Deducido de investigaciones experimentales: Cuando $d_s = d_{50}$ Para $1 < \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{(S-1)g}{v^2} d_s}} < 10$

<sup>18</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson  
EDGAR URGILES M. - DIANA GARCES V.  
2009

Para		
	$\frac{V_*}{w_o} > 0,4$	$\frac{4}{\sqrt[3]{\frac{(S-1)g}{v^2} d_s}} > 10$
	(2.45)	
<hr/>		
Raudkivi (1990)	$\frac{V_*}{w_o} > 0,5$	(2.46) Nota: "Regla empírica" ( Raudkivi1990) inicio de la suspensión es decir saltación.
	$\frac{V_*}{w_o} > 1,2$	(2.47) Carga suspendida dominante es decir suspensión.
<hr/>		
Julien (1995)	$\frac{V_*}{w_o} > 0,2$	(2.48) Flujo turbulento de agua sobre fronteras rugosas. Inicio de suspensión.
	$\frac{V_*}{w_o} > 2.5$	(2.49) Carga suspendida dominante.
<hr/>		
Sumer <i>et al</i> (1996)	$\frac{V_*^2}{(s-1)gd_s} > 2$	(2.50) Observaciones experimentales en flujo en láminas. Tamaño de sedimento

### 2.3.2.8 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El mecanismo de transporte de sedimentos se da de dos formas, el de transporte de carga de lecho y el de transporte de carga en suspensión, siendo este último el primordial para el estudio de la microcuenca del Turupamba debido a que el caudal de su afluente principal es bajo y por lo tanto su velocidad de acarreo no tiene la fuerza necesaria para llevar una carga de lecho, sino únicamente se da a lugar el transporte de carga en suspensión<sup>19</sup>.

#### Trasporte de carga en suspensión

La cantidad de partículas transportadas mediante suspensión se conoce como la carga en suspensión.

El sedimento en suspensión puede ser descrito como el movimiento de partículas de sedimento durante el cual las partículas se encuentran rodeadas por el fluido. Los granos se mantienen dentro de la masa de fluido mediante agitación turbulenta frecuentemente sin contacto con el lecho. La suspensión de sedimentos ocurre cuando el flujo turbulento es lo suficientemente fuerte para balancear el peso de las partículas.

<sup>19</sup> HIDRAULICA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS, Hubert Chanson  
EDGAR URGILES M. - DIANA GARCES V.  
2009

En corrientes naturales es más probable que la suspensión ocurra con partículas finas, como limos, arenas finas.

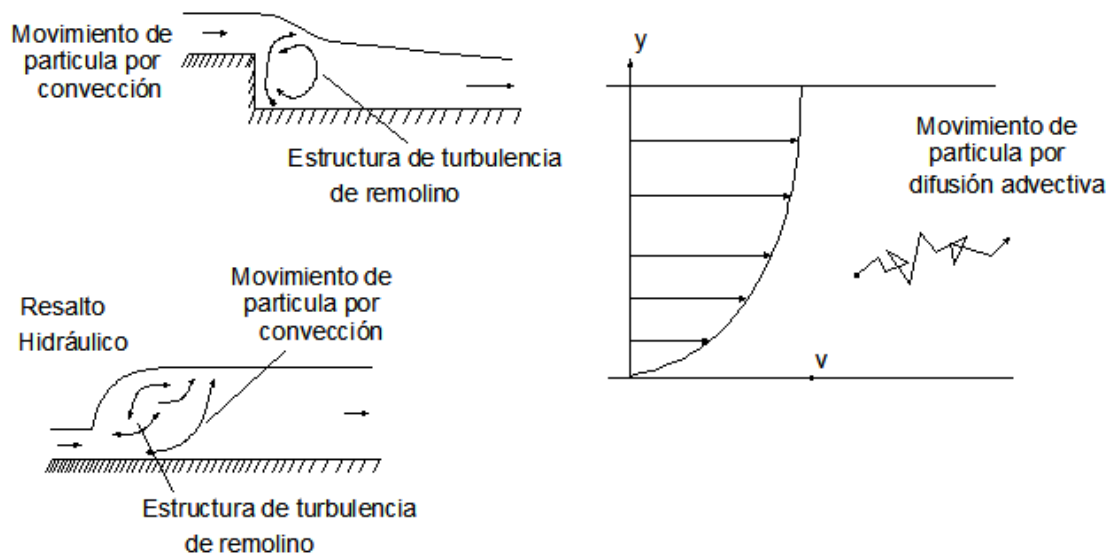
### Mecanismos del transporte de carga en suspensión

El transporte de materia suspendida ocurre por una combinación de difusión turbulenta advectiva y convección.

La difusión advectiva, conocida también como gradiente de difusión, se caracteriza por el movimiento aleatorio y de mezcla de partículas a través de toda la profundidad del agua superpuesta al movimiento longitudinal del flujo. En una corriente con partículas más pesadas que el agua, la concentración de sedimentos es mayor cerca al fondo y la difusión turbulenta induce una migración de los granos hacia arriba a regiones de concentraciones más bajas.

El movimiento de sedimentos por convección ocurre cuando la longitud de mezcla turbulenta es grande comparada con la escala de longitud de la distribución de sedimentos. El transporte convectivo puede describirse como el atrapamiento de sedimentos por vórtices de escala muy grande: por ejemplo, en caídas en el lecho, en tanques de amortiguación y en resaltos hidráulicos, como se indica en la Figura 2.17.

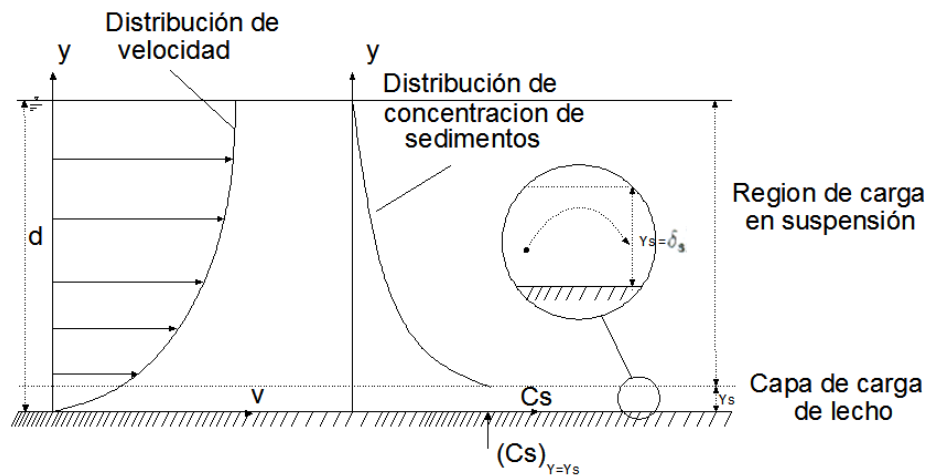
**Figura 2. 17:** Mecanismos del transporte de carga en suspensión.



### Movimiento del sedimento

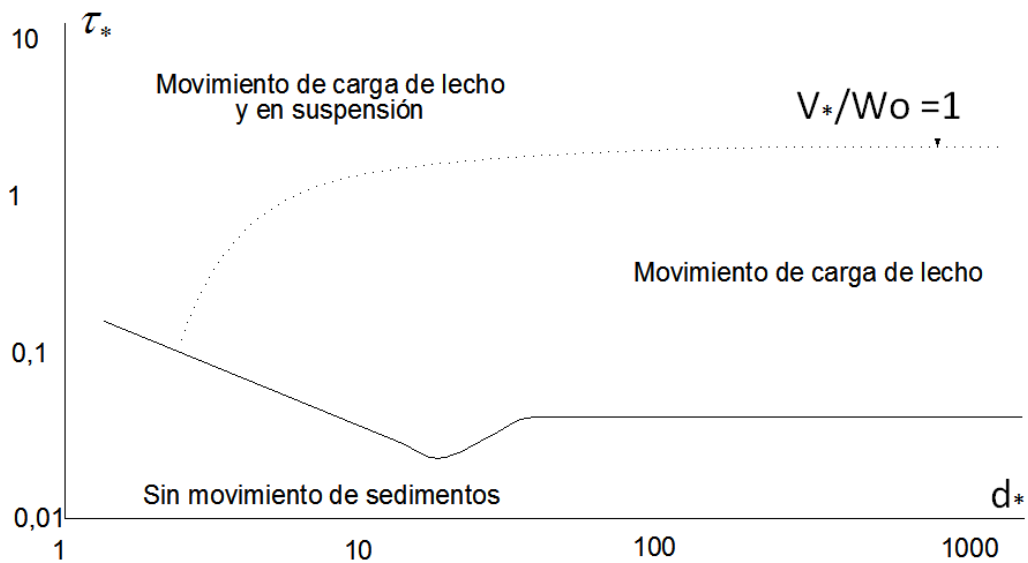
El tipo del movimiento del sedimento es una función de las propiedades del sedimento, de la pendiente del lecho y de las condiciones de flujo, lo que determina las regiones básicas del flujo (figura 2.18).

**Figura 2. 18:** Movimiento del Sedimento



Los resultados pueden ser resumidos en un diagrama de Shields modificado que presenta el umbral de movimiento de sedimentos de carga de lecho y suspensión, ilustrado en la figura 2.19.

**Figura 2. 19:** Diagrama de Shields modificado.



### Taza de transporte de sedimento en suspensión.

Si se considera el movimiento de sedimentos en un canal abierto, la tasa de transporte de sedimento en suspensión es igual a:

$$q_s = \int_{\delta_s}^d C_s v dy \quad (2.51)$$

Donde:

$q_s$  Es la tasa de transporte volumétrica de carga en suspensión por unidad de ancho en  $\text{Kg/m}^3\text{s}$

$C_s$  Es la concentración de sedimentos en  $\text{kg/m}^3$

$V$  Es la velocidad local en una distancia y medida perpendicularmente al lecho del canal en  $\text{m/s}$

$d$  Es la profundidad de flujo y  $\delta_s$  es el espesor de la capa de carga de lecho en  $\text{m}$ .

Esta ecuación implica que la componente de velocidad longitudinal de la carga en suspensión es igual a la del flujo de agua en la cual las partículas están siendo conducidas.

En la práctica, las mediciones de campo se presentan generalmente como:

$$q_s = \int_{\delta_s}^d C_s v dy = (C_s)_{media} q = (C_s)_{media} Vd \quad (2.52)$$

Donde:

$q$  Es el caudal de agua por unidad de ancho en  $\text{m}^3/\text{s}$

$V$  Es la velocidad media del flujo en  $\text{m/s}$ ,  $d$  es la profundidad del flujo en  $\text{m}$ .

$(C_s)_{media}$  Es la concentración de sedimentos promediada en la profundidad (o concentración media de sedimentos en suspensión) en  $\text{kg/m}^3$ .

## 2.4 OTRAS CONSIDERACIONES A LOS PROCESOS Y RIESGOS NATURALES EN CUENCAS

El medio natural presenta una dinámica caracterizada por la existencia de un conjunto de procesos erosivos, de transporte y de sedimentación. Estos pueden tener ritmos pausados propios de la actividad morfogenética, constituyendo entonces procesos geomorfológicos de alta frecuencia y baja intensidad, que pueden considerarse en equilibrio con el sistema natural. Sin embargo, en ocasiones estos procesos sufren aceleraciones, a veces inducidas por el hombre y otras por causas naturales, que dan lugar a roturas bruscas del equilibrio natural y al desencadenamiento de mecanismos de alta energía. Todo ello implica la puesta en marcha de procesos de baja frecuencia y alta intensidad capaces de generar rápidas acciones erosivas, de transporte o sedimentación que conllevan frecuentemente importantes pérdidas económicas e incluso humanas. Es entonces cuando estos procesos son considerados riesgos naturales, dado que impactan de modo brusco y violento en el sistema natural y socioeconómico.

Los riesgos naturales derivados de los procesos morfogenéticos deben ser considerados acciones propias del sistema natural; si bien su aceleración, intensificación e impacto, deriva de la interacción entre el uso del territorio y los sistemas ambientales. Esto provoca la rotura del equilibrio del sistema natural y el desencadenamiento de una serie de procesos que llegan a revestir un carácter catastrófico, unas veces de tipo violento

(avenidas, inundaciones, coladas...) y otras no (erosión de suelo, exportación de arenas en playas...), pero siempre con importantes consecuencias socio-económicas.

Así por ejemplo, las aguas de escorrentía laminar, concentradas en cauces, constituyen el factor desencadenante que afectan a ríos, laderas y suelos, en todas las escalas. Estos procesos se concentran en los fenómenos de avenidas e inundaciones, así como en una dinámica de laderas en la que son frecuentes los movimientos en masa, deslizamientos, reptaciones y pérdidas de suelo, que constituyen dada su intensidad y frecuencia, los denominados riesgos geomorfológicos.

### **Contaminación provocada por los sedimentos**

La sedimentación y erosión antropogénica es un problema mundial que suele estar especialmente asociado a la agricultura, porque es probable que esta sea la causante de gran parte del aporte mundial de sedimentos a los ríos, lagos, estuarios y, finalmente, a los océanos.

La contaminación provocada por los sedimentos tiene dos dimensiones principales.

1.- Dimensión Física: pérdida de la capa arable del suelo y la degradación de la tierra como consecuencia de la erosión laminar y por cárcavas, que dan lugar a niveles excesivos de turbidez en las aguas receptoras y a repercusiones ecológicas y físicas en lugares alejados, los lechos de ríos y lagos, en donde se produjo la deposición.

2.- Dimensión Química: la parte de los sedimentos constituida por limo y arcilla (< 63 µm) es transmisora primaria de productos químicos adsorbidos, especialmente fósforo, plaguicidas clorados y la mayor parte de los metales, que son transportados por los sedimentos al sistema acuático.

### **Los sedimentos, en cuanto contaminantes físicos**

Los sedimentos, en cuanto contaminantes físicos, producen en las aguas receptoras los siguientes efectos principales:

- Los altos niveles de turbidez limitan la penetración de la luz solar en la columna de agua, lo que limita o impide el crecimiento de las algas y de las plantas acuáticas enraizadas, además impide que los animales puedan ver el alimento.
- Los sedimentos que se depositan en el lecho de los arroyos alteran la cadena alimenticia natural al destruir el hábitat donde viven los organismos más pequeños y provoca disminuciones masivas de poblaciones de peces.
- Los altos niveles de sedimentación en los ríos dan lugar a la perturbación física de las características hidráulicas del cauce. Ello puede favorecer las inundaciones, por la reducción de la capacidad del flujo de agua en la cuenca de drenaje. Los sedimentos producen en gran parte de la rápida erosión de las subcuencas como consecuencia de prácticas agrícolas poco acertadas.

## Los sedimentos, en cuantos contaminantes químicos

La contribución de los sedimentos a la contaminación química está vinculada al tamaño de las partículas de los sedimentos y al volumen del carbono orgánico en partículas asociado con los sedimentos. Se suele considerar que la fracción químicamente activa de un sedimento es la que mide menos de 63  $\mu\text{m}$  (limo + arcilla). En el caso del fósforo y los metales, el tamaño de las partículas es de importancia decisiva, debido a la gran superficie externa de las partículas muy pequeñas. El fósforo y los metales suelen tener fuerte atracción a los lugares de intercambio de iones, que están asociados con las partículas de arcilla y con los recubrimientos de hierro y manganeso que se dan normalmente en estas partículas pequeñas. Muchos de los contaminantes persistentes, bioacumulados y tóxicos, especialmente los compuestos clorados incluidos en muchos plaguicidas, están fuertemente asociados con los sedimentos y en especial con el carbono orgánico transportado como parte de la carga de sedimentos de los ríos.

A diferencia del fósforo y los metales, el transporte y destino de los productos químicos orgánicos asociados con los sedimentos se complican por la degradación microbiana que tiene lugar durante el transporte de los sedimentos en los ríos y en los sedimentos depositados. No obstante, el papel de los sedimentos en el transporte y destino de los productos químicos agrícolas, tanto en lo que se refiere a los nutrientes como a los metales y los plaguicidas, se conoce bien y se debe tener en cuenta al supervisar esos productos químicos y al aplicar modelos con el fin de determinar las estrategias óptimas de ordenación en los campos de cultivo y en las cuencas hidrográficas. Por esta razón, los modelos que utilizan el concepto de "fugacidad" (es decir, que emplean las características de partición de los productos químicos como base para determinar el comportamiento ambiental - atmósfera, sedimentos, agua, biota - en que se encuentra primariamente el producto químico) han resultado eficaces como medio de prever las rutas y destino ambiental de los contaminantes (Mackay y Paterson, 1991).

- Los nutrientes transportados por los sedimentos pueden activar a las algas verde azuladas que liberan toxinas y pueden enfermar a los nadadores.

### 2.4.1 PARAMETROS DE RIESGOS EN LA PRODUCCION DE SEDIMENTOS

#### Coefficiente de aporte de sedimentos<sup>20</sup>

El coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) se utiliza normalmente en los estudios sobre erosión y transporte para indicar hasta qué punto el suelo erosionado (sedimento) se almacena dentro de la cuenca. El SDR se define así:

$$SDR = \frac{\text{Producción de sedimentos cuantificada}}{\text{Erosión bruta de la cuenca}} \quad (2.53)$$

<sup>20</sup> Revista internacional de ciencias de la tierra. Dr. José Luis Bastida Silva.

Donde la producción se determina a partir de la sedimentación de los embalses o de un centro de supervisión de los sedimentos, y la erosión bruta se determina utilizando técnicas de estimación como la ecuación universal de pérdida de suelo.

El SDR es siempre inferior a 1.0, lo que indica que el suelo que se erosiona no suele hacer grandes desplazamientos antes de quedar depositado. De hecho, es muy importante el almacenamiento de sedimentos en los surcos del suelo, en los márgenes de las fincas y al pie de las laderas. También se produce almacenamiento en los cauces de los ríos (deposición en el lecho del río o fuera de él, cuando se desborda), en las tierras húmedas y en los embalses y lagos.

### **Coefficiente de enriquecimiento de los sedimentos**

El concepto de coeficiente de enriquecimiento de los sedimentos (SER) es muy importante para entender los efectos y costo económico de las pérdidas de productos químicos de los campos. El proceso de erosión superficial suele ser selectivo, siendo más intenso cuando se trata de partículas finas. Por ello, el tamaño de las partículas del material erosionado en el origen (en las parcelas) va cambiando progresivamente, aumentando el predominio de las partículas más finas como consecuencia de la deposición de las que son más gruesas (por ejemplo, de tamaño semejante al de la arena). Como las partículas finas están químicamente enriquecidas debido a la gran superficie externa de los sedimentos con partículas predominantemente arcillosas, la concentración de productos químicos asociados con los sedimentos (fósforo, metales, nitrógeno orgánico, plaguicidas hidrofóbicos) aumenta en la medida en que la parte empobrecida, de tamaño semejante al de la arena, se pierde durante el transporte, lo que da lugar a una proporción creciente de la parte de partículas finas (limo-arcilla) químicamente enriquecida.

El coeficiente de enriquecimiento de los sedimentos (SER) se define así:

$$SER = \frac{\text{Concentración del producto químico } X \text{ en el sedimento transportado}}{\text{Concentración del producto químico } X \text{ en el suelo}} \quad (2.54)$$

La química de los sedimentos se mide en algún punto más bajo, por ejemplo, en el lindero de una finca o en cursos de agua adyacentes.

La importancia del coeficiente de enriquecimiento radica en el hecho de que los sedimentos de grano fino transportados durante la erosión superficial son, proporcionalmente, más abundantes que los de grano grueso. Por ello, el sedimento transportado tiene una textura más fina que el material original. Dada la atracción de los nutrientes del suelo hacia los sedimentos finos, esta pérdida proporcionalmente mayor de materiales finos significa que se produce un empobrecimiento neto del suelo. Ello constituye normalmente una merma de la nutrición natural del suelo (muchas veces denominada "capital natural"), que enuncias e podrías sustituir con la aplicación de fertilizantes. El costo para el agricultor es, por lo tanto, doble: pérdida de productividad debida a la pérdida de nutrición natural del suelo, y costo económico por la utilización de fertilizantes para tratar de compensarla.



## 2.4.2 MÉTODOS DIRECTOS PARA DETERMINAR LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS<sup>21</sup>

Este grupo de métodos de producción de sedimentos se basa en mediciones directas de la hidrología, hidráulica, y los parámetros de los sedimentos en el área de estudio, durante años. Hay tres subcategorías de la siguiente manera:

- El flujo de muestreo,
- Investigaciones de la sedimentación en los embalses
- Análisis regional.

### 2.4.2.1 FLUJO DE MUESTREO.

Este es el método más fiable.

#### a) Producción a largo plazo:

Aprobados a largo plazo, usado por el USGS (Geological Survey) de los E.E.UU. Dispone de la gestión diaria, debido a que calcula a partir del registro histórico de la gestión de sedimentos.

Estos registros suelen expresar las concentraciones de sedimentos en miligramos por litro, y las unidades se pueden convertir en toneladas por día con la siguiente ecuación:

$$Q_s = 0,0027 Q k C \quad (2.55)$$

Dónde

$Q_s$  = descarga de sedimentos, ton/día

0,0027= constante para convertir ton/día a ppm.

$Q$  = descarga media diaria del agua, fts/sg.

$c$  = concentración media diaria de los sedimentos, en ppm

$k$  = convertir ppm a mg/litro.

NOTA:  $k = 1$  para concentraciones de menos de 16.000 ppm, de lo contrario se utiliza la siguiente ecuación.

$$k = \frac{\left( \frac{10^6}{\left[ \frac{10^6}{C_{ppm} \cdot S_w - \frac{1}{S_w} + \frac{1}{SS}} \right]} \right)}{C_{ppm}} \quad (2.56)$$

$S_s$  - la gravedad específica de las partículas de sedimento

$S_w$  = gravedad específica del agua

<sup>21</sup> SEDIMENTATION INVESTIGATIONS OF RIVERS AND RESERVOIRS. Capítulo 3.

Por lo general, sólo la "medida de carga" se publica, sin embargo, los muestreadores suspendidos no miden más bajo de 0.3 -0.4 pies de la columna de agua. La concentración de sedimentos en la "la zona no medida" generalmente se estima del 5 al 15% de la concentración medida, y ese valor se añade a la carga suspendida para obtener el total. Antes de comparar la producción de sedimentos de un año a otro para el cual el período de registro de datos debe ser examinado por la homogeneidad. Se debe establecer correlaciones del registro hidrológico, cambios en el uso de la tierra, y las prácticas agrícolas.

#### **b) Rendimiento del período de acumulación de sedimentos.**

Esta es la técnica empleada por el USGS para el cálculo mensual y anual de sedimentos en suspensión después de que se ha calculado el rendimiento a largo plazo. Se puede utilizar el promedio diario de los caudales vertidos de sedimentos, pero pueden ser por hora para los pequeños arroyos.

Aguas a bajo de un gran embalse que recibe poco aporte tributario, que es bastante constante durante largos períodos de tiempo, se puede calcular el rendimiento anual de sedimentos por la suma mensual o semanal de las cargas.

#### **c) Duración de flujo de sedimentos.**

Se trata de una simple integración de la curva de duración de flujo con la curva de descarga de sedimentos en el punto de salida de la cuenca. Es el método más común utilizado porque:

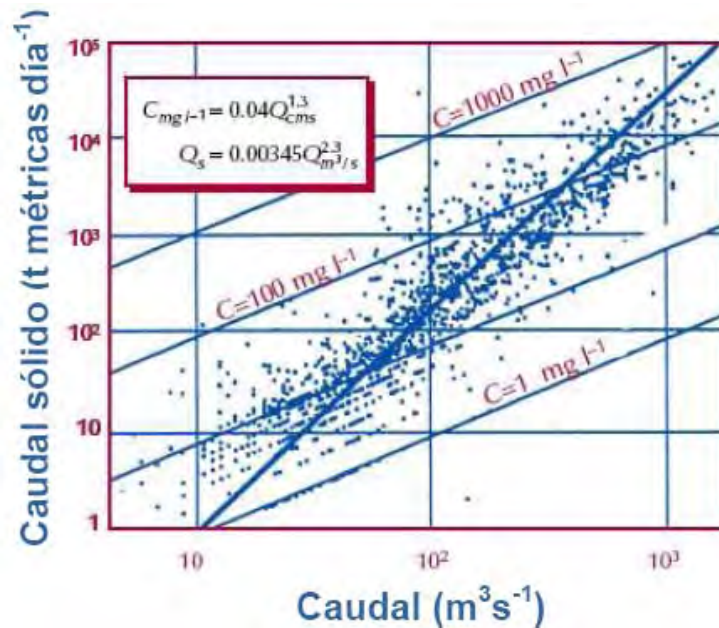
1. Tanto el flujo de la curva de duración y curva de descarga de sedimentos se basa en el proceso y puede ser cambiado desde los valores históricos necesarios hasta los más posteriores, para la previsión de agua y el escurrimiento de sedimentos en el futuro.
2. En estas curvas se puede reflejar el alcance de los componentes específicos del proceso de escorrentía de sedimentos (es decir, una curva de descarga de sedimentos puede ser calculada para la arena y grava cuando esos son los tipos de sedimentos de mayor interés de la mayoría de los sedimentos a los resultados de los proyectos).

La curva de descarga de sedimentos<sup>22</sup> a veces se denomina gráfico del transporte de sedimentos en suspensión, o relación de transporte de sedimentos en suspensión. Se trata de una relación entre la descarga de agua y descarga de sedimentos, como se ilustra en la Figura 2.20. Esta curva se utiliza para determinar la concentración. La carga de sedimentos total anual se obtiene mediante la suma de todos los intervalos de la curva de duración de los caudales.

---

<sup>22</sup> Medición del transporte de sedimentos y curvas de descarga de sedimentos. EPIC FORCE. Dr. J.C. Bathurst.

**Figura 2. 20:** Curva de Descarga de Sedimentos



Una alternativa es derivar y aplicar la curva de descarga de sedimentos, con ella se relaciona generalmente la concentración de sedimentos  $C$  con el caudal líquido  $Q$ , a partir de mediciones disponibles. La relación obtenida se puede expresar gráficamente en diagramas con ambos ejes logarítmicos, y se cuantifica habitualmente como una relación potencial de la forma:

$$C = aQ^b \quad (2.57)$$

Donde:

$a$  y  $b$  son coeficiente y exponente derivado empíricamente. El valor típico de  $b$  está en el rango de 1,5 – 3. Pueden obtenerse relaciones de este tipo para concentraciones de la carga suspendida, de la carga de fondo o de la carga total, pero las más comunes se deducen para la carga en suspensión.

La curva de descarga se obtiene para valores de concentración, no de descarga de sedimentos. Como esta última surge de multiplicar concentración por el respectivo valor de caudal líquido, relacionar descarga de sedimentos con descarga líquida introduce un grado de correlación falsa, produciendo un ajuste aparente mejor que el que se logra con el conjunto original de datos.

Concentración de una muestra de sedimentos =  $\frac{\text{Peso o volumen de sedimentos}}{\text{Peso o volumen de la mezcla agua - sedimentos}}$

La concentración comúnmente se expresa como  $\text{mg l}^{-1}$  o como partes por millón (ppm).

Descarga de sedimentos = Concentración  $\times$  Caudal líquido

### Cálculo de la producción de sedimentos<sup>23</sup>

La aplicación de la relación de descarga a un registro continuo de caudal líquido para un periodo da do pr oduce un r egistro c ontinuo de va lores de c oncentración. L a combinación de este último con el registro disponible de caudales líquidos proporciona un conjunto de valores de descarga de sedimentos variable en el tiempo. Su integración para el periodo de tiempo brinda la producción de sedimentos.

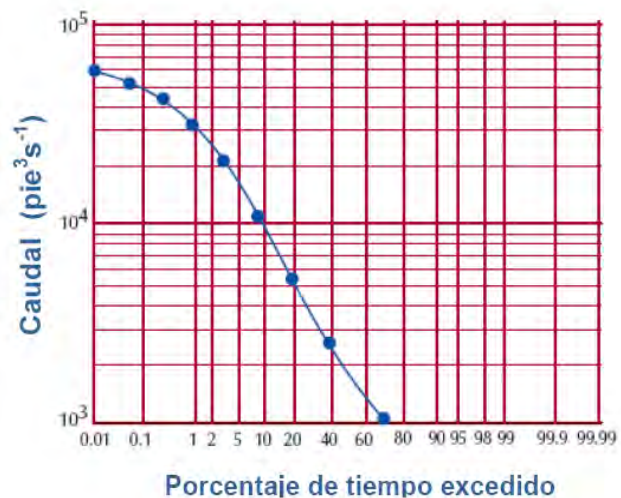
$$\text{Producción de sedimentos} = \int_0^T \frac{Q_{ss} dt}{T \times \text{Área de cuenca}}$$

Donde:

$Q_{ss}$  es la descarga de sedimentos variable en el tiempo,  
T es el periodo  
t es el tiempo.

Una técnica alternativa resulta de combinar la relación obtenida para la descarga de sedimentos con una curva de duración de caudales líquidos, como se muestra en la Figura 2.21. Esta curva de duración de caudales esta expresada en intervalos discretos.

**Figura 2. 21:** Curva de duración de Caudales.



### Fuentes de error.

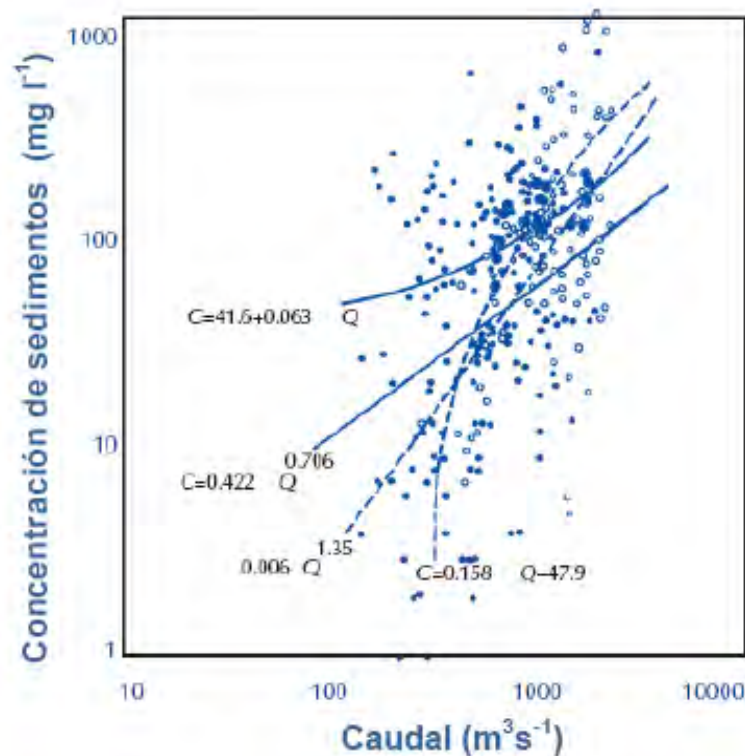
Los gráficos de los valores de concentración de sedimentos relacionados con los de caudal líquido habitualmente muestran una dispersión considerable, en la Figura 2,22, indica que como ocurren diferencias estacionales en las relaciones concentración-caudal, la dispersión de los puntos es tal que virtualmente se podría ajustar cualquier ecuación de regresión.

<sup>23</sup> Medición del transporte de sedimentos y curvas de descarga de sedimentos. EPIC FORCE. Dr. J.C. Bathurst.

Las relaciones de descarga son, por tanto, aproximadas. Las razones por tal dispersión incluyen:

- Origen de sedimento.
- Variación durante un evento de crecida.
- Eventos de escurrimiento con picos múltiples.
- Variaciones estacionales.

**Figura 2. 22:** Relaciones de descarga



**a) Origen de sedimento:**

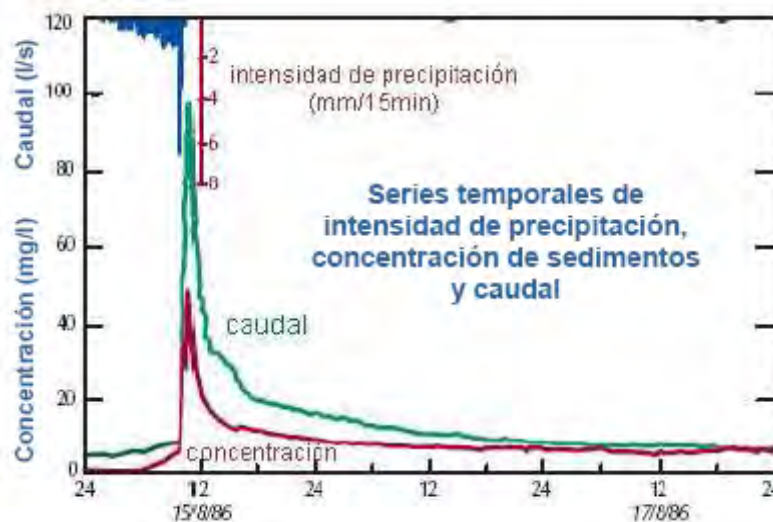
La carga de suspensión incluye la carga de lavado y una parte de la carga de material de fondo, pero solo esta última es probable que varíe estrechamente con el caudal líquido del río.

La carga de lavado puede variar ampliamente para un mismo valor de caudal, de acuerdo a los mecanismos de suministro de sedimentos y las fuentes de procedencia del material, tales como colapso de márgenes, escurrimiento por laderas de montañas, aportes por deslizamientos de taludes. Algunas partes de la cuenca pueden ser fuente de provisión más prolífica que otras, por lo que el ingreso de sedimentos al cauce puede variar en función de la distribución superficial de las precipitaciones y de la esorrentía, aun cuando estas últimas puedan generar el mismo caudal líquido.

b) **Variación durante un evento de crecida.**

Los caudales líquidos no siempre alcanzan sus valores pico simultáneamente, produciendo un efecto de histéresis, como se muestra en la Figura 2.23, los picos de la descarga de sedimentos posteriores al caudal líquido, sugieren la puesta en movimiento del material del lecho que sigue a la ruptura de una capa acorazada ocasionada por el caudal máximo o el colapso de márgenes saturados cuando los niveles de agua bajan.

**Figura 2. 23:** Evento de tormenta.



La aparición de los picos de descarga de sedimentos antes de la del caudal líquido indica que los abastecimientos de sedimento acumulado previos a las tormentas removidas en la rama ascendente, dejando poco material para transportar en la rama de bajante, Ilustrado en la Figura 2.24.

**Figura 2. 24:** Variación de transporte de carga de fondo con el caudal líquido a través del hidrograma de crecida.





### c) Eventos de escurrimiento con picos múltiples

Dos eventos de crecida sucesivos de similar magnitud pueden transportar diferentes cargas de sedimento. El primer pico puede agotar la fuente de sedimentos por lo que habrá menor cantidad disponible para ser transportada por el segundo pico, como indica la Figura 2,25.

**Figura 2. 25:** Variación en la concentración de sedimentos en suspensión durante una serie de hidrogramas de tormentas.

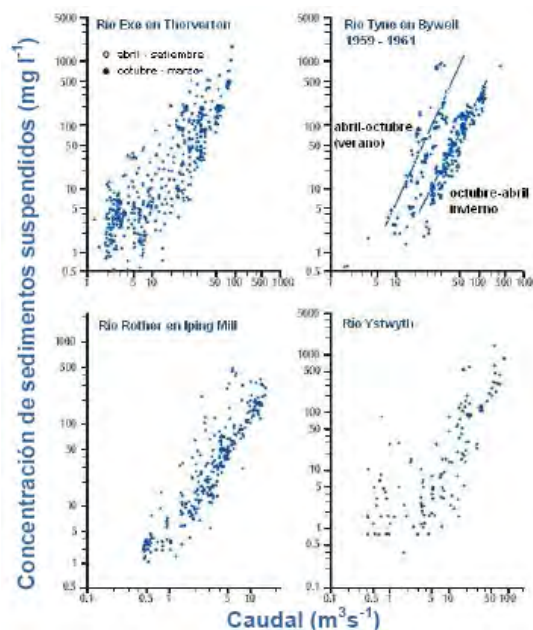


La erosión producida en laderas montañosas durante el primer evento puede generar sedimentos que no alcanzan el cauce hasta el segundo evento.

### d) Variaciones Estacionales

En una cuenca con áreas significativas destinadas al uso agrícola, en ciertos periodos del año podría resultar en cargas de sedimento relativamente altas para un caudal determinado. Mientras que en otras épocas del mismo año se registran cargas inferiores. Un ejemplo se muestra en la Figura 2,26.

**Figura 2. 26:** Relaciones concentración de sedimentos en suspensión-caudal, para cuatro ríos británicos.



### Ajustes para la Curva de Duración de Caudales.<sup>24</sup>

Aun cuando la duración del flujo y las curvas de descarga de sedimentos se basan en amplias mediciones de campo, algunos ajustes pueden ser necesarios.

- a) Los campos de datos deben ser convertidos a partir de las mediciones instantáneas de concentración media diaria de los sedimentos vertidos, en unidades de toneladas/día. Estos valores deben ser trazados con los valores de la descarga media diaria de agua del registro diario de la red para formar una curva de descarga de sedimentos en suspensión. Para que las muestras se consideren como representativas de las condiciones a largo plazo, deben incluir una amplia gama de descargas de agua, cambios de uso de la tierra y de respuestas temporales de la cuenca.
- b) Las estimaciones de la carga no medida debería incluirse para obtener el total de la carga de sedimentos que se presenta en el método anterior.
- c) La curva de duración de flujo se basa generalmente en un registro más largo que el de la curva de descarga de sedimentos. Por ejemplo en arroyos, en particular en las regiones áridas, donde el transporte de sedimentos por uno o dos eventos de alto flujo de cada año no podrán tener registros adecuados en este rango para estimar el rendimiento. En otros casos, nuevas estaciones no pueden haber experimentado los flujos de inundación. Para completar estas series de datos pueden requerir algunos ajustes a la parte alta de flujo de la curva de duración de flujo, estadísticamente, a fin de incluir los fenómenos extremos que se han desarrollado hidrológicamente. Otra técnica es el patrón de baja probabilidad de eventos después de las estaciones cercanas involucrados.
- d) El primer paso en la predicción del rendimiento futuro de sedimentos es estimar el rango de la curva de descarga de sedimentos y la curva futura de duración de flujo. Los sistemas naturales, es decir, el clima y el relieve, se consideran representados por los registros históricos, salvo que se demuestre lo contrario.

Por otro lado, el uso de la tierra está sujeto a las actividades del hombre y pueden cambiar significativamente durante la vida de un proyecto. Como consecuencia de ello, la curva de duración de flujo y la relación de descarga de sedimentos puede requerir un ajuste.

Una vez que se establezcan las relaciones futuras, el cálculo de los rendimientos de agua y sedimento sigue el mismo procedimiento descrito para las condiciones históricas.

---

<sup>24</sup> SEDIMENTATION INVESTIGATIONS OF RIVERS AND RESERVOIRS. Capítulo 3.



### Limitaciones de la Curva de Duración de Caudales<sup>25</sup>

Los puntos de atención más importantes sobre el método de la curva duración de flujo y el rango de la curva de descarga de sedimentos son:

- a) La curva de descarga de sedimentos se representa gráficamente en la descarga de agua frente a la descarga de sedimentos, en un registro de registro de la red. Sin embargo, los resultados de la cantidad de sedimentos en esas parcelas se desprende que la descarga de sedimentos no es una simple función de descarga de agua. En consecuencia, el ingeniero debe investigar y evaluar las cuencas hidrográficas regionales y las características que pueden contribuir a la dispersión. Por ejemplo, la descarga de agua en la parcela, frente a la concentración de sedimentos en ppm para evitar la dependencia de tener Q en los dos ejes de la curva de descarga de sedimentos. Prueba de homogeneidad con respecto a la temporada del año, los cambios sistemáticos en el uso del suelo, tipo de sedimento, y el mecanismos y tipo de erosión. Para determinar los factores dominantes que influyen en las concentraciones históricas Utilice un enfoque de correspondencias múltiples, junto con buenas y prácticas técnicas. Predecir la forma en que esos factores podrían cambiar en el futuro y cómo estos cambios afectaría a las concentraciones de sedimentos y tamaño de partículas.
- b) La carga de lavado de sedimentos influye en la cantidad de dispersión en los datos porque la cantidad de carga de lavado depende de su disponibilidad y no en el sistema hidráulico de flujo.
- c) La temperatura del agua provoca una importante variación en la capacidad de transporte de la carga de material del lecho. Cuando, junto con los cambios estacionales en el uso de la tierra, aparte clima frío y curvas de descarga de sedimentos sea necesario para lograr precisión en el cálculo de los resultados.
- d) La extrapolación de la relación de concentración total, no garantiza el buen comportamiento de las distintas clases de tamaño. Comprobar cada uno antes de aceptar los resultados.
- e) Es posible medir la mayor variación en la concentración de un caso a otro como ocurre a partir de una descarga a otra dentro de un mismo evento. El desarrollo de una curva de la concentración de un único caso de análisis debe tener en cuenta esa posibilidad. Por lo tanto, caben dos líneas a través de los datos.
- f) Se considera que este método puede dar una estimación fiable del rendimiento de sedimentos, pero cuando se dispone de un registro de valores históricos a largo plazo los resultados, este método debe ser verificado con estos valores y con la curva de sedimentos ajustada, dentro de la dispersión de los datos según sea necesario para reproducir el valor histórico.

---

<sup>25</sup> SEDIMENTATION INVESTIGATIONS OF RIVERS AND RESERVOIRS. Capítulo3.

- g) En regiones que tengan estaciones húmedas y secas, se pueden exigir curvas de sedimentos para principios de temporada de lluvias y para acontecimientos durante el resto de la temporada de lluvias. Esto es importante porque mecanismos eólicos son especialmente activos durante la estación seca que deja una gran cantidad de sedimentos de la erosión para el comienzo de la próxima estación de lluvias. Como el aporte de sedimentos se ha agotado a principios de eventos de precipitación, el escurrimiento puede pasar de tener una muy alta concentración de sedimentos a un suministro de energía controlado por el escurrimiento. Estas diferencias pueden expresarse mediante el uso estacional de las curvas de descarga de sedimentos y duración de flujo.
- h) Cuando se producen inundaciones, es recomendable la toma de muestras de agua de inundación, especialmente cuando no existen mediciones sobre el terreno y, al menos, algunos de ellos son necesarios para hacer estimaciones fiables del rendimiento de sedimento

### **Uso de las curvas de descarga de sedimentos<sup>26</sup>**

Las curvas de descarga de sedimentos deben ser utilizadas con precaución debido a la dispersión asociada con ellas. La suposición implícita es que puede establecerse una relación estable entre concentraciones y caudales líquidos la que, a pesar de la dispersión que posee, permitirá determinar la producción media de sedimentos sobre la base de los registros de caudales.

Las curvas de descarga de sedimentos no proporcionan estimaciones exactas de la concentración instantánea. Sin embargo, cuando se las aplica para estimar la producción de sedimentos media anual (o incluso media mensual), los errores en la relación tenderán a compensarse, y el resultado obtenido será razonablemente satisfactorio si se utiliza un registro de datos suficientemente extenso.

Además, brindarán una mayor precisión si son aplicadas a cuencas pequeñas y relativamente homogéneas.

Para un único sitio pueden llegar a ser necesarias múltiples relaciones para distintas estaciones o condiciones por ejemplo, estados de crecida y de estiaje, verano e invierno, caudales bajos o elevados.

### **2.4.2.2. INVESTIGACIONES EN LOS EMBALSES DE SEDIMENTACIÓN.<sup>27</sup>**

La cantidad de sedimentos depositados son investigados periódicamente, y analizados cuidadosamente.

Este método de cálculo de rendimiento de los sedimentos, generalmente es considerado por algunos para los períodos comprendidos entre las mejores estimaciones, es decir, grandes sequías o inundaciones.

---

<sup>26</sup> Medición del transporte de sedimentos y curvas de descarga de sedimentos. EPIC FORCE. Dr. J.C. Bathurst.

<sup>27</sup> SEDIMENTATION INVESTIGATIONS OF RIVERS AND RESERVOIRS. Capítulo 3.

Se debe considerar los siguientes factores para estimar la producción de sedimentos a la hora de la sedimentación en los embalses utilizando la técnica de encuesta para:

- Eficiencia de la trampa del embalse.
- Tamaño de sedimentos.
- Velocidad de la solución de partículas de sedimentos.
- Consolidación de la deposición.
- Zona contribuyente de drenaje.
- Mecanismo de la erosión.

### **Transferencia de datos en flujo.**

Existe una amplia variación en las curvas de descarga de sedimentos en distintos lugares a lo largo de un arroyo debido a que pequeños cambios en la velocidad produce un cambio significativo en el transporte del sedimento, por lo tanto, la transferencia de curvas de descarga de sedimentos de una cuenca en un punto a otro se puede abatir. Sin embargo, la conversión de la curva de descarga de datos a una curva de rendimiento anual de sedimentos por lo general está en relación con un área de drenaje, cuando el uso de la tierra, topografía, y los suelos son similares.

### **Reservorio de transferencia de datos de deposición.**

Los datos de rendimiento de sedimentos calculada en un determinado sitio de depósito pueden ser transferidos a la cuenca de estudio siempre que la topografía, los suelos y el uso de la tierra, en particular el porcentaje en el uso agrícola de ambas cuencas sean similares.

Transferencia directa del estudio de las cuencas hidrográficas: cuando el área del depósito es mayor a 0,5 o inferior a 2,0 veces el área de drenaje de la zona. No transferencia de las cuencas hidrográficas. Cuando el área del depósito es inferior a 0,1 o superior a 10,0 veces el área de drenaje de la zona de depósito de la encuesta.

Se aplica la siguiente ecuación para el estudio de las cuencas hidrográficas dentro de estos límites:

$$Ye = Ym \left( \frac{Ae}{Am} \right)^{0,8} \quad (2.58)$$

Dónde:

Ye = Rendimiento total anual de sedimentos estimado para el área de estudio, ton/año.

Ym = total de toneladas de sedimentos al año, medidas en el sitio de reservorio

Ae = es el área de drenaje contribuyente de la zona.

Am = es el área de drenaje estimada de la zona.

Estas guías no se aplican a los cambios en el rendimiento de los sedimentos de montaña, porque el cambio estimado para el área medida en el sitio de depósito a menudo no muestran ninguna coherencia entre el área de drenaje, ríos o canales que pueden aumentar la erosión, el rendimiento del sedimento por unidad de área, o relación con el aumento de área de drenaje.

### 2.4.2.3 ANÁLISIS REGIONAL.

Estos métodos regionales no deben ser las únicas técnicas utilizadas para calcular el rendimiento de sedimentos. Son aceptables como procedimientos preliminares y se proponen como alternativas de apoyo, detallando los mecanismos de erosión que son predominantes en el área particular de la región<sup>28</sup>.

Algunos métodos regionales son:

#### a) Método Dendy Bolton.

En esta ecuación se relaciona áreas de drenaje y la esorrentía media anual por las siguientes dos ecuaciones de regresión.

- I. Para las cuencas hidrográficas con un escurrimiento medio anual de agua inferior o igual a 2 pulgadas:

$$s = 1280(Q^{0,46})(1,43 - 0,26registro) \quad (2.59)$$

- II. Para las cuencas hidrográficas con un escurrimiento medio anual de agua superior a 2 pulgadas:

$$S = 1958(e^{0,055Q})(1,43 - 0,26registro) \quad (2.60)$$

Dónde

s - Unidad de producción de sedimentos de la cuenca, de ton.milla cuadrada por año

Q - La media anual de agua de esorrentía de la cuenca, pulgadas

A - área de Cuenca, millas cuadradas

e = 2,73

#### b) Método del Comité Interinstitucional del Pacífico Suroeste (PSIAC).

Este método PSIAC fue desarrollado con fines de planificación del rendimiento del sedimento es directamente proporcional a la suma de los valores numéricos asignados a nueve diferentes factores: el uso del suelo, erosión del canal, transporte de sedimentos, la esorrentía, la geología, la topografía, la erosión de las tierras altas, los suelos, la cubierta del suelo y el clima. Valores numéricos van desde 25 hasta -10 para cada

<sup>28</sup> SEDIMENTATION INVESTIGATIONS OF RIVERS AND RESERVOIRS. Capítulo3.

factor. La producción del sedimento puede variar de 0,15 acres-pies por milla cuadrada por año con una baja de las cuencas hidrográficas.

#### **c) Método Tatum.**

El método de Tatum se utiliza para calcular el rendimiento de sedimentos y volúmenes de escombros para las tierras áridas, las zonas montañosas.

Los cálculos se realizan a partir de una ecuación con factores de ajuste de tamaño, forma, y la pendiente del área de drenaje, 3 horas de precipitación, la parte del drenaje de superficie quemada, y los años se producen entre el momento de la quemadura y el tiempo de la inundación.

### **2.4.3 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA EL CÁLCULO DE PRODUCCION DE SEDIMENTOS**

Estos métodos se han desarrollado porque se necesitan rendimientos de sedimentos en los lugares donde no hay campo de medición directa, estos métodos pueden estimar la producción de sedimentos en un punto concreto sin la necesidad de medir el movimiento de los sedimentos de un punto a otro dentro del sistema.

Los resultados no son tan fiables como los métodos de medición directa, cuando un proyecto de sedimentación es importante se debe establecer una estación de muestreo en la zona del proyecto para perfeccionar las estimaciones realizadas con las técnicas presentadas, proporcionando estimaciones cuantitativas de la producción de sedimentos.

Estos métodos de cálculo de producción de los sedimentos se refieren a la aplicación de técnicas de análisis de sedimentos para el cálculo de rendimiento de las cuencas hidrográficas, sobre la base de los sedimentos y los parámetros hidráulicos.

#### **2.4.3.1 TÉCNICAS DE ANÁLISIS<sup>29</sup>**

Las diversas técnicas se sitúan en cuatro categorías:

- Las funciones de transporte de sedimentos,
- Ecuaciones de la pérdida de suelo.
- Erosión de cárcavas de para las pequeñas cuencas hidrográficas,
- Modelos de las cuencas hidrográficas.

##### **a) Funciones de transporte de sedimentos.**

Cuando se necesita calcular la producción de sedimentos para un sitio que tiene datos de la descarga de agua pero no de la gestión de datos de sedimentos, es mejor calcular la curva de descarga de sedimentos.

Una función de transporte de sedimentos es la base para el cálculo. Puede ser utilizado para calcular el material del lecho de la curva de descarga de sedimentos, el método de

---

<sup>29</sup> SEDIMENTATION INVESTIGATIONS OF RIVERS AND RESERVOIRS. Capítulo 3.

la curva de duración de flujo de sedimentos, se utiliza para calcular el promedio de rendimiento anual de la carga de material del lecho. Este resultado no es el adecuado para el depósito de estudios, pero puede ser regional o junto con las técnicas matemáticas para calcular la carga de lavado. En consecuencia, se producirá un resultado más fiable que proviene de la aplicación de un transporte de sedimentos en función de un único punto.

## **b) Ecuaciones de pérdida de suelo**

### **• Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).**

Estas ecuaciones de la pérdida del suelo, se han desarrollado para su uso en pequeñas cuencas rurales de montaña.

La USLE es una de las ecuaciones más recientes y ampliamente utilizadas, desarrolladas para predecir el promedio a largo plazo de la pérdida de suelo de tierras agrícolas.

Desarrollada en base a ensayos en parcelas de 72 pies de largo, y con utilización de simuladores de lluvia para crear la energía erosiva, produciendo una superficie de erosión en forma de arroyuelos, y determinando la cantidad de suelo erosionado medida en el punto de salida, expresado en toneladas por acre por año. En consecuencia, los usos de la USLE son bastante limitados para los proyectos. Los parámetros pertinentes se reunieron en la siguiente ecuación de regresión por Wischmeier y Smith.

$$A_{\text{suelo}} = R \cdot K \cdot L_p \cdot S_p \cdot c \cdot p \quad (2.61)$$

Dónde

A-la pérdida de suelo por unidad de superficie por período de tiempo, toneladas por acre por año

R - índice de erosión de las lluvias.

K-Factor de erodabilidad del suelo.

Lp = factor de longitud-pendiente.

Sp- Pendiente-factor pendiente.

c- factor de Cubierta.

p = factor de prácticas de conservación

### **Limitaciones en el uso de la USLE.**

Los siguientes puntos son limitaciones para el uso adecuado de la USLE.

1. Proyectos de canal. La USLE no da ninguna información sobre la gradación de los sedimentos erosionados. En consecuencia, las ecuaciones serían de un valor limitado en el análisis de los efectos de un canal de proyecto en el que arena y grava son de interés primordial.
2. Obras de construcción. La importancia de la selección de los coeficientes puede determinar analizando el factor de la erodabilidad del suelo, K. La importancia de este factor radica en que no es el mismo para una obra de construcción, que

para el cultivo de tierras, debido a que la erosión en el suelo de construcción es similar que en tierras agrícolas durante el primer evento después de la lluvia, pero los sucesivos eventos de precipitación podrían erosionar el suelo a un tipo reducido, porque la obra no es arada regularmente.

3. Mecanismos de la erosión. La canalización de las aguas superficiales de escorrentía debido a la construcción puede aumentar la barranca y la erosión del canal significativamente, provocando que se pierda por completo la aplicación de la USLE, ya que está formulada para la erosión en surcos.
4. El transporte de sedimentos. No hay transporte en función de la USLE, y una relación de entrega de sedimentos de cuencas hidrográficas debe aplicarse para tener en cuenta la deposición terrestre. Sin embargo, la validez de los resultados se cuestiona cuando la USLE se aplica a las zonas en exceso de unas pocas millas cuadradas.

- **Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE).**

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo fue modificada por Williams, con la ecuación resultante de nominado Modificado USLE (MUSLE). El MUSLE permite la estimación de las pérdidas de suelo por cada evento de precipitación a lo largo del año, convirtiéndose así en un modelo de escurrimiento medio anual.

La plena MUSLE la definición de la ecuación es:

$$Y = 95(Qqp)^{0.56} K.C.p.Lp.Sp \quad (2.62)$$

Dónde

Y = rendimiento de sedimentos individual a través de las tormentas y la erosión en surcos, en toneladas.

Q = volumen de escurrimiento en la tormenta ac-pie.

qp - Pico de la escorrentía en la tasa de pies<sup>3</sup>/sg.

Lp \* Sp = longitud de la pendiente y el factor de gradiente.

K-Factor de erodabilidad del suelo.

c - factor de cubierta.

p = factor de prácticas de conservación

El MUSLE es simplemente la USLE con el índice de erosión de las lluvias sustituida por la tasa de escorrentía. Dado que la erosión se calcula para cada caso, un DEG no es necesario.

c) **Erosión de las orillas y del barranco.**

Cuando la cuenca de drenaje presenta una amplia erosión de las orillas, ya sea en la corriente principal o en los afluentes a ella, el rendimiento de los sedimentos está determinado por los siguientes métodos, y debe añadirse a la hoja y la erosión en surcos previsto por las ecuaciones de pérdida de suelo.

Erosión en las barrancas. Pérdidas de suelo a través de la erosión de las orillas y el flujo en bancos contribuye cantidades significativas de la producción total de sedimentos de los ríos más natural. Las causas son muchas y variadas, y la predicción de las pérdidas futuras en determinados lugares es difícil. No se ha generalizado los procedimientos analíticos desarrollados para calcular el rendimiento de los sedimentos en banco. Los métodos de mayor éxito se basan en la fotografía aérea en la que los sucesivos vuelos se pueden utilizar para la superposición de bancos con la línea de circulación con el tiempo. Mediante la medición de la superficie entre las sucesivas líneas de banco y la estimación de alturas de banco reconocidas sobre el terreno, las cantidades de sedimento perdido por la erosión se puede calcular entre los estudios y las tasas medias anuales determinado.

La erosión de cárcavas. La pérdida de suelo de barrancas constituye un porcentaje muy pequeño del total de la producción de sedimentos cuando el área de estudio es más de 10 mi<sup>2</sup>.

#### **d) Modelos de ordenador de determinación de sedimentación en cuencas hidrográficas.**

Aplicables en una amplia investigación del movimiento de agua y de los procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos a lo largo de la cuenca.

La mayoría son modelos hidrológicos con la capacidad de escurrimiento de sedimentos añadido a través de ecuaciones de la pérdida del suelo, requieren de extensos rangos de datos, pero tienen la ventaja de predecir los efectos de futuros cambios en el uso de la tierra en considerable detalle. En general, se ha aplicado a cuencas hidrográficas, de 10 km<sup>2</sup>, sobre la superficie máxima para la aplicación de las ecuaciones de pérdida del suelo. Generalmente se utilizan Modelos de cuencas más sofisticados que tratan de abordar la mecánica erosión de los sedimentos, sin embargo, estos modelos son en gran medida aplicable a las cuencas de unos pocos km<sup>2</sup>, dada la habitual falta de datos de sedimentos, la estimación del rendimiento con equipos de modelación de cuencas hidrográficas puede no ser tan fiable como la simplificación de las técnicas.



## CAPITULO III

### MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 AREA DE ESTUDIO

##### MICROCUENCA DEL TURUPAMBA

La microcuenca del Turupamba, pertenece a la subcuenca del río Burgay, el cual forma parte de la cuenca del río Paute, está localizada al sur del Ecuador, en la provincia del Cañar, en la zona oeste de la Ciudad de Biblián, tiene una superficie de 5,43 km<sup>2</sup>.<sup>30</sup> La altitud dentro de la microcuenca varía desde los 2624 m.s.n.m en las zonas bajas, hasta los 3278 m.s.n.m. en las partes más altas. El cauce principal está formado por la unión de las quebradas Buena Muerte y Yunga Yugan.

Es una zona principalmente de tipo rural, con población dispersa, actualmente escasa debido a la migración de gente joven y económicamente activa, quedando en su mayoría personas de la tercera edad y niños, dedicados principalmente a la agricultura de maíz, papas y ganadería bovina principalmente.

La precipitación anual dentro de la microcuenca está entre los 950 mm/año,<sup>31</sup> su clima es templado, la temperatura media en la cuenca es de entre 10 y 15 °C<sup>32</sup> aproximadamente, presentando disminuciones graduales a medida que aumenta la altura.

Geomorfológicamente esta cuenca está conformada por un relieve bastante irregular con variadas pendientes y presencia de desniveles, afectado por acciones morfo dinámicas, que están modelando constantemente el relieve de la zona. En la parte inferior de la microcuenca se observan pendientes moderadas, y poco empinadas, producto de la erosión hídrica, eólica movimientos en masa, deslizamientos. En la parte central de la cuenca se determinan pequeños escarpes, pendientes menos bruscas, que favorece a la existencia de extensas zonas de pasto. La parte superior se caracteriza por zonas montañosas, de pendientes empinadas, en donde predominan procesos eólicos.

Litológicamente está conformada por lutitas laminadas de color blanco o habano en afloramientos meteorizado, y negras y grises en afloramientos frescos, con presencia de yeso, correspondiente a la formación Loyola, también se encuentran arcillas arenáceas rojizas con ocurrencia de yesos; y, a reniscas tobáceas gruesas, pertenecientes a la formación Biblián.

La Formación Mangán se divide en 3 partes y todas ellas tienen capas de carbón, que pueden ser estratográficas. La unidad inferior consiste predominantemente de limolitas, lutitas y areniscas de grano fino inter-estratificadas en capas generalmente menores a 1 m de espesor. La unidad media consiste de lutitas muy parecidas a las de la Formación Loyola y pueden contener capas de bentonitas. La unidad superior consiste principalmente de areniscas de grano grueso a veces gujarrosas y conglomeráticas.

---

<sup>30</sup> Dato obtenido del procesamiento de los datos

<sup>31</sup> Dato obtenido del análisis de datos

<sup>32</sup> Dato obtenido de informes del sector

Todos estos materiales son sedimentarios, muy susceptibles a la erosión y favoreciendo a una rápida formación de cárcavas. Todo este material erosionado es una de las principales fuentes de aporte de sedimentos a los cauces de las quebradas aledañas, ilustrado en la Foto 3.1.

**Foto 3. 1:** Fuente de aporte de sedimentos



A estos procesos naturales debe sumarse la intervención de la mano del hombre, que ha explotado los suelos, mediante la tala del bosque, y el desarrollo de sus actividades agrícolas y ganaderos, generando así gran parte del aporte de sedimentos que llegan hasta la estación de monitoreo de sedimentos en la desembocadura de la microcuenca.

La vegetación de la microcuenca está principalmente determinada por bosques de eucalipto, pastos, sembríos en las zonas media y baja, en tanto que la parte superior de la microcuenca se caracteriza por chaparros y pajonal.

Las acciones antrópicas, las características geomorfológicas, los distintos tipos de suelos, contribuyen a la persistencia de los procesos erosivos mencionados que se traduce en una permanente producción y aporte de sedimentos. Cabe recordar que el hombre no puede materialmente evitar los procesos de erosión natural, pero sí puede reducirlos considerablemente al no crear condiciones para nuevas formas de erosión.

La importancia del análisis de esta microcuenca radica básicamente en los procesos y en la producción de sedimentos que aporta a la cuenca del río Paute, ya que ésta al ser la generadora de aproximadamente el 50% de energía eléctrica para el país a través del proyecto hidroeléctrico, que incluye la represa de Amaluza, pierde capacidad de

generación por la influencia de la cantidad de sedimentos que llegan hasta su embalse debido a zonas de producción como la que corresponde a la microcuenca de estudio.

### 3.2 GEOLOGÍA REGIONAL DE TURUPAMBA<sup>33</sup>

La litología de la microcuenca corresponde a las siguientes formaciones geológicas:

#### FORMACION BIBLIAN

(Mioceno Inferior).

El depósito basal es de guijarro grueso, a menudo con cantos de la formación Yunguilla. Litológicamente formada de arcillas limosas, arenosas finas café – rojizas, y areniscas tobáceas gruesas. Aglomerados volcánicos rojos para formar la base local de la formación.

#### FORMACION LOYOLA

(Mioceno Inferior) Grupo Azogues.

Los depósitos superiores consisten casi íntegramente de lutitas grises oscuras, de color amarillo claro, meteorizadas y rojizas, con una flora variada pero sin diagnóstico. El yeso aflora en casi todos los niveles y se observaron calizas cristalizadas de 2m de largo por 50cm de espesor.

#### FORMACION MANGAN

(Mioceno Superior) Grupo Ayancay.

Dentro de la formación Mangan se encuentran los yacimientos explotables de carbón de la cuenca sedimentaria. La litología predominante es una secuencia alternante de arenisca tobácea, café gruesa, y lutitas limosas verdes y rojas. Lutitas laminadas están asociadas con el yacimiento de carbón inferior.

Son comunes las hojas fósiles, gasterópodos y bivalvos, pero de poco valor para la determinación de edad. La unión de las formaciones Mangan y Azogues parece ser gradual, donde no existe la formación Guapán.

#### FORMACIÓN SANTA ROSA

(Cuaternario Pleistoceno) Grupo Ayancay.

La transición de la formación mangan es gradual. Está representada por una secuencia de capas de arcillas rojas, lutitas limosas verdes, estas capas son más gruesas hacia arriba. Depósitos de cantos rodados gruesos se encuentran en el área al oeste de Nazón presumiblemente un indicio de la proximidad del área de origen.

#### FORMACION TARQUI

(Cuaternario Plioceno) Grupo Ayancay.

Compuesta por tobas andesíticas amarillas cremas y rojas, con cantos milimétricos y centimétricos de rocas y fenocristales blancos alineadas en una matriz blanco-amarillo-

---

<sup>33</sup> Mapa geológico de Azogues.

rojiza, rocas pir oclásticas aci das, pero ocasionalmente se obs ervan lavas, en ciertos lugares por hidratación hidrotermal s e ha a lterado completamente la ro ca or iginal o caolín.

Un detalle de la ubicación geográfica de la microcuenca de Turupamba y de la geología que esta posee se encuentra en el ANEXO 1 de este documento.

### **3.2.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

El sector de Turupamba estructuralmente es una zona inestable, tanto por la litología de las formaciones existentes, y por las estructuras geológicas como: fallas, pliegues, deslizamientos, estratificaciones, contactos, etc.

Desde el punto de vista de estructuras regionales, esto es fallas y ejes de pliegues de varios km de longitud, la zona presenta varios de estos accidentes en dirección N-S, como por ejemplo la falla de Déleg, y otra falla inferida. También existe una falla que cruza la formación Loyola.

Se observa un c ontacto entre la formación Loyola y Mangan, en tanto que entre la formación T árqui y S anta R osa existe un c ontacto i nferido. T ambién se localizan canteras cer radas, sitios f osilíferos, minas de carbón. Todas est as ca racterísticas se encuentran cartografiadas en el mapa geológico de Azogues.

En tanto que en el campo es común ver estratos de chert deformados con pliegues ligeramente pequeños. Se observa también que las raíces de los arboles van a lo largo de las capas de lutitas negras.

Otra característica que se observa en estas rocas sedimentarias es que en superficie las capas de lutitas se e ncuentran volcadas, en espesores de unos 3 m, por e fectos de alteración lo que provoca un lento movimiento superficial ladera abajo y generación de sedimentos arcillosos.

Es común observar pequeñas fallas normales muy nítidas con saltos hasta de 50 cm y muy pocos centímetros de ancho entre los dos bloques techo y piso.

Hacia el punto 734.230 y 9'699.290 en el cruce de la carretera con la quebrada Agua Sucia la roca muestra un espesor de al teración supe rficial del orde n de los 4 m. La estratificación en el sector es N60°W/32°W dentro de la secuencia de las mismas capas de lutitas negras, fósiles con capas de chert de unos 5 cm de espesor y otras capas de yeso, ilustrado en la Foto 3,2



**Foto 3. 2:** Capas de lutitas negras, con capas de yeso.



En el punto, 733.491E y 9'699.366 N, en dirección hacia la parte alta de la cuenca, y mirando al sur, se ve un deslizamiento activo muy importante (Foto3.3), el mismo que no ha sido cartografiado en el mapa geológico Azogues, (al igual que tantos otros deslizamientos de terreno). La superficie de este deslizamiento se encuentra muy lobulada y fácilmente tiene un ancho superior a los 200 m y unos 800 m de longitud. Este deslizamiento correspondería a las lutitas de unidad media de la Formación Mangán y muy probablemente el deslizamiento se debería a la presencia de las capas de bentonita que son un tipo de arcillas expansivas. Los deslizamientos de terreno de este sector son una fuente importante de producción de sedimentos.

**Foto 3. 3:** Deslizamiento Activo.



Desde el punto de vista de uso del suelo, la parte alta de la cuenca se tiene manejo de pastos, mientras que la parte media y baja es mixta de bosques con pequeños retazos de cultivos. En este sector los árboles son totalmente verticales, demostrando una ausencia de deslizamientos de terreno. Árboles de unos 25 m, por lo menos mas de la mitad son completamente verticales.

### **3.3 ESTUDIOS IMPORTANTES EN LA MICROCUENCA DEL TURUPAMBA**

#### **3.3.1 INECEL-UMACPA**

La microcuenca ha sido sujeta de una serie de intervenciones para control y manejo del suelo. La medida física más representativa tomada es la de construcción de muros de gaviones, para la recuperación y control de cárcavas y torrentes realizadas por el Proyecto INECEL – UMACPA en la década de 1980. Sin embargo, y relacionada a los eventos hidrológicos, se presenta en la actualidad una serie de problemas como deslizamientos, inestabilidad de cauces en torrentes, formación de cárcavas y constante producción de sedimento.

La ejecución del Proyecto de Manejo y Conservación de la cuenca del río Paute, financiado en parte por el BID a través de préstamos, contempla la contratación de un consultor nacional experto en el área de Geomorfología, que pueda asesorar a la UMACPA en la formulación de la propuesta morfo-dinámica de los estudios de continuidad del Proyecto.

Dentro del contrato de consultoría suscrito con INECEL-UMACPA, determina textualmente el trabajo específico que el consultor debe desarrollar: “Estudiar geomorfológicamente la dinámica de los principales procesos erosivos y de sedimentación de la cuenca del río Paute. Analizar los principales flujos detríticos, sus características litológicas y sus tendencias espacial y temporal”.

- **Principales Procesos Morfo-Dinámicos**

La diversidad de los recursos naturales, las condiciones ecológicas y las características socio-económico-culturales de la población de la cuenca del río Paute determinan la presencia y naturaleza de las principales manifestaciones morfo-dinámicas, notándose una ausencia total de procesos dinámicos eólicos, ya sea bajo formas de ablación o de acumulación.

- **Erosivos:**

Del estudio realizado en la primera parte de la consultoría sobre “Los principales procesos erosivos de la cuenca del río Paute”, se desprende que 199.043,50 ha s. Se encuentran afectadas por diferentes manifestaciones morfo-dinámicas, entre las cuales se destacan: hídricos, movimientos o remoción en masa y movimientos de gravedad, que representa el 38,60% de la superficie total de la cuenca.

- **Hídricos:**

Dentro de los factores condicionantes de la morfo-dinámica hídrica, la cobertura vegetal desempeña un papel preponderante como protector del suelo contra la erosión

pluvial y paralelamente al aumentar la evapotranspiración y la infiltración de las aguas, disminuye la escorrentía superficial.

La lluvia, a través de su intensidad, también interviene en el desencadenamiento de los procesos dinámicos hídricos. Así, los aguaceros intensos tienen un poder erosivo importante, pues una parte considerable del agua, se escurre superficialmente después de haber saturado al suelo y es la causa de las formas dinámicas más graves (cárcavas, barrancos).

En la cuenca del río Paute, el monocultivo del fréjol, brinda al suelo poca cobertura y la insignificante tecnología aplicada, hacen que se desencadenen fenómenos erosivos hídricos en forma de micro-surcos y surcos.

Los procesos dinámicos hídricos, afectan espacialmente a 136.505,5 ha s., que representan el 26,47% de la superficie total de la cuenca, lo que significa que más de la cuarta parte de la cuenca del río Paute está afectada por procesos morfo-dinámicos de naturaleza hídrica.

- **Movimientos o remoción en masa:**

Durante la estación lluviosa o después de lluvias intensas, el suelo pierde sus características de cohesión interna físicas para volverse plástico o líquido y la gravedad influye en su deformación superficial.

Además de la pendiente, factor determinante de la gravedad, la pobreza físico-química de los suelos arcillosos no saturados y la poca calidad de la cobertura vegetal antrópica (cultivos, pastos) que en ellos se desarrolla, determinan un uso agropecuario precario de subsistencia, situación que influye en el desencadenamiento de fenómenos morfo-dinámicos de movimientos en masa.

Los fenómenos de movimientos o remoción en masa afectan a 33.457,25 ha s., que representa el 6,49% de la superficie total de la cuenca. Estos valores absolutos y porcentual ocupan el segundo lugar dentro de los procesos morfo-dinámicos que afectan la cuenca del río Paute.

- **Movimientos de gravedad:**

La acción dinámica de estos fenómenos está determinada por el desplazamiento o deslizamiento rápido (brutal) del suelo y las formaciones superficiales o montos de alteritas (regolitas), bajo la acción principal de la gravedad asociados con las aguas de infiltración.

Estos flujos rápidos, por su carácter brutal e instantáneo, producen serias modificaciones de la topografía del terreno por rupturas superficiales.

Estos fenómenos dinámicos se localizan en las partes oriental y Nor-oriental de la cuenca, que corresponden a las cuencas media y baja.

Estos procesos morfo-dinámicos afectan a 29.080,75 ha s., que corresponden al 5,64% de la superficie total de la cuenca.

- **Sedimentación:**

En la cuenca del río Paute, los procesos de sedimentación son prioritariamente de naturaleza detrítica a causa de los fenómenos de fragmentación de las rocas y erosión de los suelos.

- **Análisis de los principales flujos detríticos:**

De acuerdo a los resultados obtenidos de la tasa de erosión, los valores más altos que se producen en la cuenca pertenecen a la cuenca media, seguido por la cuenca baja y por último la cuenca alta.

De esta manera, el mayor aporte de sedimentos a la represa de Amaluza y actualmente a las dos lagunas remanentes de los ríos Paute y Jadán luego del fenómeno de la Josefina, provienen de la cuenca media del río Paute.

**Tabla 3. 1:** Análisis de los Principales Flujos Detríticos, UMACPA

ANALISIS DE LOS PRINCIPALES FLUJOS DETRITICOS			
Sector de la Cuenca	Superficie (Km2)	METODOLOGIA	
		USLE*	FAO**
		Tasa de Erosión (toneladas/Km2/año)	Tasa de Erosión (toneladas/Km2/año)
Cuenca Media	1783,8	5.462	-----
Cuenca Baja	1758	2.274	1.950
Cuenca Alta	1598	2.154	771

\*USLE: Universal Soil Loss Equation

\*\*FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

- **La cuenca media:**

En esta cuenca caracterizada por una morfo-dinámica muy activa, se efectuaron estudios de Geomorfología dinámica cuantitativa utilizando la metodología de la USLE.

Para el análisis de aportes sedimentológicos es preciso tomar en consideración las tasas de erosión de cada una de ellas, pues la superficie de la sub-cuenca de Gualacéo es inmensamente superior a la de Jadán (triple) y a la de Burgay (doble), por lo cual los valores de la erosión total no presentan grandes diferencias y no constituyen la realidad.

**Tabla 3. 2:** Cuadro de Resumen de las Tasas de Erosión.

Sub-Cuenca	Superficie (Km2)	Tasa de Erosión (toneladas/Km2/año)
Jadán	338,3	9.505
Burgay	454,7	6.808
Gualacéo	990,8	3.418



Según los resultados, la sub-cuenca de Jadán presenta la más alta tasa de erosión, seguida por la sub-cuenca de Burgay y en último lugar la sub-cuenca de Gualacéo.

Es importante señalar que, desde el punto de vista hidrológico-sedimentológico, las tres sub-cuencas tienen incidencia directa en la problemática sedimentológica de la represa de Amaluza, no así para el caso de los lagos remanentes de los ríos Paute y Jadán, cuya incidencia se relaciona a las sub-cuencas de Burgay y Jadán respectivamente.

### **3.3.2 PROYECTO PRECUPA, CSS (COOPERACIÓN ECUADOR-SUIZA)<sup>34</sup>**

Prevención de desastres naturales en la Cuenca del Paute, Proyecto PRECUPA, Informe Final de Geología y Geotecnia, noviembre de 1998.

El Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) y el Cuerpo Suizo de Socorro (CSS), con el financiamiento de E.T.A.P.A; en noviembre de 1998 establecieron un convenio de cooperación para desarrollar el Proyecto PRECUPA, el que permitiría realizar estudios geológicos-geotécnicos a fin de localizar las zonas inestables, considerando la vulnerabilidad u ocupación del territorio.

Luego del deslizamiento de La Josefina se puso en manifiesto la susceptibilidad de los terreros de la cañón del Paute entre el Descanso y el río Santa Bárbara; para posibilitar los estudios de reconstrucción en esa zona, se inició la I etapa del proyecto con la hoja de Gualacéo para continuar con las hojas geológicas de Cuenca Este y Sinincay. En la II etapa se investigó la cuenca del Burgay en sus hojas Bilián, Azogues y Déleg. En la III etapa se revisaron los estudios y completaron con la hoja de Paute. Estos estudios se realizaron con hojas geológicas a escala 1:25000.

El proyecto tomó en cuenta un área comprendida entre las cuencas altas y media del Río Paute, tomando en consideración la densidad poblacional y antecedentes sobre problemas de inestabilidad del terreno y zonas de mayor vulnerabilidad. Como se indicó anteriormente se utilizaron diferentes hojas geológicas a una escala 1:25000.

Se realizó una caracterización geológico – geotécnico de formaciones y unidades geológicas, donde fueron presentadas las formaciones geológicas en un orden cronológico de joven a antiguo (según leyenda de los mapas/esquemas geológicos 1:25000), considerando que para efectos de inestabilidad del terreno, las formaciones más recientes tienden a ser en forma general las de mayor susceptibilidad a la rotura.

En la primera etapa del proyecto se detectó las áreas inestables y se caracterizó los macizos y materiales de cobertura, empleando técnicas geocientíficas clásicas como es la fotogeología, geomorfología, mapeo a una escala apropiada, determinación in situ de parámetros físicos básicos de los macizos rocosos y materiales coluviales (litología, granulometría, características de las estructuras y discontinuidades, coherencia, consistencia y compactación de los materiales, evaluación de RQD y características hidrogeológicas).

<sup>34</sup> Informe final del Proyecto PRECUPA.

Una vez recopilada la información se procedió a generar los mapas de los fenómenos que se daban en la zona, como la ubicación de los derrumbes, reptación, de rumbes, caída de rocas, flujos detríticos, erosión fluvial y erosión laminar.

Para la evaluación de la peligrosidad se utilizó los datos obtenidos en la primera fase, es decir, se evalúa un sitio en base a su fundamento, que la ocurrencia de un fenómeno geológico que inestabilice un terreno, es una consecuencia directa de su naturaleza geológica (causas condicionantes) y del impacto de factores externos (causas desencadenantes). En el siguiente cuadro se puede observar cómo se considera para evaluar la peligrosidad:

**Tabla 3. 3:** Cuadro de Evaluación de la Peligrosidad

FACTOR	DETALLE
INESTABILIDAD	Causas condicionantes, causas desencadenantes.
CAUSAS CONDICIONANTES	Geología, morfología, geotecnia, hidrogeología.
CAUSAS DESENCADENANTES	Saturación, erosión, actividad antrópica, sismicidad.
PROBABILIDAD	Actividad, causas condicionantes, causas desencadenantes.
INTENSIDAD	Superficie afectada, velocidad de masa, grado de afección.
PELIGROSIDAD	Probabilidad, Intensidad.

Los valores que se obtuvieron para probabilidad e intensidad están respaldados por relaciones matemáticas utilizadas para este trabajo, que combinan los parámetros condicionantes y desencadenantes, consecuentemente son cuantitativos.

Los resultados obtenidos para la microcuenca de Turupamba son las siguientes:

#### **CAUSAS PRINCIPALES:**

- Geológicas (material).
- Geomorfológicas (pendiente)
- Saturación del material.
- Cortes provocados.
- Inadecuada utilización del territorio.

#### **PELIGROSIDAD ALTA A MEDIA:**

- Zonas de deslizamientos activos, donde afloran sedimentos o rocas sedimentarias físis y/o fino-estratificadas (Fms. Loyola, Mangán, Biblián, ciertos estratos de Santa Rosa).
- Dentro del estudio geológico más detallado se han detectado como deslizamientos activos los siguientes Buena muerte (BIB-04), Cabopata (BIB-05), Chimborazo (BIB-09), Garusi (BIB-11), Molino huaycu (BIB-15), Rayoloma (BIB-19), San Pedro (BIB-21), Tarugacachi (BIB-22), Amenaza de flujos de lodo y escombros torrenciales en quebradas.

**PELIGROSIDAD MEDIA A BAJA:**

- Algunas zonas de coluviales en cortes de laderas o fuertes pendientes, especialmente en épocas de alta pluviosidad.
- Reptaciones en zonas mal drenadas.

**3.4 DESCRIPCION DE EQUIPOS UTILIZADOS**

Los diferentes equipos utilizados para la obtención de datos son descritos brevemente a continuación, con el objeto de tener una idea de sus características más importantes y de su aplicación en el campo.

**3.4.1 EQUIPO DE MEDICION DE NIVELES Y TOMA DE MUESTRAS**

**6712 Muestreador Portátil ISCO<sup>35</sup>**

**Figura 3. 1:** Estación ISCO.



Para el monitoreo de los niveles de agua en la sección de control se dispuso de una estación automática ISCO. Esta estación permite la medición de los niveles de agua, ya sea a través de sensores de ultrasonido o de presión, monitoreo de gastos líquidos, así como la toma de muestras de agua en un punto de la sección. Además brinda la posibilidad de instalar otros sensores para la medición de precipitación, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, turbiedad, etc.

Estas estaciones poseen un cerebro electrónico que permite su programación y el almacenamiento de datos, incluyen también un software de interconexión con computadores personales que facilita el procesamiento de la información registrada. Las

<sup>35</sup> [www.simtech.cl](http://www.simtech.cl)

estaciones ISCO trabajan con corriente alterna o mediante baterías recargables de 12 voltios, cuya duración dependerá del número de muestras recolectadas.

## GENERALIDADES

Este equipo dispone de un muestreador portátil vacío formado de plástico ABS para soportar la exposición y el abuso. Su diseño cónico y recorte de 20 pulgadas (50,8 cm) de diámetro en la boca de inspección lo hace de fácil instalación y desinstalación. De largo confortable para el transporte seguro y cómodo, incluso cuando es necesario el uso de guantes. El NEMA 4X, 6 (IP67) incluso es sumergible protegiéndola de la agua y polvo por ser hermética. Los enchufes de los módulos de la serie y la interfaz hacen más fácil añadir aparatos de medición de flujo y de terminación de los parámetros de seguimiento a su sistema.

El controlador avanzado de la ISCO 6712 le permite seleccionar diferentes modos de programación para asegurar la más adecuada para su aplicación rutinaria. La programación es rápida y sencilla.

En el modo de programación estándar, el controlador lo lleva a través de la toma de muestras de secuencias paso a paso, lo que le permite elegir todos los parámetros específicos para su aplicación. Ampliado el modo de programación permite introducir más complejos programas incluyendo los de "muestreo inteligentes" con notificación de eventos, desencadenando en cualquier combinación de hasta 16 entradas.

## CARACTERÍSTICAS ESTÁNDAR <sup>36</sup>

- Proporciona la interfaz "enchufe" con conexión de múltiples sondas para parámetros de calidad del agua y otros dispositivos compatibles.
- Tiene 512KB de memoria estándar le da una gran flexibilidad para el registro de datos ambientales.
- Elección de 11 diferentes clases de botellas de vidrio y plástico, configuraciones que van desde 24 x 1 litro a 1 x 5,5 galón.
- Resistente plástico ABS
- Base de espuma de aislamiento con un máximo de 30 libras (13,5 kg) de hielo para conservar las muestras, incluso en condiciones extremas.
- El contador de revoluciones de la bomba y el sensor de detección de líquidos garantizan la exactitud de los volúmenes de las muestras, e indica cuando la tubería debe ser sustituida.

---

<sup>36</sup> [www.isco.com](http://www.isco.com).

## APLICACIONES

- Efluentes de aguas residuales
- Seguimiento de tormentas
- Monitoreo
- Pre tratamientos

### 3.4.2 EQUIPO DE MEDICION DE PRECIPITACION

#### Sensor inteligente medidor de lluvia<sup>37</sup>(estación pluviográfica)

Figura 3. 2: Pluviógrafo



El pluviómetro de sensor inteligente está diseñado para trabajar con la estación de Hobo madereros. El sensor inteligente tiene un enchufe conector modular que le permite ser fácilmente añadido a esta estación. Todos los parámetros del sensor están almacenados en el interior del sensor inteligente, que automáticamente se comunica a la información de configuración de registro sin necesidad de programación o a mplia de configuración de usuario.

#### CARACTERISTICAS ESTANDAR

- El Rango de Medición es de 0 a 12,7 cm (0 a 5 pulgadas) por hora, máximo de 4000 por intervalo de registro.
- La precisión de calibración es de  $\pm 1,0\%$  , a un máximo de 20 mm / hora (1 pulg / hora).
- La Calibración debe ser anual: puede ser calibrado en campo o devueltos a la fábrica para volver a calibrar.

<sup>37</sup> <http://www.proviento.com>

- El Rango de Temperatura de Funcionamiento está entre 0 ° y +50 ° C (+32 ° a +122 ° F), y la supervivencia de -40 ° a +75 ° C (-40 ° a 167 ° F)
- Evaluación ambiental: Impermeable.
- Vivienda: 15,24 (6 pulgadas) cubo de aluminio.
- Mecanismo: Eje de acero inoxidable con cojinetes de bronce.
- Dimensiones: 22,8 cm de altura x 15,4 cm de diámetro (9 x 6 pulgadas), 15,4 cm (6,06 pulgadas) de orificio.
- Peso: 1 Kg (2 lbs).
- Bits por muestra: 12.
- Número de canales: 1.
- Formato de datos: Número de registros por medición, en pulgadas o en milímetros.
- Medición Promedio: No.

### 3.4.3 EQUIPO PARA DEMARCAR COBERTURA VEGETAL

#### Sistema de posicionamiento global gps

##### eTrex Venture® HC <sup>38</sup>

Figura 3. 3: GPS



El GPS eTrex Venture HC es un equipo de gran utilidad para cualquier excursión al aire libre, debido a su receptor GPS de alta sensibilidad localiza una posición de forma rápida y precisa y la mantiene incluso en bosques espesos o áreas edificadas. Pudiendo ampliar los mapas. Gracias a la rapidez con la que permite determinar la posición, y la facilidad para trazar rutas o senderos recorridos se ha empleado este equipo para el levantamiento de los distintos tipos de cubierta vegetal en el área de estudio.

#### GENERALIDADES

Incorpora un receptor de GPS de alta sensibilidad para un máximo rendimiento en cualquier terreno e incluye 24 Mb de memoria interna, mapa base europeo y pantalla a color.

<sup>38</sup> <http://www.GARMIN.com>

Este instrumento dispone de mapa base europeo y una memoria interna de 24 Mb que permite cargar waypoints y rutas de los software Trip & Waypoint Manager de MapSource. Además, se puede cargar cartografía adicional topográfica, náutica o callejeros adicionales para excursionismo, caza, geocaching y muchas más actividades al aire libre. Este completo GPS proporciona además instrucciones giro a giro, lo que permite utilizarlo en el vehículo.

Esta unidad permite la creación de waypoints o puntos de referencia que son grabados y almacenados en el GPS, además puede añadir waypoints a las rutas, crear rutas complejas mediante mapas de MapSource, e incluso crear una función para ir directamente al waypoint seleccionado.

Posee la función tracks, que permite crear un track log o sendero de puntos electrónico en la página mapa cuando viaja. Este dispositivo puede almacenar 50 rutas con hasta 250 puntos cada una. El track log contiene información sobre los puntos a lo largo de la ruta, la misma que se graba cuando la unidad identifica una posición.

Su ventaja más importante es que se puede descargar los datos almacenados en el GPS al programa Map Source creando mapas virtuales de las rutas o puntos almacenados, que a la vez pueden ser convertidos en archivos de Autocad para un mejor manejo de los mismos.

## CARACTERISTICAS FISICAS Y DE RENDIMIENTO

Dimensiones de la unidad (Ancho/Alto/Profundidad):	10,7 x 5,6 x 3,0 cm
Tamaño de la pantalla (Ancho/Alto):	3,3 x 4,3 cm
Resolución de pantalla (Ancho/Alto):	176 x 220 píxeles
Tipo de pantalla:	TFT de 256 colores
Peso:	156 g con baterías
Batería:	2 baterías AA (no incluidas)
Duración de la batería:	14 horas
Resistente al agua:	Sí (IPX7)
Flotante:	No
Receptor de alta sensibilidad:	Sí
Interfaz del equipo:	USB
Versión RoHS disponible:	Sí

### Cartografía y Memoria:

Mapa base:	Sí
Mapas pre instalados:	no
Posibilidad de agregar mapas:	Sí

Memoria interna:	24 Mb
Admite tarjetas de datos:	No
Waypoints:	500
Rutas:	50
Track log:	10.000 puntos, 10 tracks guardados

**Prestaciones:**

Creación automática de rutas (giro a giro en carretera):	No
Brújula electrónica:	No
Pantalla táctil:	No
Altímetro barométrico:	No
Modo geocaching:	Sí
Juegos GPS para exteriores:	Sí
Calendario de caza y pesca:	Sí
Información astronómica:	Sí
Predicción de mareas:	No
Cálculo de áreas:	Sí

Puntos de interés personalizables (posibilidad de agregar puntos de interés adicionales):	No
-------------------------------------------------------------------------------------------	----

Transferencia de unidad a unidad (comparte datos con unidades similares de forma inalámbrica):	No
Visor de imágenes:	No

### 3.4.4 ESTRUCTURA DE AFORO PARA MEDICION DE CAUDALES.

#### CANAL TRAPEZOIDAL DE FLUJO SUPERCRÍTICO<sup>39</sup>

##### DISEÑO GENERAL

Flujos Supercríticos con canales de muros laterales verticales, tiene relaciones en la cabeza de descarga que son insensibles a las bajas corrientes. El flujo de sección rectangular limita el alcance de los apreciables vertidos disponibles para cualquier tamaño. Al inclinarse las paredes laterales de modo que el ancho de suelo es más estrecho que la anchura superior en todas las secciones transversales, la sensibilidad de la medida, así como la gama de descarga que pueden ser alojados por el canal pueden ser aumentados.

<sup>39</sup> Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey Pag 19.



Si no fuera por la grave contracción de ancho en el extremo corriente abajo de la recta convergente, el caudal crítico se produciría en la interrupción de la inclinación en el extremo corriente abajo del acceso recto; el flujo supercrítico sería transversal en todas las secciones abajo del acceso recto. Para todos pero de sobremanera para bajos flujos, la fuerte constricción de ancho resultante de la utilización de un ángulo de convergencia o de  $21,8^\circ$  causa remanso que se extiende aguas arriba en el acceso recto. Como resultado de ello, la profundidad crítica se produce en la sección transversal más limitada de la recta convergente, mientras que el flujo es subcrítico en el acceso y en la recta convergente y supercrítico en la garganta recta.

El objetivo de la recta convergente es obtener un incremento de velocidad en el fondo crítico de la sección trasversa y por ende reducir la probabilidad de deposición de desechos en esa sección; tal deposición podría afectar a la relación de la cabeza de descarga en la garganta del canal.

### **GENERALIDADES<sup>40</sup>**

Es conveniente indicar algunas generalidades acerca de los canales trapecoidales de flujo supercrítico:

1. El canal debe ser cuidadosamente alineado en el canal natural, y no debería limitarlo por más de 40 por ciento, de preferencia menos.
2. Suave y gradualmente la convergencia de las paredes laterales de la la debe utilizarse para proporcionar una transición sin tropiezos desde el canal natural para la cabeza del canal.
3. La longitud del canal no debe ser más de dos o tres veces la cabeza máxima prevista (fondo vertical) a la cabeza de medición de la sección transversal. Una excesiva longitud del canal pueden producir una serie de ondas que viajan por la longitud del canal.
4. Las paredes laterales deben tener una pendiente de al menos 30 % con la horizontal; paredes laterales planas induce perturbaciones de ondas.
5. Para garantizar el flujo supercrítico, el piso de la convergencia y la garganta debe tener una pendiente entre el 3 y el 5 por ciento en la dirección corriente abajo.
6. Canales de flujo supercrítico deben diseñarse e instalarse en el canal natural para funcionar parcialmente sumergidos en las corrientes más altas para evitar la socavación excesiva abajo y el exceso de remanso aguas arriba.
7. El factor de control de la altura de las paredes laterales es el valor crítico de la profundidad de la garganta de sección transversal que corresponde a la máxima descarga para que el canal está diseñado. Profundidad que se produce

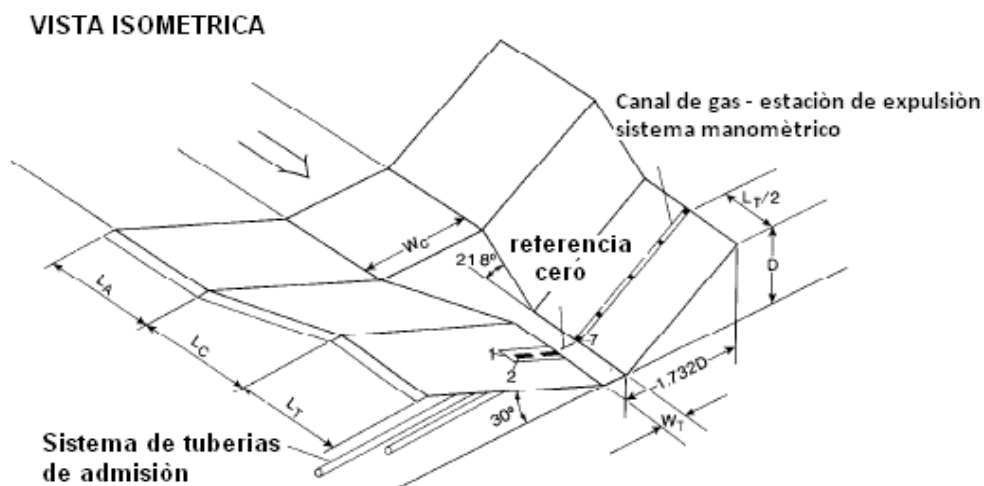
---

<sup>40</sup> Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey Pag 20

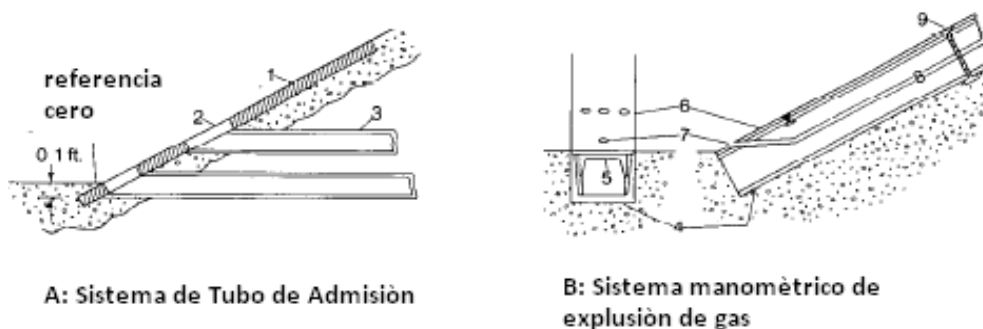
en la cabeza de la garganta de llegada. En consecuencia, la altura vertical, de las paredes laterales deben ser iguales que los críticos más un fondo de 0,3 pies libres del borde para dar cabida a la acción y el aumento de las olas.

8. La cabeza debe ser medida en la mitad de longitud de sección transversal de la garganta recta.
9. Todos los canales deben ser de sólida construcción, preferentemente de hormigón armado. Si el canal no se construye sobre cimientos, debe haber protección de socavación inmediatamente abajo de la estructura.
10. A menos que se empleen amplias medidas de protección, los canales de flujo supercrítico no deben utilizarse en los canales de arena, estos canales están destinados a ser utilizados en la medición de la roca y los desechos que vienen cargados en la corriente, típica de los arroyos de las montañas más escarpadas.

**Figura 3. 4:** Vista Isométrica del Aforador.



**Figura 3. 5:** Vistas de la sección del sistema manométrico de expulsión de gas



1. Chapa de acero, 1/2 pulgada.
2. Ranura de entrada, 1/2 pulgadas de ancho, buen acabado.
3. Tuberías de admisión, 2 ½ a 3 pulgadas de diámetro.
4. Canal de acero de hierro fraguado en hormigón.
5. Canal de refuerzo de acero.
6. Cubierta de acero con placa de ¼ de pulgadas de diámetro.
7. Orificio del tubo.
8. Línea de gas convencional, tubo de plástico.
9. Pernos establecidos para permitir la eliminación de la placa

### 3.5 METODOLOGIA

#### INTRODUCCION

Los métodos de investigación que se han seguido para alcanzar la gama de objetivos propuestos en el documento pretenden efectuar una observación y análisis al interpretar los datos obtenidos de los diferentes equipos de medición. Para ello se ha seguido un proceso de investigación, que sigue las técnicas necesarias para llevar a cabo la recopilación, el procesamiento, el análisis de datos y la de terminación de las conclusiones en base a los resultados obtenidos.

Para esto se ha seguido un esquema de trabajo de la siguiente manera:

1. Delineado de un mapa de la microcuenca, en donde se define los distintos tipos de cobertura vegetal existentes en la zona de estudio.
2. Recolección de información registrada en los cuatro últimos años, tanto de registros pluviográficos, como datos de la estación ISCO.
3. Medición de las precipitaciones, a partir del monitoreo de los datos registrados por el pluviógrafo, y la aplicación del programa estadístico R para la determinación más puntual de los mismos en un régimen de tiempo correcto para el análisis de los datos en conjunto.
4. Lecturas de nivel del agua, tomadas por la estación ISCO, instalada en la sección de la estructura de aforo, cuya ecuación de transformación es conocida. Para la debida determinación de los caudales líquidos que han pasado por el aforador.
5. Construcción de la curva de descarga de sólidos en suspensión, a través de las concentraciones de sólidos de las muestras recolectadas en la sección de la estructura de aforo y el respectivo análisis en laboratorio de las mismas.
6. Determinación de los caudales sólidos, a partir del caudal líquido y la curva de descarga de sólidos determinada previamente.
7. Calculo de la cantidad de sedimentos producidos por año y por hectárea en la microcuenca de Turupamba en base a los resultados obtenidos anteriormente.

### 3.5.1 DELINEADO DE LA CUBIERTA VEGETAL

La información cartográfica especialmente la de topografía utilizada para el estudio corresponde a la misma que fuera restituida por el IGM para el proyecto INECCEL - UMACPA, dicha restitución fue realizada en una escala 1:25000, con curvas de nivel cada 20 metros.

Para efectos de caracterizar el tipo de cobertura vegetal y uso de suelo se parte de levantamientos en campo mediante recorridos y medición de georeferenciación con sistemas de posicionamiento global GPS, y mediante el manejo de programas computacionales como Map Source y Autocad, se traza un mapa de cobertura vegetal y uso de suelo mismo que se presenta en el ANEXO 2 de este documento.

Este mapa de caracterización del área de estudio y de cobertura vegetal se utiliza para estimar el grado en el que, tanto la vegetación existente en la zona, como el aprovechamiento que el hombre hace del suelo favorecen al desarrollo de los procesos erosivos que se dan en la zona.

En cuanto al mapa geológico de Azogues que se presenta en el ANEXO 1 es empleado para revisar e identificar la información litológica, y establecer una caracterización de la misma en función de los parámetros importantes que le hacen al suelo vulnerable a la erosión ya que este es un elemento principal en lo que a producción de sedimentos se refiere.

### 3.5.2 MEDICION DE PRECIPITACIONES

Para la determinación de las precipitaciones se cuenta con una estación de medida, dotada de un pluviógrafo, el cual registra valores continuos de la precipitación y duración de los eventos de lluvia.

La tasa máxima de las precipitaciones que el pluviógrafo inteligente puede medir con precisión es de una pulgada de lluvia por hora. Por lo tanto, el indicador de lluvia debe ser calibrado en el campo, utilizando un caudal de agua equivalente, o inferior a una pulgada de lluvia por hora.

El monitoreo del registro de datos se realiza mediante el programa estadístico R, con un intervalo de tiempo de 5 minutos, así se tienen datos de precipitación cada cinco minutos, en tanto para la obtención de la intensidad se emplea la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{(t_2 - t_1) * 1440} * 60 \quad (2.63)$$

Donde:

I Es la intensidad en mm/h.  
P Es la precipitación en mm.  
 $t_1$  y  $t_2$  Es el tiempo en minutos.

### 3.5.3 MEDICION DE NIVELES DE AGUA EN AFORADOR

Para estimar caudales en cursos naturales o artificiales, existen distintos métodos, cada uno con su respectivo procedimiento, para nuestro análisis se determinó el caudal por medio de curvas de descarga líquida, y medición de los niveles de agua.

#### **Determinación del caudal líquido a través de curvas de descarga líquida y medición de niveles de agua**

Este método es el más difundido a lo largo del mundo, pues requiere de la medición del nivel del agua para determinar el caudal líquido a través de una expresión matemática que define la curva de descarga líquida de la sección transversal de estudio que ha sido previamente establecida, la misma que puede ser natural o artificial.

El lugar donde se establezca la sección de control debe ser cuidadosamente analizado, a fin de obtener una relación correcta entre el nivel y caudal del agua.

#### **Condiciones que debe reunir una estación de aforo**

- Debe de estar situada sobre un tramo recto del río, que cuente con una sección uniforme y una pendiente constante a lo largo del río.
- La dirección de la corriente en la sección, debe de ser paralela a la del río, a su vez debe ser coincidente con la dirección del cable.
- En lo posible la sección debe ser fácilmente accesible
- La sección de aforo debe tener una distribución pareja de velocidades, evitándose aquellas en que existan sectores de altas velocidades, aguas muertas, contracorrientes o remolinos, tampoco conviene utilizar secciones con lechos fangosos o con mucha vegetación, secciones en curva de los ríos deben evitarse.
- La vegetación excesiva no poder evitarse, debe quitarse periódicamente, además de bien eliminarse ciertos obstáculos como matorrales en las orillas y piedras grandes situadas en el lecho de sectores de poca profundidad.

Para el desarrollo del presente análisis, se conocía previamente la ecuación de la curva de descarga líquida de la estación, dicha ecuación es la siguiente:

$$Q = 3,0958 \left( \frac{Y_a}{1000} \right)^{3,1331} 1000 \quad (2.64)$$

Donde:

Q es el caudal líquido, expresado en litros por segundo (lit/seg).

Ya es el nivel del agua, expresado en milímetros, (mm).

### 3.5.4 DETERMINACION DEL CAUDAL DE SOLIDOS EN SUSPENSION

A continuación se describe el procedimiento para determinar el caudal de sólidos en suspensión.

- Recolección de muestras
- Determinar la concentración de sólidos
- Construcción de la curva de descarga.

#### **3.5.4.1 RECOLECCION DE MUESTRAS.**

Esta recolección de muestras se realiza con el fin de obtener datos de la carga en suspensión, para estimar la concentración de sedimentos en la sección de aforo. Este muestreo se realiza de forma automática, mediante el empleo de la estación ISCO.

##### **Muestreo con la estación ISCO**

Para realizar una correcta medición de la producción de sedimentos, es necesario instalar un dispositivo que intercepte el flujo superficial del agua que transporta las partículas de suelo, y disminuya la velocidad de la agua a fin de propiciar la sedimentación de las partículas, y facilite la medición del volumen de material sedimentado.

Una de las ventajas de esta estación es que permite tomar muestras en forma automática, gracias a una bomba de succión e impulsión, un sistema recolector y de almacenaje de botellas, pudiendo tomar hasta 24 muestras.

La capacidad de cada botella es de un litro, permitiendo calibrar el volumen de la muestra a tomar, siendo recomendable recolectar el volumen de 1 litro.

En función del desnivel entre la estación y el punto de recolección de la muestra, y de la longitud de la manguera se deberá ajustar la cabeza de succión de la bomba para la recolección de la muestra. La toma de muestras puede ser regulada ya sea en función del volumen de agua que ha atravesado la sección de control o a nte incrementos o descensos del nivel del agua en intervalos de tiempo determinados.

Cuando se desea tomar muestras en función del volumen de agua previamente se deberá obtener la curva de descarga líquida para la sección de análisis, cuya ecuación es introducida en la memoria electrónica de la estación ISCO, con dicha ecuación y con el tiempo transcurrido desde su programación calcula el volumen correspondiente que ha circulado por la sección, una vez que este volumen es igual al volumen preestablecido para la toma de muestras se inicia dicha operación.

Cada vez que se produce una crecida por encima de niveles predeterminados, se disparan los muestreadores, recogiendo el agua con material en suspensión a intervalos de tiempo variables, mínimo de dos minutos programados según criterio de experiencias anteriores.

Para la obtención de muestras cuando se producen variaciones en el nivel del agua dentro de un intervalo de tiempo se programa la estación según el rango de variación y el tiempo requerido. Esta variación puede ser en aumento como en descenso del nivel, generalmente este tipo de estudios se denominan análisis de eventos, en su mayor parte se considera para grandes variaciones de nivel del agua en intervalos de tiempo relativamente pequeños llamándose análisis de eventos extremos. Estas

estaciones se pueden programar con hasta 1000 eventos de ocurrencia para la toma de muestras.

Además es posible la toma de muestras en un instante cualquiera, y adicionalmente se puede calibrar opciones de auto limpieza para la bomba y las mangueras colectoras de las muestras.

### 3.5.4.2 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS

Una vez tomadas las muestras, estas son llevadas al laboratorio, para determinar la concentración de los sólidos en suspensión de las mismas. A partir de un amplio registro de estos resultados y de los datos de nivel obtenidos en el campo por la estación ISCO, en el momento de la toma de muestras, se procede a construir una curva que relacione el caudal líquido y la concentración de sedimentos en suspensión, a fin de establecer una relación matemática que permita estimar la concentración de sólidos para los datos de caudal líquido registrados a lo largo de todo el tiempo de monitoreo.

### 3.5.4.3 CONSTRUCCION DE LA CURVA DE DESCARGA DE SEDIMENTOS

Para construir esta curva de descarga de sólidos en suspensión, es necesario determinar el caudal de sólidos, el mismo que se obtiene a partir del caudal líquido y la concentración de sólidos, a través de la ecuación:

$$Q_s = (C_s)_{media} * Q \quad (2.65)$$

Donde:

Cs = Concentración de sólidos en suspensión medida en gr/lit

Q = Caudal líquido en lit/s

Qs = Caudal de sólidos en gr/s

## 3.6 LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

### 3.6.1 RECOLECCION DE DATOS DEL PLUVIOGRAFO

Los datos de lluvia necesarios para el análisis de la microcuenca del Turupamba fueron obtenidos de las mediciones registradas por el pluviografo OFSET por un periodo de 4 años, el mismo que se encuentra ubicado en las coordenadas X= 733499; Y= 9698913, contando así con un registro desde el mes de Junio del 2005 hasta Marzo del 2009. Parte de dichos datos fueron proporcionados de la base de datos ubicada en el PROMAS y el complemento de los mismos fueron obtenidos directamente de la estación pluviográfica ubicada en la microcuenca de estudio.

Estos datos se encuentran en el ANEXO 3 de este documento.

### **3.6.2 CAMPAÑA DE MUESTREO Y MEDICION DE NIVELES**

Para este propósito como fue descrito anteriormente se utilizó la estación de muestreo ISCO, la cual se encuentra ubicada en las coordenadas  $X = 734198$ ;  $Y = 9698957$ , la misma que como en el caso anterior tiene un registro de niveles de 4 años pero no con datos continuos, sino en intervalos de datos desde Junio del 2005 hasta Abril del 2006, desde Enero del 2007 hasta Mayo del 2008, y el último intervalo que fue completado en el desarrollo de este documento que va desde Octubre del 2008 hasta Marzo del 2009. Los datos no registrados entre esos intervalos de meses faltantes se deben a problemas con la estación de muestreo en cuanto a su funcionamiento o su requerimiento en otro sector de estudio, y se presentan los registros de estos periodos en el ANEXO 3.

En cuanto a las muestras extraídas en los eventos producidos en la microcuenca de Turupamba, se cuenta con un total de 132 muestras, las mismas que fueron analizadas en laboratorio para la determinación de la concentración de sólidos que contenía cada una de ellas, y así poder determinar una ecuación que pueda predecir el Caudal de sólidos que se produciría de acuerdo al caudal por un evento precipitación.

Los resultados de los análisis de dichas muestras se encuentran en el ANEXO 4 de este documento.



## CAPITULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN HIDROLOGICA DE LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA

En base a lo descrito en la sección 2.2 de este documento, se procedió a determinar los parámetros de la microcuenca de Turupamba, con la finalidad de caracterizarla y de comprender los factores geomorfológicos e hidrológicos que puedan afectar la producción de sedimentos de la misma.

##### De la sección 2.2.1

**Tabla 4. 1:** Área de drenaje de la microcuenca del Turupamba.

AREA DE DRENAJE		
	m2	Km2
Área (A)	5435600,86	5,43

A partir de este resultado se puede definir que la microcuenca de Turupamba es pequeña debido a su área reducida.

##### De la sección 2.2.2

**Tabla 4. 2:** Morfometría lineal de la microcuenca del Turupamba.

MORFOMETRIA LINEAL		
	m	km
Perímetro (Pc)	10008,6	10,009
Long. Cauce Principal (Lc)	3416,77	3,42
Longitud max entre extremos (Lm)	3848,32	3,85

Longitud max entre extremos y desagüe (L)	3848,32	3,85
Longitud Intermedia (L10-85)	2562,58	2,56
Ancho Máximo (A)	2347,6	2,35
Ancho Medio (Am)	1412,46	1,41

### De la sección 2.2.3

**Tabla 4. 3:** Parámetros de forma de la microcuenca del Turupamba.

FORMA		
Relación de Forma	Rf =	0,37
Relación Circular	Rc =	0,682
Índice de Compacidad	Gravelius	
	Kc =	1,20
Radio de Elongación	Re =	0,68

El Factor de forma de Horton calculado, indica que la microcuenca tiende a ser circular; por lo tanto es propensa a presentar crecidas súbitas, cuando se presenten lluvias intensas simultáneamente en toda o en gran parte de su superficie.

El Coeficiente de elongación, da una idea de un relieve pronunciado, que comparado con la relación de circularidad, que indica que la cuenca posee una forma oval oblonga, constituye un riesgo porque puede presentar altos grados de erosión y características un tanto torrenciales y por ende peligrosas.

## De la sección 2.2.4

**Tabla 4. 4:** Parámetros del relieve de la microcuenca del Turupamba.

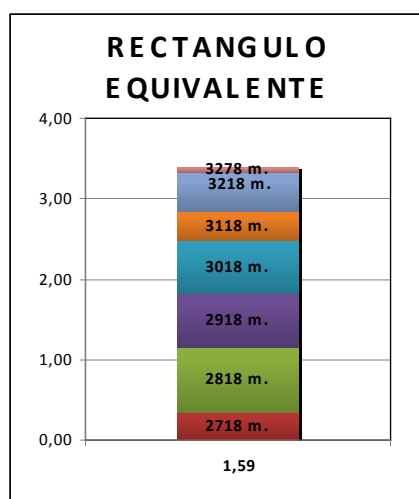
RELIEVE			
Elevación Máxima	3278 m.s.n.m.	Cota max Río	3098 m.s.n.m.
Elevación Mínima	2624 m.s.n.m.	Cota min Río	2624 m.s.n.m.
Elevación Promedio	2951 m.s.n.m.		
Desnivel Cuenca	654 m		

Para Obtener La Altitud Media Según Heras							
Curvas de Nivel				Longitud curva (m)	$\Delta h_i$ (km)	$S_i$ (Km)	$\Delta h_i$ (km) x $S_i$ (Km)
2624	a	2718	m	3286,106	0,047	3,286	0,154
2718	a	2818	m	4487,879	0,050	4,488	0,224
2818	a	2918	m	3651,381	0,050	3,651	0,183
2918	a	3018	m	2954,217	0,050	2,954	0,148
3018	a	3118	m	2028,455	0,050	2,028	0,101
3118	a	3218	m	532,396	0,050	0,532	0,027
3218	a	3278	m	100	0,030	0,100	0,003
						$\Sigma=$	0,84
Pendiente media según Heras =						0,155	
Pendiente media según Llamas =						0,131	
Pendiente media según Benson =						0,119	

Pendiente del Río	0,139
Relación del Relieve	Schumm
	Rr 0,170
Rectángulo Equivalente	

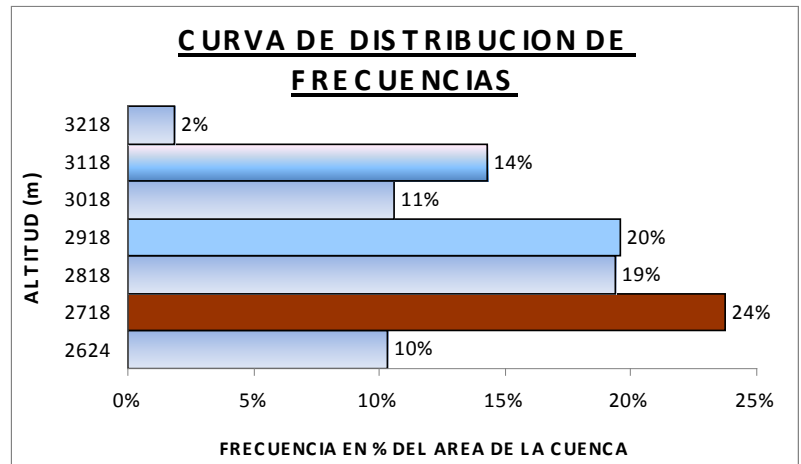
<b>RECTANGULO EQUIVALENTE</b>			
LADO MAYOR =	3,41	Km	
LADO MENOR=	1,59	Km	
CURVAS DE NIVEL	Ai/LADO MENOR		
3278,00	0,06	Km	A1/LADO MENOR
3218,00	0,55	Km	A2/LADO MENOR
3118,00	0,91	Km	A3/LADO MENOR
3018,00	1,58	Km	A4/LADO MENOR
2918,00	2,24	Km	A5/LADO MENOR
2818,00	3,05	Km	A6/LADO MENOR
2718,00	3,40	Km	A7/LADO MENOR

**Figura 4. 1:** Rectángulo Equivalente de Turupamba



**Figura 4. 2:** Curva de Distribución de Frecuencias

<b><u>CURVA DE DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS</u></b>	
<b>ALTITUD</b>	<b>%</b>
2624,00	10
2718,00	24
2818,00	19
2918,00	20
3018,00	11
3118,00	14
3218,00	2

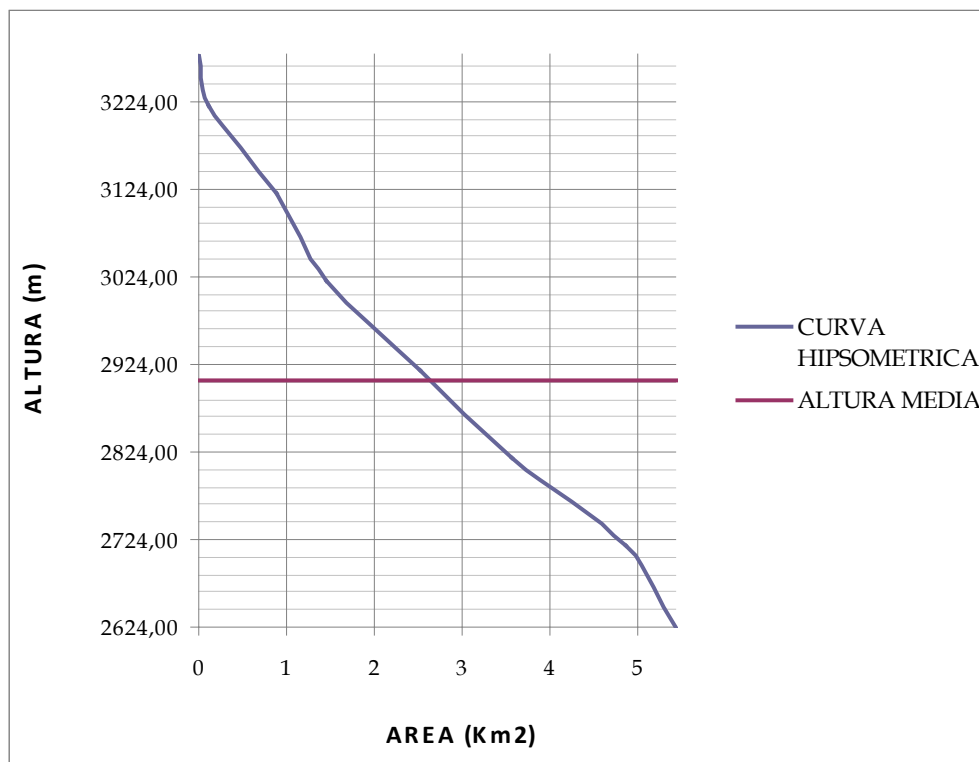


<b><u>INDICE DE PENDIENTE</u></b>					
		<b>%</b>	<b>AH<sub>i</sub></b>	<b>INDICE</b>	
<b>H1=</b>	2624,00				
		0,10	<b>B1</b>	10	94,00
<b>H2=</b>	2718,00				
		0,24	<b>B2</b>	24	100,00
<b>H3=</b>	2818,00				
		0,19	<b>B3</b>	19	100,00
<b>H4=</b>	2918,00				
		0,20	<b>B4</b>	20	100,00
<b>H5=</b>	3018,00				<b>0,43</b>
		0,11	<b>B5</b>	11	100,00
<b>H6=</b>	3118,00				
		0,14	<b>B6</b>	14	100,00
<b>H7=</b>	3218,00				
		0,02	<b>B7</b>	1,88	60,00
<b>H8=</b>	3278,00				

### Curva Hipsométrica

CURVA HIPSOMETRICA			
	m	(Km <sup>2</sup> )	
Por encima de	3278,00	0	0
Por encima de	3218,00	0,10	A1
Por encima de	3118,00	0,88	A2
Por encima de	3018,00	1,45	A3
Por encima de	2918,00	2,52	A4
Por encima de	2818,00	3,57	A5
Por encima de	2718,00	4,86	A6
Por encima de	2624,00	5,42	A7

**Figura 4. 3:** Curva hipsométrica de Turupamba



Relación Hipsométrica	0,998
Índice de alargamiento	0,71

Estos resultados presentan pendientes altas del cauce, lo que indica que las aguas que circulan por esta microcuenca están siendo sometidas a velocidades considerables, que influyen en la erosión de mismo, la socavación de los taludes adyacentes y en consecuencia el transporte de sedimentos. Lo que validaría el proyecto realizado en la microcuenca de Turupamba por la UMACPA para estabilizar los cauces mediante el empleo de los muros de gaviones.

Como ya se mencionó que la relación hipsométrica es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca, y en este caso al aproximarse a la unidad, se deduce que la microcuenca del Turupamba está en equilibrio dinámico, y además por la forma obtenida se concluye que la microcuenca está en la etapa de madurez.

### De la sección 2.2.5

La orientación de la microcuenca está regida por la dirección del cauce principal, mismo que corre en dirección Oeste-Este, por lo cual se asume que la microcuenca en función del clima que se presente tiene las siguientes características:

- El número de horas que está soleada la microcuenca es de 12 horas ya que el sol sale por el Este y se oculta por el Oeste, tomando como que este proceso se dé entre las 6 am y 6 pm en promedio.
- No existe diferencia de influencia del sol en ninguna de las caras por la forma de orientación de la microcuenca.
- En cuanto a la dirección de los vientos dominantes, la dirección del movimiento de los frentes de lluvia y los flujos de humedad son aspectos que tienen características similares y que no afecta en gran magnitud cual sea la dirección que estos adquieran, debido que al tener la microcuenca la misma incidencia de sol, estos van a generar las mismas reacciones a la superficie de la microcuenca, tanto por su orientación como por su área pequeña.

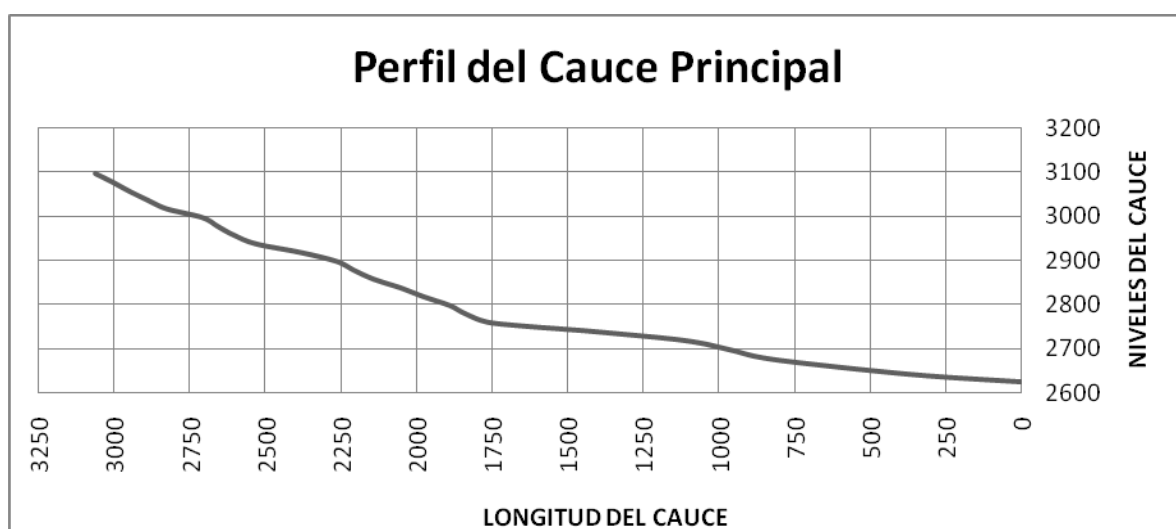
### De la sección 2.2.6

**Tabla 4. 5:** Parámetros del drenaje de la microcuenca del Turupamba.

DRENAJE		
	Long ríos (km)	Dd
Densidad de Drenaje (Dd)	9,2783	1,71

Constante de Estabilidad del Cauce (C)	0,586	
Densidad de corriente	Schumm	
	Dc	0,59
Densidad Hidrográfica (Dh)	Nº canales	Dh
	14	2,58
PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL		

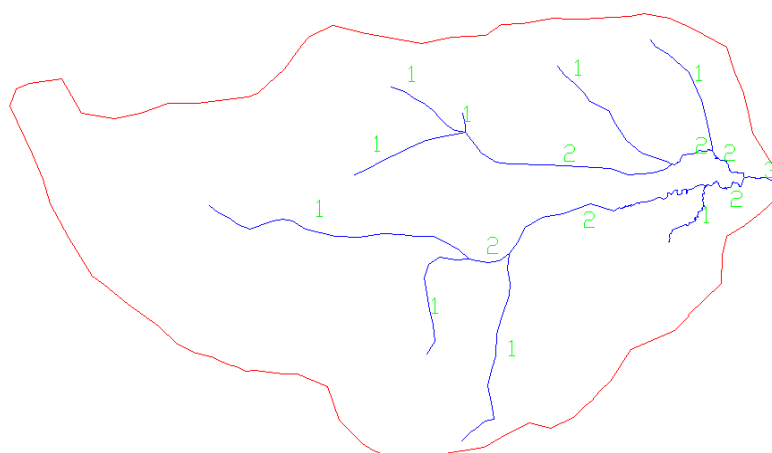
**Figura 4. 4:** Perfil del cauce principal



Orden de las corrientes	Nª de las corr.	Long de las corr.
1	9	6,19902
2	6	3,59926
3	1	0,20244



**Figura 4. 5:** Orden de la Microcuenca



Relación o radio de bifurcación

Un	Rb (parcial)
9	
6	1,5
1	6
Rb =	3,75

Los resultados obtenidos dan una baja constante de estabilidad, o una elevada densidad de drenaje, lo que se traduce en una microcuenca constituido por rocas débiles, escasa cobertura vegetal y baja capacidad de infiltración del suelo, lo que le hace susceptible a procesos de erosión.

**De la sección 2.2.7**

### TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.

**Tabla 4. 6:** Tiempo de concentración de la microcuenca del Turupamba.

Formulas Empíricas (en minutos)		
Californiana del U.S.B.R:	27,38 min	
Kirpich	21,90 min	
Giandotti	49,78 min	
Ventura-Heras	$\alpha = 0,04$	$\alpha = 0,1335$ (valores de $\alpha$ )

	40,33	134,62 min
Passini	$\alpha = 0,04$	$\alpha = 0,1335$ (valores de $\alpha$ )
	17,06	56,95 min
Temez	66,7 min	
Californiana Culver Practice	3,19 min	

El valor del Tc es muy variable con las fórmulas teóricas por lo cual será apreciado de mejor manera al analizar y comparar los registros de precipitación y caudal.

## 4.2 IDENTIFICACION DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA

Una vez realizados los recorridos y con la ayuda del GPS se procedió al delineamiento de la cobertura vegetal existente en la microcuenca de Turupamba obteniendo el siguiente resultado.

**Tabla 4. 7:** Tipos de cobertura vegetal en la microcuenca del Turupamba.

COBERTURA VEGETAL DE TURUPAMBA		
Tipo de Cobertura	Área Cubierta (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Mixta (pasto y cultivos)	3,939	72,46
Bosque (eucalipto)	1,265	23,28
Nativa (arbustos de montaña)	0,232	4,26
<b>TOTAL</b>	<b>5,436</b>	<b>100</b>

Un mejor detalle del tipo de cobertura con su correspondiente extensión se exhibe en el Mapa de Cobertura Vegetal de la Microcuenca de Turupamba presentado en el ANEXO 2 de este documento.

## 4.3 REGISTROS OBTENIDOS EN LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA

Se tiene para la microcuenca de Turupamba los siguientes registros de precipitación, niveles de caudal y concentración de sólidos observados a partir de Junio de 2005 hasta Marzo de 2009, con un registro continuo en cuanto a los datos de precipitación, tres periodos de datos en cuanto a niveles, y muestras de concentración de sólidos en los eventos más importantes de lluvias.

**Tabla 4. 8:** Datos recopilados de la microcuenca del Turupamba.

DATOS RECOPIRADOS					
MES	AÑO	PRECIPITACION	NIVELES DE CAUDAL	Nº de Muestras de Cs	OBSERVACIONES
Datos extras				18	De Nov/2004 a Jun/2005
Junio	2005	x	x	5	Los datos empiezan el 16 del mes
Julio	2005	x	x	3	
Agosto	2005	x	x		
Septiembre	2005	x	x		Del 11 al 26 no hay datos de niveles
Octubre	2005	x	x	5	
Noviembre	2005	x	x	9	
Diciembre	2005	x	x	17	
Enero	2006	x	x		Del 1 al 18 no hay datos de niveles.
Febrero	2006	x	x		
Marzo	2006	x	x	12	
Abril	2006	x	x		
Mayo	2006	x	-----		A partir del 18 no hay datos de niveles.
Junio	2006	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Julio	2006	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Agosto	2006	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Septiembre	2006	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Octubre	2006	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Noviembre	2006	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Diciembre	2006	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Enero	2007	x	x		
Febrero	2007	x	x		
Marzo	2007	x	x		
Abril	2007	x	x	6	
Mayo	2007	x	x		
Junio	2007	x	x		Del 6 al 19 no hay datos de niveles
Julio	2007	x	x		Del 12 al 20 no hay datos de niveles.
Agosto	2007	x	x		
Septiembre	2007	x	x		
Octubre	2007	x	x		
Noviembre	2007	x	x		
Diciembre	2007	x	x		Del 2 al 20 no hay datos de niveles.
Enero	2008	x	x		
Febrero	2008	x	x	21	
Marzo	2008	x	x		
Abril	2008	x	x		
Mayo	2008	x	x		Del 24 en adelante no hay datos de niveles.
Junio	2008	x	-----		No se dispone de la estación ISCO
Julio	2008	x	-----		No se dispone de la estación ISCO

Agosto	2008	x	-----	No se dispone de la estación ISCO
Septiembre	2008	x	-----	No se dispone de la estación ISCO
Octubre	2008	x	x	Solo hay datos del 20 al 25.
Noviembre	2008	x	x	5
Diciembre	2008	x	x	
Enero	2009	x	x	8
Febrero	2009	x	x	15
Marzo	2009	x	x	8

Para el año 2005 y en referencia a niveles se anota que la estación hidrológica estuvo en proceso de calibración y de equipamiento con la estación de muestreo automática, por lo cual los datos de niveles pueden presentar una variabilidad en cuanto a los datos reales y en comparación con los datos de los otros años de medición.

La no disponibilidad de la estación ISCO para los meses en los cuales no existen mediciones de niveles es debido a que esta estación fue requerida para el estudio de otro cauce, siendo trasladada de lugar al nuevo sitio de estudio.

Existen 18 datos extras de concentración de sólidos tomados entre los meses de Noviembre de 2004 hasta Junio de 2005 que fueron considerados para el estudio de la microcuenca de Turupamba.

#### 4.3.1 ANALISIS DE LAS PRECIPITACIONES REGISTRADAS EN LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA

En base a los registros obtenidos por la estación pluviográfica se presenta en la tabla 4.9 la precipitación mensual, semestral y anual de la microcuenca de Turupamba, datos con los que se pretende comprender el régimen de lluvia presente en la microcuenca.

**Tabla 4. 9:** Precipitaciones en la microcuenca del Turupamba.

AÑO	PRECIPITACION (mm)	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2005	MENSUAL							22,8	15	23,8	59	98,4	173
	SEMESTRAL							392					
	ANUAL												
2006	MENSUAL	69,8	53	130,4	87,8	39,2	49,8	13,2	26,4	39	61	144,2	117,8
	SEMESTRAL			430				401,6					
	ANUAL	831,6											
2007	MENSUAL	85,6	28,2	86,8	165	58,8	92,6	14,6	51,2	31	88,2	105,4	91,2
	SEMESTRAL			517				381,6					
	ANUAL	898,6											
2008	MENSUAL	95,4	162	143	151,6	114,4	63,6	36	34,6	46,4	91,4	115,6	57,2
	SEMESTRAL			730				381,2					
	ANUAL	1111,2											
2009	MENSUAL	107,2	82,4	78,4									

Estos resultados indican que en la microcuenca de Turupamba no existe una clara definición de los meses de lluvia con los de estiaje, debido a la variación de precipitaciones en la comparación de los mismos meses en los distintos años de registro; siendo más claramente visible el incremento de lluvias en los primeros semestres de cada año en comparación a la similitud de los segundos semestres.

Además se puede notar que en el año 2008 se presenta un alto registro de precipitación anual por lo cual se lo considera como un año considerablemente húmedo.

### 4.3.2 ANALISIS DEL CAUDAL vs CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS

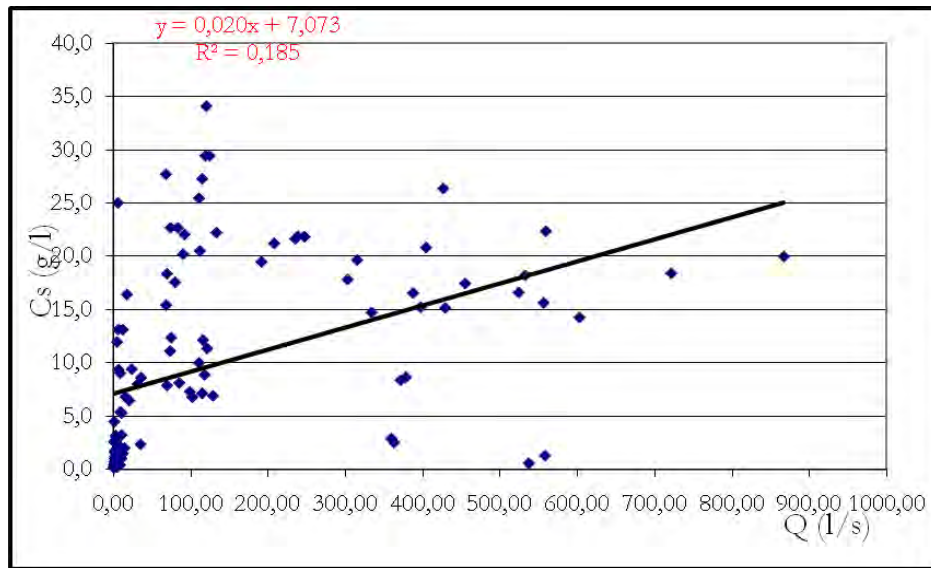
La grafica de caudal vs concentración de sólidos, corresponde a los datos obtenidos del análisis de las 132 muestras tomadas por la estación ISCO, para la determinación de una ecuación de tendencia de la concentración de sólidos de acuerdo a un caudal.

Para realizar la grafica se consideraron 111 muestras de las 132 existentes, las 21 muestras restantes no fueron consideradas porque se pueden suponer como dudosas ya que presentan un caudal alto ante la ausencia de precipitación. La lista de datos no considerados para la grafica se ilustra en la Tabla 4.10

**Tabla 4. 10:** Datos de concentración de sólidos no considerados para obtener una ecuación de tendencia de la concentración de sólidos en la microcuenca del Turupamba.

Fecha (mm-dd-aa)	Hora	Caudal (l/sg)	Concentración (gr/lt)	Caudal Sólidos (gr/sg)	Precipitación (mm)
09-mar-06	7:40:00	7,62	50,00	380,95	0
15-mar-06	19:10:00	76,08	32,35	2461,38	0
15-mar-06	19:15:00	68,49	35,29	2417,45	0
15-mar-06	20:05:00	109,14	45,56	4971,81	0
15-mar-06	20:10:00	100,81	37,71	3801,97	0
05-abr-07	17:35:00	163,18	110,18	17978,71	0,2
05-abr-07	17:40:00	163,18	61,31	10004,97	0,2
18-feb-08	16:30:00	156,86	41,25	6470,44	0
18-feb-08	18:40:00	441,32	110,00	48545,39	0
19-feb-08	18:25:00	133,91	83,68	11206,54	0
1-nov-08	14:35:00	192,40	71,05	13670,60	0
26-nov-08	0:15:00	94,18	51,94	4891,27	2,4
8-ene-09	1:30:00	69,00	45,91	3168,12	0
14-feb-09	13:50:00	90,63	172,22	15608,12	0
14-feb-09	14:20:00	146,90	158,82	23330,67	0
14-feb-09	15:20:00	216,80	79,82	17304,19	0
14-feb-09	20:55:00	210,51	36,61	7706,81	0
14-feb-09	21:10:00	241,50	52,93	12782,94	0
18-feb-09	9:40:00	169,95	32,17	5467,84	0
18-feb-09	13:00:00	114,39	7,13	815,67	0
28-mar-09	21:05:00	82,97	22,69	1882,55	0

**Figura 4. 6:** Ecuación de tendencia para la concentración de sólidos en función del caudal en la microcuenca del Turupamba.

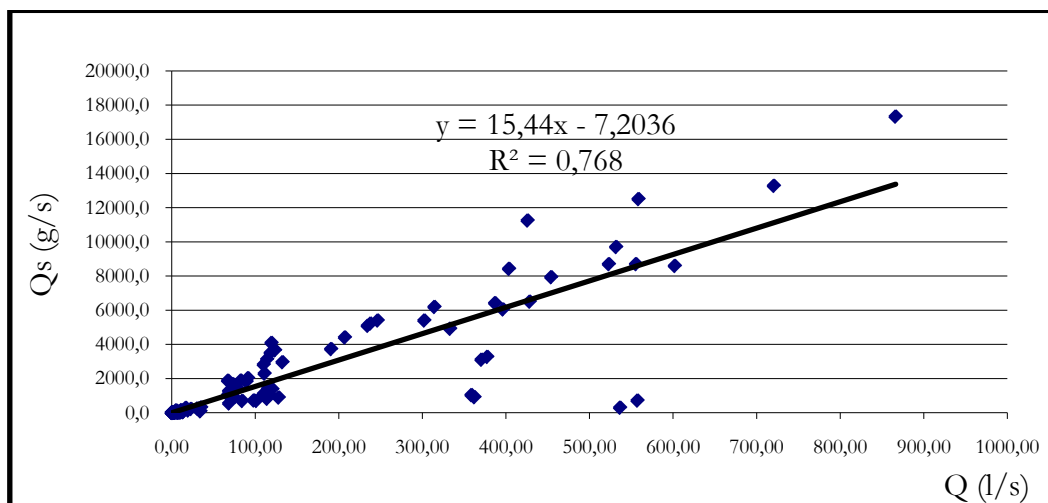


Como se puede apreciar en la Figura 4.6 el valor  $R^2$  de la ecuación no es muy bueno, lo que nos indica que las muestras obtenidas tienen un alto rango de variabilidad; ya que este debería ser superior a un valor de 0,9 para que exista una mayor congruencia en los datos.

#### 4.3.3 ANALISIS DEL CAUDAL vs CAUDAL DE SOLIDOS

La gráfica corresponde a los mismos datos utilizados para la gráfica anterior, si embargo al obtener el caudal de sólidos mediante la multiplicación de la Concentración de Sólidos ( $C_s$ ) por el Caudal ( $Q$ ), y al graficar Dicho caudal de sólidos vs el caudal de la vertiente, se obtiene una mejor aproximación de la ecuación de tendencia para que exista un mejor valor de  $R^2$ .

**Figura 4. 7:** Ecuación de tendencia para el caudal de sólidos en función del caudal en la microcuenca del Turupamba.



#### 4.3.4 DETERMINACION DE LOS CAUDALES DE SOLIDOS EN SUSPENSION PARA LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA.

En base al procesamiento de los registros obtenidos en los 3 periodos continuos de datos, mismos que han sido analizados con su promedio horario como una simplificación, ya que al tener una gran cantidad de registros (cada minuto), el análisis y presentación de resultados sería de masiado extenso y sin mayor variación al análisis horario; procediéndose así al cálculo de las CURVAS DE DESCARGAS DE SEDIMENTOS Y DE DURACIÓN DE CAUDALES para cada periodo, de las cuales se obtuvo el TOTAL DE SEDIMENTO que aporta esta microcuenca en toneladas por hectárea y por año.

La simbología utilizada para la descripción de las características en los tres eventos de tomas de muestras es:

Q50 = Caudal 50

Qmedio = Caudal Promedio

CSS = Concentración de Sólidos

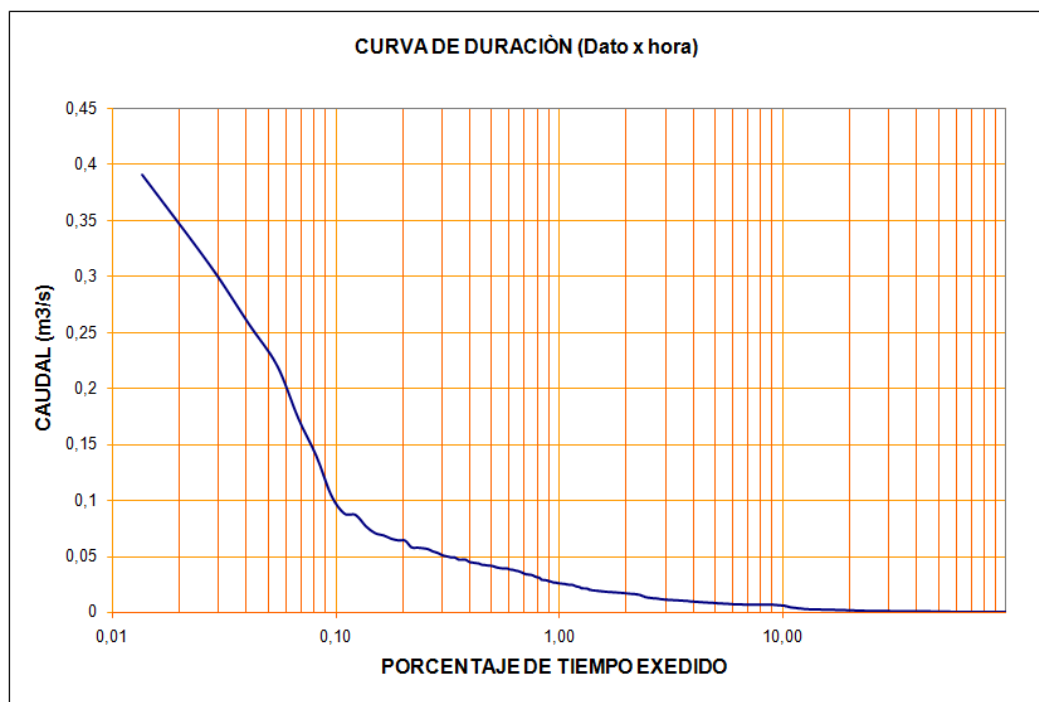
QScal = Caudal de sólidos calculado con  $(Q \times CSS)$

Q = Caudal de la quebrada

QSecu = Caudal de sólidos calculado con la ecuación de aproximación  $15,42 \cdot Q$

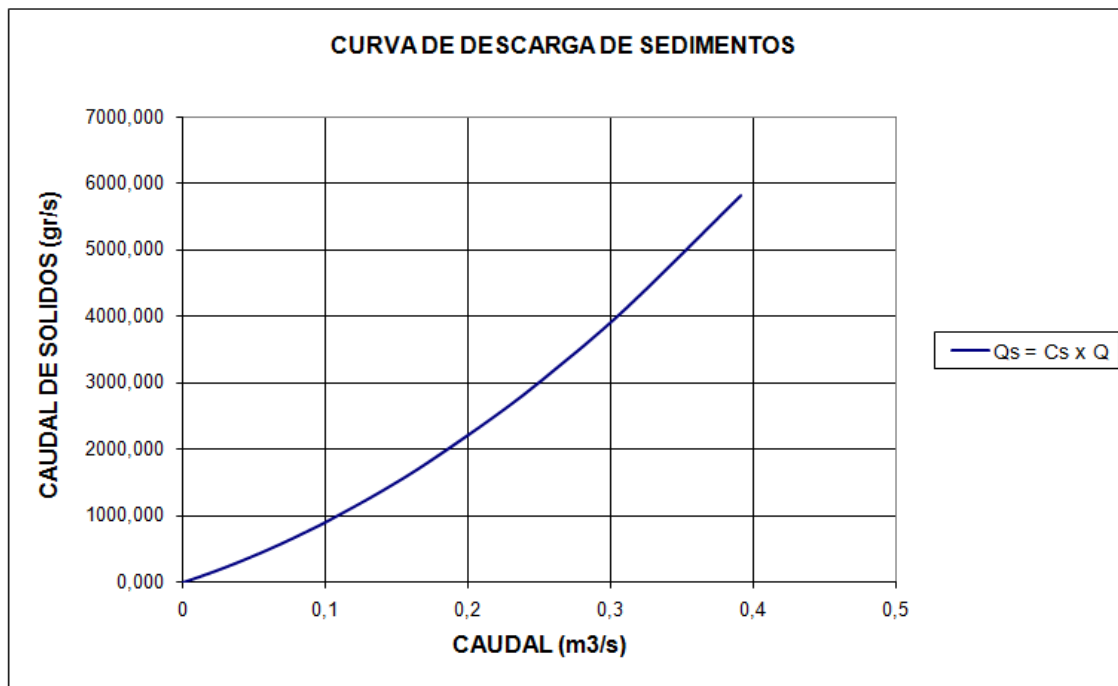
**Los resultados para el periodo de Junio de 2005 a Abril de 2006 son:**

**Figura 4. 8:** Curva de Duración de Junio 2005 a Abril de 2006

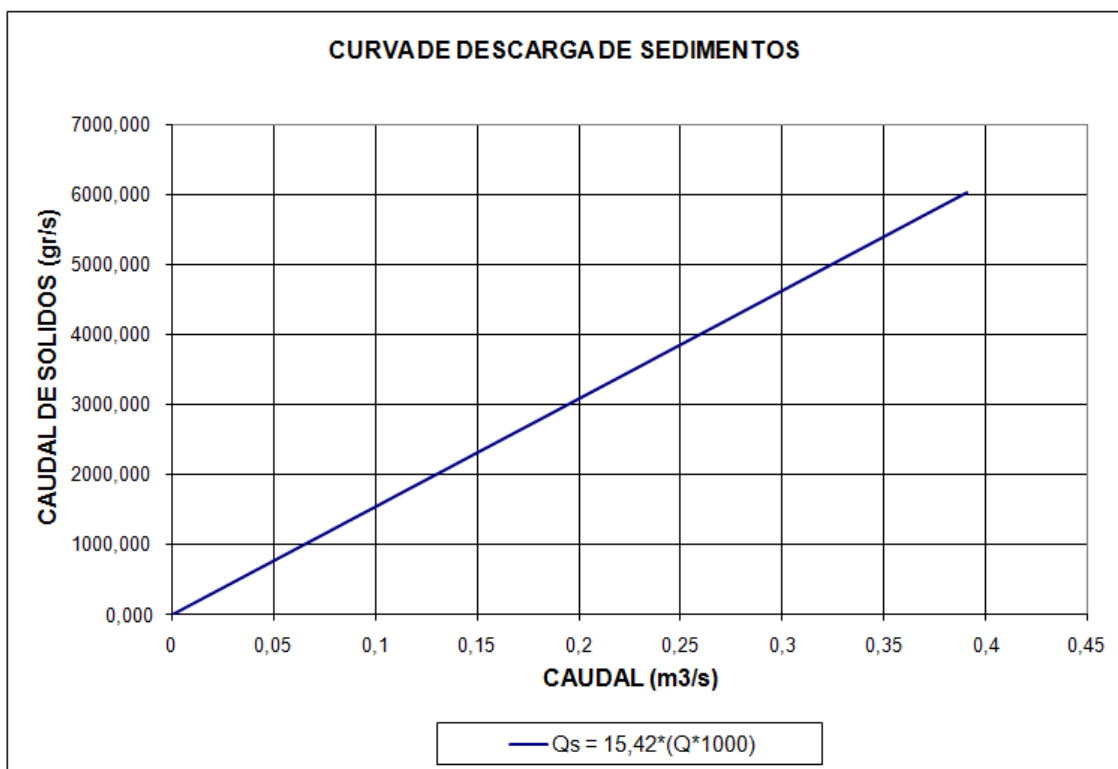




**Figura 4. 9:** Curva de Descarga de Junio de 2005 a Abril de 2006, en base a Concentración de Sólidos



**Figura 4. 10:** Curva de Descarga de Junio de 2005 a Abril de 2006, en base a Ecuación aproximada



De las Figuras 4.9 y 4.10 podemos desprender la Tabla 4.11 que nos muestra la cantidad de sólidos aportado por la microcuenca de Turupamba en para el periodo de análisis registrado.

**Tabla 4. 11:** Producción de Sedimentos para el Periodo de Junio de 2005 a Abril de 2006

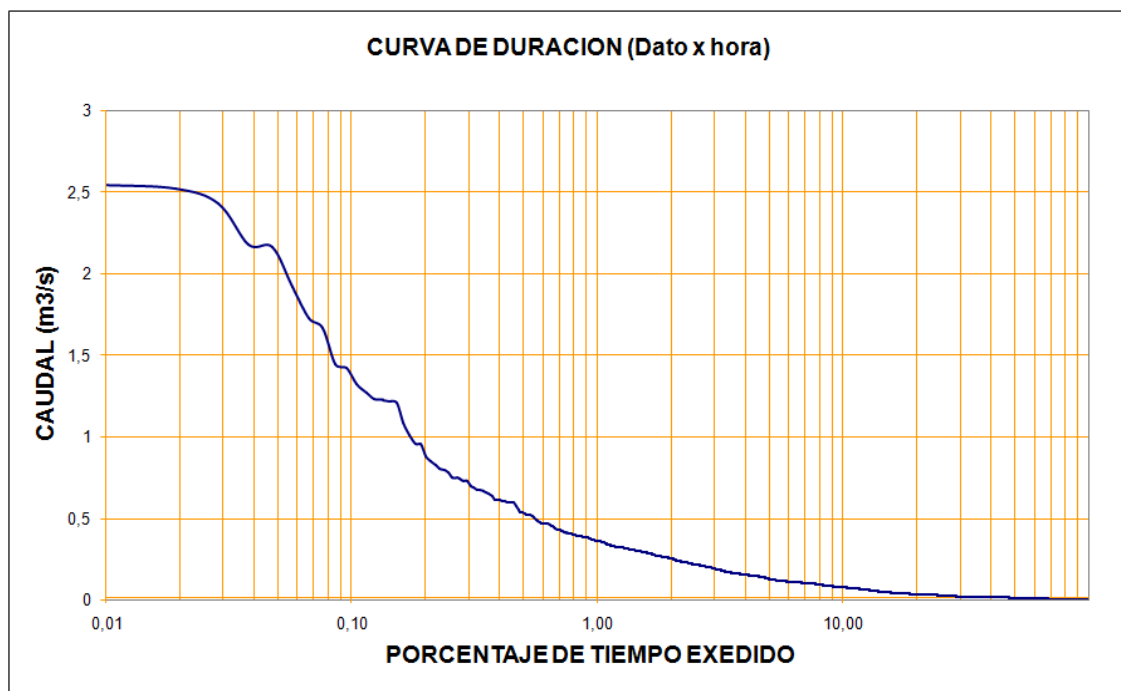
Q50 =	0,0004	m³/s
Q medio =	0,002	m³/s
CSS 50 =	7,082	g/l
CSS medio =	7,113	g/l
QS cal 50 =	3,089	g/s
QS cal medio =	15,913	g/s
QS ec 50 =	6,727	g/s
QS ec medio =	30,877	g/s

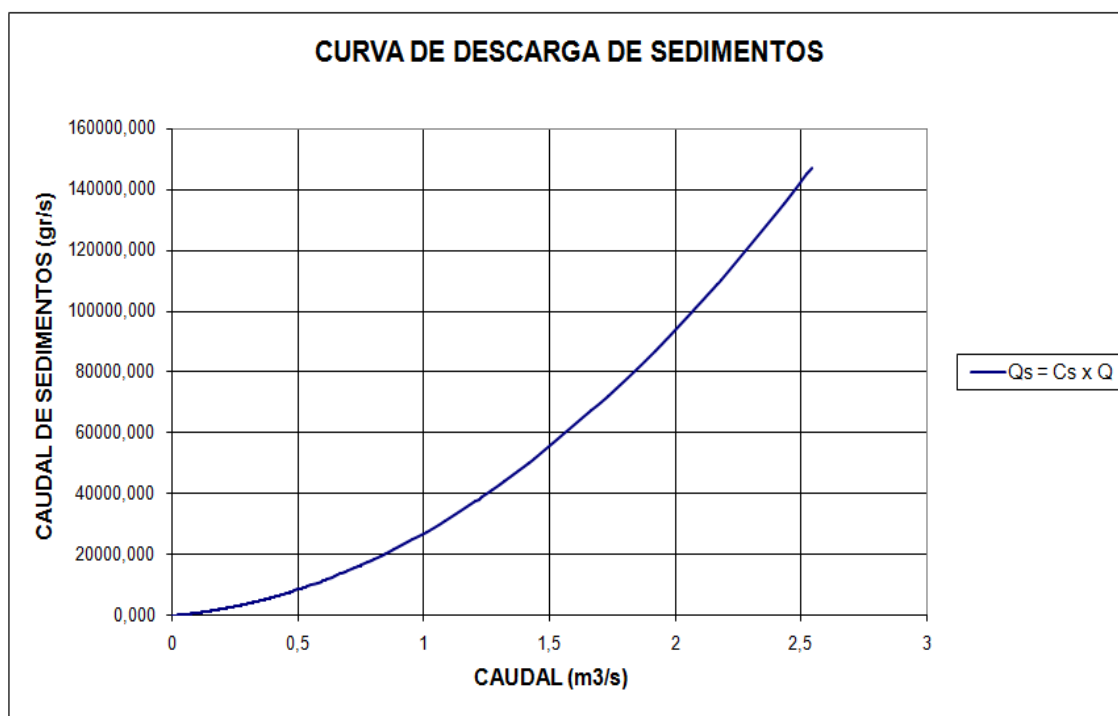
PERIODO	11 MESES =	334	DÍAS	28857600	segundos
		pesp=	2,00	tn/m3	
AREA DE CUENCA DE TURUPAMBA =	543,56			ha	
Carga de sedimentos en 11 meses =		813,23		tn	
Carga de sedimentos en 1 año =		887,16		tn	
Vol =	11028,74	m³	2005,23	tn/mes	
Vol =	12031,35	m³			
<b>TOTAL Sedimentado (11MESES con Qs ecu)</b>		1,50		<b>tn/ha/11meses</b>	
<b>TOTAL Sedimentado (1AÑO con Qs ecu)</b>		1,63		<b>tn/ha/año</b>	
Carga de sedimentos en 11 meses =		419,11		tn	
Carga de sedimentos en 1 año =		457,21		tn	
Vol =	435,09	m³	79,11	tn/mes	
Vol =	474,64	m³			
<b>TOTAL Sedimentado (11MESES con Qs cal)</b>		0,77		<b>tn/ha/11meses</b>	
<b>TOTAL Sedimentado (1AÑO con Qs cal)</b>		0,84		<b>tn/ha/año</b>	

Los resultados para el periodo de Enero de 2007 a Mayo de 2008 son:

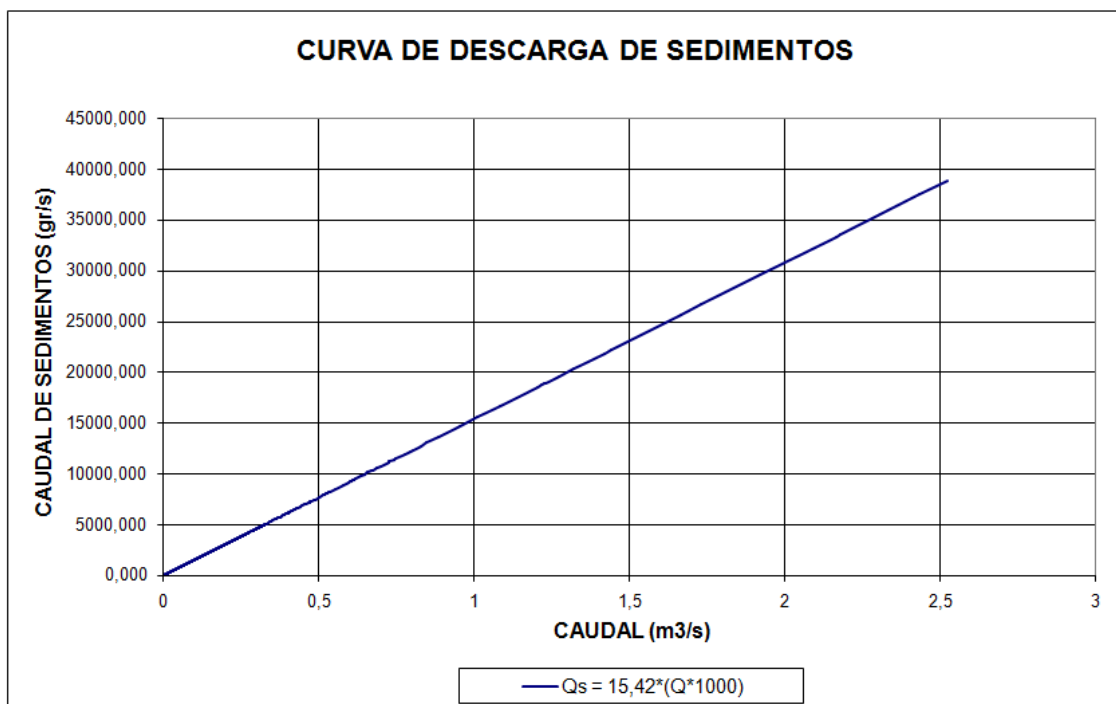
**Figura 4. 11:** Curva de Duración de Enero de 2007 a Mayo de 2008



**Figura 4. 12:** Curva de Descarga de Enero de 2007 a Mayo de 2008, en base a Concentración de Sólidos



**Figura 4. 13:** Curva de Descarga de Enero de 2007 a Mayo de 2008, en base a Ecuación Aproximada



De las Figuras 4.12 y 4.13 podemos desprender la Tabla 4.12 que nos muestra la cantidad de sólidos aportado por la microcuenca de Turupamba en para el periodo de análisis registrado.

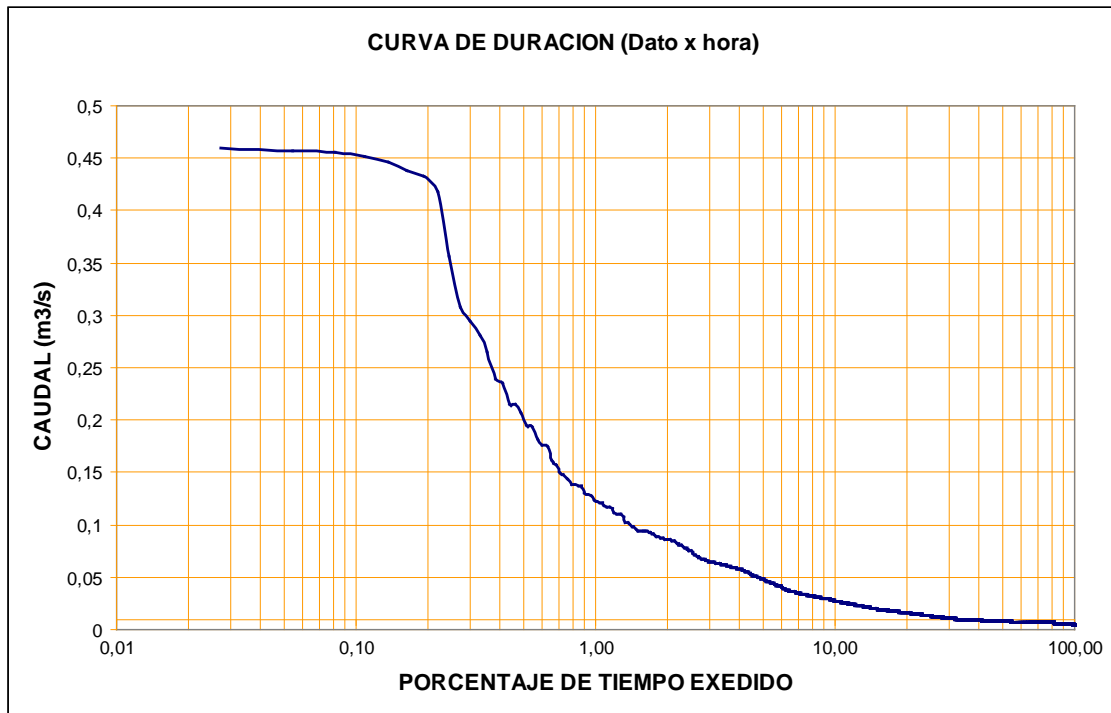
**Tabla 4. 12:** Producción de Sedimentos para el Periodo de Enero de 2007 a Mayo de 2008

Q50 =	0,0109	m³/s
Q medio =	0,033	m³/s
CSS 50 =	7,292	g/l
CSS medio =	7,727	g/l
QS cal 50 =	79,728	g/s
QS cal medio =	437,120	g/s
QS ec 50 =	168,604	g/s
QS ec medio =	504,556	g/s

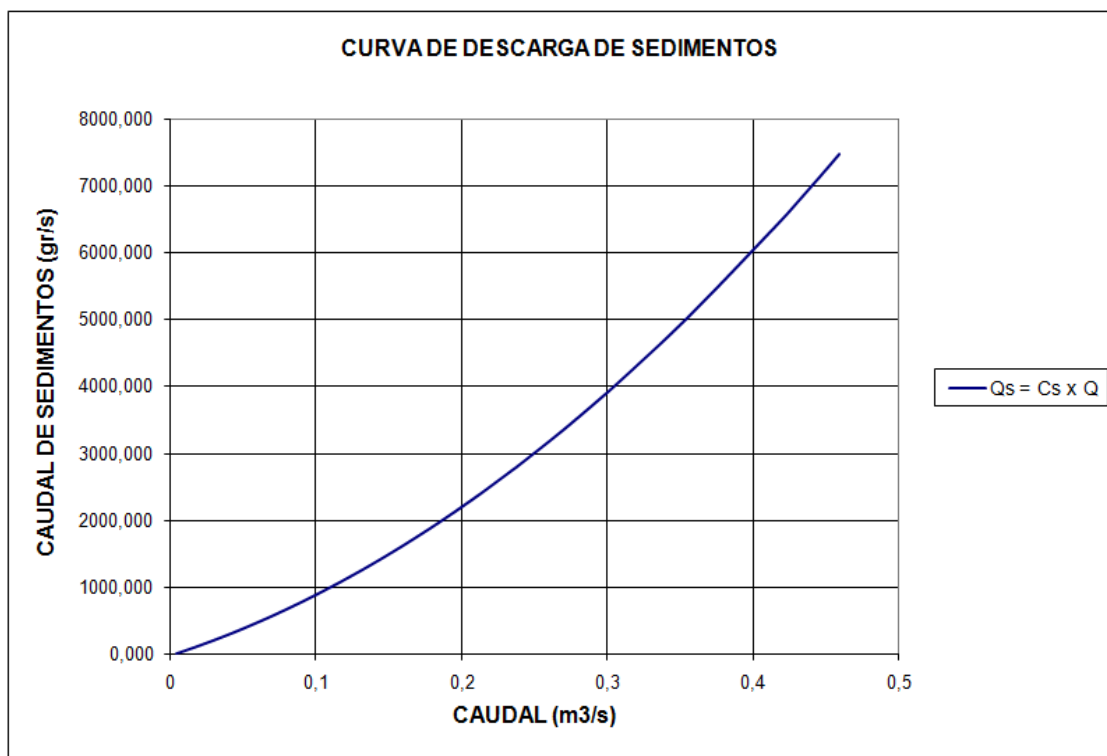
PERIODO	17 MESES =	517	DÍAS	44668800	segundos
		pesp=	2,00	tn/m3	
AREA DE CUENCA DE TURUPAMBA =	543,56			ha	
Carga de sedimentos en 17 meses =				19064,97 tn	
Carga de sedimentos en 1 año =				13457,62 tn	
Vol =	27010,11	m <sup>3</sup>	3177,66	tn/mes	
Vol =	19065,96	m <sup>3</sup>			
<b>TOTAL Sedimentado (17MESES con Qs ec)</b>			35,07	<b>tn/ha/17meses</b>	
<b>TOTAL Sedimentado (1AÑO con Qs ecu)</b>			24,76	<b>tn/ha/año</b>	
Carga de sedimentos en 17 meses =				16516,86 tn	
Carga de sedimentos en 1 año =				11658,96 tn	
Vol =	14766,98	m <sup>3</sup>	1737,29	tn/mes	
Vol =	10423,75	m <sup>3</sup>			
<b>TOTAL Sedimentado (17MESES con Qs cal)</b>			30,39	<b>tn/ha/17meses</b>	
<b>TOTAL Sedimentado (1AÑO con Qs cal)</b>			21,45	<b>tn/ha/año</b>	

Los resultados para el periodo de Octubre de 2008 a Marzo de 2009 son:

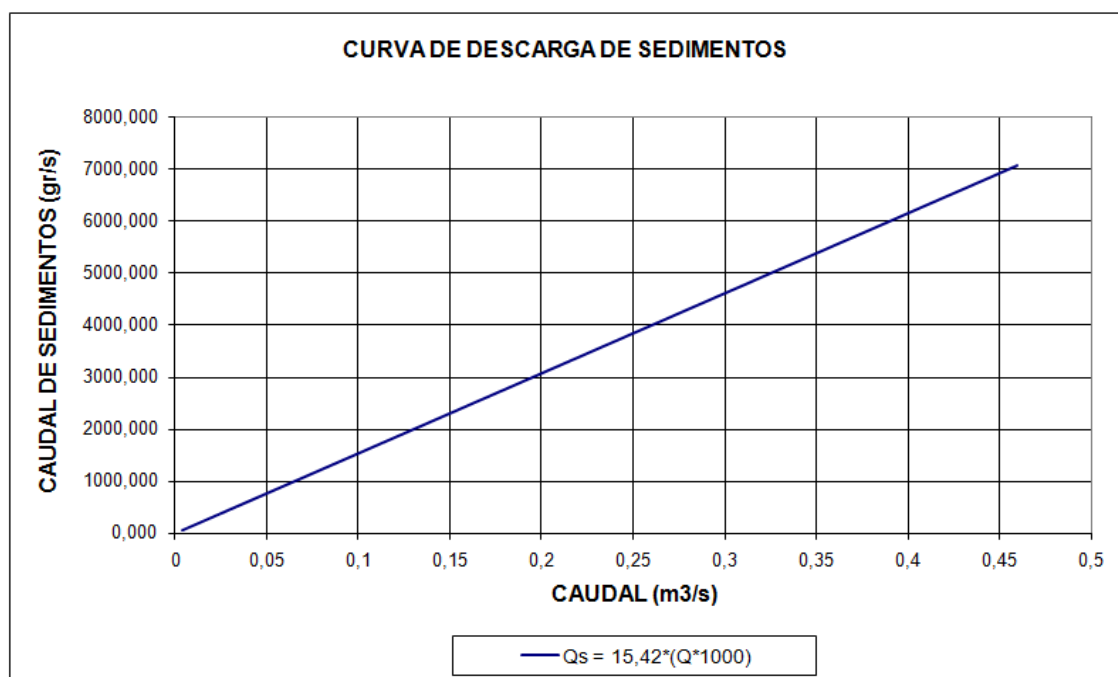
**Figura 4. 14:** Curva de Descarga para el Periodo de Octubre de 2008 a Marzo de 2009



**Figura 4. 15:** Curva de Descarga de Octubre de 2008 a Marzo de 2009, en base a Concentración de Sólidos



**Figura 4. 16:** Curva de Descarga de Octubre de 2008 a Marzo de 2009, en base a Ecuación Aproximada



De las Figuras 4.15 y 4.16 podemos desprender la Tabla 4.13 que nos muestra la cantidad de sólidos aportado por la microcuenca de Turupamba en para el periodo de análisis registrado.

**Tabla 4. 13:** Producción de sedimentos para el Periodo de Octubre de 2008 a Marzo de 2009

Q50 =	0,0078	m³/s
Q medio =	0,015	m³/s
CSS 50 =	7,228	g/l
CSS medio =	7,379	g/l
QS cal 50 =	56,156	g/s
QS cal medio =	130,677	g/s
QS ec 50 =	119,796	g/s
QS ec medio =	236,026	g/s

PERÍODO	6 MESES =	182	DÍAS =	15724800	segundos
		pesp=	2,00	tn/m³	
AREA DE CUENCA DE TURUPAMBA =	543,56			ha	
Carga de sedimentos en 6 meses =				3115,83 tn	
Carga de sedimentos en 1 año =				6231,65 tn	
Vol =	7220,75	m³	2406,92	tn/mes	
Vol =	14441,50	m³			
<b>TOTAL Sedimentado (6MESES con Qs ecu)</b>			5,73	<b>tn/ha/6meses</b>	
<b>TOTAL Sedimentado (1AÑO con Qs ecu)</b>			11,46	<b>tn/ha/año</b>	
Carga de sedimentos en 6 meses =				1725,10 tn	
Carga de sedimentos en 1 año =				3450,20 tn	
Vol =	1748,45	m³	582,82	tn/mes	
Vol =	3496,90	m³			
<b>TOTAL Sedimentado (6MESES con Qs cal)</b>			3,17	<b>tn/ha/6meses</b>	
<b>TOTAL Sedimentado (1AÑO con Qs cal)</b>			6,35	<b>tn/ha/año</b>	

#### 4.4 ANALISIS DE LA RESPUESTA HIDROLOGICA DE LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA

En base a los registros obtenidos tanto de precipitaciones y niveles se realizó el análisis de diversos eventos representativos de lluvia para observar características como intensidades de lluvia, tiempos de duración de los eventos al caudal pico, etc. Las gráficas de los eventos analizados se presentan en el ANEXO 5, mientras que a continuación en la Tabla 4.14 se presenta el resumen del análisis de los eventos de lluvia para la microcuenca de Turupamba.

**Tabla 4. 14:** Resumen de los eventos de lluvia más representativos ocurridos en la microcuenca del Turupamba.

EVENTO TOTAL				EVENTO AL PICO			
FECHA (dd/mm/aa)	PRECIPITACION TOTAL(mm)	DURACION TOTAL(h)	INTENSIDAD INSTANTANEA (mm/h)	PRECIPITACION PARA PICO(mm)	DURACION AL PICO (h)	INTENSIDAD EQUIVALENTE (mm/h)	CAUDAL (lt/s)
29/06/2005	3	1:15	9,60	2,2	0:40	3,30	2,57
21/10/2005	20	1:30	31,20	10,0	0:25	24,00	32,26
14/11/2005	24,4	1:30	43,20	22,0	1:00	22,00	38,24
04/12/2005	8	0:45	24,00	3,4	0:20	10,20	31,40
20/01/2006	16,2	1:05	67,20	16,2	1:40	14,95	14,88
04/02/2006	7	1:30	24,00	7,0	1:30	4,67	0,89
12/03/2006	22	4:00	40,80	7,2	0:05	86,40	6,69
26/01/2007	15	3:30	19,20	15,0	4:25	4,29	339,73
27/03/2007	16	1:55	21,60	11,2	1:10	9,60	75,00
05/04/2007	21,2	1:45	62,40	21,2	2:00	12,11	446,49
17/05/2007	15,8	1:40	26,40	15,6	1:25	9,48	42,80
21/10/2007	12,8	1:25	40,80	11,2	0:55	12,22	35,85
11/11/2007	37	2:05	38,40	37,0	2:30	17,76	647,86
10/01/2008	6,6	0:20	36,00	6,6	0:40	19,80	5,44
26/02/2008	19	2:15	84,00	18,8	2:00	9,40	74,23
01/05/2008	12,8	1:20	60,00	12,8	1:30	9,60	1044,70
01/11/2008	17,6	0:45	72,00	16,8	0:30	33,60	138,54
12/12/2008	13,4	2:20	33,60	13,4	2:35	5,74	21,93
07/01/2009	17,2	1:30	43,20	17,2	1:35	11,47	129,40
13/02/2009	16	1:25	31,20	16,0	1:35	11,29	94,18
17/03/2009	9	0:35	38,40	7,2	0:20	21,60	11,36



#### 4.4.1 CAUDALES BASE PARA LA MICROCUENCA DE TURUPAMBA

En base a los registros de niveles tomados por la estación ISCO fueron determinados los caudales base para la microcuenca de Turupamba, tratando de tomar la variabilidad posible en los meses de mayor y menor precipitación. Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 4. 15:** Determinación del caudal base en la microcuenca del Turupamba.

MES	AÑO	Q <sub>BASE</sub> (lt/s)
Agosto	2005	0,01
Noviembre	2005	0,294
Diciembre	2005	0,466
Enero	2006	0,607
Abril	2006	1,74
Febrero	2007	1,795
Marzo	2007	1,832
Abril	2007	3,577
Agosto	2007	1,024
Octubre	2007	3,065
Noviembre	2007	8,231
Marzo	2008	14,239
Noviembre	2008	6,337
Enero	2009	6
Febrero	2009	6,258
Marzo	2009	6,019

De la Tabla 4.15 se puede observar que los caudales base correspondientes al año 2005 son pequeños y que se presenta un incremento a partir del año 2006, siendo más notable que desde finales del 2007 hasta principios del 2009 los caudales base son de mayor magnitud al tener una variabilidad entre 6 y 15 (lt/s). Datos que concuerdan con las precipitaciones presentadas en la Tabla 4.9 de la sección 4.3.1 en la cual se asevera el incremento de lluvias en esas fechas y la mayor precipitación dada en el año 2008 considerado como un año húmedo, dando como resultado los máximos caudales base dentro de los registros que se tienen.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- Luego de la caracterización física realizada a la microcuenca de Turupamba, se puede destacar que esta se trata de una microcuenca pequeña, con un relieve pronunciado y altas pendientes de ladera y de cauce, lo que tiene como consecuencia una erosión acentuada en los márgenes y en las laderas de los cauces, efecto justificado al obtener la constante de estabilidad de la microcuenca que denota que esta es baja.
- De acuerdo a la densidad alta de drenaje obtenida para la microcuenca de estudio se desprende que al tener el cauce varias ramificaciones el tiempo de concentración es menor y en relación a la alta pendiente de escoria, y a las características de forma de la microcuenca que la representa como circular-oval-oblonga, esta debe presentar un régimen de crecidas súbitas ante la presencia de un evento de lluvia.
- El valor del radio de bifurcación de la microcuenca de Turupamba es de 3,75; lo que la caracteriza como una microcuenca de montaña, que además al observar el comportamiento de su curva hipsométrica con un valor muy cercano a la unidad la denota como una microcuenca en equilibrio morfológico, en su etapa de madurez.
- Se establece en el mapa de cobertura vegetal que la microcuenca de Turupamba tiene casi el 75% de su área cubierta por pastos o cultivos, la superficie restante (25%) se encuentra cubierta con intervención forestal (*ecucalyptus*). La combinación existente entre intensidades de precipitación, mal manejo de los terrenos en barbecho y los efectos de la especie forestal mencionada sobre la delicada configuración de los suelos, tienen como consecuencia hacerla más susceptible a la acción de los agentes erosivos.
- Luego del análisis de los registros de niveles y la consecuente obtención de los caudales para estos datos, se determina que la microcuenca tiene un aporte bajo en cuanto a caudales para la Cuenca del Paute, por su caudal base determinado y que no es muy significativo; pero un aporte considerable en lo que al caudal de sedimentos se refiere. Resultado que se apoya en la producción de sedimentos determinada para cada periodo continuo de registros, mismos que son de mayor consideración en el segundo periodo el cual incluye los datos de registros de los primeros meses de un año en los cuales la precipitación se encuentra en aumento.

- La producción de sedimentos encontrada para la superficie total de la microcuenca de Turupamba en los periodos continuos de registros resultan de 1,63 Tn/ha/año para el primer periodo; 24,76 Tn/ha/año para el segundo periodo y 11,46 Tn/ha/año como valores máximos, lo que indica que la microcuenca no tiene un grado de erosión significativa con referencia a su área total, sin embargo, de considerarse exclusivamente las zonas de gradadas como únicas aportantes de sedimento, las tasas reales se incrementarían sustancialmente.
- En base a la literatura revisada y al desarrollo investigativo realizado en la microcuenca de Turupamba se asume que los factores de orden antropogénico, factores y condiciones hidro-climáticas serían las causas más importantes para cambios en distribución e intensidad de erosión y de producción de sedimentos.

## RECOMENDACIONES

- Con referencia a la escala de estudio, y como es conocido, es muy difícil entender lo que ocurre a nivel de microcuenca o peor aún de cuenca sin haber logrado un adecuado entendimiento a escala de parcela de un área de estudio, por lo cual sería importante que en estudios posteriores u otros de mayor envergadura sea implementados métodos de análisis de mayor detalle que denoten de mejor manera el efecto de los agentes erosivos (naturales y antrópicos) a las variedades de parcelas que componen el área de análisis.
- Es importante el constante mantenimiento y calibración de equipos utilizados para estudios de microcuencas de aporte a la cuenca del Paute, con la finalidad de evitar errores en las apreciaciones de tomas de datos por estos equipos, y así lograr resultados que favorezcan en mejor manera el manejo y conservación de suelos de las áreas estudiadas. Se recomienda considerar ajustes en los programas de monitoreo de datos, especialmente en lo referente a sedimento en suspensión.
- Los resultados obtenidos en este documento resaltan la complejidad de los procesos de erosión y producción de sedimentos para cuencas hidrográficas de montaña y la dificultad de lograr una caracterización completa y adecuada, más aún si a esto se suma el hecho de falta de información apropiada sobre medición y monitoreo de parámetros, por lo cual sería indispensable el llevar un mayor y mejor registro de eventos y tomas de muestras del mismo, para que los datos indiquen lo que sucede antes, durante y después de estos sucesos. Por ejemplo se debe considerar la importancia de registrar sedimento en suspensión a lo largo de hidrogramas completos.

- Sería de gran interés y de un importante aporte a la comunidad realizar una investigación que determine los cambios en la producción de sedimentos debido a la conversión de bosques en áreas agrícolas y ganaderas y viceversa, además del impacto de actividades agrícolas en zonas de fuertes pendientes y la construcción y operación de obras de infraestructura, con la finalidad de implementar mejores métodos de conservación y de manejo del suelo.

## CAPITULO VI

### REFERENCIAS

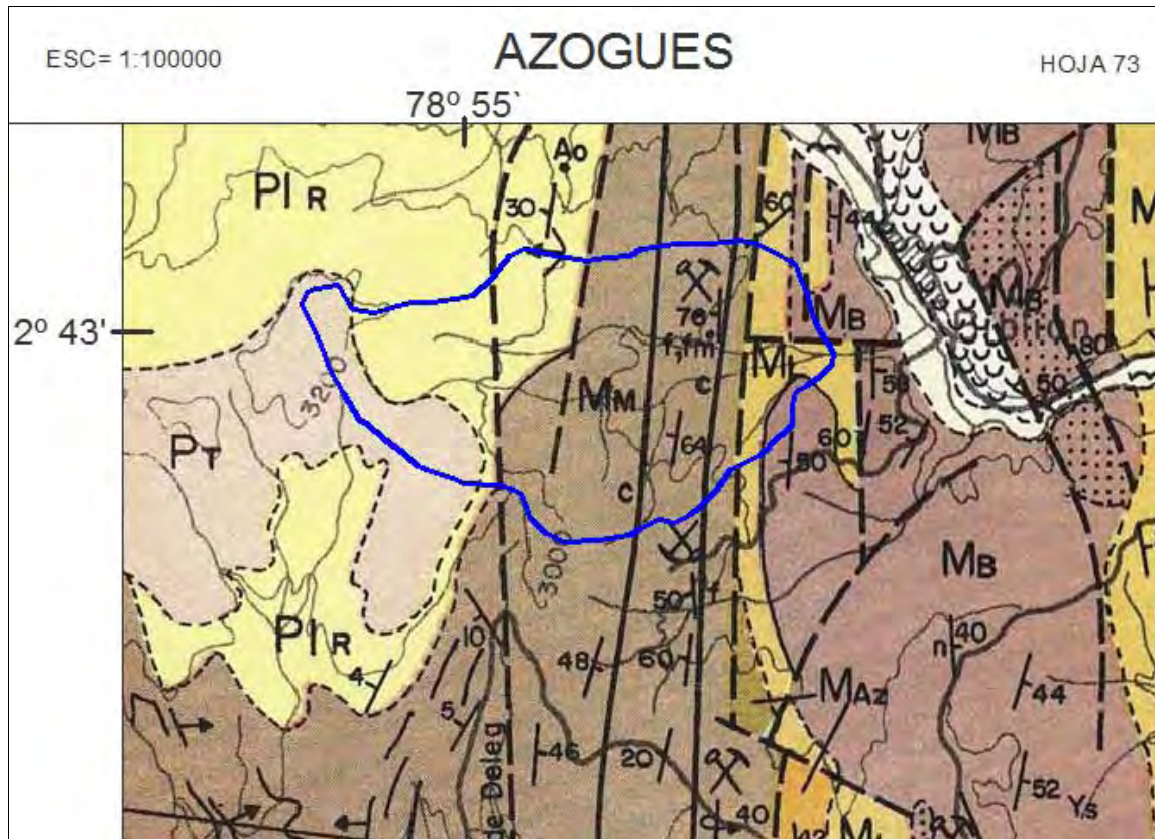
- HUBERT CHANSON. Hidráulica del Flujo en Canales Abiertos; Editorial Mc Graw Hill (2002).
- Ven Te Chow David R. Maidment, Larry W. May. Hidrología Aplicada, s ; Editorial Mc Graw-Hill (1994).
- LLAMAS, J. 1993. Hidrología General, Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial. Universidad del País Vasco. España.
- HORTON R. E. Erosional Development of streams and their drainage basings; hydropysical approach to quantitative morphology (1945).
- STRAHLER. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology (1957)
- Petts & Foster, Rivers and landscape. Edward Arnold (eds). London (1985)
- KNIGHTON. D. Fluvial Forms and processes. Edward Arnold. London (1984)
- Pedkov A.P., Gusarov A. V. (2006) Suspended sediment yield from continents into the World Ocean: spatial and temporal changeability. IAHS 306, 3-11.
- LUIS I. GONZALEZ DE VALLEJO. Mercedes Ferrer Luis Ortuño Carlos Oteo Ingeniería Geológica. Pearson education Madrid 2002
- EDUARDO CASTRO MARIN. AMILCAR VALENCIA NUÑEZ, JACOBO OJEDA MONCAYO, FERNANDO MUÑOZ CARMONA SOFÍA FONSECA GONZALES. Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa. Primera Edición 2001.
- SEDIMENTATION INVESTIGATIONS OF RIVERS AND RESERVOIRS Department Of The Army U.S. Army Corps of Engineers (1995).
- Manual de prácticas integradas de manejo y conservación del suelo. Boletín de tierras y aguas de la tierra N° 8. (1997).
- Revista internacional de ciencias de la tierra. Dr. José Luis Bastida Silva.

- Medición del transporte de sedimentos y curvas de descarga de sedimentos. EPIC FORCE. Dr. J.C. Bathurst.
- Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey.
- Informe final del Proyecto PRECUPA.
- Mapa Geológico de Azogues.
- Cartografía de Turupamba, restituido por el IGM.
- Wikipedia. Enciclopedia Libre.
- [www.simtech.cl](http://www.simtech.cl)
- [www.isco.com](http://www.isco.com)
- [www.proviento.com](http://www.proviento.com)
- [www.GARMIN.com](http://www.GARMIN.com)

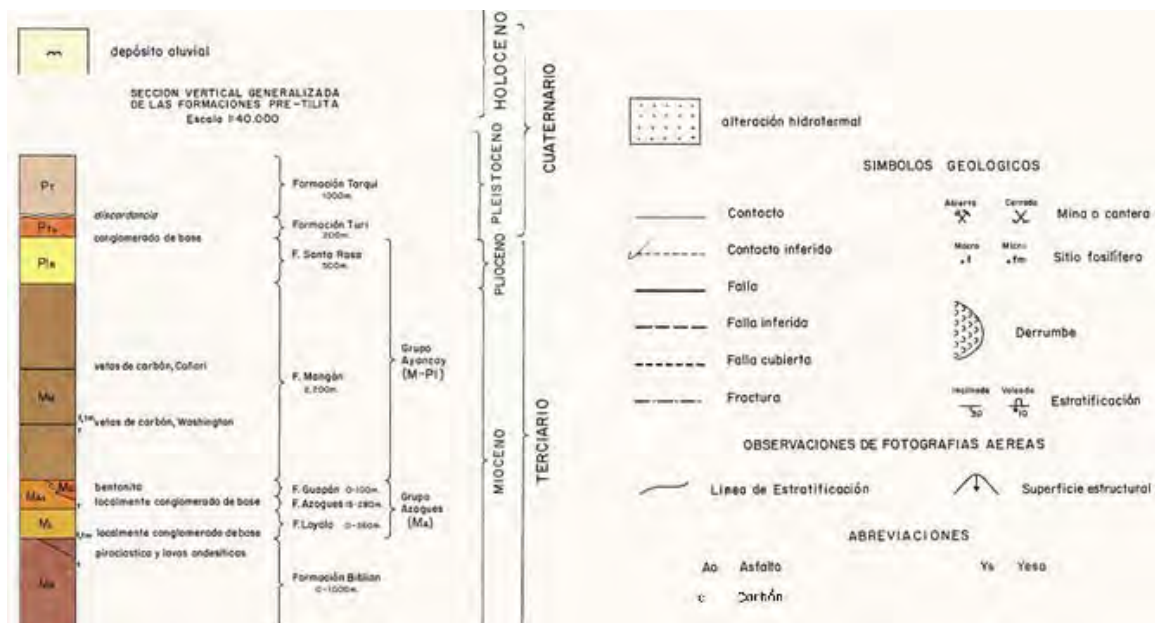
## **ANEXOS**

ANEXO 1: MAPA DE UBICACIÓN REGIONAL Y GEOLOGICA DE TURUPAMBA

Ubicación Geográfica y Geológica de la Cuenca del  
Turupamba

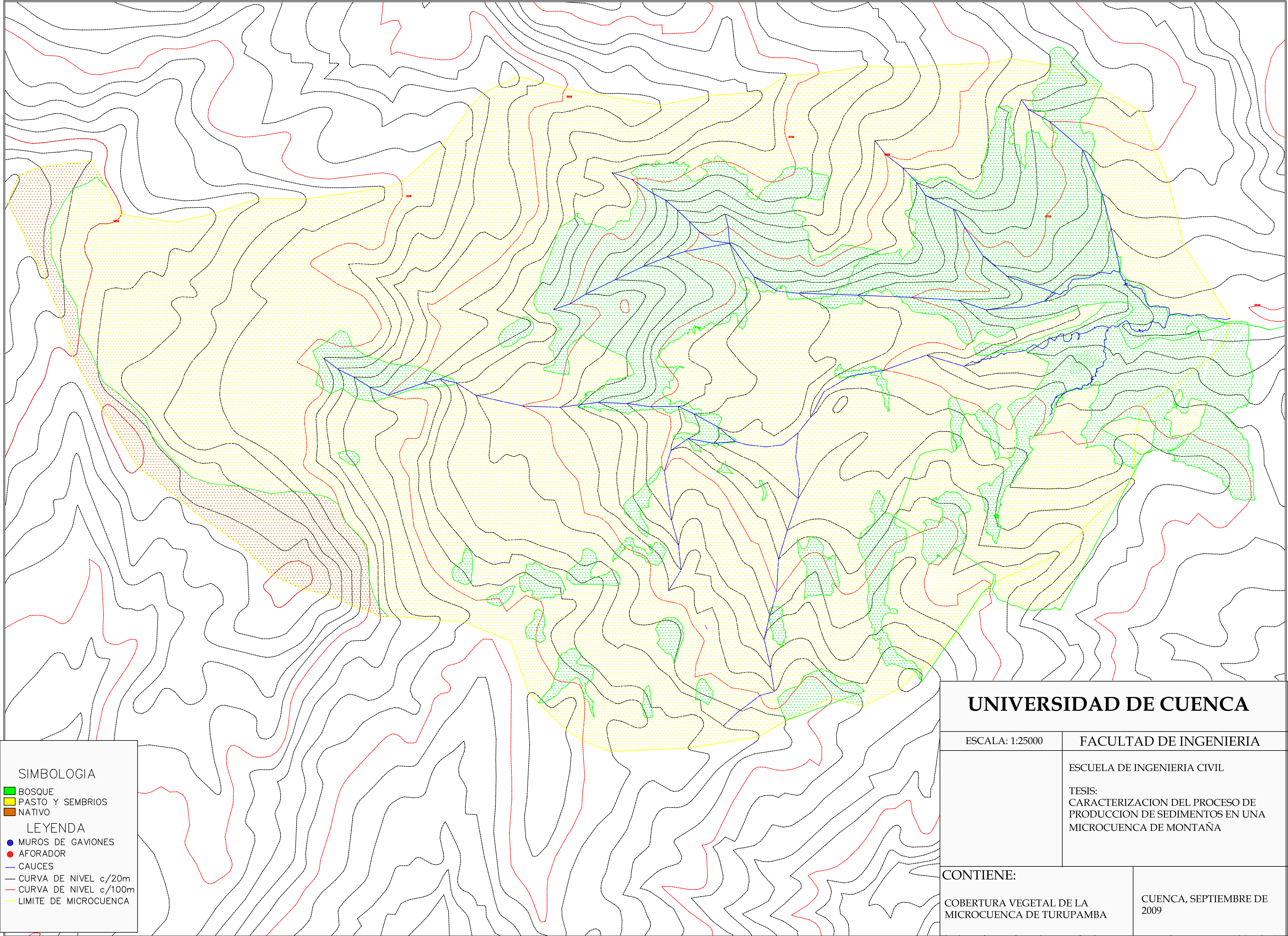


Descripción de Símbolos





**ANEXO 2: MAPA DE COBERTURA VEGETAL**



### SIMBOLOGIA

- BOSQUE
- PASTO Y SEMBRIOS
- NATIVO

### LEYENDA

- MUROS DE GAVIONES
- AFORADOR
- CAUCES
- CURVA DE NIVEL c/20m
- CURVA DE NIVEL c/100m
- LIMITE DE MICROCUENCA

## UNIVERSIDAD DE CUENCA

ESCALA: 1:25000

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

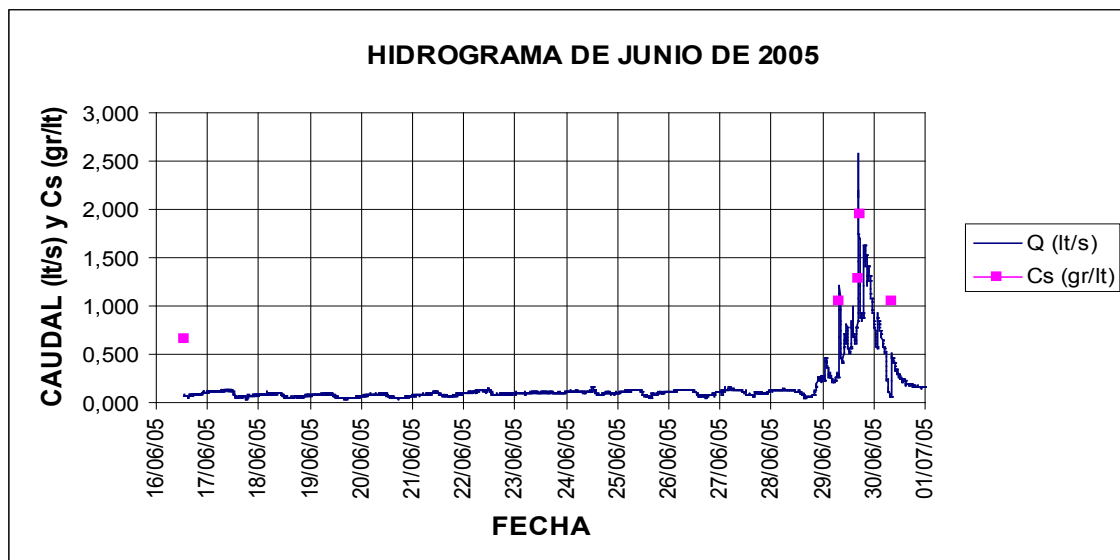
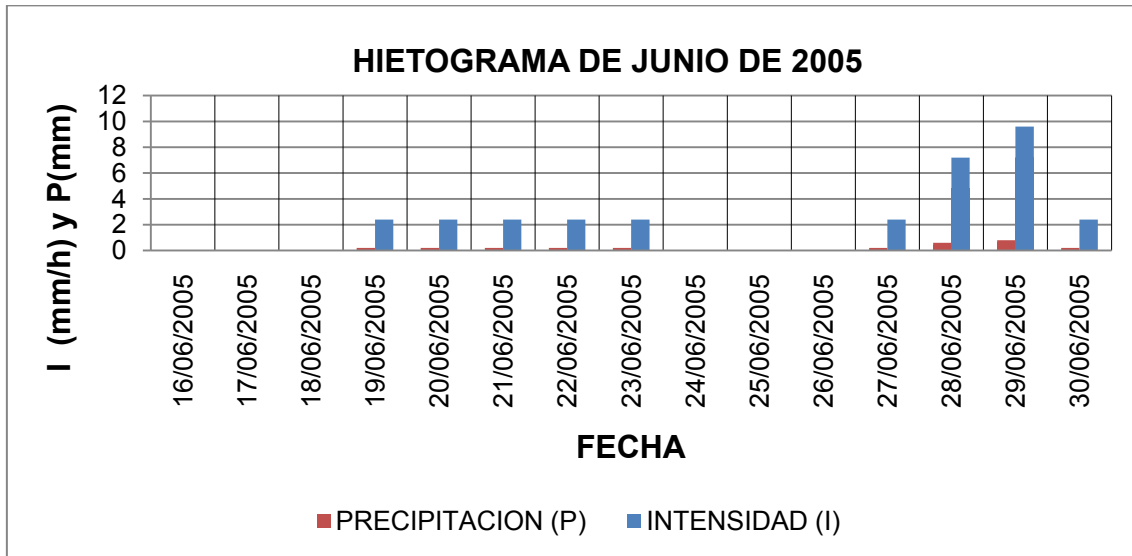
TESIS:  
CARACTERIZACION DEL PROCESO DE  
PRODUCCION DE SEDIMENTOS EN UNA  
MICROCUENCA DE MONTAÑA

### CONTIENE:

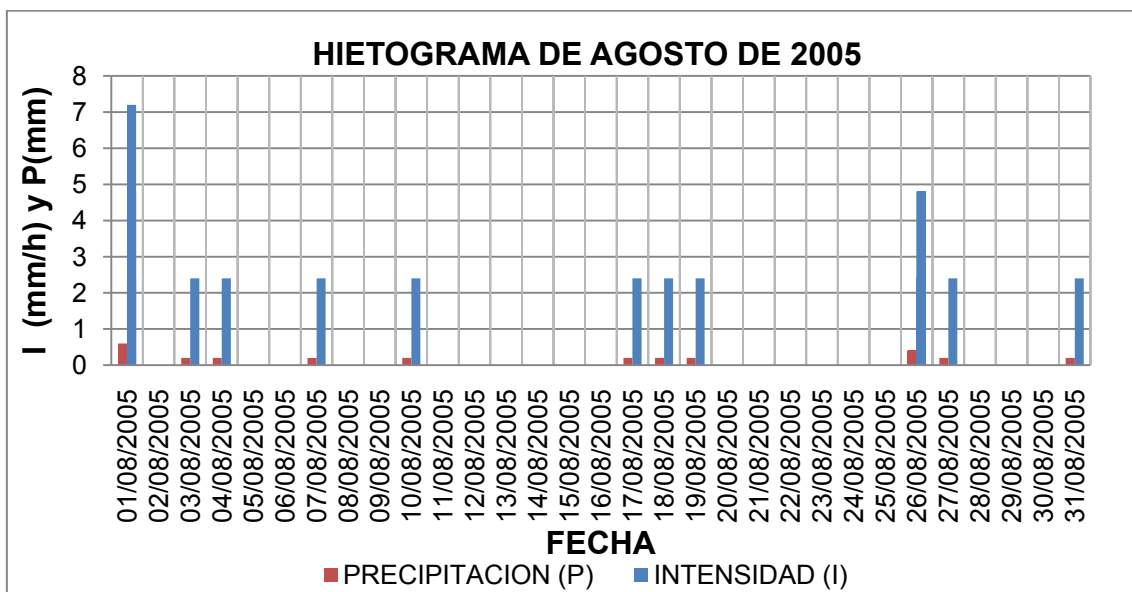
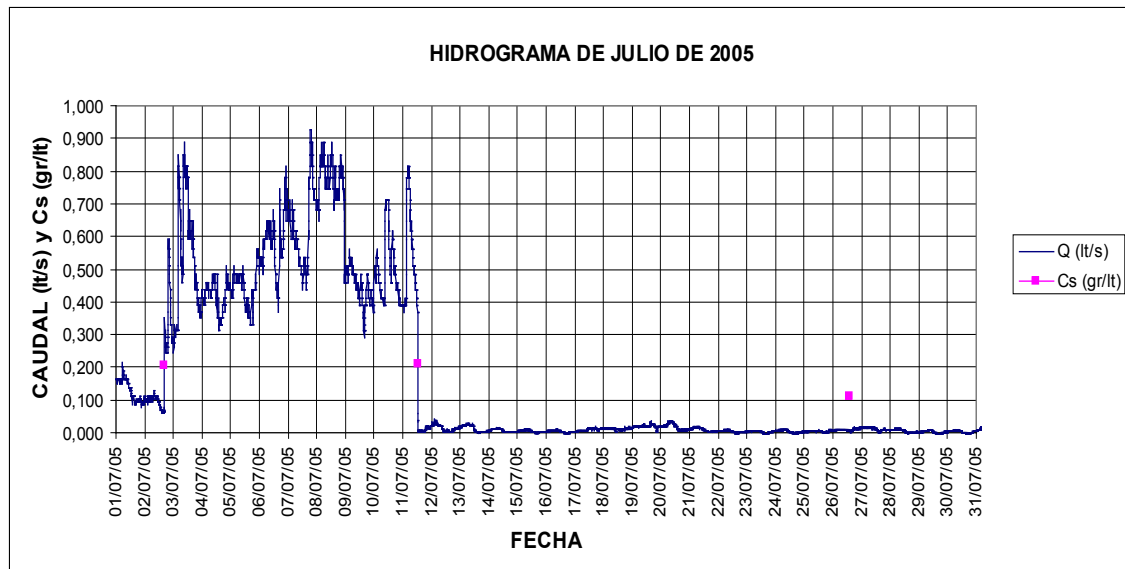
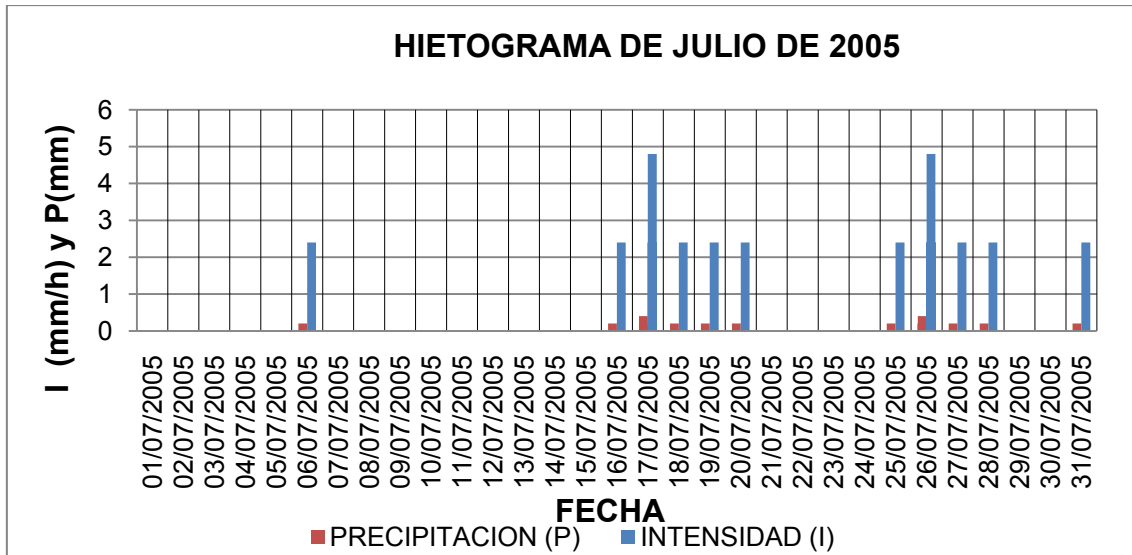
COBERTURA VEGETAL DE LA  
MICROCUENCA DE TURUPAMBA

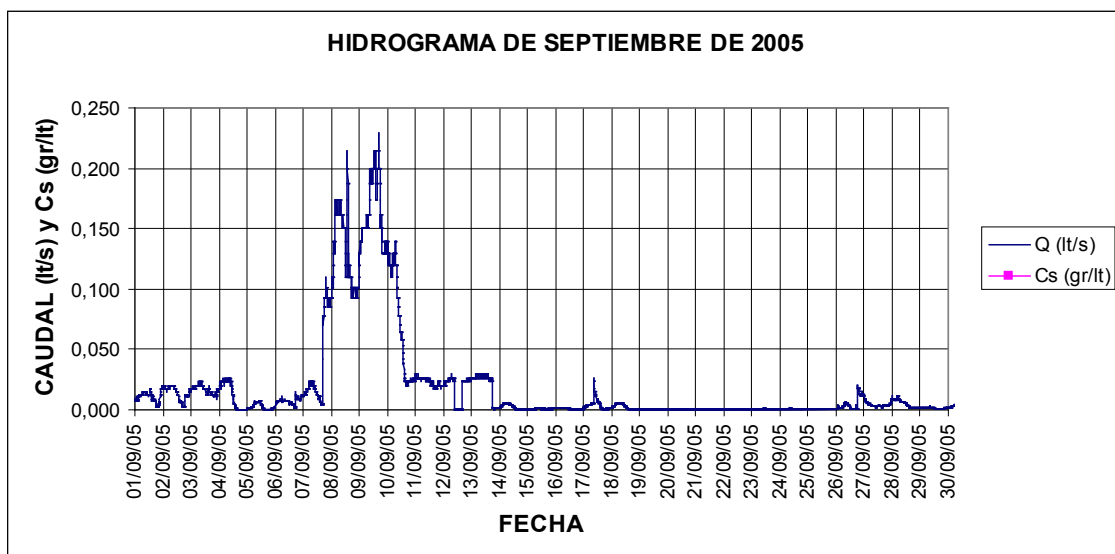
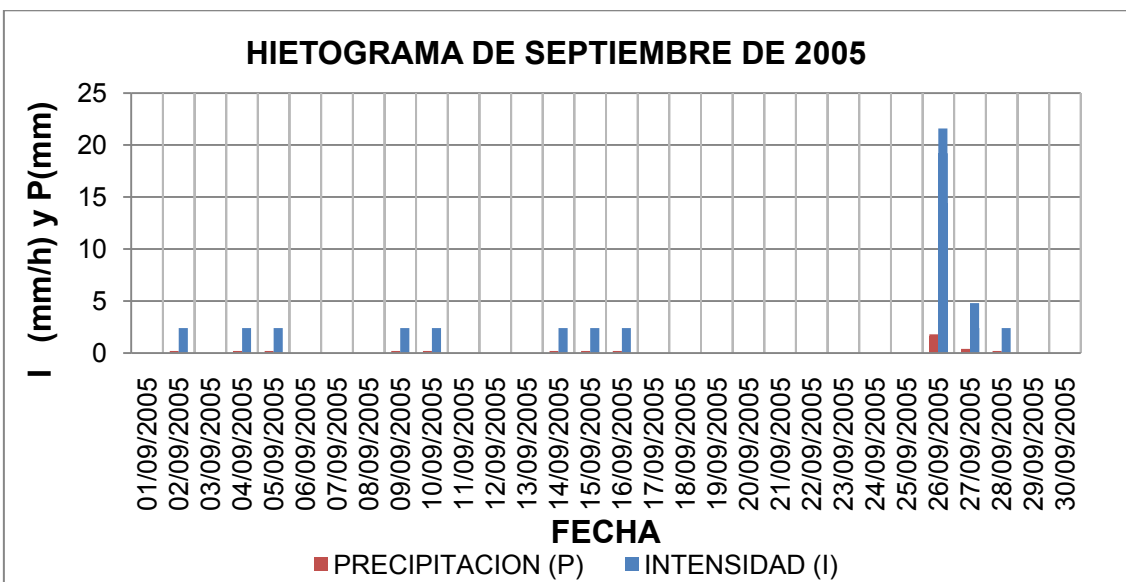
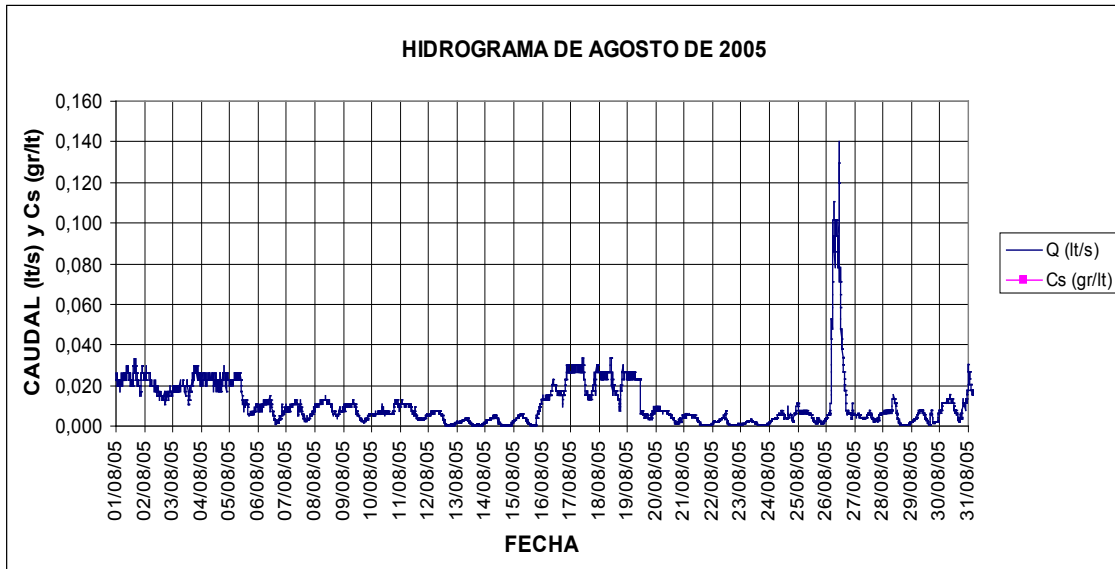
CUENCA, SEPTIEMBRE DE  
2009

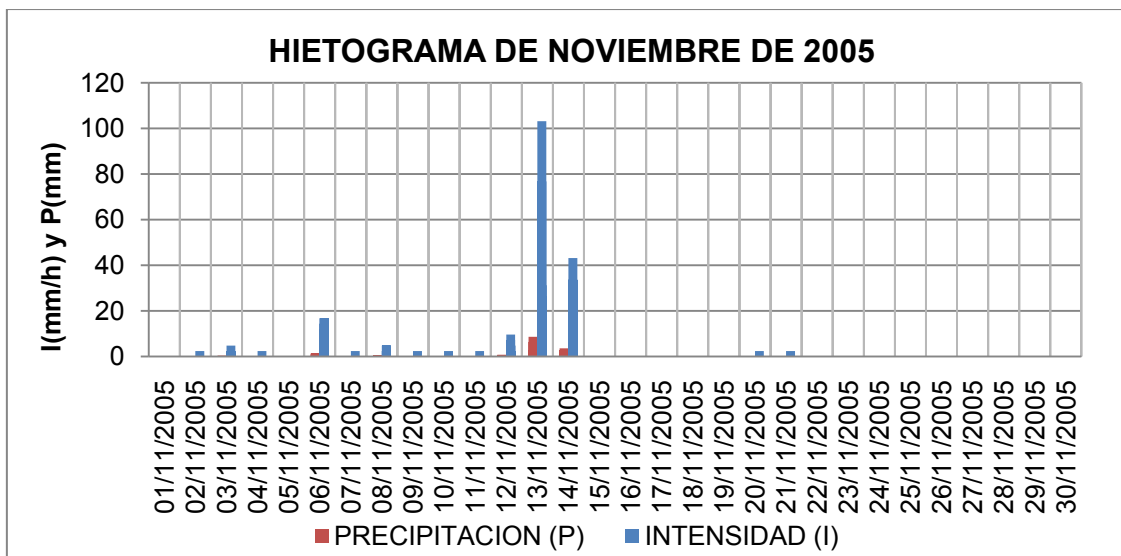
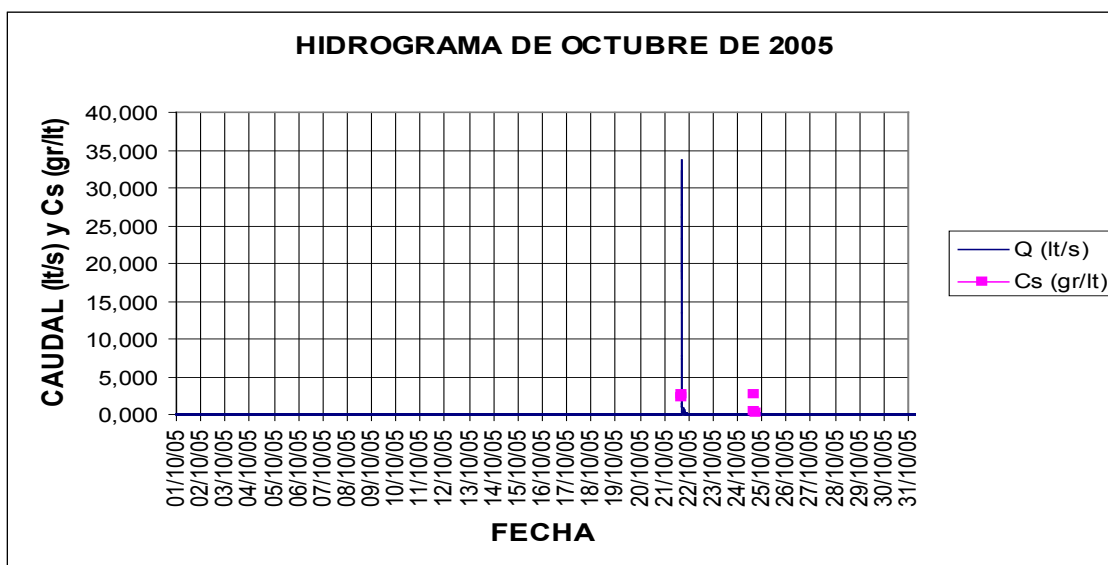
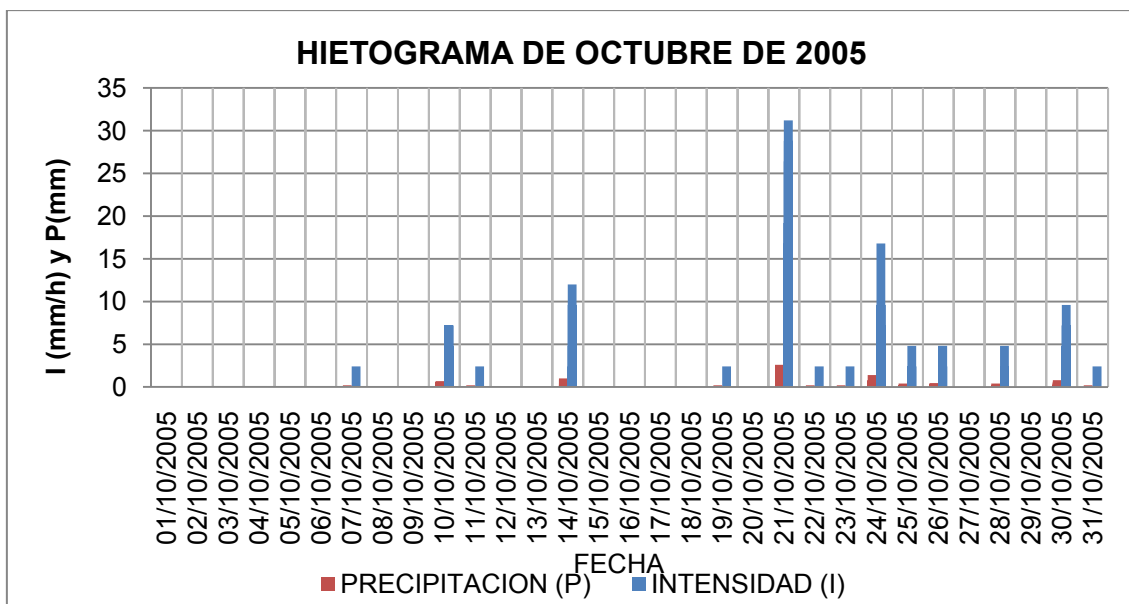
**ANEXO 3: REPRESENTACION GRAFICA DE INTENSIDADES DE LLUVIA Y CAUDALES  
EN LOS MESES DE REGISTRO**



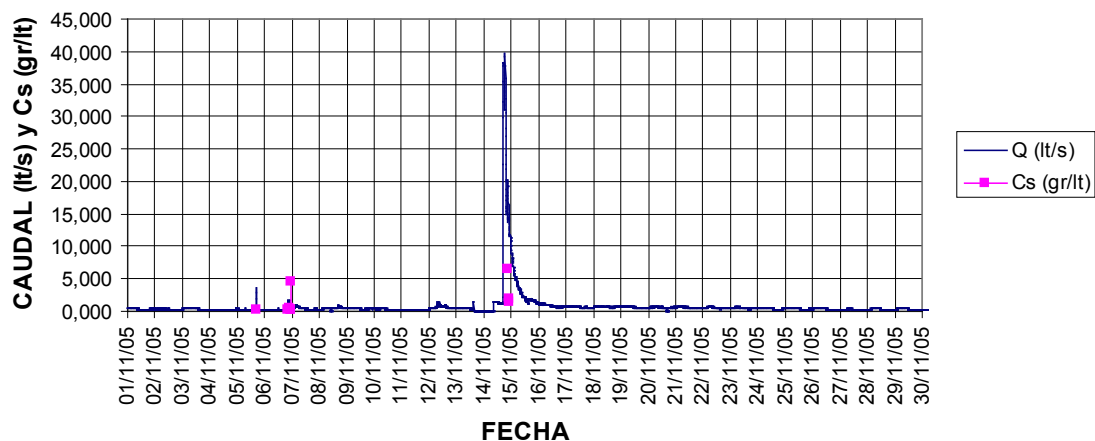




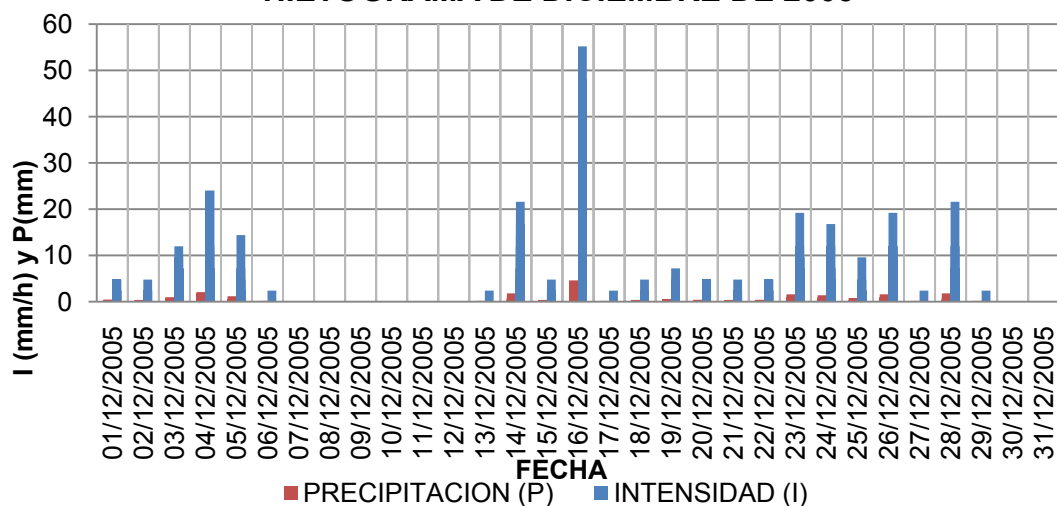




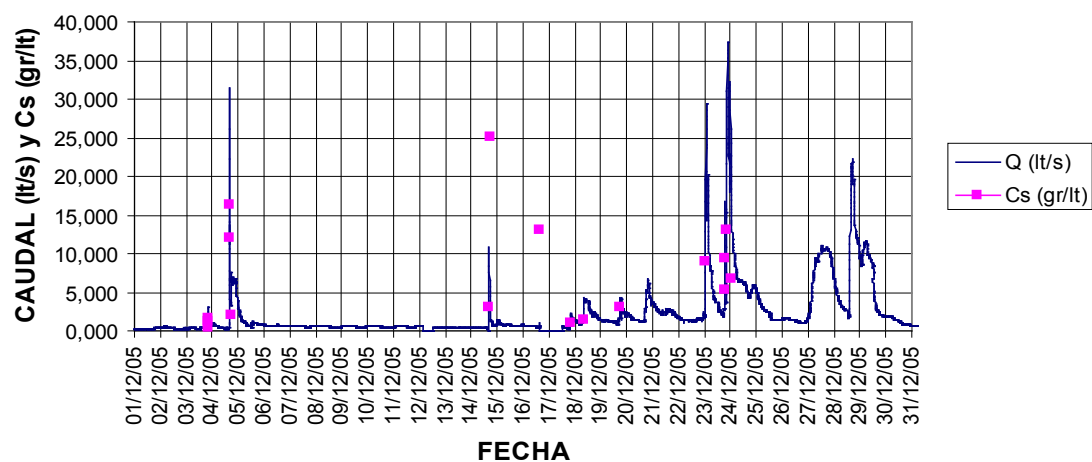
**HIDROGRAMA DE NOVIEMBRE DE 2005**

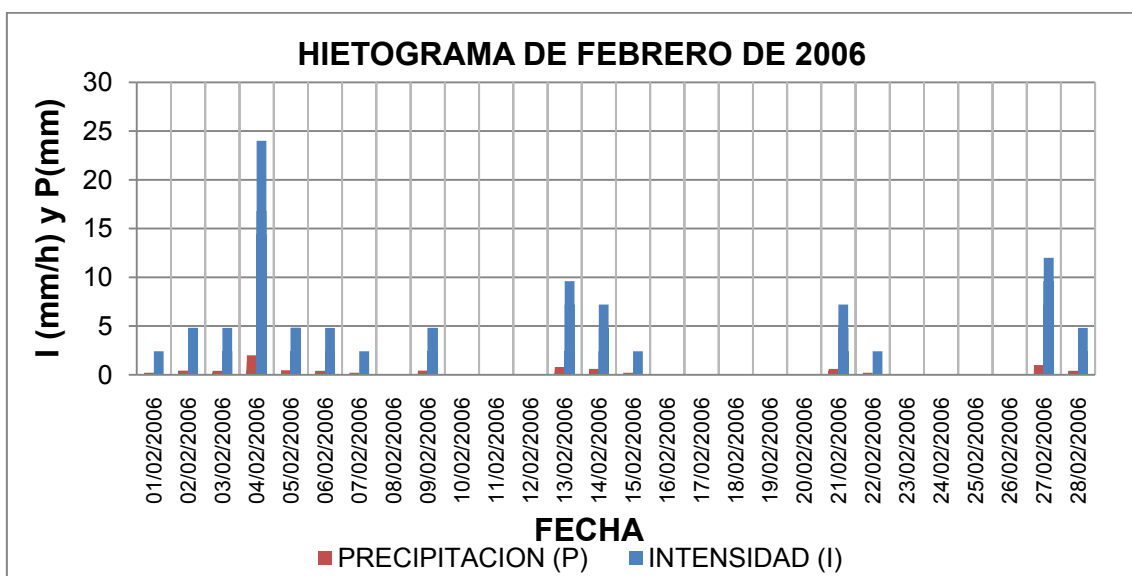
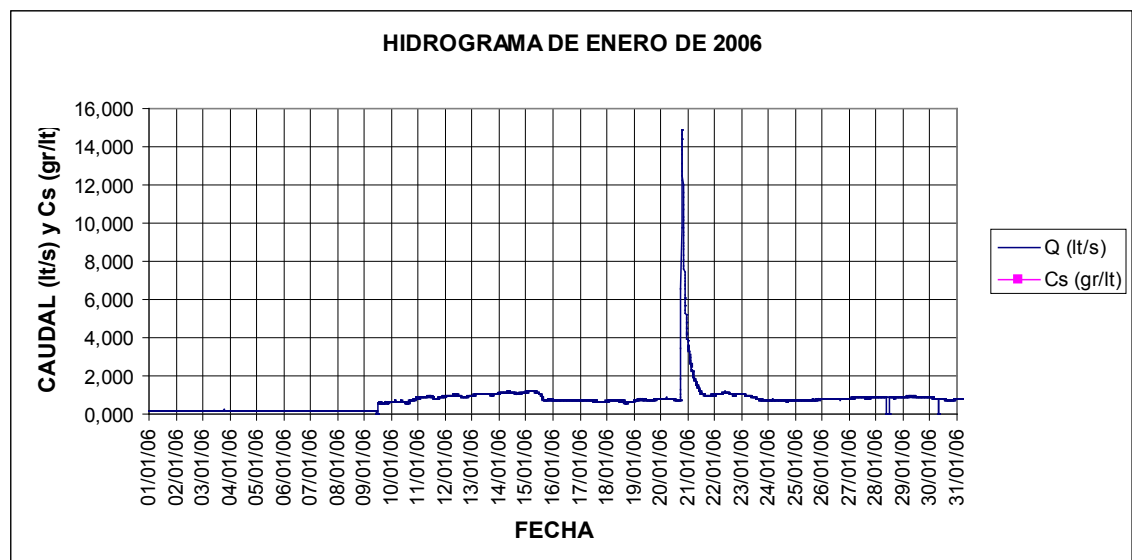
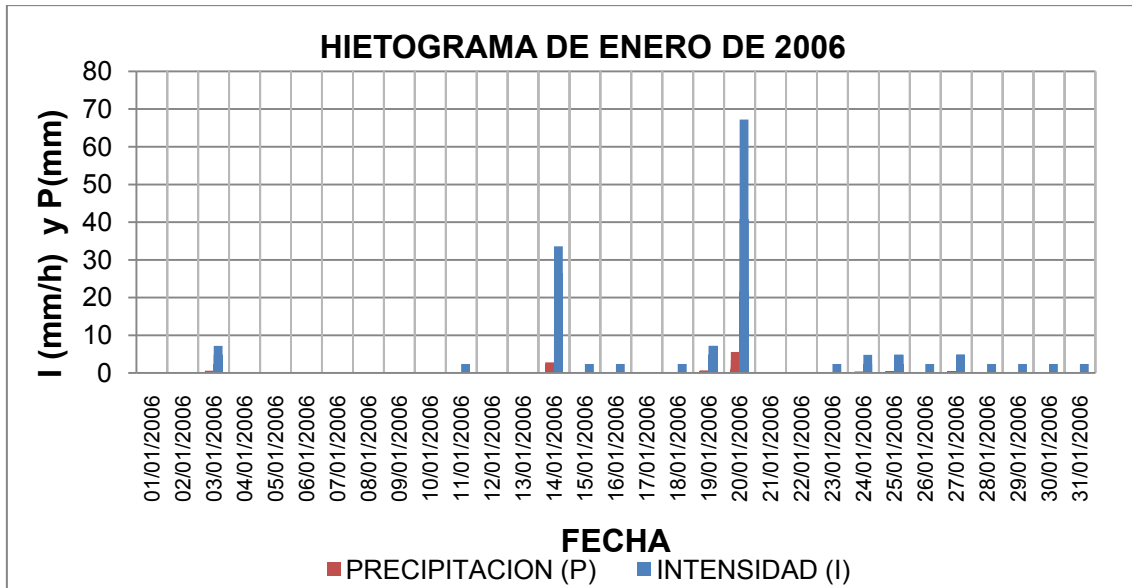


**HIETOGRAMA DE DICIEMBRE DE 2005**

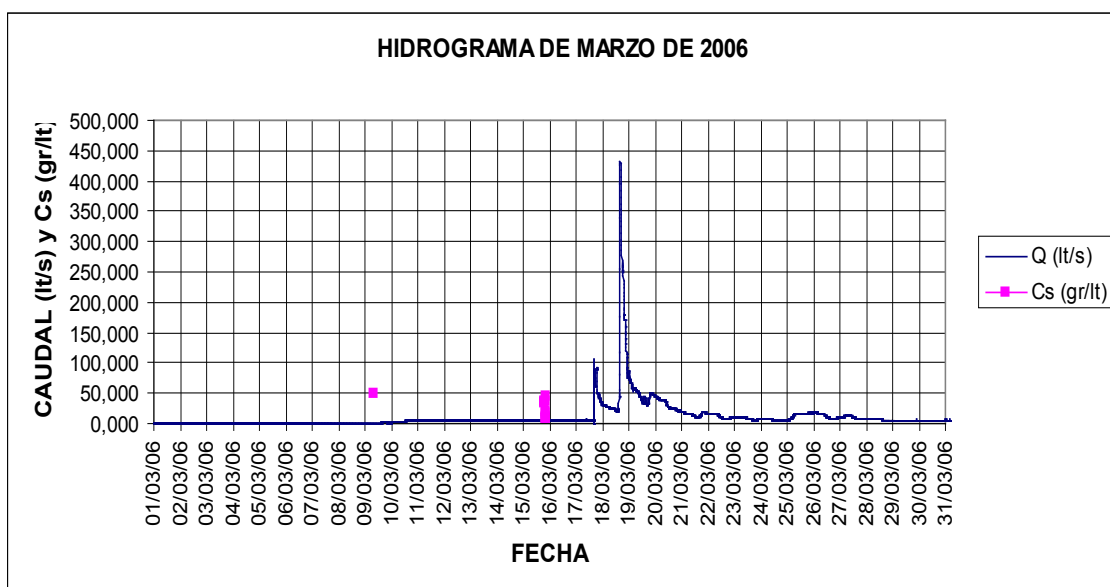
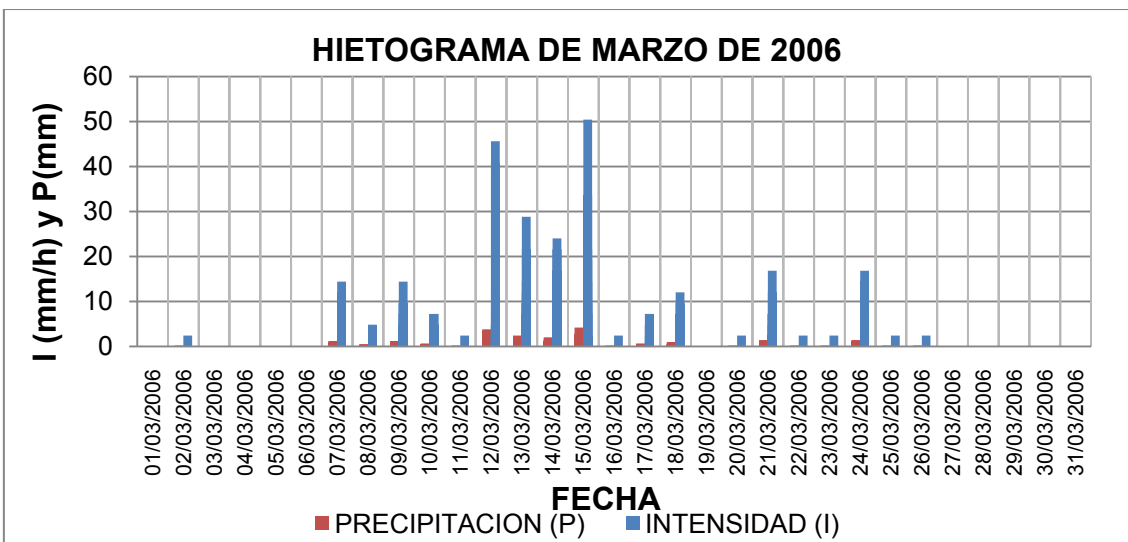
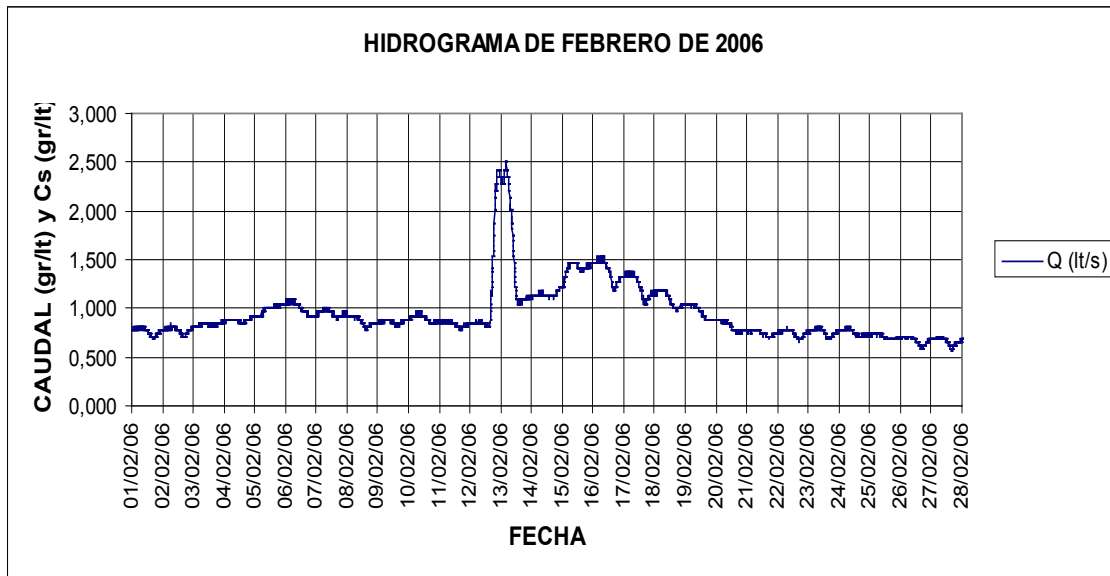


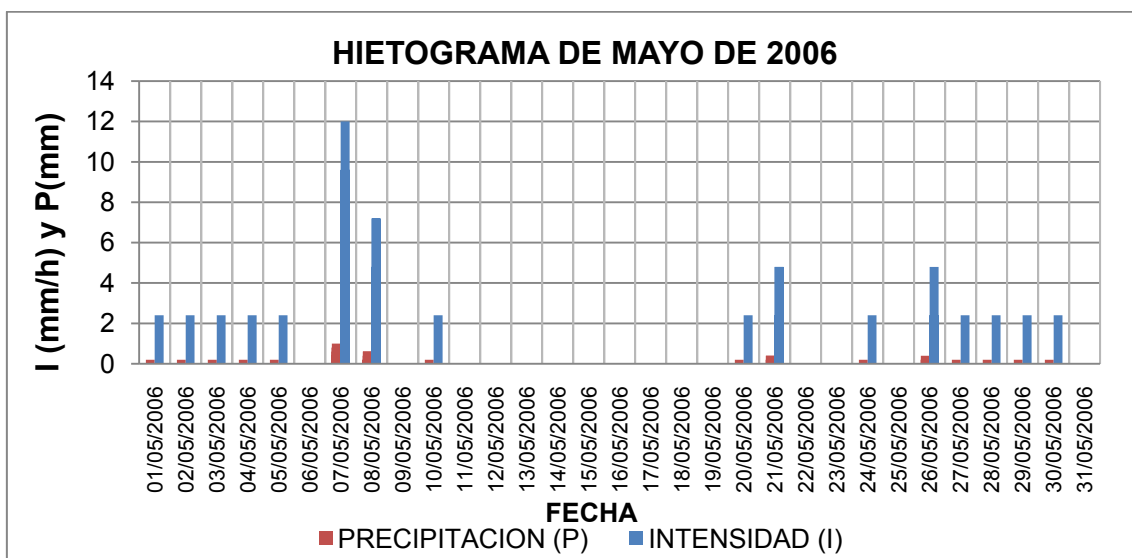
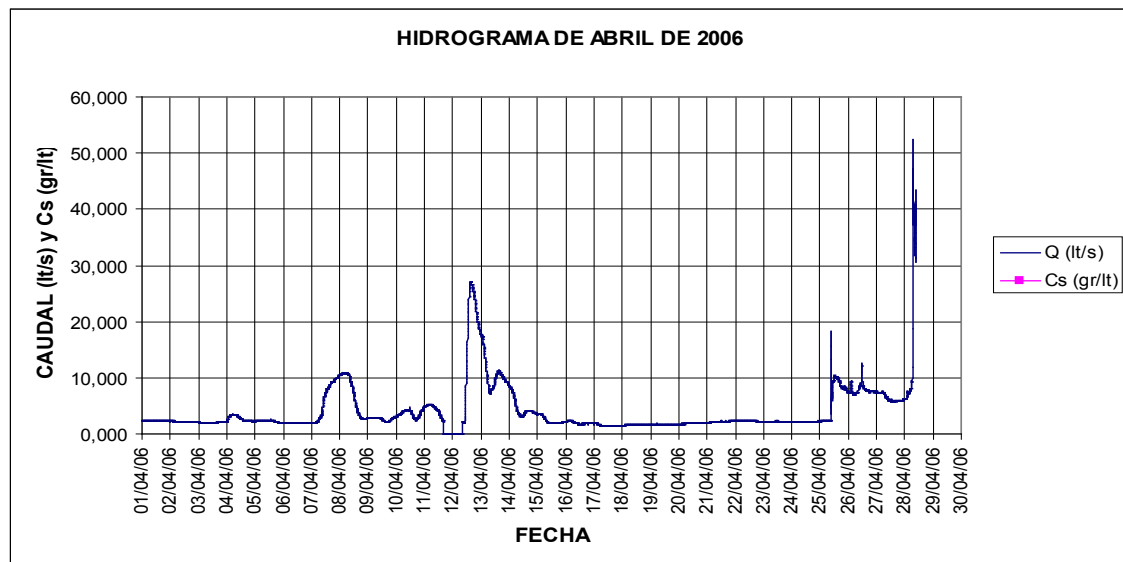
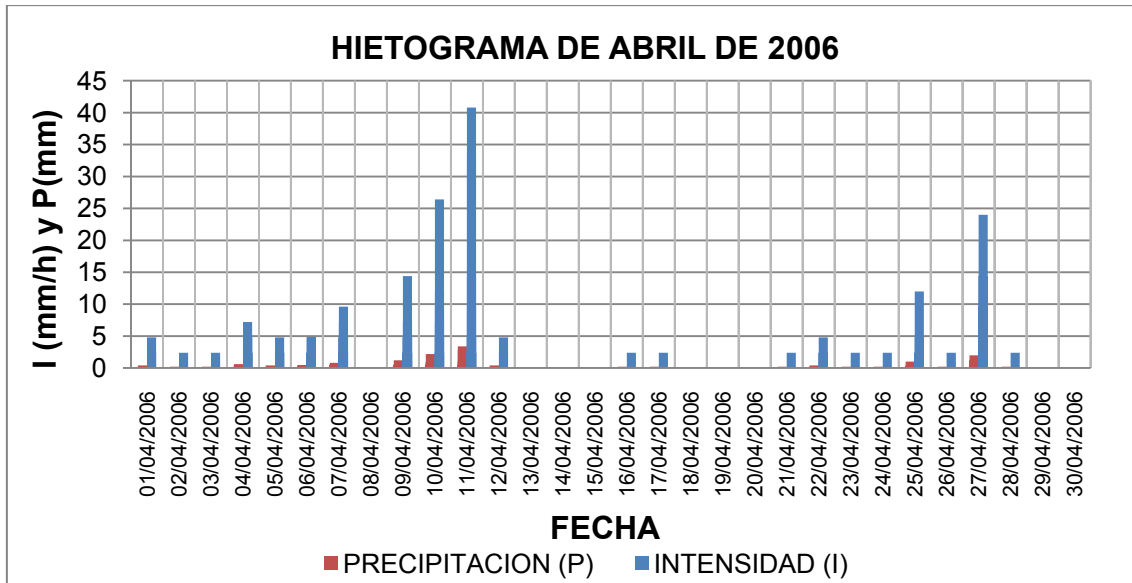
**HIDROGRAMA DE DICIEMBRE DE 2005**

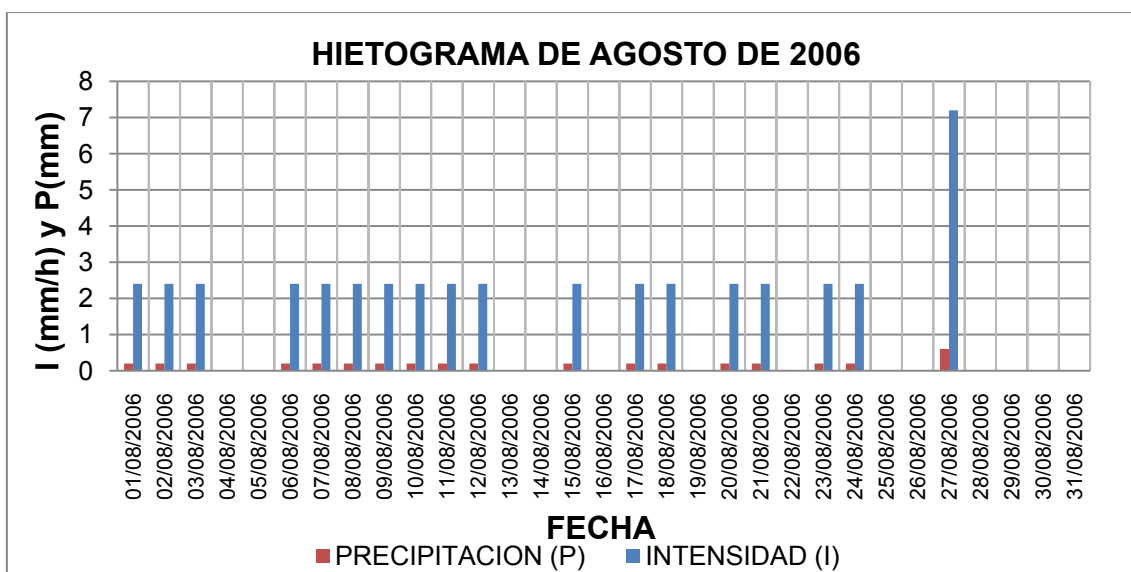
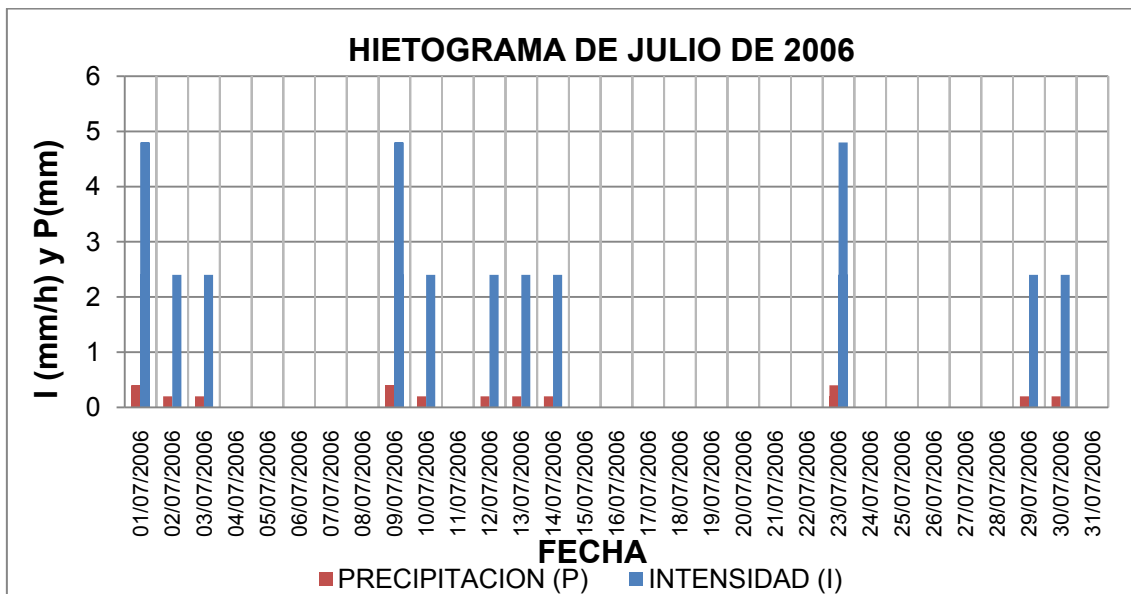
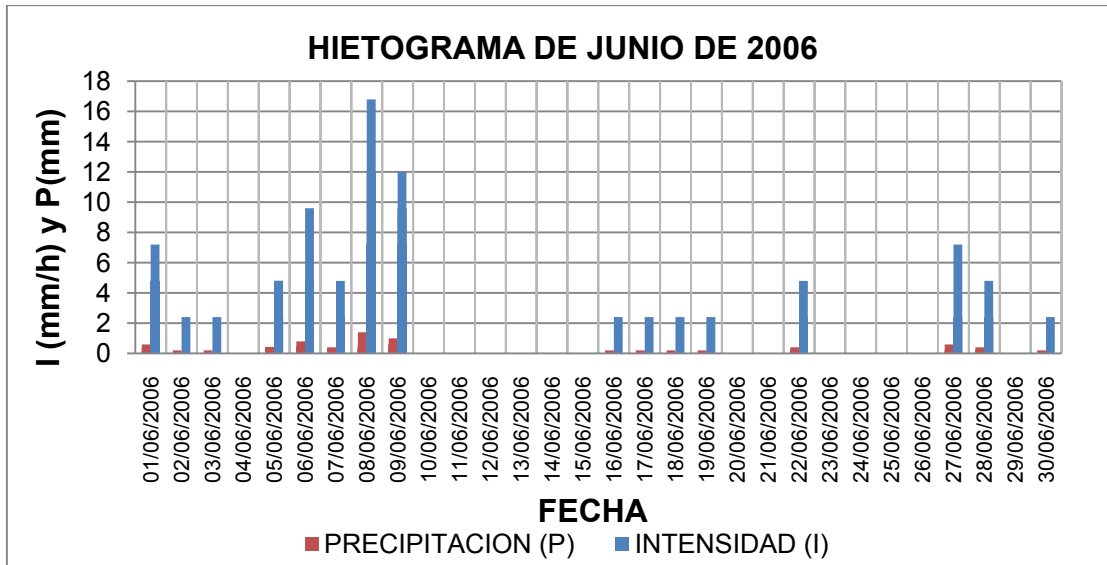


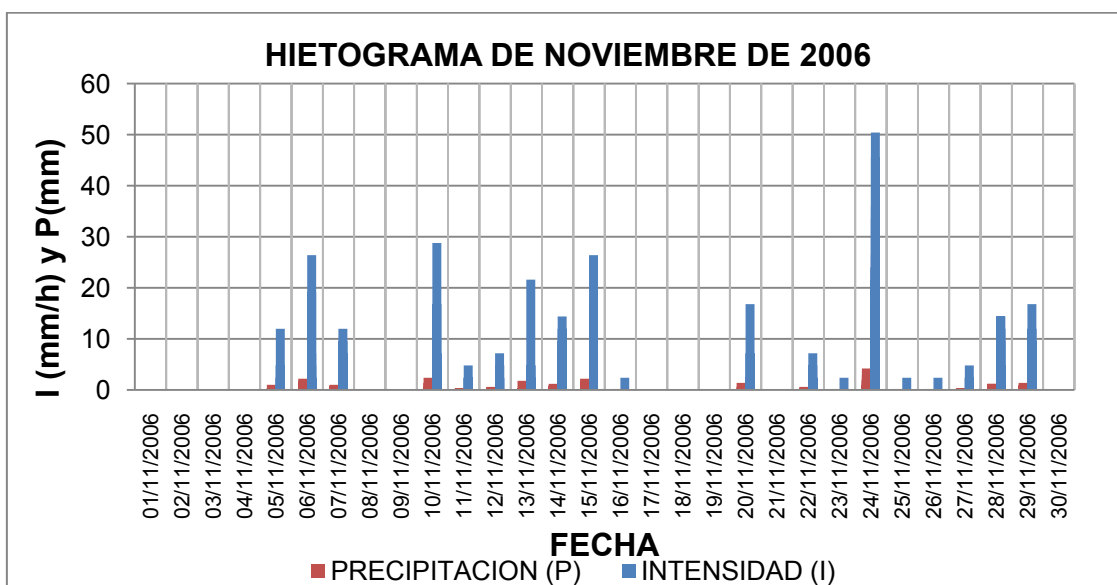
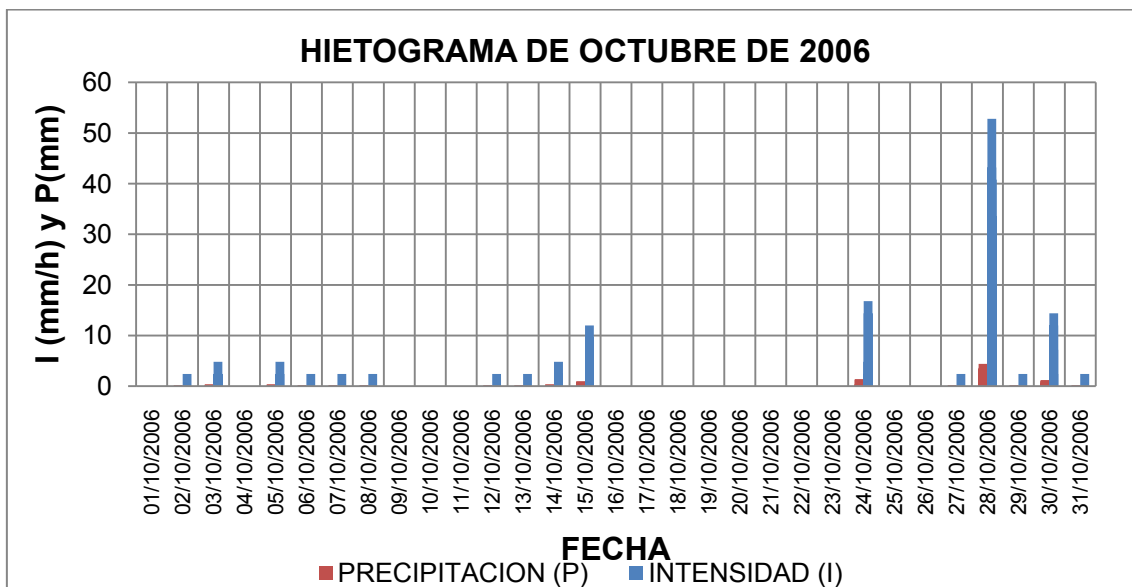
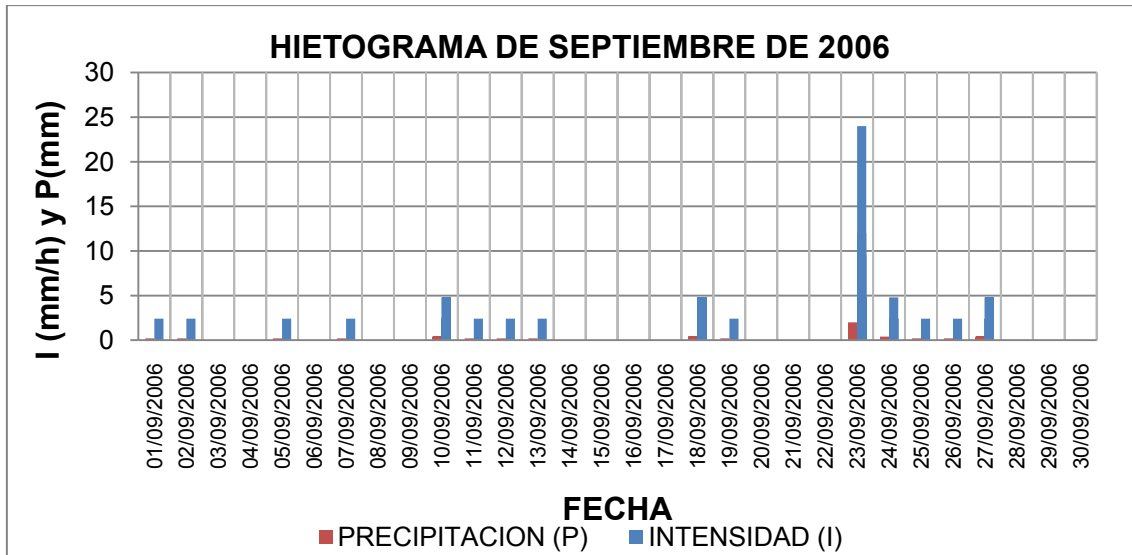


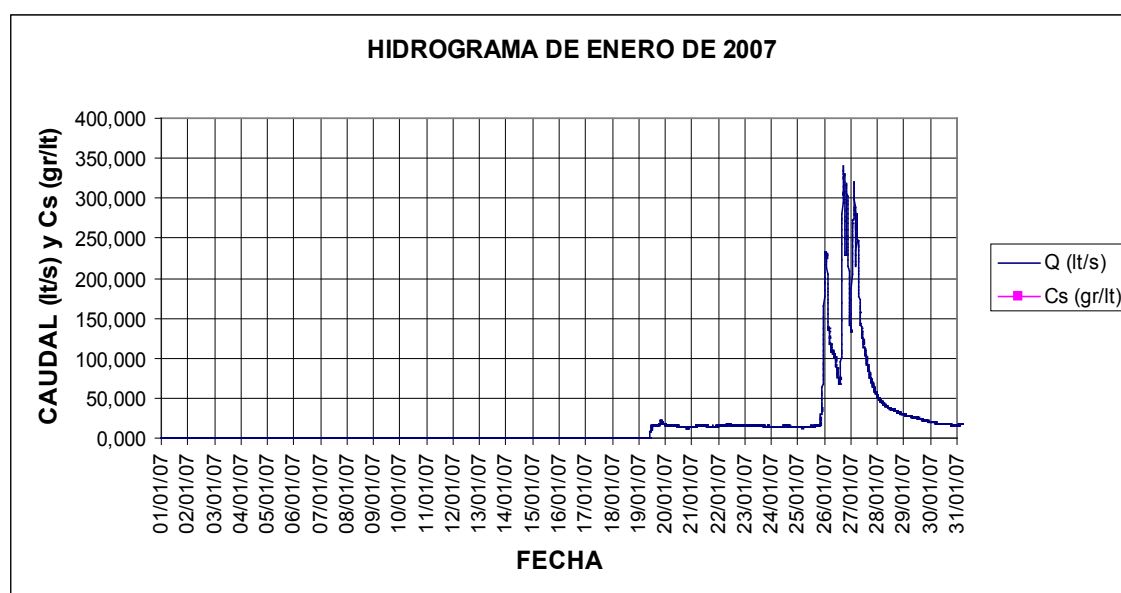
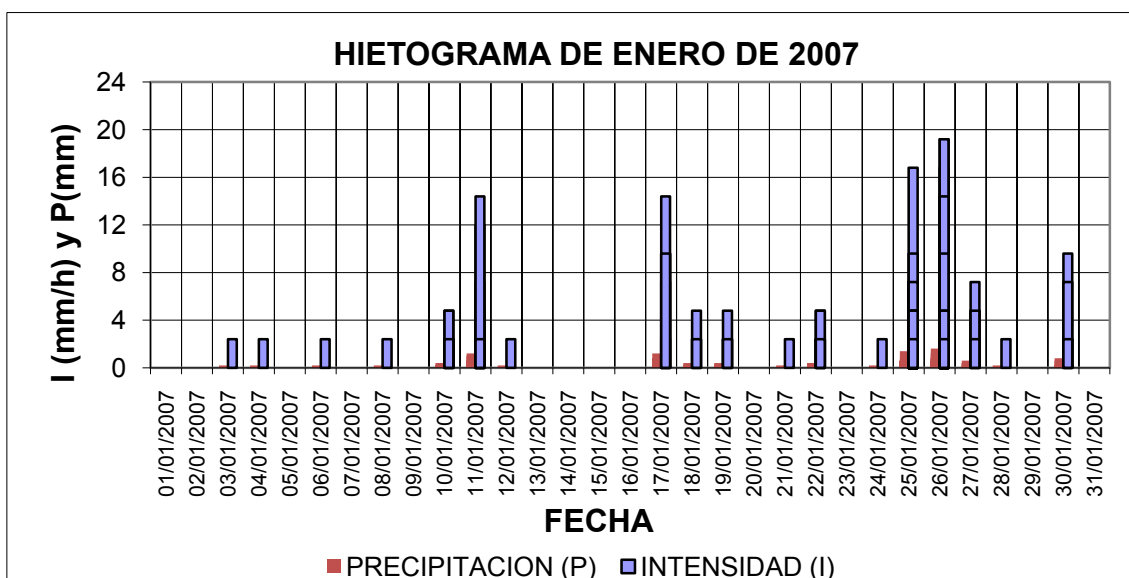
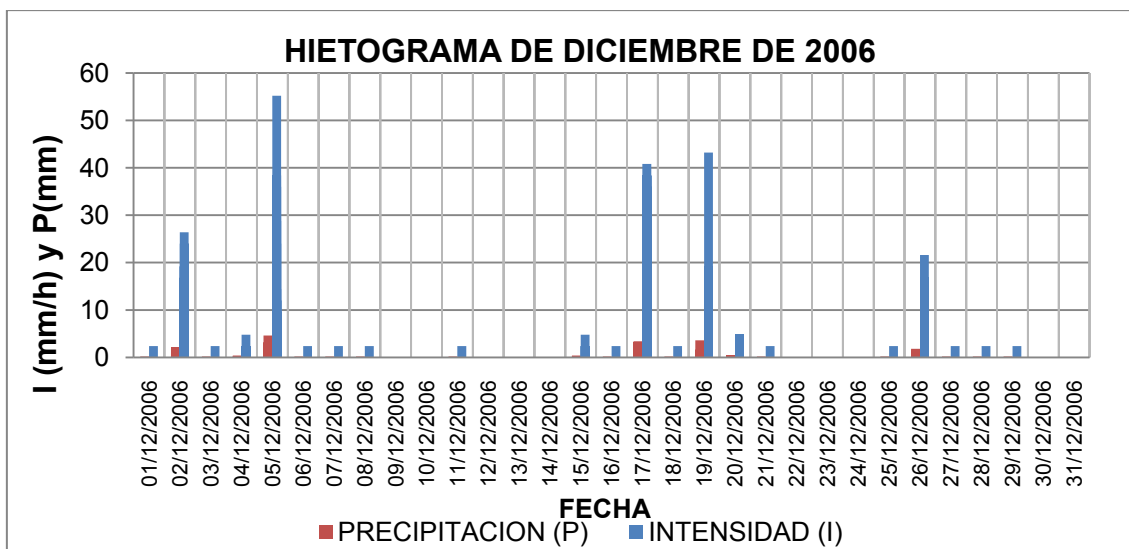


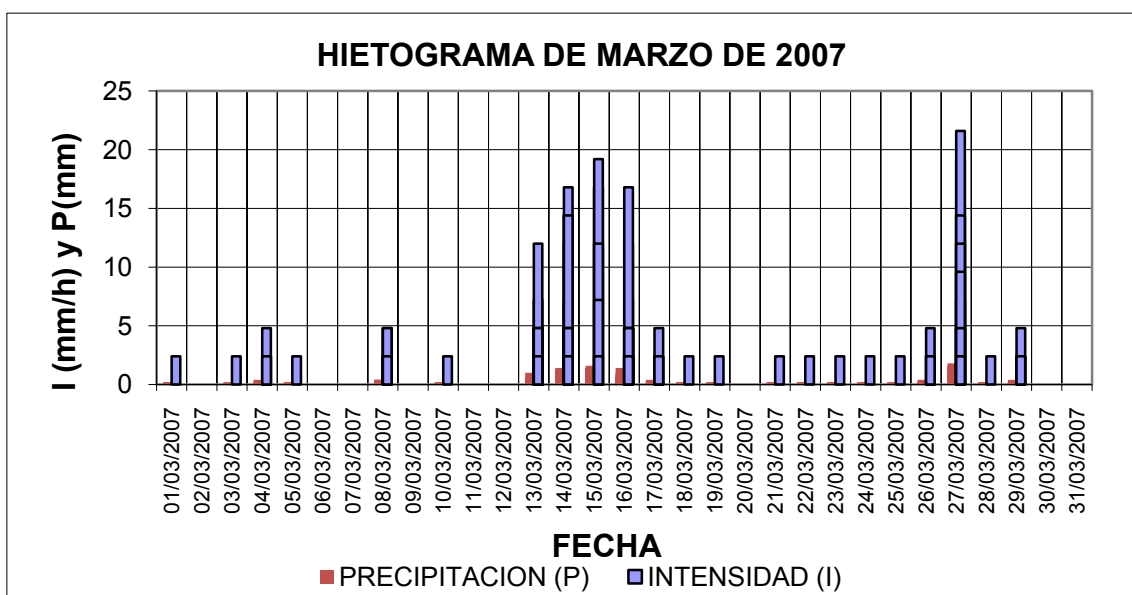
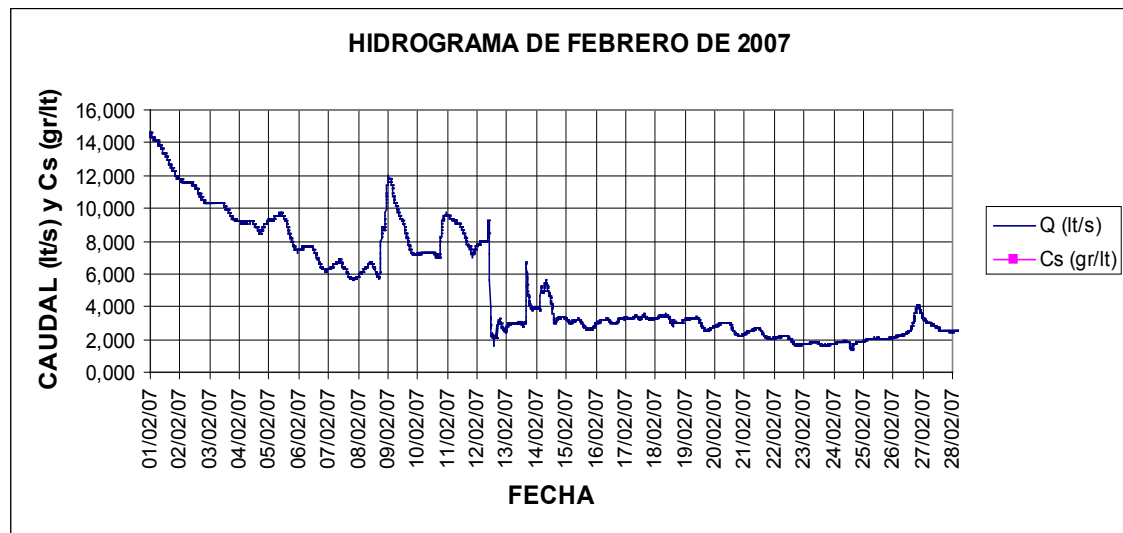
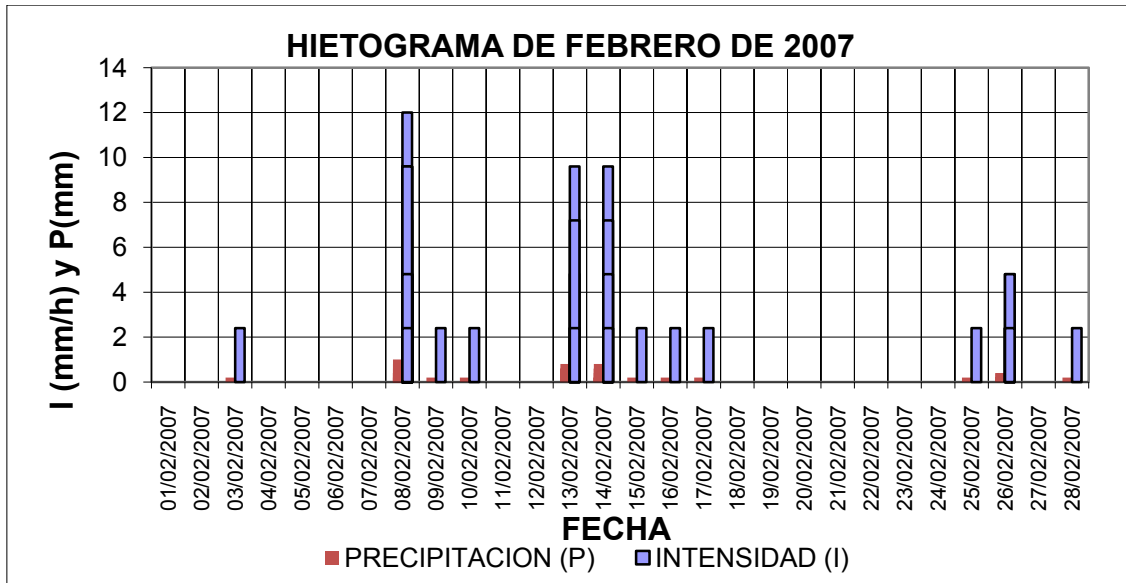


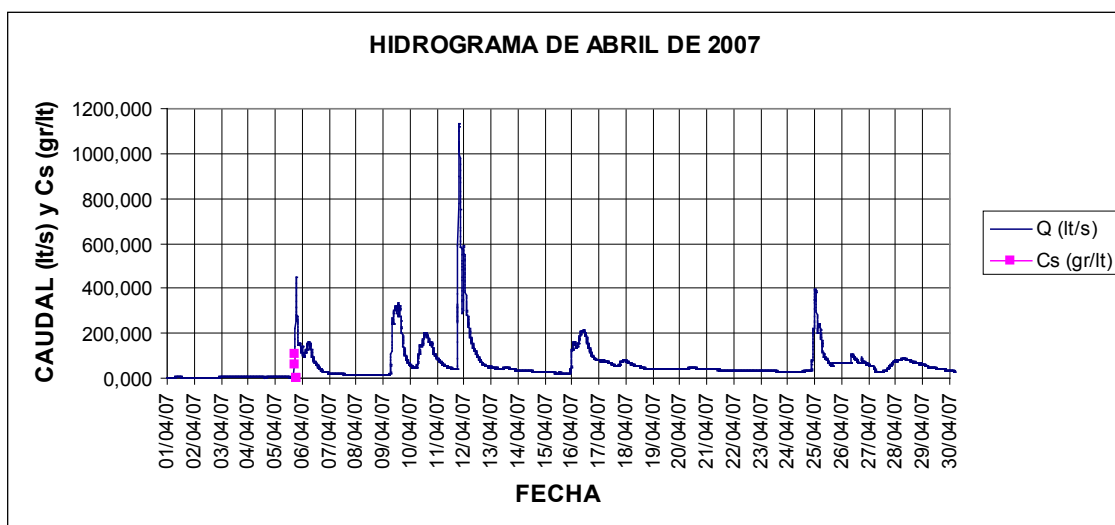
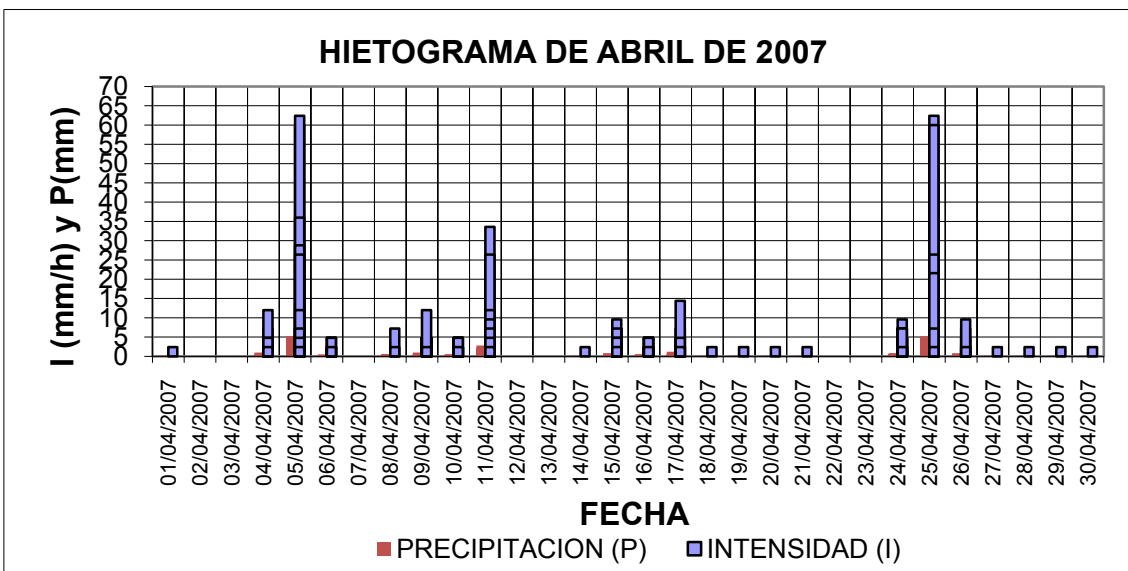


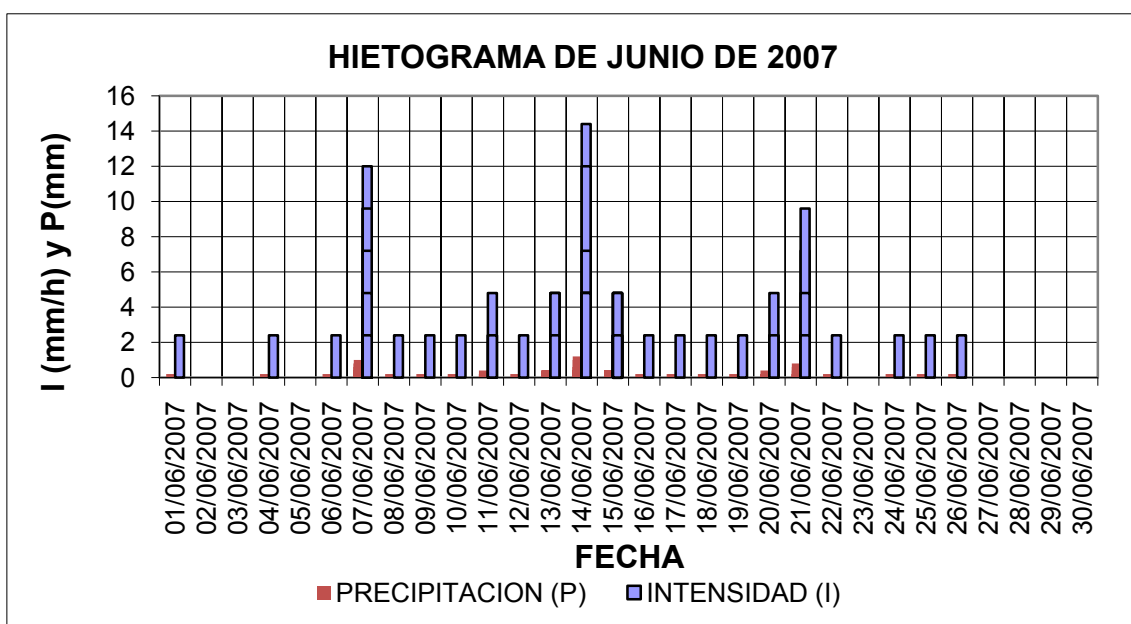
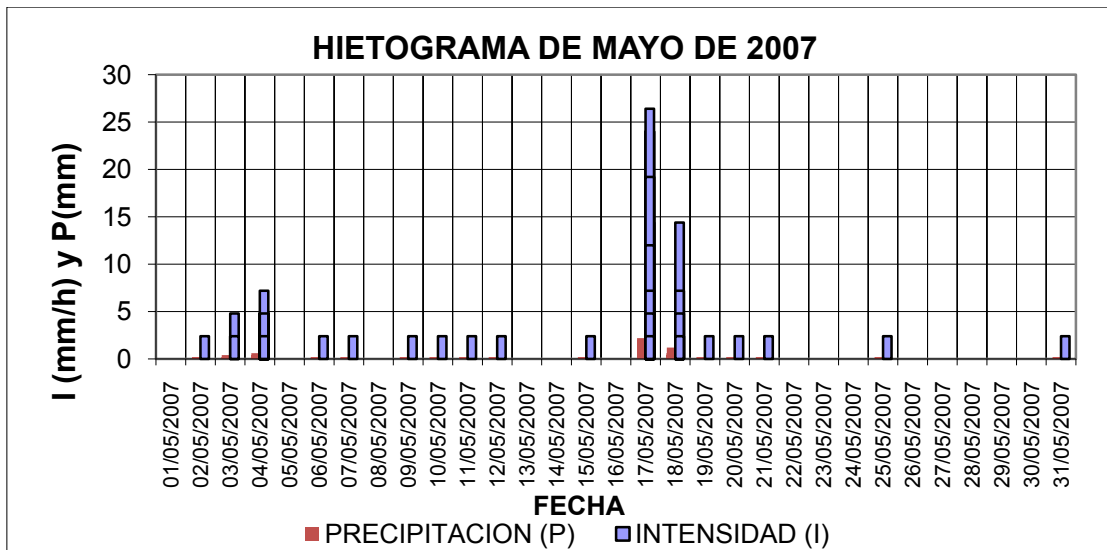




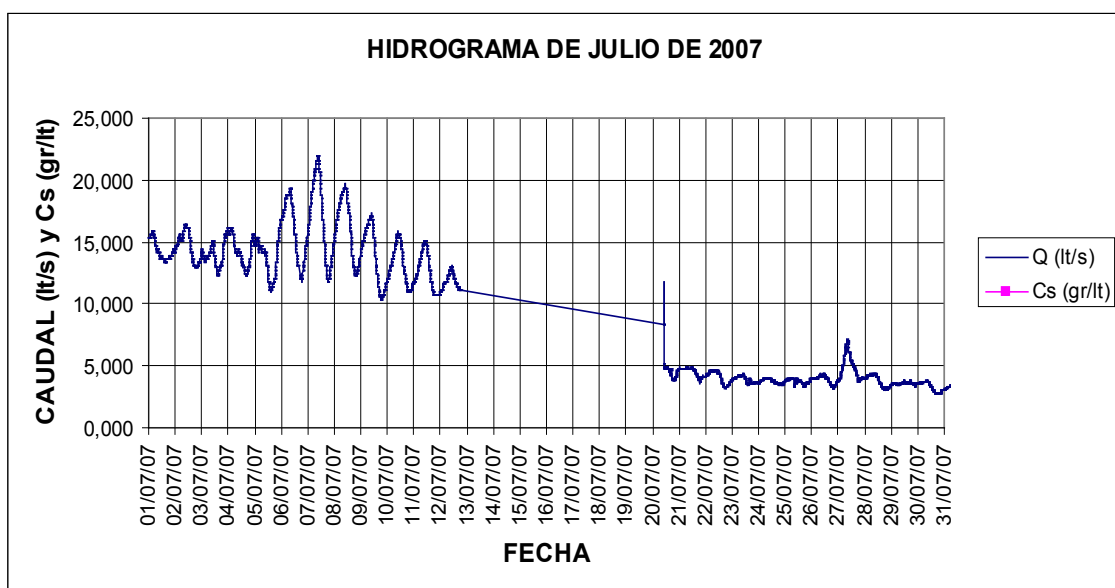
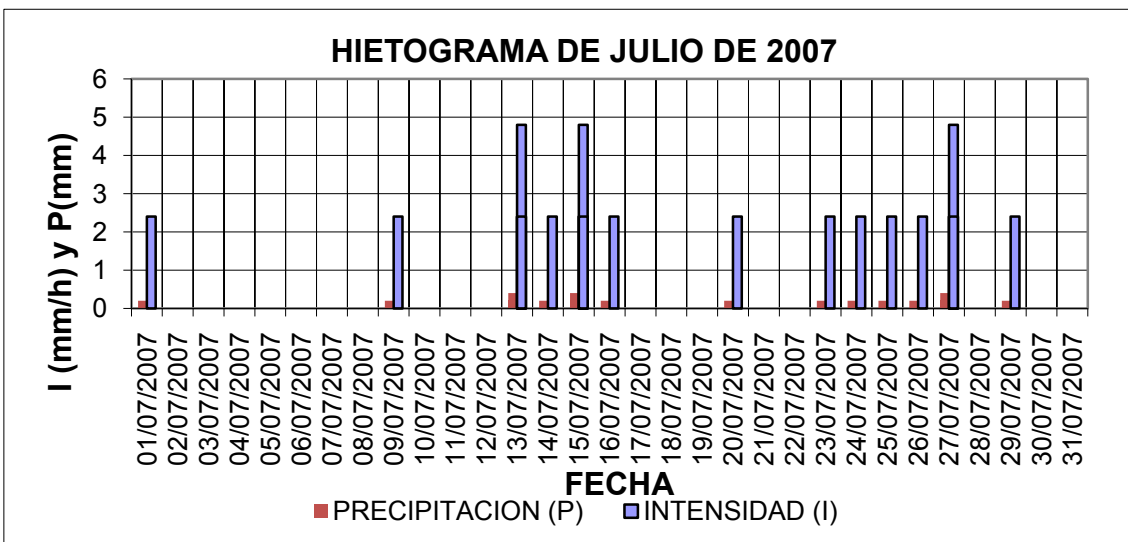
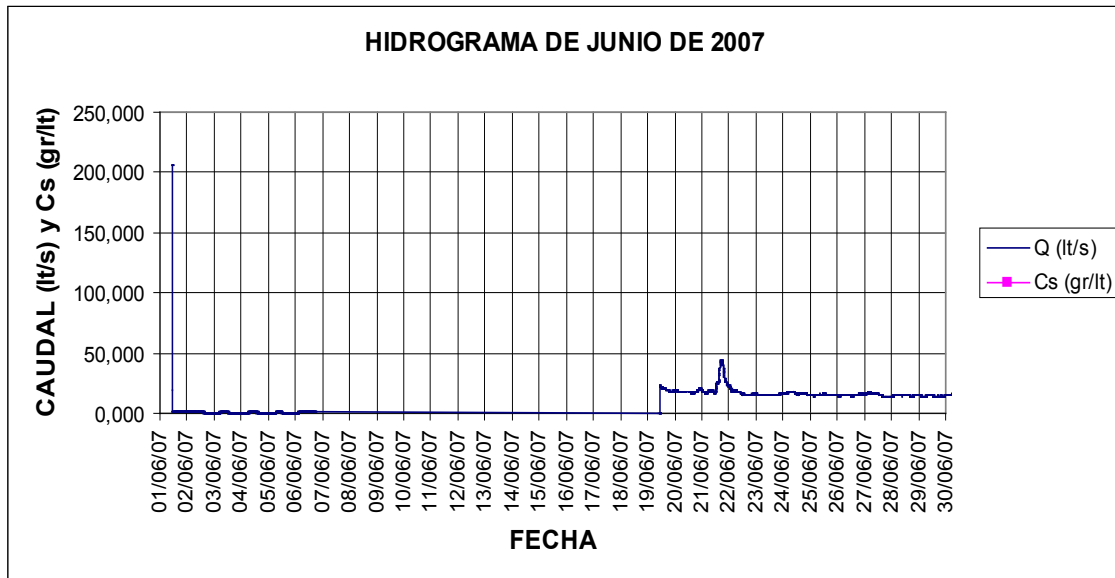


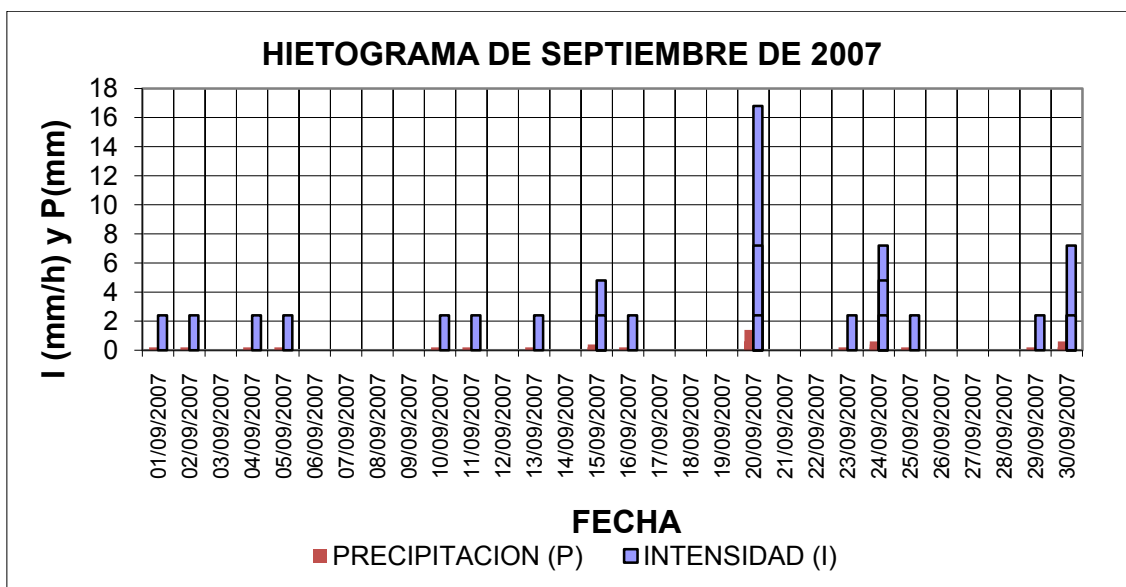
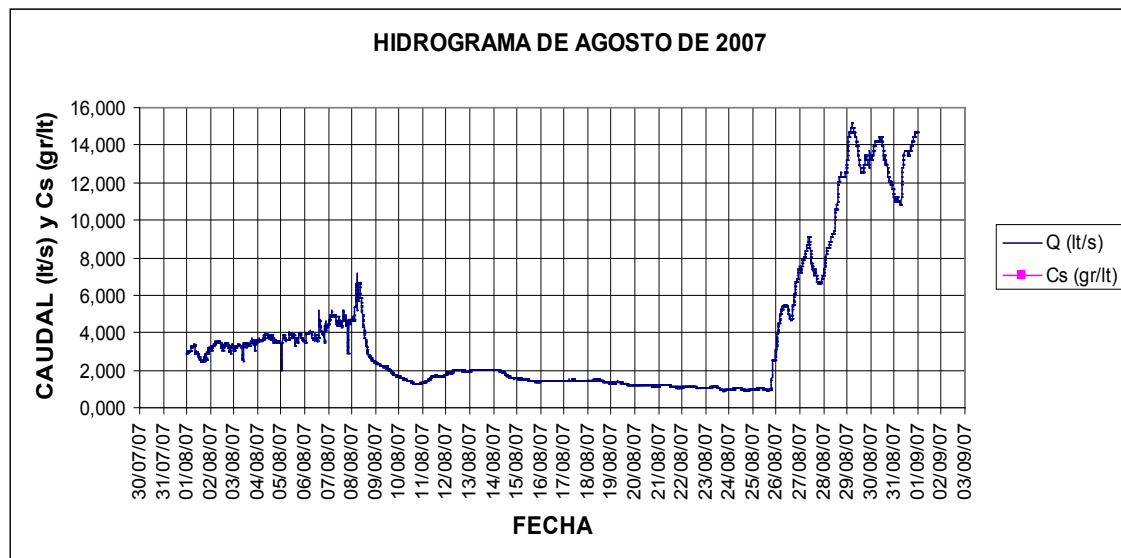
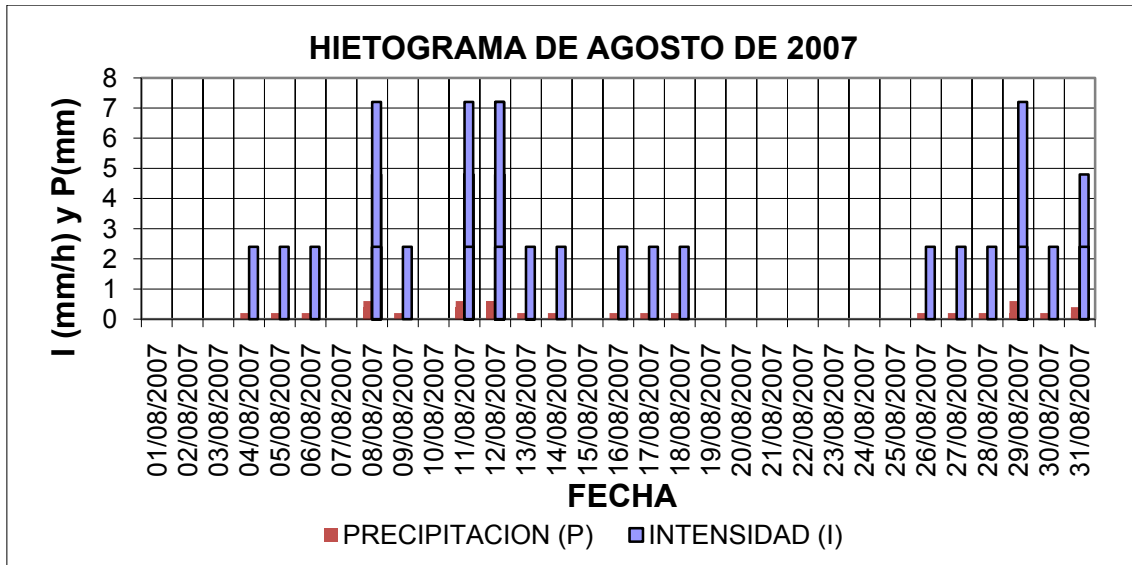


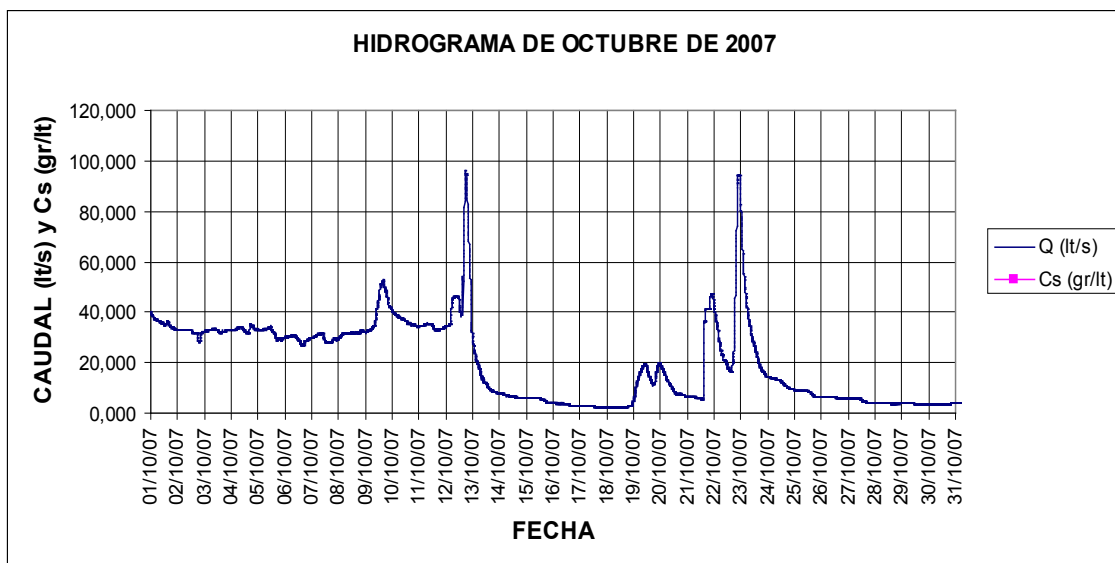
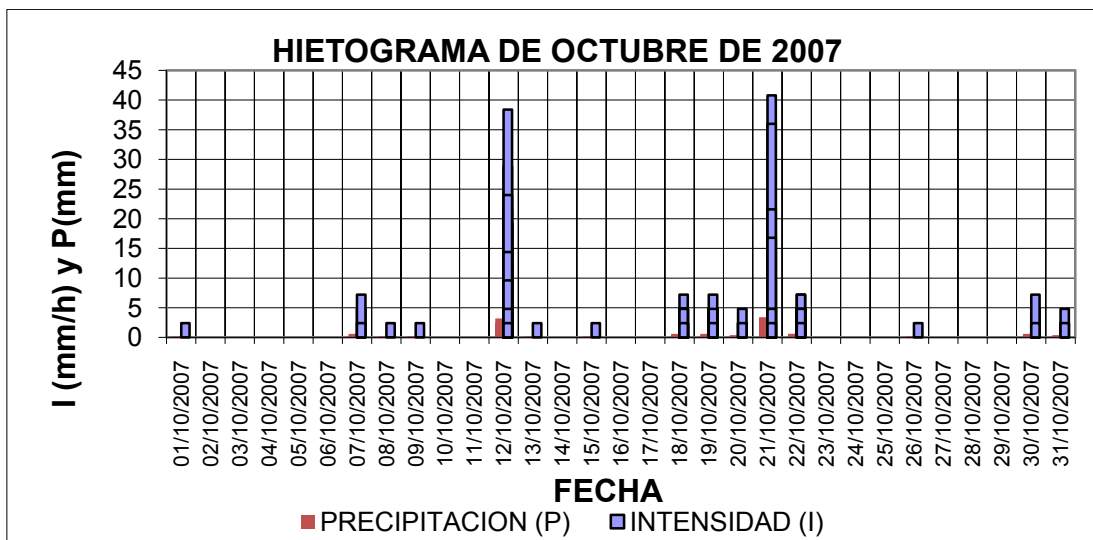
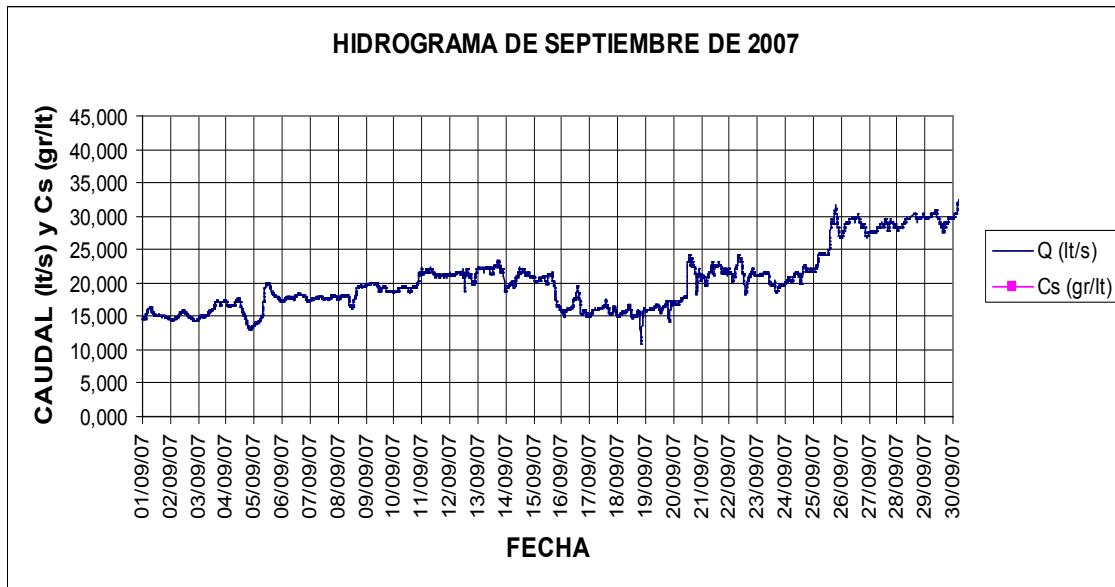


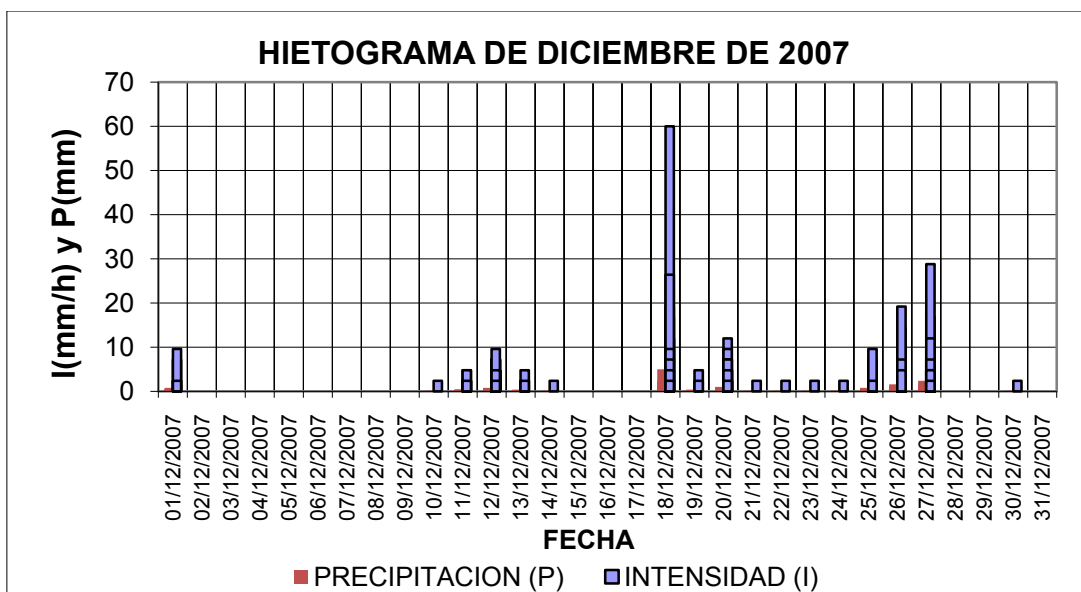
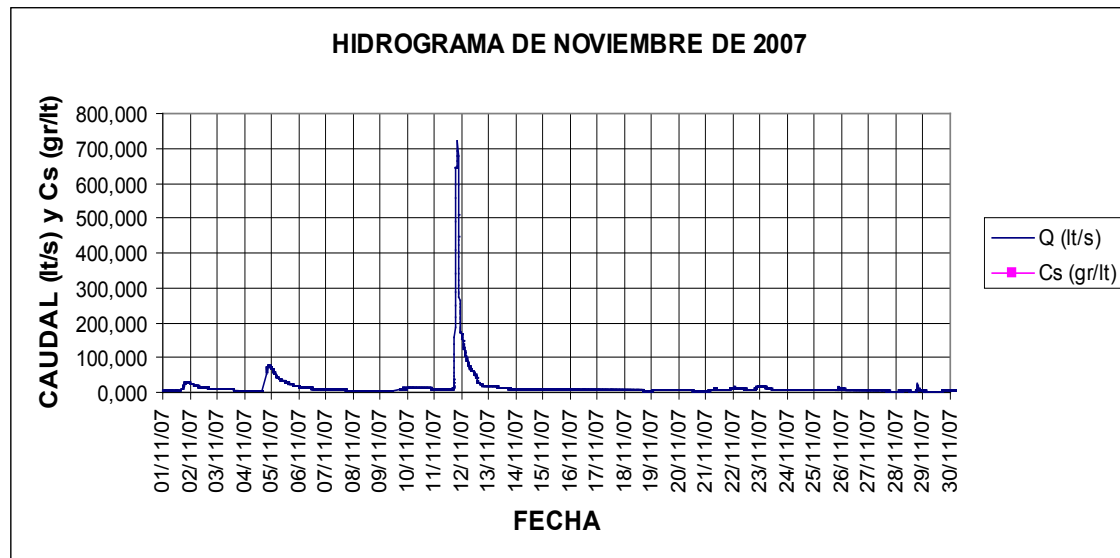
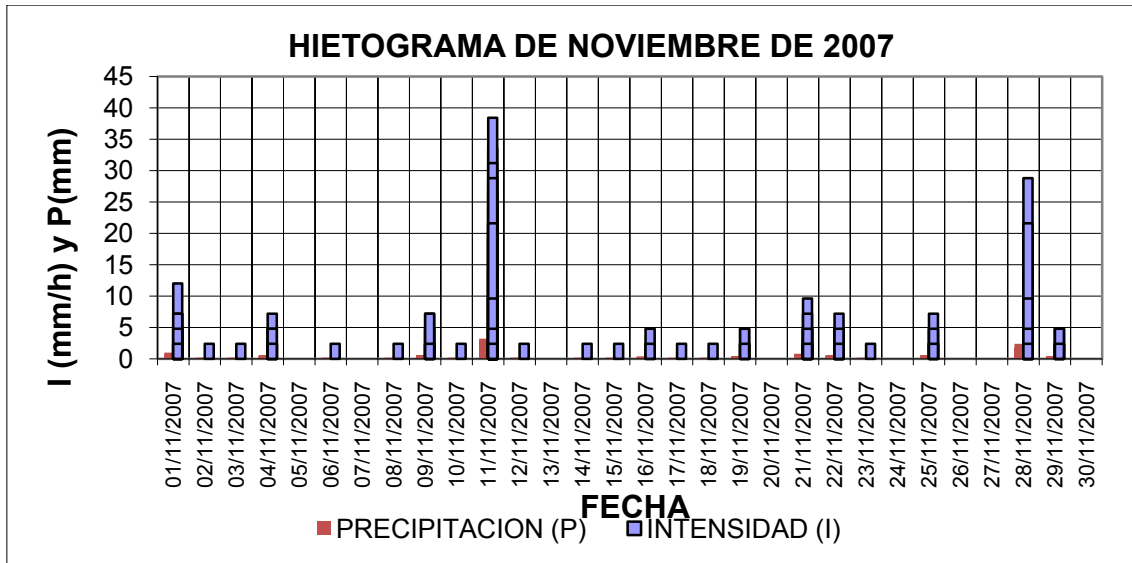


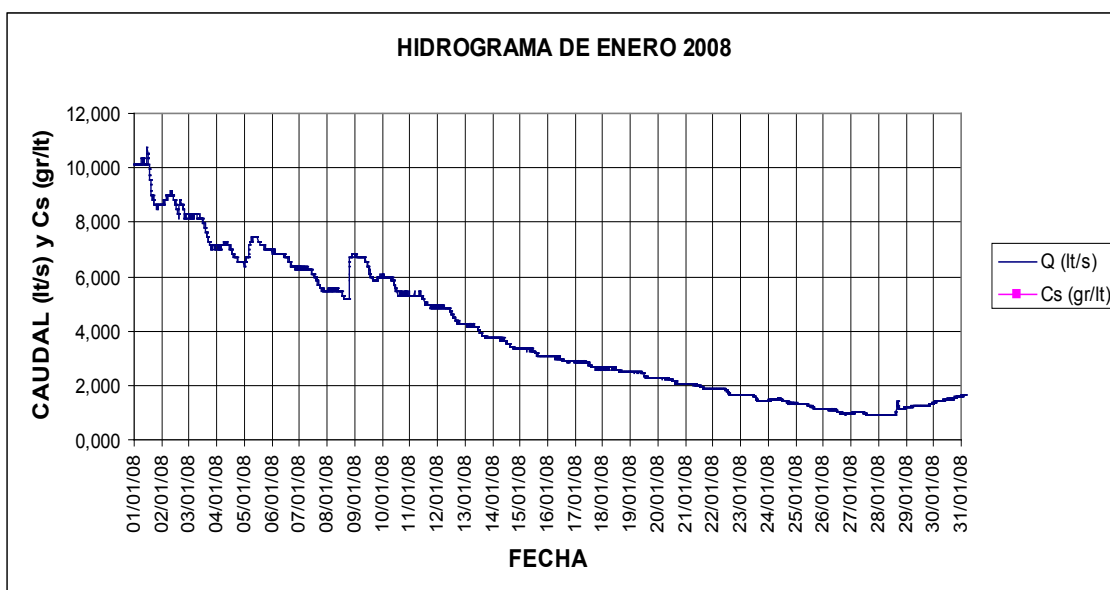
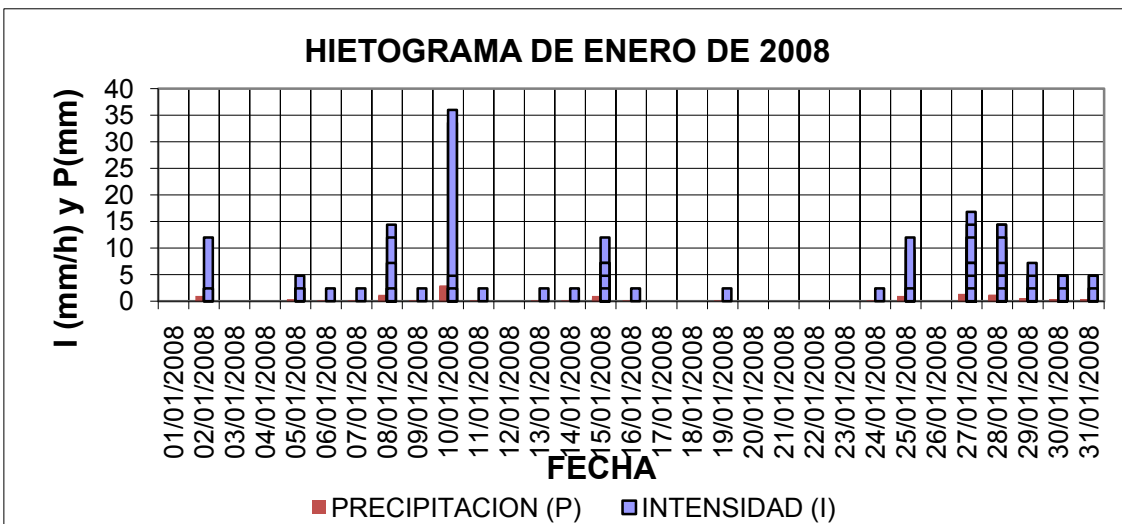
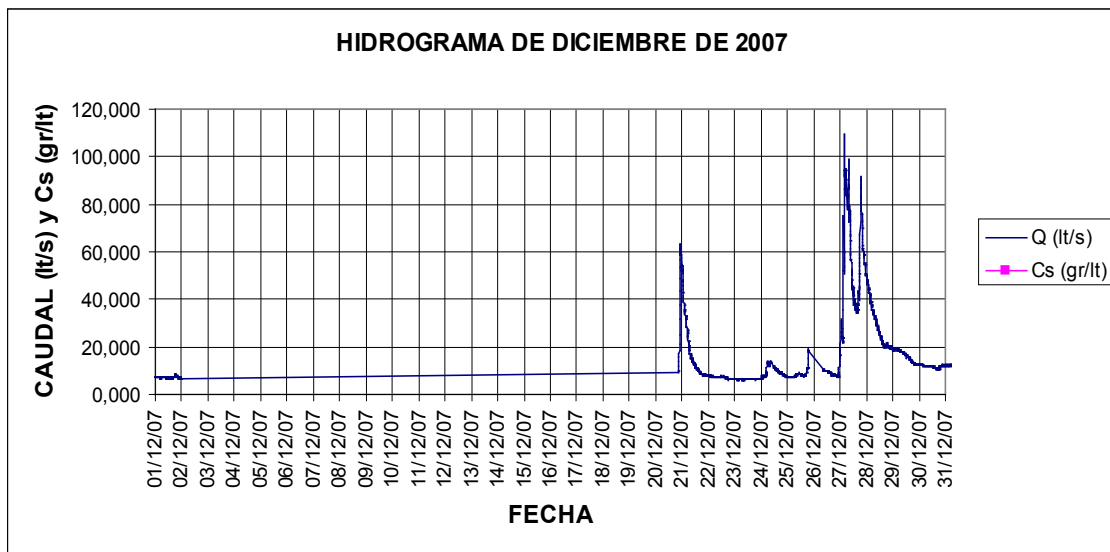


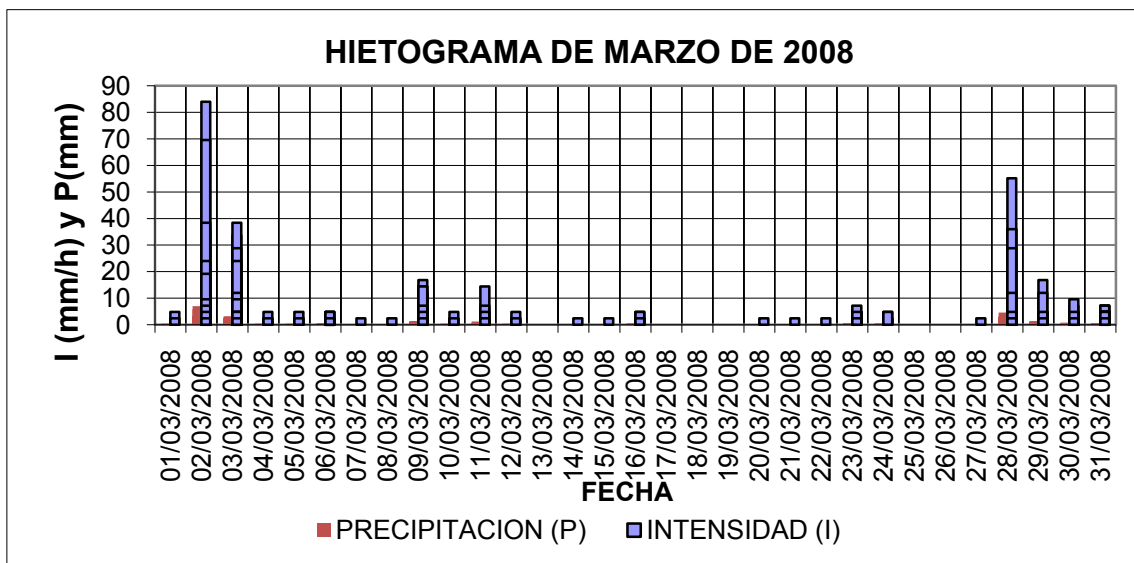
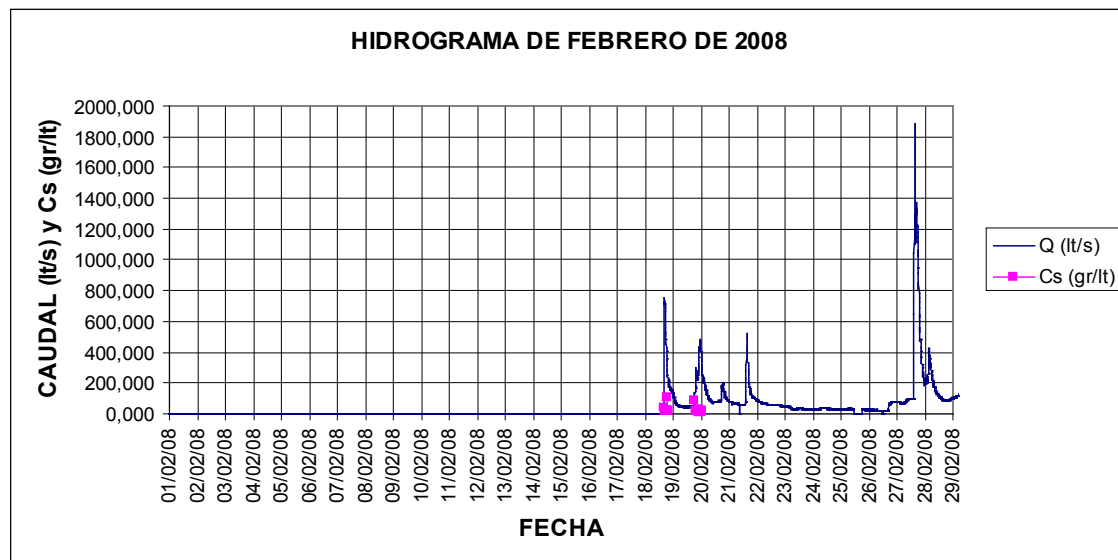
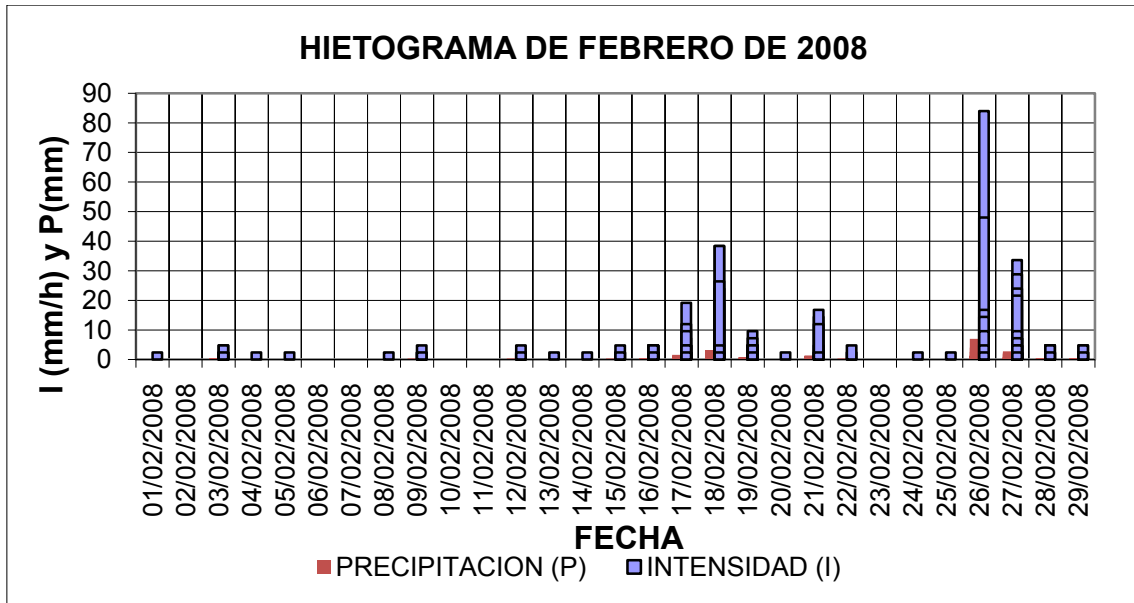


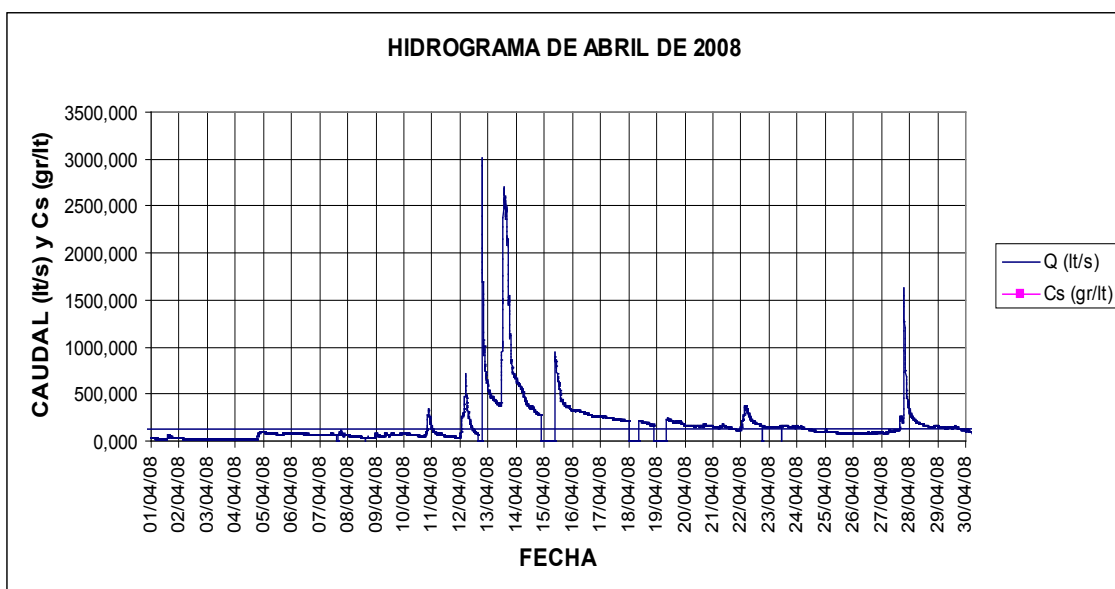
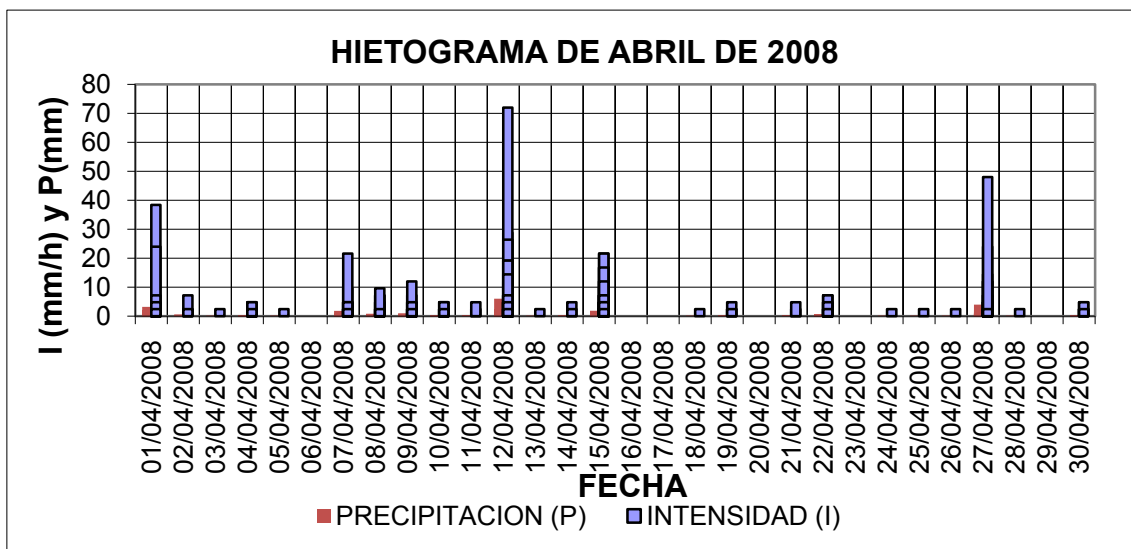
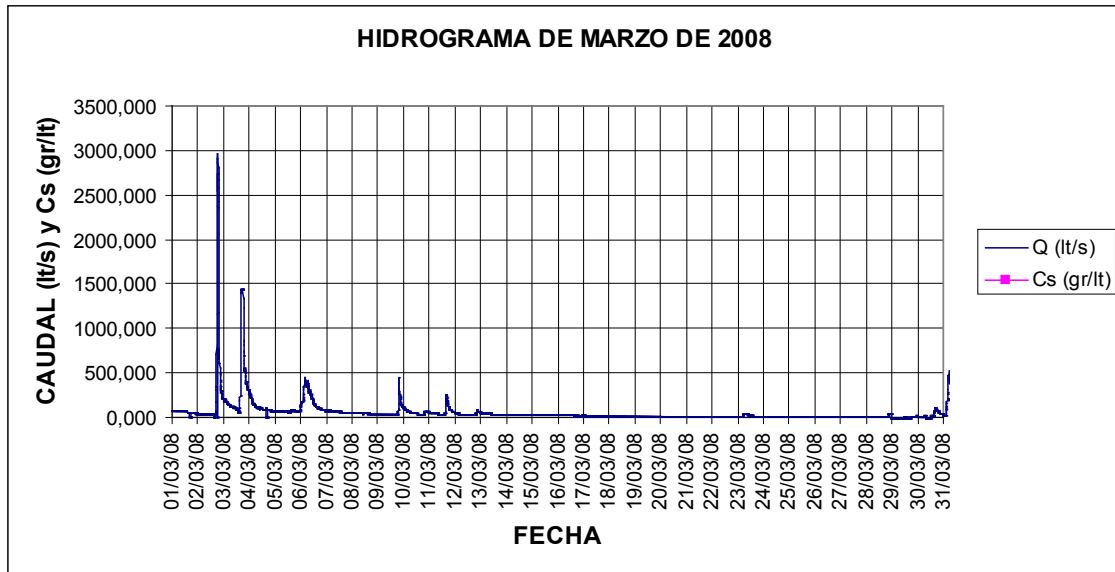


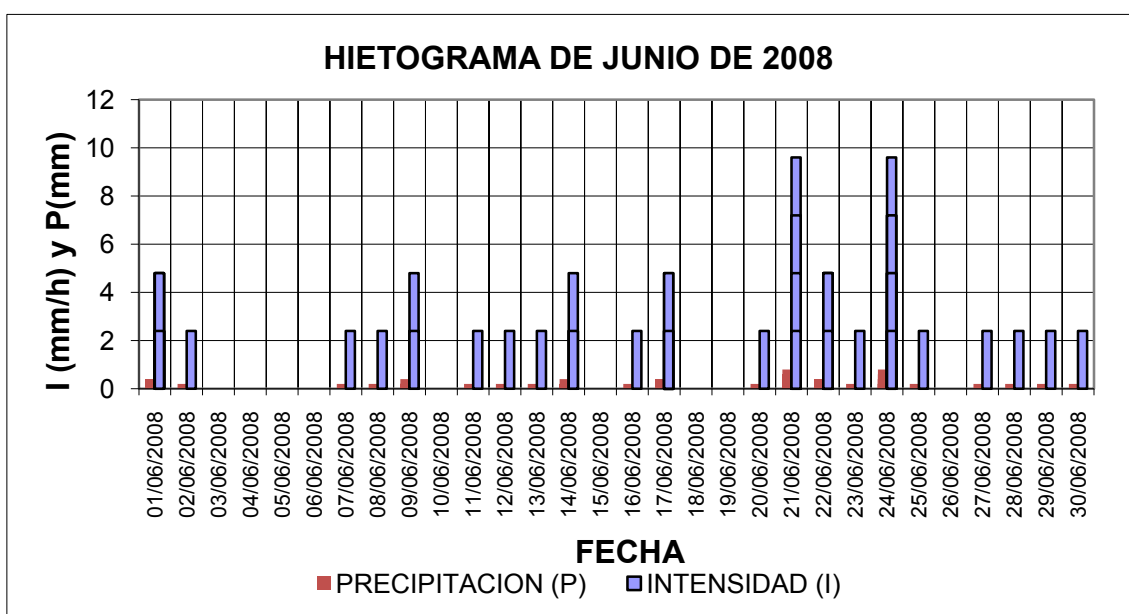
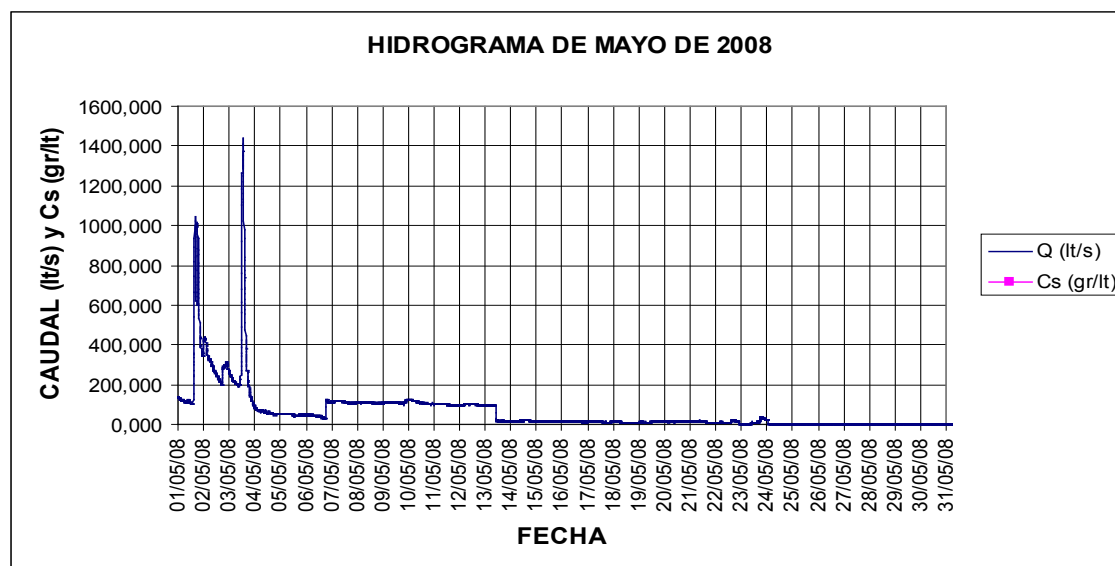
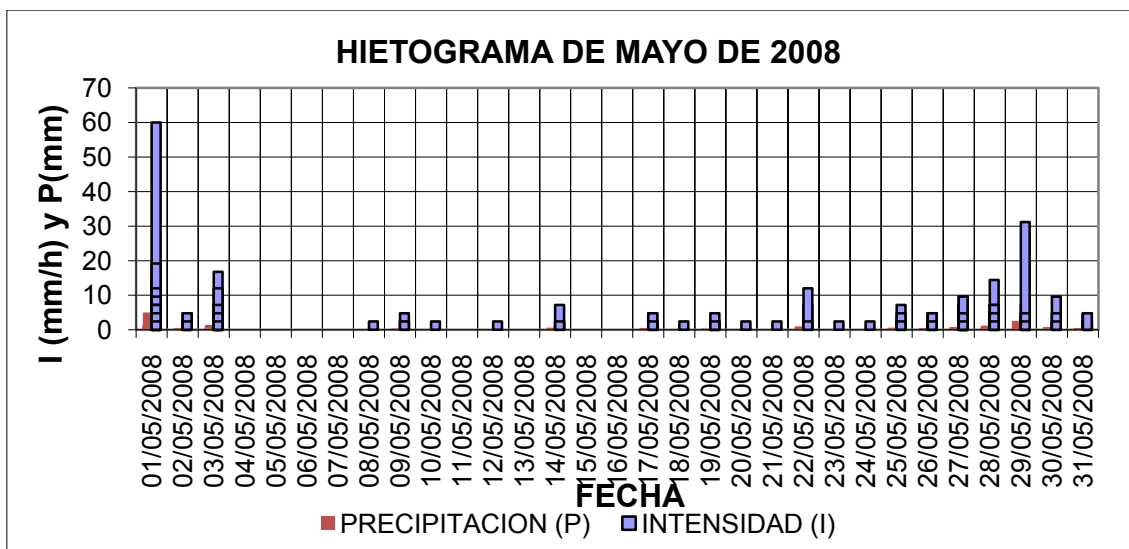




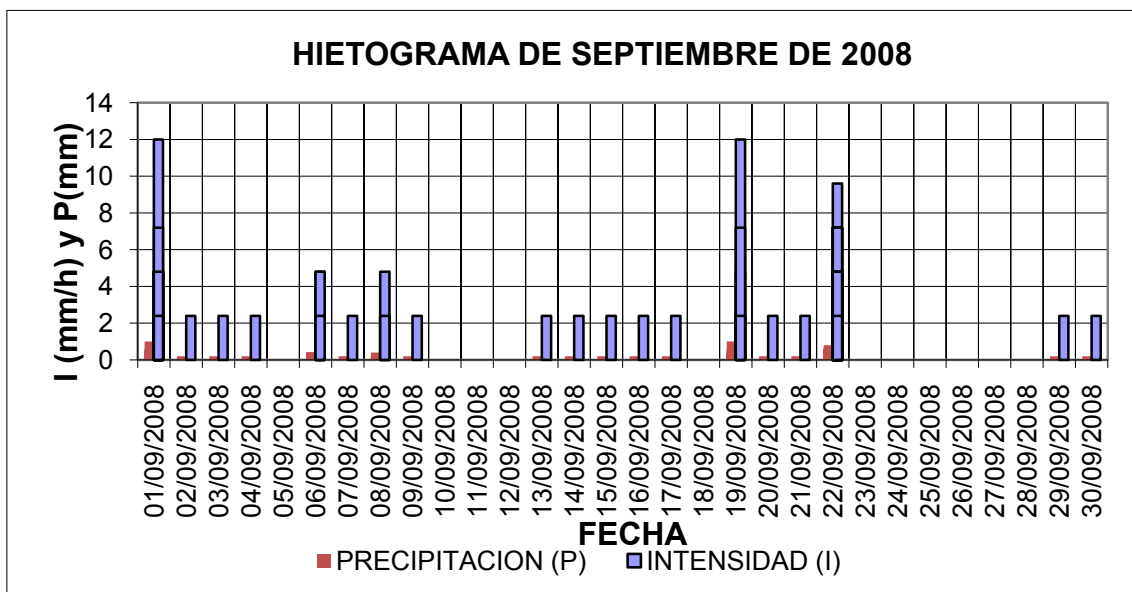
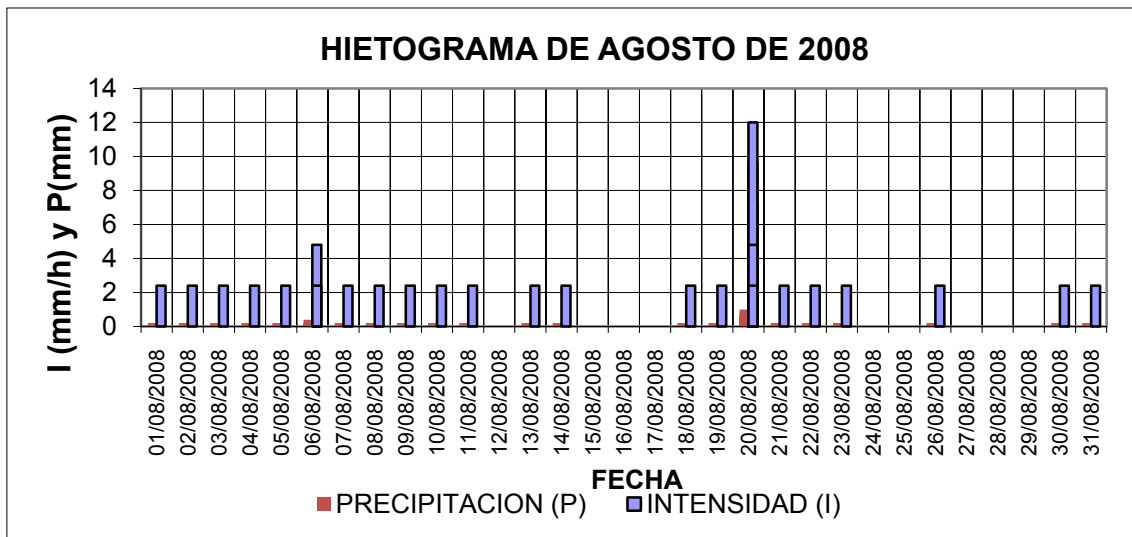
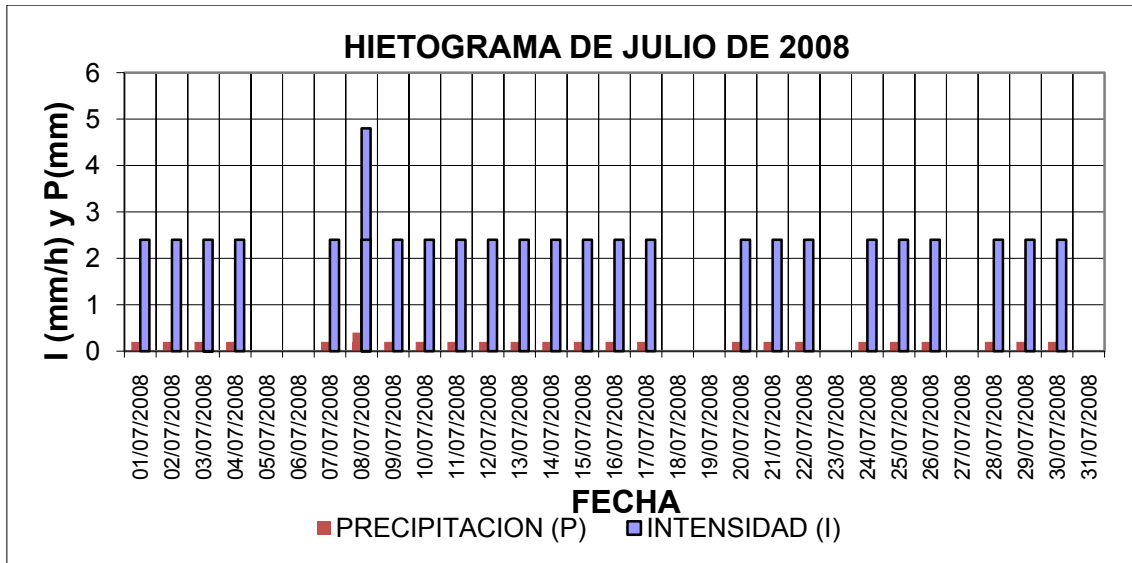


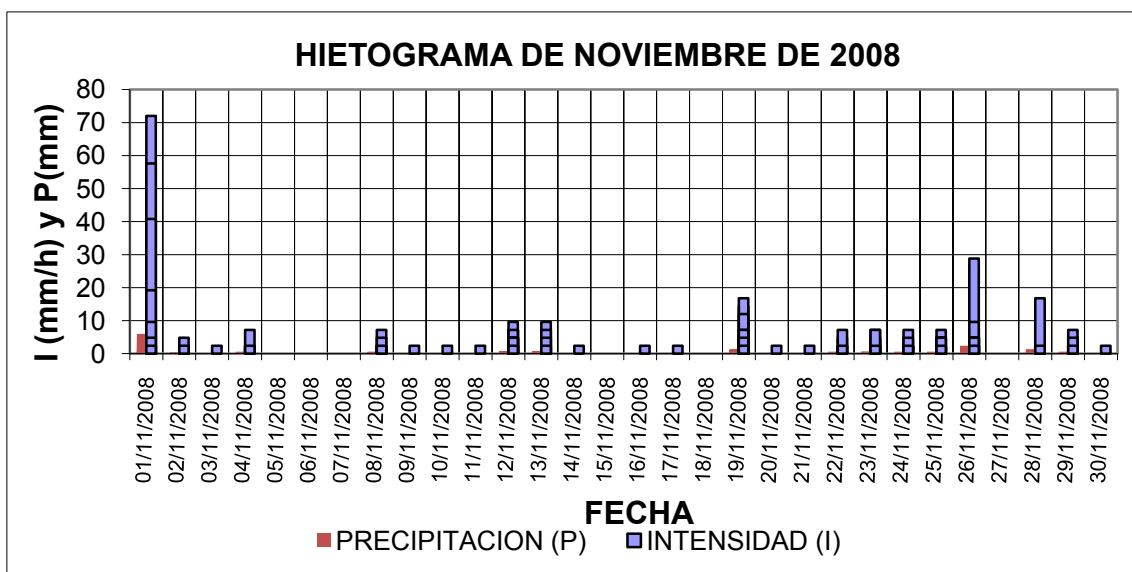
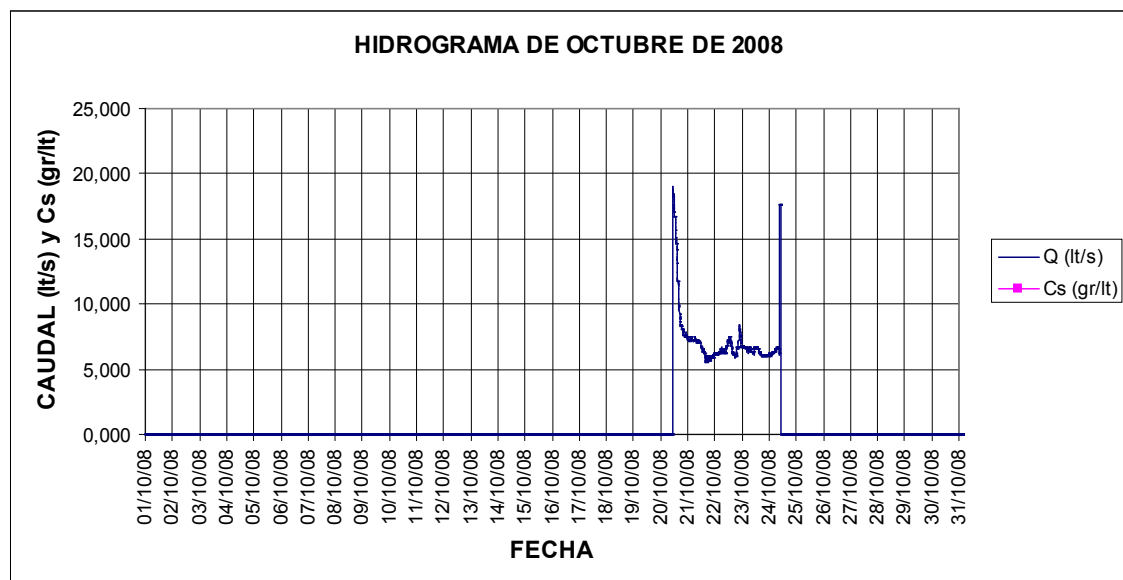
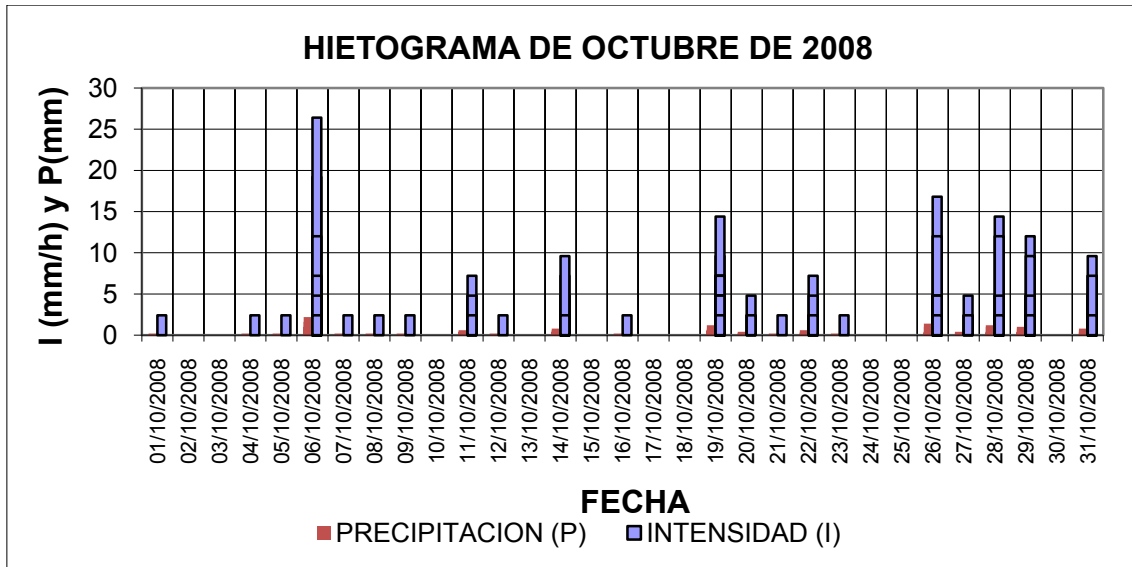


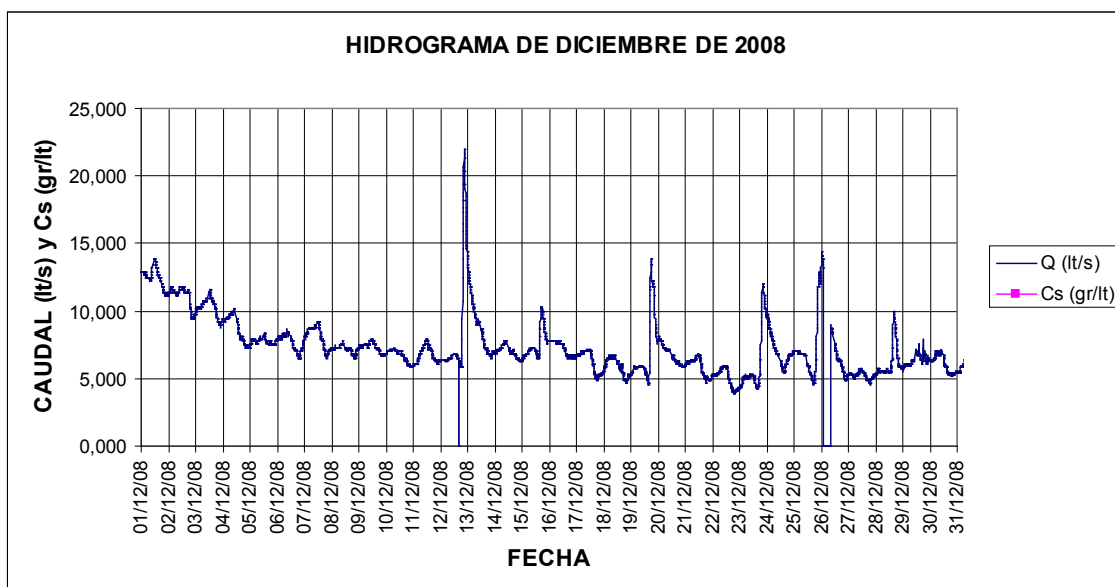
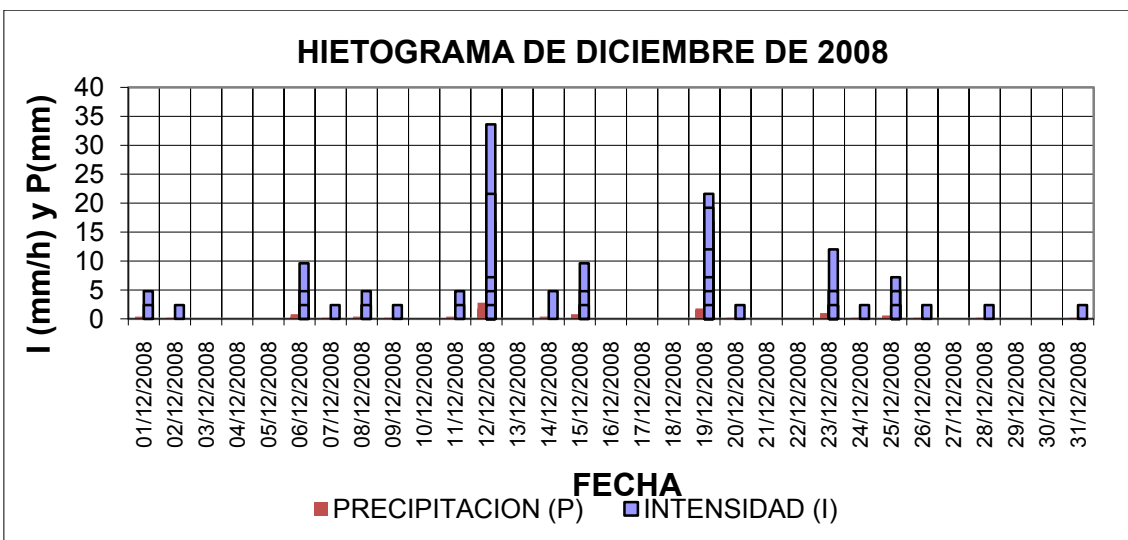
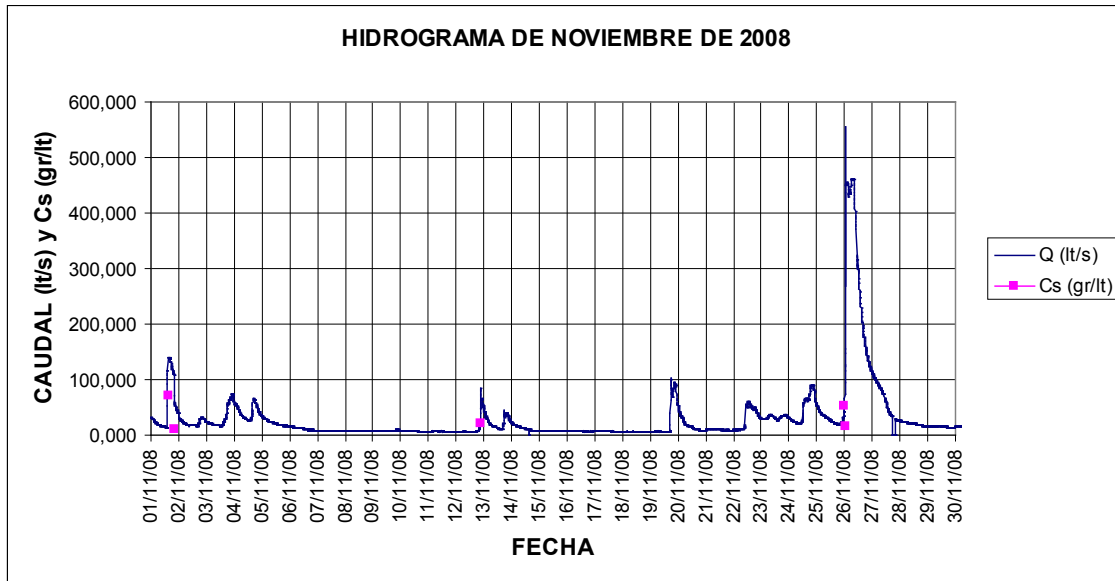


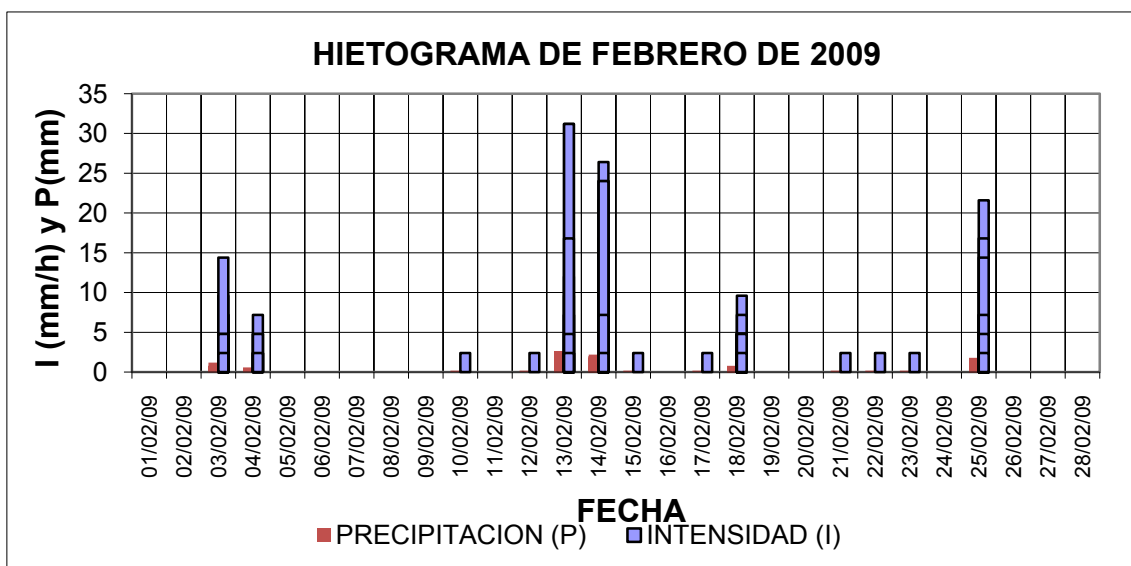
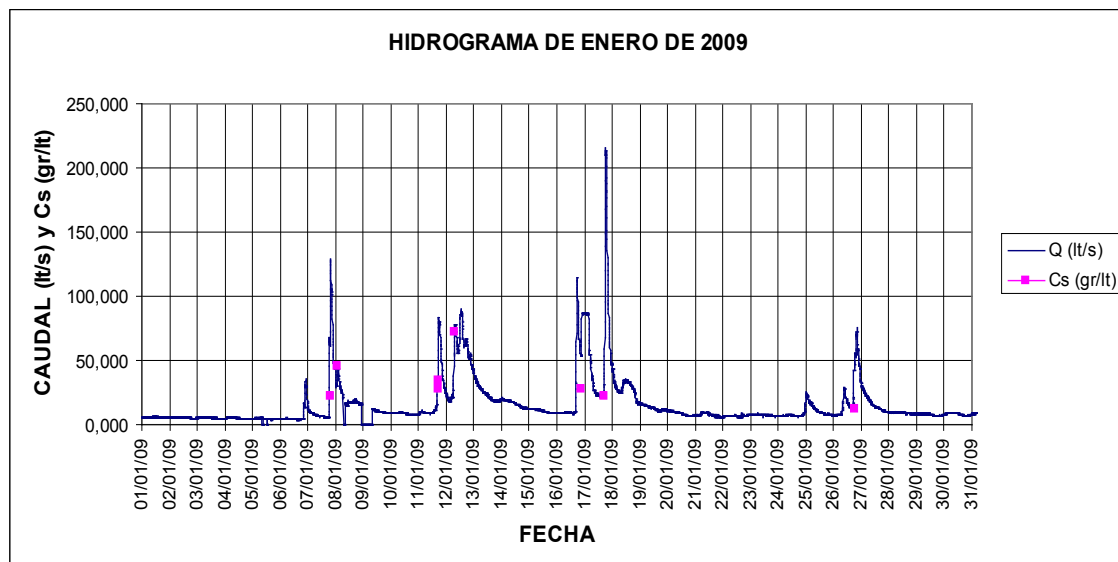
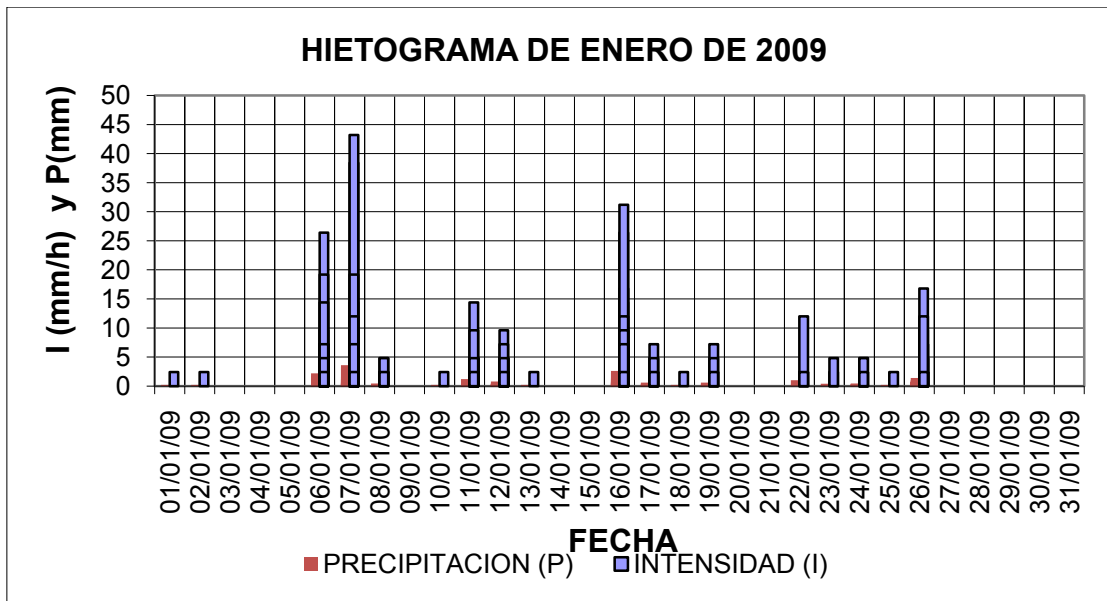


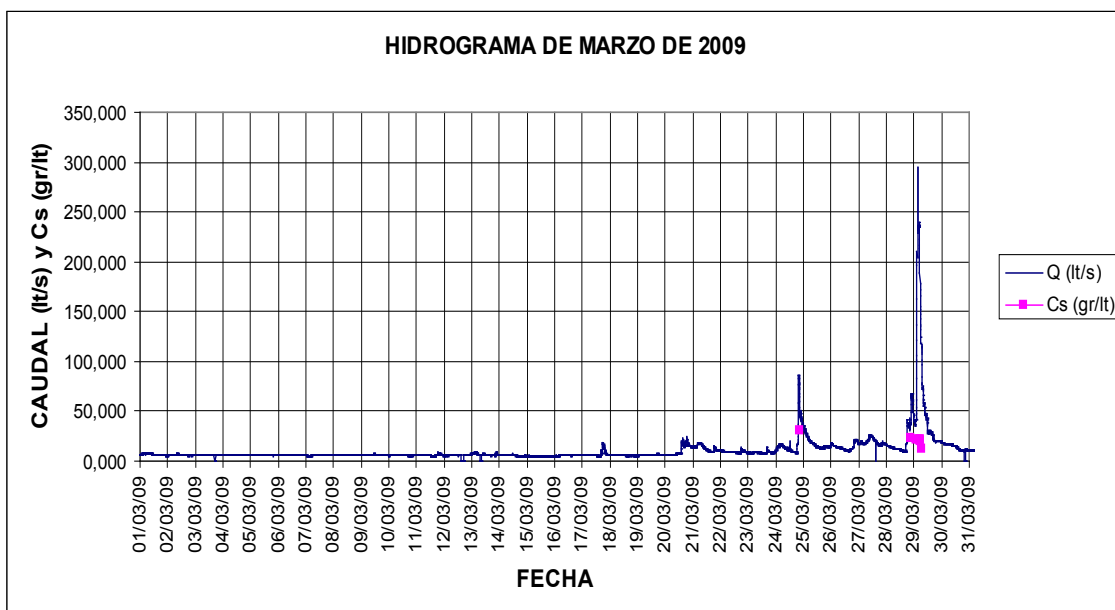
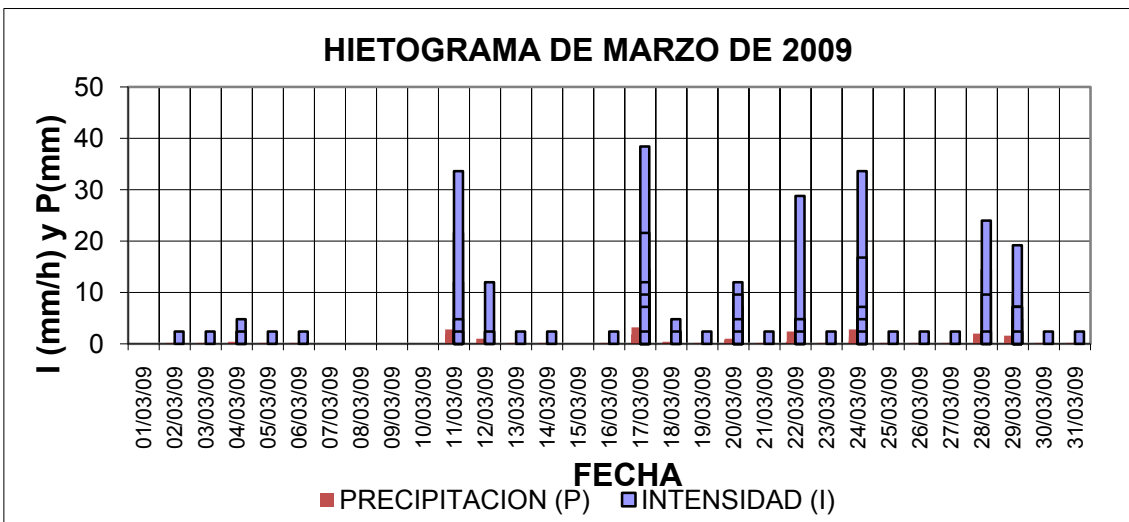
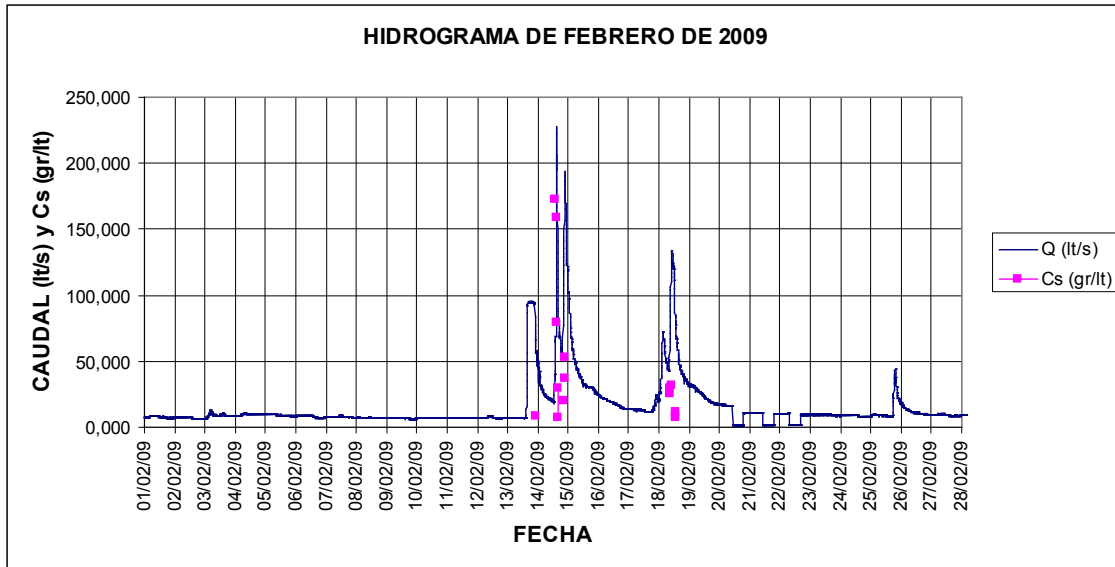












#### ANEXO 4: RESULTADOS DE LAS MUESTRAS DE CONCENTRACION DE SEDIMENTOS

Fecha (mm-dd-aa)	hora	Caudal (l/sg)	Concentración (gr/lit)
12/11/2004	7:35	8,636	5,400
15/12/2004	11:35	4,585	2,400
27/12/2004	11:00	4,359	0,200
02/02/2005	17:10	2,279	0,400
15/02/2005	10:10	9,936	3,200
15/02/2005	10:15	9,936	1,000
14/03/2005	12:05	8,117	2,000
22/03/2005	12:00	8,461	2,000
30/03/2005	17:15	23,293	9,400
30/03/2005	17:20	30,974	8,000
30/03/2005	17:20	35,393	8,600
01/04/2005	18:25	8,117	0,400
19/04/2005	17:10	0,745	0,200
04/05/2005	12:00	2,279	0,400
05/05/2005		2,279	0,600
05/05/2005		2,279	0,400
18/05/2005	15:40	1,177	0,400
06/06/2005	15:10	2,279	1,778
16/06/2005	13:15	0,745	0,670
29/06/2005	7:55	3,882	1,048
29/06/2005	16:50	6,351	1,290
29/06/2005	17:30	4,359	1,957
30/06/2005	8:25	2,222	1,048
02/07/2005	16:50	1,953	0,210
11/07/2005	12:35	0,650	0,210
26/07/2005	13:45	0,413	0,110
21/10/2005	16:35	0,474	2,581
21/10/2005	17:10	34,568	2,340
24/10/2005	15:55	1,521	2,553
24/10/2005	16:40	0,626	0,426
24/10/2005	18:50	1,785	0,213
05/11/2005	16:45	0,244	0,211
06/11/2005	20:40	1,576	0,211
06/11/2005	21:25	0,752	0,426
06/11/2005	22:50	0,687	4,468
06/11/2005	22:50	0,719	0,213
06/11/2005	22:50	0,719	0,208
14/11/2005	20:45	19,928	6,458
14/11/2005	22:00	13,998	2,000
14/11/2005	22:50	11,555	1,458
03/12/2005	19:55	1,521	1,200
03/12/2005	20:05	2,005	0,400
03/12/2005	20:55	1,168	1,600
04/12/2005	15:40	4,348	11,960
04/12/2005	16:00	17,079	16,420
04/12/2005	17:25	7,236	2,062
14/12/2005	16:30	2,469	3,158
14/12/2005	17:00	5,438	25,053

16/12/2005	15:35	5,903	13,125
17/12/2005	19:55	1,468	1,000
18/12/2005	7:50	3,407	1,505
19/12/2005	17:10	2,917	3,000
23/12/2005	0:55	8,322	9,030
23/12/2005	18:30	9,994	5,260
23/12/2005	19:05	6,180	9,360
23/12/2005	20:25	11,663	13,120
24/12/2005	1:05	15,160	6,800
09/03/2006	7:40	7,619	50,000
15/03/2006	19:10	76,079	32,353
15/03/2006	19:15	68,494	35,294
15/03/2006	20:05	109,137	45,556
15/03/2006	20:10	100,810	37,714
15/03/2006	20:15	98,473	7,273
15/03/2006	20:20	84,633	8,108
15/03/2006	20:25	79,234	17,576
15/03/2006	20:35	68,857	7,879
15/03/2006	20:40	68,857	18,378
15/03/2006	20:45	72,935	11,111
28/03/2007	20:55	67,701	15,429
05/04/2007	17:35	163,183	110,175
05/04/2007	17:40	163,183	61,311
05/04/2007	18:20	358,875	2,879
05/04/2007	18:20	362,466	2,500
05/04/2007	18:45	536,684	0,545
05/04/2007	18:50	557,546	1,270
18/02/2008	16:30	156,859	41,250
18/02/2008	17:05	866,363	20,000
18/02/2008	17:10	720,710	18,421
18/02/2008	18:05	555,737	15,645
18/02/2008	18:10	531,991	18,226
18/02/2008	18:15	523,268	16,610
18/02/2008	18:40	441,322	110,000
18/02/2008	18:45	428,575	15,161
18/02/2008	18:55	396,610	15,238
18/02/2008	19:25	314,577	19,669
18/02/2008	19:30	302,471	17,833
19/02/2008	18:25	133,915	83,684
19/02/2008	19:10	238,102	21,905
19/02/2008	21:35	370,864	8,361
19/02/2008	22:00	426,056	26,393
19/02/2008	22:05	454,324	17,455
19/02/2008	22:45	558,755	22,373
19/02/2008	22:55	602,186	14,262
20/02/2008	0:30	403,837	20,847
20/02/2008	0:40	387,112	16,563
20/02/2008	0:45	377,769	8,644
01/11/2008	14:35	192,401	71,053
01/11/2008	20:05	110,335	10,000
12/11/2008	21:35	89,754	20,222
26/11/2008	0:15	94,180	51,935
26/11/2008	0:55	333,350	14,737
07/01/2009	19:20	132,775	22,241

08/01/2009	1:30	69,003	45,913
11/01/2009	16:50	67,557	27,739
11/01/2009	17:30	119,607	34,138
12/01/2009	6:40	71,210	72,364
16/01/2009	21:35	114,393	27,304
17/01/2009	17:15	73,465	22,712
26/01/2009	18:05	74,227	12,373
13/02/2009	21:55	101,566	6,777
14/02/2009	13:50	90,628	172,222
14/02/2009	14:20	146,897	158,824
14/02/2009	15:20	216,795	79,818
14/02/2009	16:10	128,281	6,897
14/02/2009	16:15	123,892	29,455
14/02/2009	19:50	111,340	20,526
14/02/2009	20:55	210,510	36,610
14/02/2009	21:10	241,502	52,931
18/02/2009	8:45	110,335	25,487
18/02/2009	8:50	118,551	29,483
18/02/2009	9:40	169,946	32,174
18/02/2009	12:45	120,668	11,356
18/02/2009	12:55	117,502	8,870
18/02/2009	13:00	114,393	7,130
24/03/2009	20:40	85,473	31,250
28/03/2009	21:05	82,972	22,689
29/03/2009	1:50	91,507	22,069
29/03/2009	4:55	246,663	21,864
29/03/2009	5:05	234,735	21,667
29/03/2009	5:20	207,415	21,228
29/03/2009	5:35	190,942	19,500
29/03/2009	7:00	115,423	12,143



ANEXO 5: EVENTOS DE LLUVIA ANALIZADOS

