

# **ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**INSTRUCTIVOS DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN  
HIDROMETEOROLÓGICA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
AMBIENTAL**

**MARÍA DE LA PAZ ALMEIDA ROMÁN**

maripaz201@hotmail.com

**DIRECTOR: DR. LAUREANO SALVADOR ANDRADE CHÁVEZ**

landradech52@yahoo.com

**Quito, Octubre 2010**

## **DECLARACIÓN**

Yo, María de la Paz Almeida Román, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**MARÍA DE LA PAZ ALMEIDA ROMÁN**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María de la Paz Almeida Román, bajo mi supervisión.

---

**DR. LAUREANO ANDRADE CHÁVEZ**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional, porque en ella he recibido una excelente formación profesional dentro del campo ambiental.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis, Dr. Laureano Andrade, quién ha sabido estar presto para ayudarme a sacar adelante mi tesis, y quien la ha encaminado para que el resultado sea el esperado.

Al Ing. Ciro Menéndez e Ing. Teresa Matos, por apoyar el desarrollo de esta investigación.

A mis profesores, quienes colaboraron con sus conocimientos en varios temas de mi tesis y durante toda la carrera sembraron sólida formación académica en mí.

A mi familia, precursores de este gran logro.

A mis compañeros de aula Nicole, Mario, Darwin y Luis David, quienes de manera desinteresada han estado conmigo siempre.

A mis amigos químicos, porque desde el comienzo nos supimos dar la mano para salir adelante juntos.

A todas aquellas personas que han sido partícipes de varios momentos en mi carrera, y de forma especial en el desarrollo de mi tesis.

## DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la oportunidad de haber cursado mis estudios superiores con éxito en tan prestigiosa institución, y culminarlos con la obtención de mi título.

A mi padre, quién desde pequeña supo inculcar en mí hábitos de estudio, quien ha sido una fuente de conocimientos no solamente técnicos, sino espirituales, un ejemplo de lucha y valor, un amante de la vida que ha estado conmigo en toda circunstancia. A ti, te debo mucho.

A mi madre, quien siempre ha estado ahí dándome fuerzas para seguir adelante, batallando conmigo el día a día y apoyándome de todas las formas posibles para que mis sueños se hagan realidad. El pilar de mi vida, has sido tu mamá...

A mi hermano Andrés, compañero de vida, solidario conmigo en todo momento, tu presencia ha sido fundamental para mí...

A Ricardo José, quién ha sido un motor importante en gran parte de mi vida universitaria y de forma especial en el desarrollo de mi proyecto de titulación. Eres un ejemplo digno de ser imitado. Gracias por tu apoyo y guía, por tus consejos y amor...

A mi familia entera: a mi abuelita, mi tío, mis primos, quienes han estado incondicionalmente para mi...

A mis amigos de toda la vida.

Para ustedes, todos los logros de mi vida.... Los amo.

## CONTENIDO

### ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	II
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	XV
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	XVI
GLOSARIO.....	XVII
RESUMEN .....	XIX
PRESENTACIÓN .....	XX
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
1.3 BREVE DESCRIPCION DE LOS INSTRUCTIVOS .....	5
CAPÍTULO 2 .....	9
LOS PLANES DE DESARROLLO NACIONAL Y SECTORIALES.....	9
2.1 PLANES NACIONALES DE DESARROLLO .....	9

2.1.1	PLAN NACIONAL DEL BUEN VIVIR 2009 – 2013.....	9
2.2	PLAN NACIONAL DEL AGUA .....	11
2.3	DEMANDA DE AGUA EN EL ECUADOR.....	13
2.3.1	LAS CONCESIONES PARA USO DEL AGUA.....	21
CAPÍTULO 3 .....		25
IDENTIFICACIÓN DEL NIVEL DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA .....		25
3.1	INTRODUCCIÓN .....	25
3.1.1	DEFINICIÓN DEL NIVEL DE INFORMACIÓN DE UNA CUENCA Y METODOLOGÍA HIDROLÓGICA .....	25
3.1.2	OBJETIVO DE LA IDENTIFICACIÓN.....	26
3.1.3	APLICACIÓN A LOS NIVELES DE PREFACTIBILIDAD, FACTIBILIDAD Y DISEÑO.....	26
3.2	PROCEDIMIENTO PARA EL NIVEL DE PREFACTIBILIDAD.....	27
3.2.1	DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA PARA UNA CUENCA DE DRENAJE .....	27
3.2.2	IDENTIFICACIÓN DE METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS .....	29
3.3	PROCEDIMIENTO PARA EL NIVEL DE FACTIBILIDAD .....	32
3.3.1	REAJUSTE DEL NIVEL DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA DE DRENAJE. ....	32
3.3.2	IDENTIFICACIÓN DE METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS .....	33
3.4	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	33
3.4.1	INFORMACIÓN HIDROLÓGICA .....	33
3.4.2	INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA.....	34
3.4.3	INFORMACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AGUA .....	34
3.4.4	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.....	36
3.5	EJEMPLO .....	46
3.5.1	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.....	47

3.5.2	INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	48
3.5.3	INFORMACION HIDROMETRICA.....	49
3.5.4	INFORMACIÓN ACERCA DE CALIDAD DEL AGUA.....	51
3.5.5	USO DE LAS FIGURAS 3.1, 3.6, 3.7, 3.8 Y 3.9. ....	51
CAPÍTULO 4 .....		53
CARACTERIZACIÓN FÍSICO – GEOGRÁFICA DE LAS CUENCAS DE DRENAJE .....		53
4.1	INTRODUCCIÓN .....	53
4.2	METODOLOGÍA .....	53
4.2.1	SISTEMA DE REFERENCIA.....	53
4.2.2	MEDICIONES SUPERFICIALES.....	54
4.2.2.1	SUELOS.....	67
4.3	EJEMPLO .....	71
4.3.1	CURVA HIPSOMÉTRICA.....	80
CAPÍTULO 5 .....		87
RECONOCIMIENTO DE CAMPO .....		87
5.1	INTRODUCCIÓN .....	87
5.2	APLICABILIDAD .....	87
5.3	TIPO DE RECONOCIMIENTO .....	88
5.4	EJEMPLO .....	92
CAPÍTULO 6 .....		95
CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA CUENCA DE ESTUDIO Y SITIOS DE OBRA .....		95
6.1	INTRODUCCIÓN .....	95
6.1.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE EN LOS ANUARIOS METEOROLÓGICOS.....	96
6.2	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE UNA CUENCA .....	98



6.2.1	DATOS AL INTERIOR DE LA CUENCA .....	99
6.2.2	DATOS EN EL EXTERIOR DE LA CUENCA DE DRENAJE.....	102
6.3	PROCESAMIENTO DE DATOS .....	104
6.3.1	PRECIPITACIÓN.....	104
6.3.2	TEMPERATURA.....	108
6.3.3	HUMEDAD RELATIVA .....	111
6.3.4	NUBOSIDAD .....	112
6.3.5	EVAPORACIÓN .....	113
6.4	CLASIFICACIONES CLIMÁTICAS .....	115
6.4.1	CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA PROPUESTA POR BLANDIN, C., 1989. EN “ANÁLISIS Y ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS EN EL ECUADOR”. INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA. QUITO.....	115
6.4.2	CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA PROPUESTA POR POURRUT, P., EN “LOS CLIMAS DEL ECUADOR – FUNDAMENTOS EXPLICATIVOS”. ORSTOM. (1995) .....	116
6.5	EJEMPLO .....	124
6.5.1	PRECIPITACIÓN.....	125
6.5.2	TEMPERATURA.....	132
6.5.3	PROGRAMA “SISTEMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA – EPN”	135
CAPÍTULO 7 .....		139
CÁLCULO DE AFOROS LÍQUIDOS Y ELABORACIÓN DE CURVAS DE DESCARGA .....		139
7.1	OBJETIVO .....	139
7.2	PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE AFOROS.....	141
7.2.1	AFOROS CON MOLINETE (RELACIÓN SECCIÓN – VELOCIDAD) 141	
7.2.2	RELACIÓN SECCIÓN – PENDIENTE.....	152
7.2.3	SECCIÓN DE CONTROL.....	153

7.3	DETERMINACIÓN DE CURVAS DE DESCARGA EN RÍOS .....	153
7.3.1	DEFINICIONES .....	153
7.3.2	MÉTODO DE CÁLCULO .....	161
7.4	EJEMPLO .....	166
CAPÍTULO 8 .....		167
VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA BÁSICA Y RELLENO DE DATOS .....		167
8.1	INTRODUCCIÓN .....	167
8.2	RELLENO DE DATOS FALTANTES .....	167
8.2.1	MODELO DE CORRELACIÓN – REGRESIÓN.....	167
8.3	VALIDACIÓN DE DATOS .....	170
8.3.1	HOMOGENEIZACIÓN.....	171
8.4	RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCURRIMIENTO.....	176
8.4.1	METODOLOGÍA.....	176
8.5	EJEMPLO .....	177
8.5.1	RELLENO DE DATOS FALTANTES.....	177
8.5.2	VALIDACIÓN DE DATOS.....	181
CAPÍTULO 9 .....		183
DETERMINACIÓN DE CAUDALES MEDIOS Y MÍNIMOS.....		183
9.1	INTRODUCCIÓN .....	183
9.2	CAUDALES MEDIOS.....	184
9.2.1	METODOLOGÍA.....	184
9.3	CAUDALES MÍNIMOS.....	193
9.3.1	METODOLOGÍA.....	194
9.4	EJEMPLO .....	194
9.4.1	CURVA DE DURACIÓN GENERAL.....	196
CAPÍTULO 10 .....		204

DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS .....	204
10.1 INTRODUCCIÓN .....	204
10.1.1 DEFINICIONES .....	204
10.2 METODOLOGÍA .....	215
10.2.1 SUFICIENTE INFORMACIÓN.....	218
10.2.2 INSUFICIENTE INFORMACIÓN .....	226
10.2.3 DATOS EN EL EXTERIOR DE LA CUENCA DE DRENAJE .....	227
CAPÍTULO 11 .....	228
MÉTODO RACIONAL .....	228
11.1 INTRODUCCIÓN .....	228
11.2 METODOLOGÍA .....	228
11.2.1 OBTENCIÓN DE INTENSIDADES MÁXIMAS .....	229
11.2.2 COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA.....	230
CAPÍTULO 12 .....	232
CALIDAD DEL AGUA.....	232
12.1 INTRODUCCIÓN .....	232
12.2 USOS DEL AGUA.....	233
12.3 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA .....	235
12.3.1 PARÁMETROS FÍSICOS .....	235
12.3.2 PARÁMETROS QUÍMICOS .....	236
12.3.3 PARÁMETROS BIOLÓGICOS .....	238
12.4 LÍMITES DE VARIACIÓN EN LOS CURSOS NATURALES: LAGOS, LAGUNAS, RÍOS, VERTIENTES .....	240
12.4.1 RÍOS.....	241
12.4.2 LAGOS.....	243
12.5 PLAN DE MUESTREO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL AGUA	

12.5.1	PLANIFICACIÓN DEL MUESTREO.....	245
12.5.2	MUESTREO.....	246
12.6	INDICE DE CALIDAD DEL AGUA.....	247
12.7	EJEMPLO.....	256
12.7.1	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA.....	256
CAPÍTULO 13.....		263
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		263
13.1	CONCLUSIONES.....	263
13.2	RECOMENDACIONES.....	267
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		268
ANEXOS.....		272

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1: Información hidrológica necesaria para distintos tipos de proyectos sobre recursos hídricos .....	2
TABLA 2.1: Cobertura (%) de servicios de agua potable y saneamiento .....	14
TABLA 2.2 Oferta de energía eléctrica.....	15
TABLA 2.3 Energía hidráulica anual producida.....	15
TABLA 2.4 Capacidad de las centrales hidroeléctricas.....	16
TABLA 2.5 Carteras de Proyectos Hidroeléctricos de mediana capacidad en los Sistemas Hidrográficos .....	17
TABLA 2.6 Proyectos Hidroeléctricos mayores a 100 MW en fase de estudio ...	17
TABLA 2.7 Proyectos de riego por sistemas hidrográficos .....	19
TABLA 2.8 Distribución de los caudales aprovechados según los usos del agua	22
TABLA 3.1 Estaciones climatológicas principales .....	49
TABLA 3.2 Estaciones pluviométricas y pluviográficas .....	49
TABLA 3.3 Estaciones hidrométricas .....	51
TABLA 4.1 Tabla de apoyo para la construcción de la curva hipsométrica.....	62
TABLA 4.2 Tabla de apoyo para el cálculo de la pendiente de la corriente .....	66
TABLA 4.3 Rangos de las características de los grupos hidrológicos de suelos	70
TABLA 4.4 Tabla de apoyo para el cálculo de la pendiente media de la cuenca del río amanta. ....	79
TABLA 4.5 Tabla de apoyo para la construcción de la curva hipsométrica de la cuenca del río amanta.....	80
TABLA 4.6 Tabla de apoyo para el cálculo de la pendiente media de la corriente .....	82
TABLA 4.7 Características de los suelos de la zona en estudio .....	86

TABLA 5.1	Eventos hidrológicos y características de una cuenca a las que más los afectan.....	89
TABLA 6.1	Tabla de apoyo para cálculos de precipitaciones por estación meteorológica.....	106
TABLA 6.2	Tabla de apoyo para cálculos de temperaturas por estación meteorológica.....	109
TABLA 6.3	Tabla de apoyo para cálculos de humedad relativa por estación meteorológica.....	112
TABLA 6.4	Tabla de apoyo para el análisis de nubosidad.....	113
TABLA 6.5	Tabla de apoyo para el análisis de la evaporación.....	114
TABLA 6.6	Principales características generales de los climas del ecuador según P. Pourrut.....	118
TABLA 6.7	Estaciones meteorológicas.....	125
TABLA 6.8	Estaciones pluviométricas.....	125
TABLA 6.9	Ejemplo de tabla de apoyo elaborada para los cálculos de la precipitación.....	126
TABLA 6.10	Valores característicos de la precipitación mensual y anual.....	129
TABLA 6.11	Relaciones Intensidad – Duración - Frecuencia.....	132
TABLA 8.1	Distribución del número de rachas según Thom, recomendado por la OMM.....	172
TABLA 8.2	Series de datos para el periodo 1972 - 2006 respecto a la precipitación media anual para las estaciones climatológicas seleccionadas.....	178
TABLA 8.3	Tabla de apoyo para la obtención del coeficiente $r$ para la aplicación del modelo de correlación – regresión.....	179
TABLA 8.4	Datos rellenados de la estación M358 Calacalí – INAMHI, mediante correlación con la estación M339 Nono.....	180
TABLA 8.5	Test de rachas de precipitación. Estación Calacalí – INAMHI.....	181
TABLA 9.1	Tabla de apoyo para la construcción de la CDG.....	186
TABLA 9.2	Fórmulas estadísticas requeridas para llenar la Tabla 9.3.....	189
TABLA 9.3	Determinación de las características estadísticas de las series mensuales de caudales.....	189
TABLA 9.4	Tabla de apoyo para la construcción de la CVE.....	191

TABLA 9.5 Caudales del río Alambi .....	197
TABLA 9.6 Caudales característicos, áreas y volúmenes bajo la CDG obtenidos mediante el uso del Programa CDG 1.07.....	201
TABLA 9.7 Valores característicos de la Curva General de Duración, mediante el programa CDG 1.07 .....	202
TABLA 10.1 Coeficiente de la desviación standard para intervalos de confianza .....	212
TABLA 10.2 Criterios para la elección del tipo de distribución de probabilidad para el cálculo de caudales máximos.....	223
TABLA 11.1 Coeficientes de escorrentía para diferentes superficies.....	231
TABLA 12.1 Variables básicas relativas a la calidad del agua.....	239
TABLA 12.2 Tabla de apoyo para el cálculo del ICA.....	250
TABLA 12.3 Valor porcentual asignado a los diez parámetros propuestos por Bascaran.....	253
TABLA 12.4 Unidades porcentuales de otros parámetros que intervienen en la calidad del agua .....	254
TABLA 12.5 Aptitud del agua para distintos usos en función del ICA .....	255
TABLA 12.6 Resultados de los análisis de laboratorio de las muestras de agua .....	257
TABLA 12.7 Ejemplo de comparación de los análisis realizados con las normas ambientales según el uso del agua.....	258
TABLA 12.8 Tabla de apoyo para el cálculo del índice de calidad del agua (ICA) .....	261

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 Diagrama para determinar cual gráfico se debe utilizar en función del análisis cualitativo del Formulario N° 1.....	30
FIGURA 3.2 Ejemplo de manejo de la información mediante el uso de las Figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 .....	31
FIGURA 3.3 Mapa del territorio ecuatoriano completo.....	38
FIGURA 3.4 Región de 1°x 1°escogida en el mapa de la figura 3.3 .....	38
FIGURA 3.5 Carta topográfica Nono. Escala 1:50.000 (CT-ÑIII-A2).....	39
FIGURA 3.6 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Climatología) .....	42
FIGURA 3.7 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Caudales líquidos).....	43
FIGURA 3.8 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Calidad del agua) .....	44
FIGURA 3.9 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Cuenca no registrada).....	45
FIGURA 3.9 Ubicación de la cuenca en estudio .....	46
FIGURA 3.10 Diagrama de flujo para la ubicación de las distintas cartas topográficas a ser utilizadas.....	47
FIGURA 3.11 Ubicación de las estaciones meteorológicas alrededor del centroide de la cuenca en estudio .....	48
FIGURA 3.12 Ubicación de las estaciones meteorológicas alrededor del centroide de la cuenca en estudio.....	50
FIGURA 4.1 Orden de la cuenca.....	57
FIGURA 4.2 Densidad de drenaje.....	58
FIGURA 4.3 Sinuosidad de las corrientes.....	59
FIGURA 4.4 Pendiente de la cuenca hidrográfica. Método de las tangentes.....	60



FIGURA 4.5	Curva hipsométrica de una cuenca hidrográfica.....	62
FIGURA 4.6	Ejemplos de curvas hipsométricas.....	63
FIGURA 4.7	Pendiente de la corriente principal.....	67
FIGURA 4.8	Carta topográfica de Sigchos.....	72
FIGURA 4.9	Delimitación de la cuenca del Río Amanta .....	73
FIGURA 4.10	Demostración acerca del uso de las polilíneas de autocad para el cálculo de las características de la cuenca .....	74
FIGURA 4.11	Cauce principal de la cuenca del río Amanta.....	75
FIGURA 4.12	Área de la cuenca del río Amanta.....	75
FIGURA 4.13	Orden de la cuenca del río Amanta .....	76
FIGURA 4.14	Longitud real y longitud en línea recta del cauce principal.....	77
FIGURA 4.15	Método de las tangentes aplicado para la cuenca en estudio .....	78
FIGURA 4.16	Curva hipsométrica y cota media de la cuenca del Río Amanta...	81
FIGURA 4.17	Puntos seleccionados dentro del cauce principal .....	81
FIGURA 4.18	Fotografía aérea de la zona en estudio .....	84
FIGURA 4.19	Uso del suelo de la cuenca del Río Amanta .....	84
FIGURA 4.20	Aptitud agrícola de la cuenca del Río Amanta .....	85
FIGURA 4.21	Textura del suelo dentro de la cuenca del Río Amanta .....	85
FIGURA 6.1	Repartición de los principales climas según Pourrut.....	119
FIGURA 6.2	Isoyetas de la zona de estudio.....	130
FIGURA 6.3	Ubicación de la cuenca en estudio dentro del mapa de zonificación de intensidades. ....	131
FIGURA 6.5	Ventana para introducción de coordenadas y búsqueda de las estaciones climatológicas más cercanas del Programa “Sistema de Información Climático”.....	136
FIGURA 6.6	Ventana de la interpolación con el método IDW para la obtención de valores de precipitación para la cuenca en estudio.....	137
FIGURA 7.1	.....	145
FIGURA 7.2	Ejemplo de curva de descarga.....	155
FIGURA 8.1	Gráfico de correlación lineal entre dos estaciones.....	170
FIGURA 9.1	Ejemplo de una Curva de Duración General .....	187
FIGURA 9.2	Tipos de CDG .....	187
FIGURA 9.3	Ejemplo de curva de variación estacional (CVE) .....	192

FIGURA 9.4	Esquema de cuencas vecinas .....	192
FIGURA 9.5	Transferencia de datos entre la cuenca de la Estación H136 Alambi en Churupamba y la cuenca del sitio de interés.....	196
FIGURA 9.6	Ventana para ingresar datos en el Programa CDG 1.07 .....	199
FIGURA 9.7	Ventana de Resultados del Programa CDG 1.07. ....	200
FIGURA 9.8	Ventana del gráfico de la curva del Programa CDG 1.07. ....	200
FIGURA 10.1	Representación de la relación entre el periodo de retorno de la avenida de diseño, la vida útil de la obra y el riesgo que tal avenida sea igualada o excedida.....	209
FIGURA 12.1	Balance esquemático del agua de un lago .....	244

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1	Tendencia de la producción hidroenergética anual.....	16
GRÁFICO 2.2	Distribución de caudales asignados en concesiones para los distintos usos del agua.....	23
GRÁFICO 2.3	Distribución de las concesiones realizadas según los usos del agua a nivel nacional. ....	23
GRÁFICO 2.4	Porcentaje de número de concesiones para riego según demarcación hidrográfica.....	24
GRÁFICO 2.5	distribución de caudales destinados para riego según demarcación hidrográfica .....	24
GRÁFICO 6.1	Variación estacional de la precipitación. Estación Nanegalito. ..	127
GRÁFICO 6.2	Variación estacional de la precipitación. Estación Calacalí - INAMHI.....	127
GRÁFICO 6.3	Variación interanual de la precipitación.....	128
GRÁFICO 6.4	Variación altitudinal de la precipitación .....	129
GRÁFICO 6.5	Intensidad – Duración - Frecuencia .....	132
GRÁFICO 6.6	Variación Estacional de la Temperatura Estación La Perla .....	133
GRÁFICO 6.7	Variación Interanual de la Temperatura Estación La Perla.....	134
GRÁFICO 6.8	Variación Altitudinal de la Temperatura .....	134
GRÁFICO 8.1	Ejemplo de curva de masas Precipitación – Precipitación.....	174
GRÁFICO 8.2	Ejemplo de curva de masas Precipitación - Caudal.....	174
GRÁFICO 8.3	Curva de masas realizada con estaciones climatológicas cercanas al sitio de interés .....	182
GRÁFICO 9.1	Curva de duración general para la cuenca de interés.....	197
GRÁFICO 9.2	Curva de Duración General obtenida con el Programa CDG 1.07 para la cuenca en estudio. ....	201

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1	Sección de la Estación Hidrométrica Río Jubones D.J. San Francisco.....	93
FOTOGRAFÍA 2	Vista de pastos y matorrales en la cuenca del Río San Francisco.....	93
FOTOGRAFÍA 3	Reconocimiento Estación Río San Francisco A.J. Jubones....	94
FOTOGRAFÍA 4	Banco de piedra, grava y arena – Río Jubones D.J. San Francisco.....	94

## GLOSARIO

**Caudal medio anual.-** Promedio de los caudales medios diarios del año.

**Caudal medio mensual.-** Promedio de los caudales medios diarios del mes.

**Caudal mínimo anual.-** Es el menor caudal presentado del año.

**Caudal medio mensual interanual.-** Es el promedio de los caudales medios mensuales de un mes dado, para un periodo de  $n$  años.

**Evaporación potencial.-** Máxima cantidad de vapor que es emitida a la atmósfera desde una superficie de agua líquida pura, en condiciones atmosféricas dadas.

**Evaporación.-** Hidrometeoro, que se refiere a la emisión de vapor de agua a la atmósfera desde un suelo, a una temperatura inferior al punto de ebullición.

**Hidrograma anual.-** Gráfica anual del caudal medio diario o medio mensual en función del tiempo.

**Hietograma de precipitaciones o intensidades.-** Gráfico de barras o bloques que expresa la precipitación o su intensidad en función del tiempo, y generalmente se refiere a lluvias intensas.

**Humedad atmosférica.-** Es el contenido del vapor de agua en una masa de aire. Se expresa como: tensión de vapor, humedad relativa, humedad absoluta y temperatura del punto de rocío.

**Humedad relativa.-** Contenido real de humedad de una masa de aire como tanto por ciento de la humedad que contendría este mismo volumen de aire saturado de humedad a la misma temperatura.

**Media móvil.-** Es una herramienta de análisis estadístico que consiste en la definición de promedios de 3 a 5 elementos consecutivos (en hidrología), con lo cual se genera una nueva serie para facilitar el análisis de tendencia.

**Octas.-** Es la unidad de medida de la nubosidad, que equivale a un octavo del cielo. Por ejemplo, si la *bóveda celeste visible* se encuentra despejada completamente se dice que la nubosidad es cero (0) octas; si las nubes no permiten la visibilidad de la mitad del cielo se habla de una nubosidad de cuatro (4) octas.

**Periodo de retorno.-** Generalmente expresado en años, se entiende como el número de años en que se espera, que en promedio ocurra un cierto valor de la variable, expresada en datos anuales, o un dato mayor.

El periodo de retorno  $T_r$  está relacionado con la probabilidad de que determinado valor sea igualado o excedido  $P$  (probabilidad complementaria o de excedencia)

**Serie anual.-** Comprende un conjunto de valores anuales (un valor por año).

**Temperatura del aire.-** Temperatura señalada en un termómetro expuesto al aire y protegido de la radiación solar directa. Se mide en grados centígrados y décimas de grado.

**Temperaturas extremas:** Los valores máximo y mínimo de temperatura del aire percibidos durante un período de observación dado.

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación, consiste en una recopilación bibliográfica dirigida a personas relacionadas con el área hidrológica, hidráulica, agronómica, etc., acerca de los procedimientos que deben seguirse para el procesamiento de la información hidrometeorológica, adaptada a las particularidades del Ecuador.

En este se incorpora el uso de software diseñado en la Escuela Politécnica Nacional para estos fines, y se sugiere la utilización de otros usados a nivel regional y mundial. Estas metodologías se ven materializadas en ejemplos prácticos al final de cada uno de los capítulos.

Incluye temas como caracterización físico – geográfica de las cuencas de estudio, caracterización climática, reconocimiento de campo, calidad del agua, validación de información hidrometeorológica, caudales máximos, medios y mínimos y aforos líquidos. Se propone una guía acerca de la información necesaria para este tipo de estudios, su disponibilidad, y los procedimientos a seguir en función de la información disponible.

Este proyecto tiene como base la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM, la publicación “Instructivos para el Procesamiento de Datos y Cálculo Hidrológico” del Ing. Oscar Villacís y el Dr. Laureano Andrade, a la cual se le han incorporado nuevos temas y actualizado los ya existentes en función de bibliografía especializada sobre cálculos hidrológicos.

## PRESENTACIÓN

La recopilación, procesamiento primario, y la caracterización climática e hidrológica son tareas muy importantes en la elaboración de estudios climáticos e hidrológicos para proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos, gestión ambiental, planificación, etc.

Los instructivos que se proponen justamente permitirán organizar la elaboración de los estudios, evaluar la disponibilidad de información básica, organizar el procesamiento básico de la información, orientar la utilización de una u otra metodología de cálculo, en dependencia del tipo de información disponible.

Con frecuencia los métodos o procedimientos utilizados resultan algo obsoletos, si no se consideran las nuevas tecnologías y el software especializado, que resultan de gran ayuda para procesar y generar información de manera más precisa y rápida.

En este Proyecto de Titulación se tratan 9 temas fundamentales de apoyo a la elaboración de estudios hidrológicos. Cada uno contiene una breve introducción, la metodología propuesta según el nivel de información disponible y finalmente un ejemplo que permitirá la mejor comprensión de los procedimientos sugeridos.

Estos temas son:

- **Identificación del nivel de información de la cuenca**

Se provee una orientación acerca de la profundidad con la que debe realizarse un estudio hidrológico según el nivel de desarrollo de un proyecto, entendiéndose por ello, la etapa de prefactibilidad, factibilidad o diseño definitivo. Menciona las fuentes donde es posible encontrar los datos necesarios para la realización de los



mismos y guía hacia cada uno de los instructivos donde se podrán encontrar las metodologías que deben ser aplicadas para cada caso.

- **Caracterización físico – geográfica de las cuencas de drenaje y usos del agua**

Proporciona la metodología escogida acerca de las variables que deben ser tomadas en cuenta para la determinación de las características físico – geográficas de las cuencas de estudio, en base a las condiciones del territorio ecuatoriano.

- **Reconocimiento de campo**

Se explican los procedimientos que deben realizarse cuando se visita el sitio de interés, cuáles deben ser los datos a recolectar y los aspectos que deben ser tomados en cuenta, mediante el uso de formularios.

- **Caracterización climática de la cuenca de estudio y sitios de interés u obra.**

Se definen los parámetros que deben ser tomados en cuenta para realizar un estudio climatológico, y se muestra detalladamente los procedimientos para obtener los valores característicos que pongan de manifiesto el comportamiento del clima en la cuenca estudiada.

- **Cálculo de aforos líquidos y elaboración de curvas de descarga**

Se hace énfasis en la realización del aforo con molinete donde se detalla la metodología en campo y los cálculos necesarios para conocer el caudal una vez realizado el aforo.

A más de esto, el instructivo proporciona un procedimiento claro y detallado acerca de la elaboración de curvas de descarga, partiendo de los cálculos

necesarios, graficación de la curva y obtención de la ecuación, tomando en cuenta en esto los factores que pueden afectarla.

- **Validación de la información hidrometeorológica básica y relleno de datos**

Se detallan los procedimientos a seguir para controlar la calidad de la información, identificando valores incorrectos o dudosos, y se propone la metodología para rellenar datos faltantes, dada la gran cantidad de vacíos en las series.

- **Determinación de caudales medios y mínimos**

Se muestra los procedimientos para la obtención de los caudales medios y mínimos, mediante la Curva de Duración General (CDG), y la Curva de Variación Estacional (CVE).

- **Determinación de caudales máximos**

Se presentan los métodos más utilizados en el país para determinar los caudales máximos, y cuyas características se adaptan más a las necesidades y disponibilidad de información. Se detalla el procedimiento estadístico - probabilístico, y el método racional para cuencas pequeñas.

- **Aplicación del Método Racional**

Se describe este método como alternativa para el cálculo de caudales máximos aplicable para cuencas pequeñas (menores a 5 km<sup>2</sup>), duración máxima de la lluvia de 30 minutos, tiempos de concentración de 12 horas.

- **Calidad del agua**

Se presenta la forma para evaluar la calidad del agua, considerando los distintos usos que podría dársela, tomando en cuenta las características puntuales de la

calidad de los ríos, es decir, en el lugar en donde se toma la muestra de agua. Se proporciona una guía acerca del muestreo en cuerpos hídricos, se dan nociones de cómo determinar los parámetros a ser analizados en laboratorio y finalmente se orienta la determinación de un índice de calidad del agua.

- **Caudales ambientales**

Se proporciona una guía para la obtención de los caudales ambientales basados en el método hidrológico de porcentaje fijo del caudal medio multianual; que considere también la variabilidad estacional de los caudales, condiciones hidrológicas alteradas y aspectos bióticos.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Es evidente la insuficiencia a nivel nacional de normas, guías, procedimientos o instructivos para la toma, procesamiento y almacenamiento de información climática e hidrológica, que se basen en las normas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en publicaciones regionales y nacionales y en la práctica profesional.

Los instructivos propuestos se sustentan principalmente en la “Guía de Prácticas Hidrológicas”, publicación N° 168 de la OMM, “Instructivos para el Procesamiento de Datos y Cálculo Hidrológico” del Ing. Oscar Villacís y Dr. Laureano Andrade, y en textos de hidrología, y se pretende sistematizar la realización de los estudios hidrometeorológicos, partiendo de la información básica, de la complementación de la información con trabajo de campo, del procesamiento de la información físico – geográfica de las cuencas, de la información climática y por último de los datos hidrológicos.

Estos instructivos deberán constituirse en un primer paso para normar la gestión de la información hidrometeorológica y la realización de estudios, sobre lo cual se ocupan instituciones públicas y privadas, ingenieros civiles, agrónomos, ambientales, etc.

## Importancia de los estudios hidrológicos

La Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM, reconoce algunos tipos de proyectos hídricos para los cuales precisa información requerida, esto se resume en la Tabla 1.1.

**TABLA 1.1: Información hidrológica necesaria para distintos tipos de proyectos sobre recursos hídricos**

Proyecto	Nivel de agua			Caudal			Sedimentos			Calidad del agua*		
	Series	Max.	Mín.	Series	Max.	Mín.	Series	Max.	Mín.	Series	Max.	Mín.
Redistribución del agua (derivación, obras de agua, caudales)	M	M	M	H	H	H	H	M	M	H	M	M
Redistribución del agua en el tiempo (embalses)	M	M	M	H	H	H	H	M	M	H	M	M
Producción de energía (energía hidroeléctrica, dispositivos de enfriamiento)	H	M	M	H	M	H	H	M	M	M	M	M
Embalses de agua (preas, diques)	H	H	M	M	H	M	M	M	M	M	M	M
Aliviaderos (vertederos)	M	H	M	H	H		M			M		
Mejoras en la calidad (tratamiento del agua y de las aguas residuales)				H	M	H	M	M	M	H	H	H
Repartición (llanura inundable, ríos panorámicos)	H	H	M	M	H	M	M					
Seguros (el daño ocasionados por el agua, contaminación)	H	H		H	H					H	H	
Predicciones de caudales y niveles (control de crecidas, reservas)	H	H	H	H	H	H						
Normas y legislación (calidad de agua)	M	H	H	M	H	H				H	H	M

H = Alto nivel de prioridad; M = Nivel medio de prioridad

\*Los parámetros de calidad del agua son diversos y dependen del tipo de proyecto

FUENTE: (OMM, 1994)

Los proyectos que usan el agua como componente principal se clasifican de la siguiente manera (Silva, 2004)

- **Proyectos de Suministro de Agua.**

Captan caudales de corrientes superficiales o de depósitos subterráneos para abastecer demandas de agua en áreas específicas.

Entre estos proyectos se cuentan los de Acueductos y Alcantarillados, y los de Riego y Drenaje de Campos Agrícolas.

- **Proyectos de suministro de Energía Hidráulica.**

Captan caudales de corrientes superficiales y aprovechan diferencias de cota para entregar Energía Hidráulica a las Turbinas de las Centrales Hidroeléctricas.

Las turbinas convierten la Energía Hidráulica en Energía Mecánica la cual se transmite a los Generadores; éstos transforman la Energía Mecánica en Energía Eléctrica.

- **Diseño de Obras Viales, Drenajes de Aguas Lluvias y Estructuras de Protección contra ataques de ríos.**

Los estudios hidrológicos analizan los regímenes de caudales medios y extremos de las corrientes de agua en los tramos de influencia de las obras viales, en las zonas que requieren de alcantarillados de aguas lluvias, y en las zonas inundables adyacentes a los cauces .

Los caudales de creciente y las avalanchas o flujos de lodo que se producen por deslizamientos son los problemas importantes en este tipo de proyectos. Los caudales se relacionan luego con los niveles de inundación, con las velocidades de flujo y con los procesos de socavación lateral y de fondo.

- **Proyectos de Navegación Marítima y Fluvial.**

En los proyectos de Navegación Fluvial se estudian los regímenes de caudales medios y extremos en los tramos navegables, las relaciones caudal-profundidad, y los volúmenes de sedimentos que se mueven como carga de fondo y en suspensión.

Para el desarrollo de todos estos proyectos los estudios hidrológicos recolectan y procesan información histórica; programan y ejecutan tareas de campo en topografía, batimetrías, aforos líquidos y sólidos; identifican los usos del agua, se toman y analizan muestras de sedimentos y calidad del agua.

Los resultados de los estudios producen información sobre los siguientes aspectos:

- Características climatológicas y morfométricas de las zonas que tienen influencia sobre el área del proyecto.
- Selección y capacidad de la fuente que suministrará el caudal que se entregará a los beneficiarios del proyecto. Se incluyen aquí los análisis sobre necesidad de almacenamiento y regulación.
- Magnitud de los eventos extremos, crecientes y sequías, que pueden poner en peligro la estabilidad de las obras civiles, o los procesos de navegación o el suministro confiable de agua a los usuarios.
- Transporte de sedimentos hacia las obras de captación y almacenamiento.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Generar instructivos para el procesamiento, análisis y determinación de características hidrológicas, de apoyo a la realización de estudios hidrológicos, de tal manera que estos puedan ser sistematizados dentro del país.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los métodos y procedimientos de acopio, almacenamiento y procesamiento de datos climáticos e hidrológicos;
- Orientar a los usuarios en cuanto a la determinación de la disponibilidad de información básica y a la selección de las metodologías de cálculo más adecuadas;
- Presentar las diferentes metodología, técnicas y programas computacionales que podrían ser utilizados para la determinación de los distintos parámetros hidrometeorológicos; y,
- Difundir en los medios técnicos los programas de cómputo disponibles y que son útiles para el tratamiento y procesamiento de información hidrometeorológica

### **1.3 BREVE DESCRIPCION DE LOS INSTRUCTIVOS**

- **Identificación del nivel de información de la cuenca**

Se provee una orientación acerca de lo que debe analizarse en un estudio hidrológico según el nivel de desarrollo de un proyecto, entendiéndose por ello, la etapa de prefactibilidad, factibilidad o diseño definitivo. Se mencionan las fuentes de los datos necesarios para la realización de los estudios y guía hacia cada uno de los instructivos donde se podrán encontrar las metodologías que deben ser aplicadas para cada caso.



- **Caracterización físico – geográfica de las cuencas de drenaje y usos del agua**

Proporciona la metodología para la determinación de las características físico – geográficas de las cuencas de estudio y de los cauces.

- **Reconocimiento de campo**

Este instructivo constituye una guía de los procedimientos que deben realizarse cuando se visita el sitio de interés, indica cuáles deben ser los datos a recolectar y los aspectos que deben ser tomados en cuenta. Para ello, se presentan formularios que permiten recoger la información para su posterior utilización

- **Caracterización climática de la cuenca de estudio y sitios de obra**

Se definen los parámetros a tomar en cuenta para realizar un estudio climatológico, se muestra detalladamente los procedimientos para obtener valores característicos para conocer el comportamiento del clima en la cuenca estudiada.

- **Cálculo de aforos líquidos y elaboración de curvas de descarga**

Se describen los principales procedimientos para determinar el caudal de una corriente, poniendo énfasis en la realización del aforo con molinete. Se detalla la metodología del trabajo de campo y los cálculos necesarios para conocer el caudal una vez realizado el aforo.

A más de esto, el instructivo proporciona un procedimiento claro y detallado acerca de la elaboración de curvas de descarga, obtención de las ecuaciones, tomando en cuenta los factores que pueden afectarla.

- **Validación de la información hidrometeorológica básica y relleno de datos**

Dada la gran cantidad de datos faltantes, y la evidente inconsistencia de muchos valores en las series de datos, se hizo fundamental crear un instructivo sobre los procedimientos que deben seguirse tanto para validar la información disponible, como para rellenar los datos ausentes. Se mencionan los procedimientos a seguir para evaluar la calidad de la información, identificando valores incorrectos o dudosos, se proporciona la metodología adecuada para corregir o eliminar este tipo de valores que afectan la realización de los estudios.

- **Determinación de caudales medios y mínimos**

Se muestran los procedimientos para la obtención de los caudales medios y mínimos, mediante la Curva de Duración General (CDG) y la Curva de Variación Estacional (CVE).

- **Determinación de caudales máximos**

Se presentan los métodos más difundidos en el país para determinar los caudales máximos, en base a las necesidades y disponibilidad de información. Se da una breve introducción de cómo escoger un periodo de retorno para realizar los estudios y se detalla el procedimiento de la metodología estadístico - probabilística, y el método racional para cuencas pequeñas.

- **Aplicación del Método Racional**

Se incluye como alternativa para el cálculo de caudales máximos aplicable para cuencas pequeñas (menores a 5 km<sup>2</sup>), con duración de hasta 30 minutos, y tiempos de concentración de 12 horas.

- **Calidad del agua**

Siendo importante no solamente la cantidad del recurso hídrico para los proyectos, sino también la calidad del mismo, este instructivo presenta el método para la evaluación de la calidad del agua para los distintos usos, tomando en

cuenta las características puntuales de la calidad de los ríos, es decir, en el lugar donde se toma la muestra de agua. Se incluye una guía acerca del muestreo en cuerpos hídricos tomando en cuenta las posibles variaciones existentes debido al régimen hidrológico, características hidráulicas del sistema fluvial, época del año y actividades antrópicas dentro de su área de influencia; provee nociones de cómo determinar los parámetros a ser analizados en laboratorio y finalmente, orienta hacia la determinación de un índice de calidad del agua.

## **CAPÍTULO 2**

### **LOS PLANES DE DESARROLLO NACIONAL Y SECTORIALES**

#### **2.1 PLANES NACIONALES DE DESARROLLO**

El artículo 280 de la Constitución de la República del Ecuador del 2008, define al Plan de Desarrollo Nacional como *“el instrumento al que se sujetarán las políticas, programas y proyectos públicos; la programación y ejecución del presupuesto del Estado; y la inversión y la asignación de los recursos públicos; y coordinar las competencias exclusivas entre el Estado central y los gobiernos autónomos descentralizados”*.

Se señala también que *“Su observancia será de carácter obligatorio para el sector público e indicativo para los demás sectores”*.

##### **2.1.1 PLAN NACIONAL DEL BUEN VIVIR 2009 – 2013**

El Plan Nacional de Desarrollo, puesto en vigencia a principios del 2010, tiene como objetivo global el Buen Vivir.

En el Plan, el agua es considerada como un sector estratégico en el país, y la planificación para su gestión se encuentra enmarcada dentro del Objetivo 4 del Plan Nacional del Buen Vivir: *“Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un medio ambiente sano y sustentable”*

En este se mencionan los problemas relacionados al recurso agua: la pérdida de la cantidad y la calidad debido a la sobreexplotación de las fuentes, el incremento de la contaminación, el uso de tecnología anticuada, los trasvases sin planificación y la acelerada deforestación de las cuencas hidrográficas; por otro lado se refiere el déficit de agua principalmente en las regiones Costa y Oriente y las diferencias urbano - marginales en el acceso al agua entubada.

Un punto adicional es la vulnerabilidad de los recursos hídricos ante los efectos del Cambio Climático, siendo importante la reducción de precipitaciones en varias cuencas del país con el aumento de la temperatura.

Es así que se crean políticas y directrices que se enfocan al recurso agua (SENPLADES, 2009), tales como:

**Política 4.2.** Manejar el patrimonio hídrico con un enfoque integral e integrado por cuenca hidrográfica, de aprovechamiento estratégico del Estado y de valoración sociocultural y ambiental, cuyos componentes son:

- a. Diseñar y aplicar reformas institucionales tendientes a fortalecer la regulación, el acceso, la calidad y la recuperación de los recursos hídricos, e implementar un proceso de desconcentración articulado a los procesos de planificación de todos los niveles de gobierno.
- b. Establecer lineamientos públicos integrales e integrados de conservación, preservación y manejo del agua, con criterios de equidad y racionalidad social y económica.
- c. Recuperar la funcionalidad de las cuencas, manteniendo las áreas de vegetación y las estructuras relacionadas con las fuentes y la producción hídrica.
- d. Estimular la gestión comunitaria responsable del recurso hídrico y apoyo al fortalecimiento de las organizaciones campesinas e indígenas en los territorios para garantizar la continuidad y permanencia de los procesos de conservación.

- e. Impulsar la investigación para la restauración, reparación, rehabilitación y mejoramiento de los ecosistemas naturales y la estructura de las cuencas hidrográficas.
- f. Diseñar programas de sensibilización, educación y capacitación que permitan el reconocimiento del valor y la gestión cultural del patrimonio hídrico.
- g. Implementar programas bajo criterios de corresponsabilidad y equidad territorial (en vez de compensación) por el recurso hídrico destinado a consumo humano y a actividades económicas.
- h. Desarrollar e implementar programas que impulsen sistemas sostenibles de producción, como alternativa a las actividades productivas que afectan el estado de las cuencas hidrográficas.

**Política 4.4.** Prevenir, controlar y mitigar la contaminación ambiental como aporte para el mejoramiento de la calidad de vida, y por tanto:

- e. Regular criterios de preservación, conservación, ahorro y usos sustentables del agua e implementar normas para controlar y enfrentar la contaminación de los cuerpos de agua mediante la aplicación de condiciones explícitas para el otorgamiento de las autorizaciones de uso y aprovechamiento.

En consecuencia, todo plan o proyecto debe estar bajo estos lineamientos, además de otros que se encuentran vinculados con el tema.

## **2.2 PLAN NACIONAL DEL AGUA**

Ante la necesidad de evitar el deterioro del recurso, y buscar una mejor gestión del mismo, la Secretaría Nacional del Agua (actualmente es la autoridad encargada de cuidar y distribuir equitativamente el agua), lanzó el Plan Nacional del Agua (SENAGUA, 2009).

Propone varios temas orientados al manejo del agua, entre los que se destaca: gestión integral del agua; creación de una nueva estructura organizativa enfocada hacia una operación por organismos de cuenca; establecimiento de balances hídricos para el reparto equitativo del agua; aseguramiento de la calidad del agua; conservación de páramos, riberas y fuentes de agua; y, manejo de riesgos hídricos para la prevención de desastres.

Otros planes que aún se encuentran como proyectos, y que están contenidos en el Plan Nacional del Agua son:

- **Plan Nacional de Monitoreo y Control de la Calidad del Agua**

Según menciona la SENAGUA en su página web, este proyecto busca establecer los sectores críticos en relación a la calidad del agua, para proponer medidas de control de la contaminación que posteriormente permitirán obtener una metodología con aplicabilidad a nivel nacional. La cuenca del río Esmeraldas se ha establecido como un sitio prioritario para el estudio y ahí se desarrolla el proyecto piloto.

Para la ejecución del proyecto se tomará en cuenta la información existente sobre vertidos, la misma que se validará y actualizará. El monitoreo de la calidad del agua, tanto de fuentes de abastecimiento para consumo humano, como de cuerpos hídricos receptores de aguas residuales industriales y domésticas, permitirá establecer las condiciones actuales de los cuerpos de agua.

- **Plan Nacional de Conservación, Protección, y Manejo de los Recursos Hídricos**

Este proyecto se desarrolla dentro del Plan Nacional del Agua y prioriza la cuenca del río Esmeraldas como unidad hidrográfica para ejecutarlo. El objetivo principal del proyecto es definir una metodología general a nivel de sistemas hidrográficos y de subcuencas para realizar estudios de diagnóstico y propuesta de planes,

programas y proyectos destinados a la protección, conservación y manejo de los recursos hídricos. La implementación de los resultados que se obtengan permitirá garantizar la disponibilidad y calidad del agua, para satisfacer de forma oportuna, equitativa, y suficiente los diferentes usos del recurso hídrico. (SENAGUA, 2009)

### **2.3 DEMANDA DE AGUA EN EL ECUADOR**

Se presenta a continuación un análisis sucinto a nivel sectorial, destacando cuales son los campos de gestión con mayor demanda de registros y estudios hidrometeorológicos; y que corresponden a agua potable y saneamiento, riego, generación hidroeléctrica, prevención de las amenazas hidrometeorológicas, entre otros temas.

- **Agua potable y saneamiento**

Este sector presenta graves problemas que se reflejan en la cobertura de servicios a nivel nacional. Según (CNRH, 2002) el 67 % de la población dispone de agua potable, y apenas el 57 % tiene infraestructura para saneamiento. La cobertura de servicios por regiones se presenta en la Tabla 2.1, en donde se aprecia que las regiones Costa y Oriente tienen las menores coberturas. En la práctica el tratamiento de agua no se realiza con alguna excepción puntual (ciudad de Cuenca).

Si bien la cobertura de agua potable y saneamiento en el país ha aumentado considerablemente en los últimos años, el sector se caracteriza por bajos niveles de cobertura, especialmente en áreas rurales; deficiente calidad y baja eficiencia del servicio; y, limitada recuperación de costos y por tanto alto nivel de dependencia en las transferencias financieras de los gobiernos nacionales y locales.

De acuerdo al Censo del 2001 las características de la cobertura de los sistemas de agua potable y saneamiento para las zonas urbanas y rurales del Ecuador se presentan en la Tabla 2.1.



**TABLA 2.1: Cobertura (%) de servicios de agua potable y saneamiento**

Región	Agua potable			Saneamiento		
	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural	Total
Costa	74	20	58	66	17	52
Sierra	92	58	78	82	43	66
Amazónica	85	19	43	58	11	27
Insular	64	35	61	23	14	22
<b>Total Nacional</b>	<b>82</b>	<b>39</b>	<b>67</b>	<b>73</b>	<b>30</b>	<b>57</b>

FUENTE: (CNRH, 2002)

Desde un enfoque práctico, la implementación o ampliación de proyectos o sistemas de agua potable demanda de estudios climatológicos e hidrológicos y como consecuencia, de datos sobre: precipitación, temperatura; caudales y calidad del agua de las fuentes; y, además de información hidrogeológica en el caso de aprovechamientos de aguas subterráneas. Para el diseño de plantas de tratamiento de aguas servidas es indispensable disponer o generar estudios hidrológicos sobre los caudales y calidad del agua de los cuerpos receptores de las aguas tratadas.

- **Demanda energética**

Dentro de los caudales asignados para los diferentes usos del agua, para hidroelectricidad se han destinado 3'120.451,084 l/s, que corresponde al 82% entre todas las demandas. (EPN - MEER, 2008)

Esto se debe a que la matriz energética del país del año 2008 establece un alto grado de dependencia de la energía hidráulica (67.7 %), un aporte menor de energía térmica (29.3 %) y también la necesidad de la importación de energía (3.0 %), como se precisa en el Cuadro 10. Adicionalmente, la alta concentración de la producción de energía en las centrales hidroeléctricas Paute, Agoyán, San Francisco, que tienen régimen climático amazónico y la ocurrencia de estiajes severos, pone al momento al servicio eléctrico en dependencia de la variabilidad climática y por ende de la distribución estacional de caudales, situación reflejada en el último período de estiaje oriental (noviembre 2009 – febrero 2010).

**TABLA 2.2 Oferta de energía eléctrica**

Oferta de energía	GWh	%
Hidráulica	11 293	67.7
Térmica	4 897	29.3
Importación	500	3.0
<b>Total</b>	<b>16 691</b>	<b>100</b>

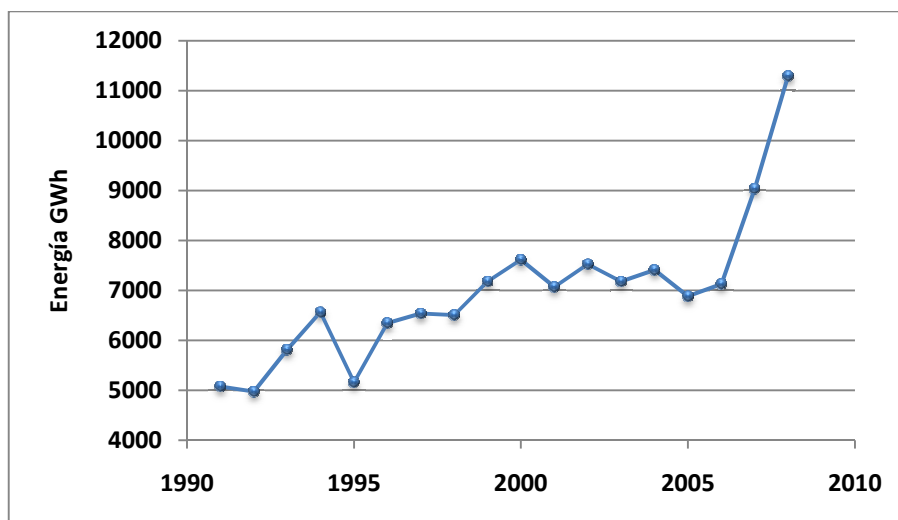
FUENTE: CONELEC, 2009

No obstante, en lo que respecta a energía producida, el 67% es de origen hidráulico, el 23% de origen térmico y el restante 10% se importa. (Andrade, Gallegos, & Villacrés, 2010). En la Tabla 2.3 se incluye la evolución de la producción anual de energía hidráulica en el país, que si bien es creciente, aún es insuficiente para cubrir la demanda anual (ver Gráfico 2.1).

**TABLA 2.3 Energía hidráulica anual producida**

Año	Energía (GWh)
1992	4 973.6
1993	5 810.1
1994	6 565.3
1995	5 160.6
1996	6 343.4
1997	6 534.2
1998	6 506.1
1999	7 176.7
2000	7 611.2
2001	7 070.7
2002	7 524.3
2003	7 180.4
2004	7 411.7
2005	6 882.6
2006	7 129.5
2007	9 037.7
2008	11 293.3

FUENTE: CONELEC, 2009

**GRÁFICO 2.1 Tendencia de la producción hidroenergética anual**

FUENTE: CONELEC, 2009

En las estadísticas presentadas sobre los proyectos en carpeta, se concluye que la mayor parte de los proyectos corresponde a centrales hidroeléctricas (grandes, medianas y pequeñas), las cuales demandan para su planificación, operación y mantenimiento, de registros hidrológicos y meteorológicos. En la Tabla 2.4 se presentan las centrales hidráulicas que actualmente están en operación.

**TABLA 2.4 Capacidad de las centrales hidroeléctricas**

Central Hidráulica	Potencia (MW)
Hidropaute Paute – Molino	1 100
San Francisco	216
Hidronación M. Laniado	213
Mazar	160
Hidroagoyán Agoyán	156
Pucara	70
Cumbaya	40
Hidroabanico	38
Nayón	29.7
Saucay	24
Calope	17.2
Otros	148.56
<b>Total</b>	<b>2 052.46</b>

FUENTE: CONELEC, 2009

Es política del estado variar la matriz energética nacional, con un mayor porcentaje de generación de energía hidráulica, para lo cual se encuentra en carpeta la construcción de varias centrales hidroeléctricas. (Ver Tabla 2.6)

**TABLA 2.5 Carteras de Proyectos Hidroeléctricos de mediana capacidad en los Sistemas Hidrográficos**

Sistemas Hidrográficos	Nombre de Proyectos	Total MW
Mira – Carchi	Sigsipamba, Escudillas, Palmar, Apaqui, El Ángel, Guayabal, Mira 1, Plata, Mira 2, Blanco, Chinambi, Parambas, Chilma.	328
Esmeraldas	Calderón, Mindo, Milpe, Los Bancos, Alambi, Tulipe, Santa Rosa, Pamplona, Intag, Guangaje, Isinlivi, Sigchos, Yacuchaqui, Las Juntas, Sarapullo, Corazón, Santa Ana, Pilatón, Alluriquin, San Pedro	490
Jama-Chone-Portoviejo	La Esperanza	6
Guayas	Rayo, Blanco, Pilaló – 3, Chuquiraguas, La Maná, Angamarca – Sinda, Echandía Alto, Echandía Bajo, Caluma Alto, Caluma Bajo, Balsapamba, Tambo, Pangor – 1, Alausí, Chanchán	201
Taura-Naranjal-Pagua-Cañar	Tambo, Raura, Gualletero, Ocaña, Cañar	98
Jubones	Shincata, Udushapa I, Udushapa II, Oña, Paquishapa, Susudel, El Burro, Mandur, Uchucay, San Francisco, Vivar, Casacay, La Unión	201
Puyango	Río Luis	16
Napo	Chalpi, Papallacta – 1, Quijos – 1, Sizaplaya, Cosanga, Jondachi – 1, Misahualli – 2	69
Pastaza	Cebadas, Chambo, Puela – 2	225
Santiago	Tomebamba, Collay, Sucúa, Abanico, Sabanilla, Soñaderos, Bumbuscara	37
Mayo	Chinchipe	37

FUENTE: INECEL, 1997

**TABLA 2.6 Proyectos Hidroeléctricos mayores a 100 MW en fase de estudio**

Sistema Hidrográfico	Nombre del Proyecto Hidroeléctrico	Potencia a instalar	Nivel de Estudio
Mira	Parambas	145	Prefactibilidad
Napo	Verdeyacu Chico	1 173	Inventario
	Catachi	748	Inventario
	Cedroyacu	270	Inventario
Pastaza	Lligua – Muyo	170	Prefactibilidad
Puyango	Marcabeli	163	Factibilidad
Santiago	Naiza	1 039	Inventario
	Zamora San Juan Bosco	1 028	Inventario

**TABLA 2.6 Continuación**

Santiago	Zamora Salto 3	1 015	Inventario
	Zamora Salto 1	924	Inventario
	Zamora Salto 2	917	Inventario
	San Antonio	760	Inventario
	Gualaquiza	661	Prefactibilidad
	San Miguel	686	Inventario
	El Retorno	261	Inventario

FUENTE: <http://www.conelec.gov.ec>

- **Riego**

En el país existe gran cantidad de áreas con suelos potencialmente aptos para agricultura, pero se requiere de riego para que estos sean incorporados a lo que en sí representan las actividades productivas.

Según (CNRH, 2002), la superficie potencialmente regable del Ecuador alcanzaba los 3'136.085 ha, de la cual, la superficie regable en el mediano plazo alcanzaría 1'185.000 ha, en tanto que el área con infraestructura de riego alcanza las 863.370 ha.

La demanda por agua de irrigación es alta y aumenta anualmente, especialmente en la región de los Andes y en las áridas planicies costeras.

El área regable neta está sobre las cuencas de la vertiente del Pacífico y la diferencia sobre la vertiente Amazónica. La cuenca más importante en extensión es la del río Guayas, que representa el 40.4 % de la superficie regable del país, seguida de la del río Esmeraldas con el 12.6%. Del total del área regable, apenas 560 000 ha están bajo riego, lo que representa el 30 % de la superficie cultivada del país. Sin embargo la agricultura bajo riego tiene una significación mucho mayor que la de secano, aportando aproximadamente con el 75% del valor de la producción agrícola nacional. (Andrade, Gallegos, & Villacrés, 2010)

Pese a que es poco lo que se conoce sobre el riego privado, estos sistemas cubrirían aproximadamente 460.000 ha (83 %), correspondiendo la diferencia, esto es 108.000 ha a cultivos regados con sistemas públicos (CNRH, 2002).

Existe un sesgo en la distribución de la tenencia del agua, que confirma la desigual distribución de la tenencia de la tierra: el 88% de los beneficiarios del riego, minifundistas, disponen entre el 6 y el 20 % de los caudales totales disponibles; en contraste, entre el 1 y 4% del número de beneficiarios disponen del 50 al 60 % de los caudales disponibles. (SENPLADES, 2009)

Las áreas ocupadas por riego se definieron en función de los proyectos identificados por el Instituto Nacional de Riego ([www.inar.gov.ec](http://www.inar.gov.ec)) a nivel nacional, y se destaca que la superficie total ocupada por los 432 proyectos identificados es 257.343 ha. En la Tabla 2.7 se presenta la superficie ocupada por los proyectos de riego de acuerdo a los Sistemas Hidrográficos.

**TABLA 2.7 Proyectos de riego por sistemas hidrográficos**

Sistemas Hidrográficos	Proyectos de Riego	Superficie (ha)
Mira – Carchi	76	19 092
Esmeraldas	62	24 112
Jama - Chone - Portoviejo	5	16 550
Jipijapa	3	2 000
Guayas	55	84 083
Taura - Cañar - Naranjal - Pagua	21	3 098
Jubones	7	711
Santa Rosa, Arenillas	5	360
Puyango	10	4 255
Catamayo	14	9 743
Napo	3	13 845
Pastaza	125	61 716
Santiago	46	17 778
<b>TOTAL</b>	<b>432</b>	<b>257 343</b>

FUENTE: INAR

La Constitución, respecto a este tema, establece:

Art. 282: “Que el Estado regulará el uso y manejo del agua de riego para la producción de alimentos, bajo los principios de equidad, eficiencia y sostenibilidad ambiental”

Art. 318: “Que los servicios de riego serán prestados únicamente por personas jurídicas estatales o comunitarias”

“Que el Estado, a través de la autoridad única del agua, será el responsable directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos que se destinarán a consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas, en este orden de prelación.”

“Que se requerirá autorización del Estado para el aprovechamiento del agua con fines productivos por parte de los sectores público, privado y de la economía popular y solidaria, de acuerdo con la ley.”

En base a ello, lo que se ha buscado es reorganizar el otorgamiento de las concesiones, evitar el abuso y las inequidades en las tarifas de uso, y garantizar una distribución y acceso más equitativo, en particular a los pequeños y medianos productores agropecuarios, siendo prioridades plasmadas también el Plan Nacional del Buen Vivir.

La SENAGUA con el Plan Nacional del Agua abarca estos aspectos en algunos puntos como: la solución definitiva al problema de los trámites por concesiones y tarifas diferenciadas, justas y solidarias, con lo que se pretende eliminar los problemas en cuanto a solicitudes de otorgamiento de agua, y tarifas de aprovechamiento que sean mas altas para quienes consumen más, y que privilegien el consumo humano y soberanía alimentaria.

En noviembre del 2007, fue creado el Instituto Nacional de Riego (INAR), por la urgente necesidad de establecer la institucionalización para la Gestión Integral del Riego en el país.

### **2.3.1 LAS CONCESIONES PARA USO DEL AGUA**

La SENAGUA es la institución encargada en la actualidad de las concesiones de agua para todos los usos, dividió al país en 9 demarcaciones hidrográficas, las mismas que se encuentran conformadas por varias cuencas hidrográficas. Estas vienen a reemplazar las antiguas agencias en donde se recibían las solicitudes para las concesiones de agua.

En el Anexo N°1, se incluyen las cuencas hidrográficas del país (Mapa 1), Demarcaciones de Ecuador (Mapa 2) y Rendimiento de caudales por cuenca hidrográfica (Mapa 3).

Según las estadísticas, de 1973 a septiembre del 2009, las concesiones de agua otorgadas para todos los usos son aproximadamente 87.407 a nivel nacional. (SENAGUA, 2009)

De todas las concesiones realizadas y aun vigentes a nivel nacional, el riego representa el 56% en número (Ver Gráfico 2.3), en tanto que los caudales concedidos para esta actividad representan el 15% de total. (Ver Gráfico 2.2).

En el mapa 4, ubicado en el Anexo N°1 se observa las ubicaciones de las concesiones para riego dentro del país.

Después de la hidroelectricidad, el riego es el uso del agua al cual se le ha asignado mayor caudal en los años en consideración, que representa el 15% del caudal total asignado para todas las concesiones. En la tabla 2.8 se indican los caudales otorgados para distintos usos del agua.



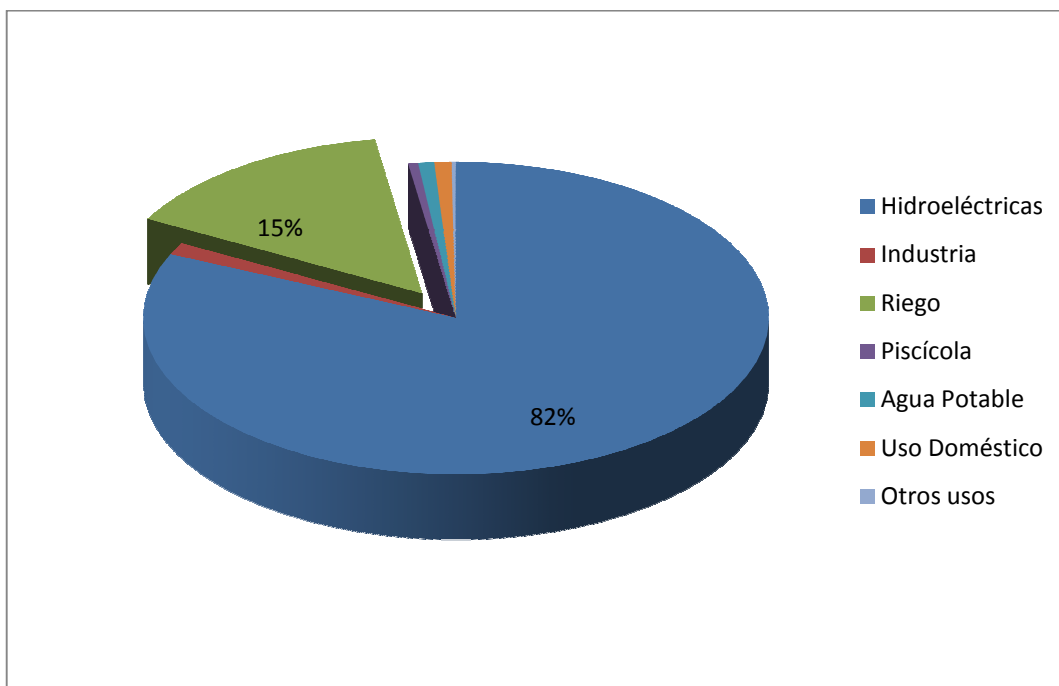
**TABLA 2.8 Distribución de los caudales aprovechados según los usos del agua**

USOS DEL AGUA	CAUDALES (l/s)	PORCENTAJE DEL TOTAL DE CAUDALES APROVECHADOS
Abrevadero	1326,55903	0,035%
Balneología	109,091	0,003%
Uso Doméstico	44593,12897	1,170%
Fuerza Mecánica	4907,538	0,129%
Hidroeléctricas	3120451,084	81,856%
Industria	47107,45711	1,236%
Aguas de Mesa	260,5515	0,007%
Agua Potable	39095,97266	1,026%
Riego	529787,8327	13,897%
Piscícola	23796,5851	0,624%
Termales	666,21652	0,017%
No definidos	26,41	0,001%

FUENTE: SENAGUA, 2009

El número de concesiones para riego son aproximadamente 48.706 y la mayor parte se encuentran ubicadas en la demarcación de Puyango, Jubones y Pastaza (Ver Gráfico 2.4), sin embargo en cuanto a caudales concedidos que son 5'223.213,383 l/s en todo el territorio nacional, la mayor parte han sido otorgados para la demarcación de Guayas (Ver Gráfico 2.5). (SENAGUA, 2009).

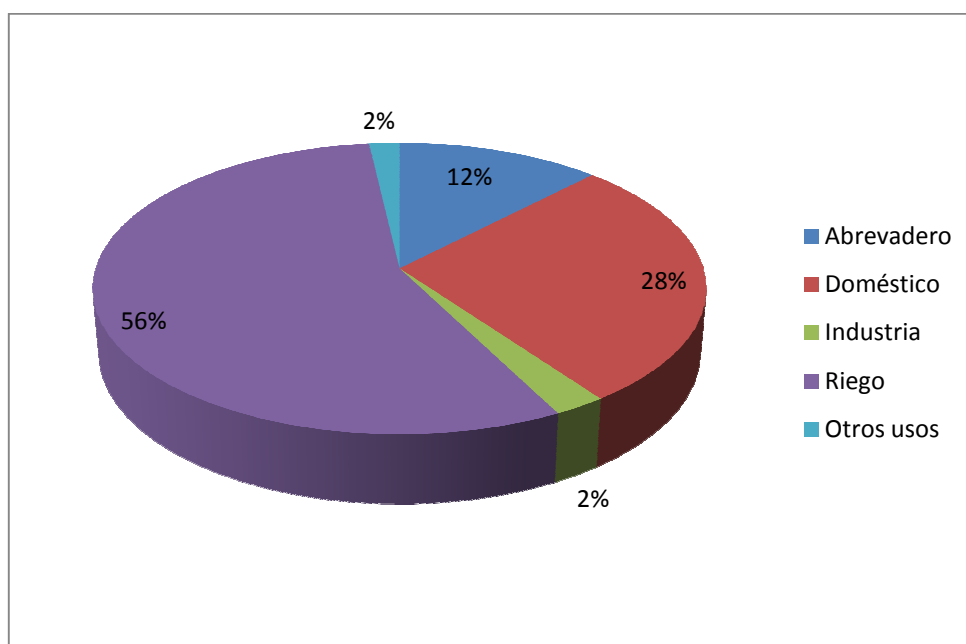
**GRÁFICO 2.2** Distribución de caudales asignados en concesiones para los distintos usos del agua



FUENTE: SENAGUA

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

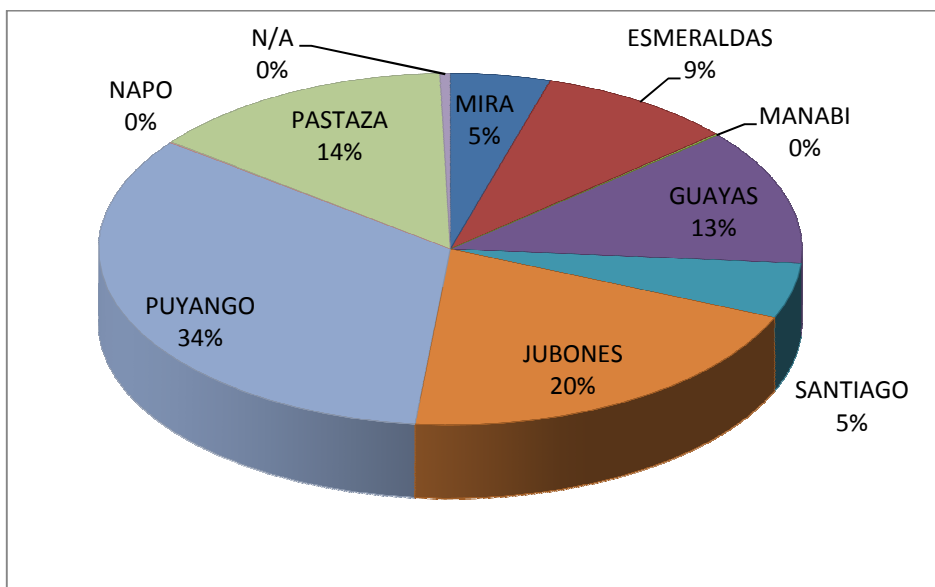
**GRÁFICO 2.3** Distribución de las concesiones realizadas según los usos del agua a nivel nacional.



FUENTE: SENAGUA

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

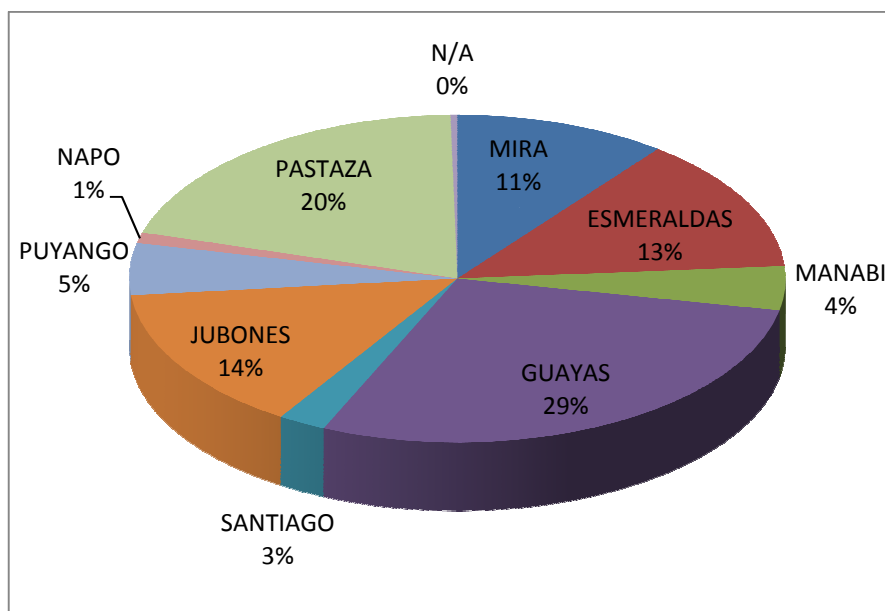
**GRÁFICO 2.4** Porcentaje de número de concesiones para riego según demarcación hidrográfica



FUENTE: SENAGUA

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

**GRÁFICO 2.5** Distribución de caudales destinados para riego según demarcación hidrográfica



FUENTE: SENAGUA

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

## **CAPÍTULO 3**

# **IDENTIFICACIÓN DEL NIVEL DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

#### **3.1.1 DEFINICIÓN DEL NIVEL DE INFORMACIÓN DE UNA CUENCA Y METODOLOGÍA HIDROLÓGICA<sup>1</sup>**

##### **Nivel de información hídrica de una cuenca**

Se entiende como tal a los datos registrados sin procesamiento, semiprocesados o procesados, sea que estén o no organizados en un estudio hidrológico y en cuanto tienen que ver con su cantidad y calidad que tengan relación a variables hidrológicas como: temperatura, humedad atmosférica, lluvias y caudales líquidos y sólidos, que son los que pueden interesar para estudios de riego, agua potable, hidroelectricidad, entre otros.

El conocimiento de este nivel de información se obtiene a través de un proceso secuencial en dos etapas:

- Realización de un inventario que constate la existencia o no de datos para la cuenca.

---

<sup>1</sup> Este instructivo se sustenta en el documento (Villacís & Andrade, 1985)

- Recopilación de los datos específicos de cada variable seleccionada.

## **Metodología Hidrológica**

Es el conjunto de criterios, asunciones, simplificaciones y procedimientos específicos de cálculo, los mismos que constituyen el tratamiento que se da a cada una de las variables hidrológicas para obtener un valor específico de diseño para un proyecto.

### **3.1.2 OBJETIVO DE LA IDENTIFICACIÓN**

El principal objetivo que se pretende alcanzar al identificar el nivel de información existente, es el de lograr la sistematización y optimización en el uso de la información para orientar la metodología a aplicar, además de aquellos que han sido aclarados anteriormente.

### **3.1.3 APLICACIÓN A LOS NIVELES DE PREFACTIBILIDAD, FACTIBILIDAD Y DISEÑO**

Los procedimientos que deben seguirse para estos dos niveles de estudio son:

- Nivel de prefactibilidad
  - Investigar el nivel de información de la cuenca
  - Interpretar los datos básicos recolectados
  - Utilizar los instructivos del manual donde se encuentren las metodologías hidrológicas de cálculo.
- Nivel de factibilidad
  - Reajustar el nivel de información de la cuenca

- Interpretar los resultados de prefactibilidad y cualquier información adicional para optar por la metodología hidrológica más apropiada.
- Nivel de diseño definitivo
  - Definir las características físicas, hidrológicas y climatológicas para los sitios de obra seleccionados

## **3.2 PROCEDIMIENTO PARA EL NIVEL DE PREFACTIBILIDAD**

### **3.2.1 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA PARA UNA CUENCA DE DRENAJE**

Para facilitar este procedimiento, se debe apoyar en el Formulario N° 1 (Ver Anexo N°2), el mismo que contiene las siguientes columnas:

- **Columna 1:** En ella se indica el sitio donde existen los datos, además de la simbología:
  - PR: propiamente en el sitio de implantación de las obras, sea que correspondan a un estudio previo o a estaciones de registro.
  - H: Las estaciones hidrológicas relativas al proyecto. Si la estación es interior a la cuenca se pondrá junto al nombre el símbolo (I) o (E) si es exterior.
  - M: La estación meteorológica más representativa para el proyecto
  - P: La estación pluviométrica o pluviográfica más representativa para el proyecto.

- **Columna 2:** Se da el título al documento que contiene la información que interesa al proyecto, la fecha de su publicación y la institución o persona que hizo el estudio
  
- **Columna 3:** Se señala la disponibilidad de la cartografía respectiva, es decir, plano ya estructurado de la cuenca de drenaje o en su defecto cartas topográficas y/o planimétricas y cualquier otra carta temática que interese a la evaluación hídrica (de erosividad, de regionalización, etc.)
  
- **Columna 4:** Se hace constar la existencia de registros de las siguientes variables meteorológicas:
  - Lluvias: Registros de valores mensuales en la estación más cercana al sitio de proyecto, mapa local o regional de isoyetas lluvias intensas en forma de dato básico o ya en un análisis frecuencial.
  - Temperaturas: Medias – máximas – mínimas, mapas de isotermas, y gráficos de cota –vs- temperatura
  - Humedad Relativa: Media – máxima (puntual) y gráficos cota vs. Humedad relativa
  
- **Columna 5:** Se indica la existencia tanto de valores medios como máximos de lo relativo a caudales líquidos en cuanto a: niveles medios diarios y máximos instantáneos del río, aforos líquidos, curva de descarga, caudales diarios mensuales, curvas de duración general y caudales máximos instantáneos para varios periodos retorno ( $Q_T$ )
  
- **Columna 6:** Se anota la disponibilidad de información de sólidos en suspensión y arrastre por el fondo en cuanto a: índices regionales de erosión, aforos sólidos, curvas de descarga sólida, volúmenes anuales de erosión ya estimados, curvas granulométricas, análisis mineralógicos.

Complementariamente, se indica el periodo de registro correspondiente y número de muestreos – análisis.

### 3.2.2 IDENTIFICACIÓN DE METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS

Es el segundo paso y con el se define el *camino a seguir* para optar por el procedimiento hidrológico que conviene al estudio.

Consiste en:

- Analizar cualitativamente el contenido del Formulario N° 1
- Posteriormente, se tendrá la opción de escoger los parámetros de acuerdo al sitio del manual que deberá consultarse para ejecutar el estudio hidrológico.

#### **Análisis cualitativo del Formulario N° 1**

Una vez completo este formulario, es posible realizar el siguiente análisis para cada uno de los temas contenidos en las columnas 3 a 7:

- ***Si existen o no los datos:*** Permitiendo la posibilidad de que sea una cuenca registrada o no.
- ***Si corresponden a los datos registrados en el interior o exterior de la cuenca:*** Esto conduce a dos opciones: el usar una metodología de cálculo con datos registrados en la misma cuenca de drenaje, o el decidir por un procedimiento de extrapolación de información de cuencas vecinas.
- ***Si la cantidad de información es suficiente.***

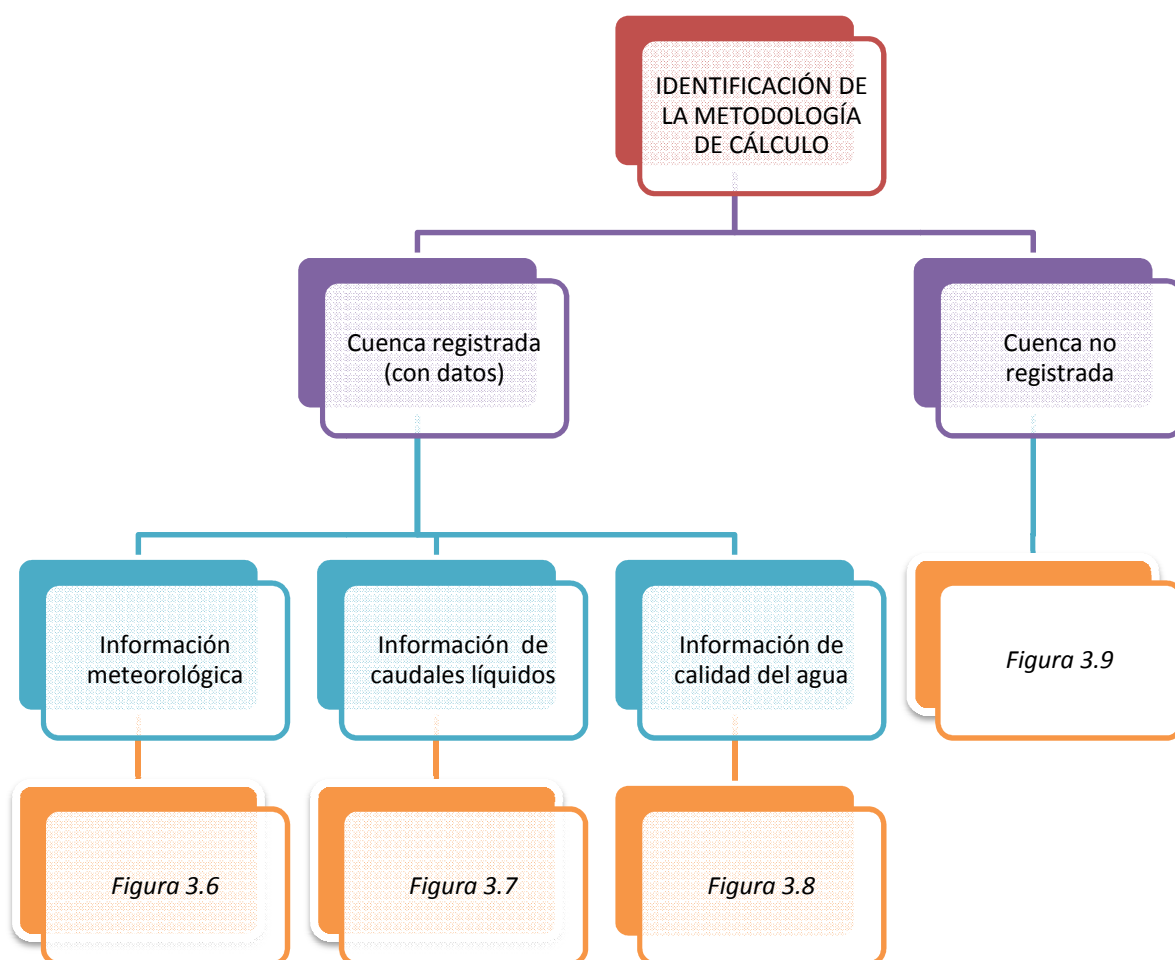


Lo que nos conduce a dos opciones en cuanto a los procesos específicos de cálculo a elegir y que fundamentalmente dan confiabilidad y representatividad a los resultados que se obtengan al realizar el estudio hidrológico.

Todos estos puntos, están contenidos en cada una de las Figuras (3.6 a la 3.8)

En la Figura 3.1, se proporciona un diagrama que establece el procedimiento que deben utilizarse las figuras teniendo en cuenta la información recabada por medio del Formulario N° 1 para el estudio hidrológico y climatológico.

**FIGURA 3.1 Diagrama para determinar cual gráfico se debe utilizar en función del análisis cualitativo del Formulario N° 1**



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

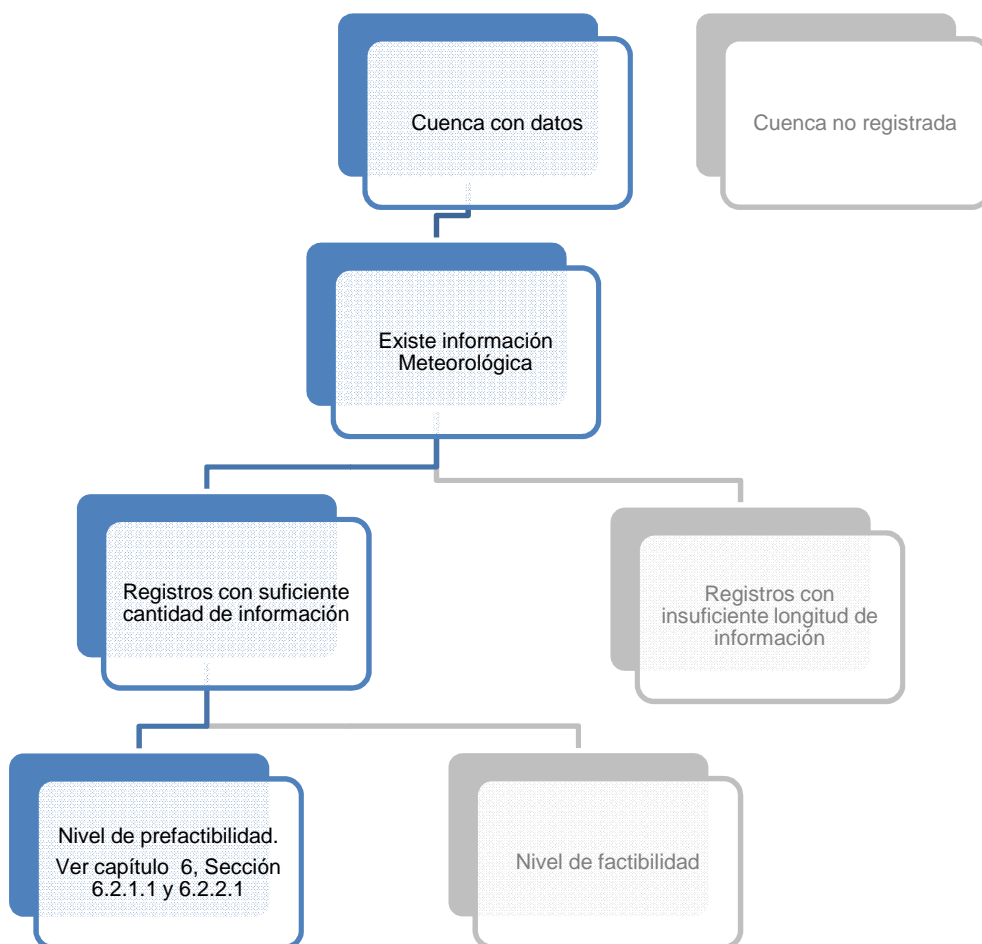
### Uso de los esquemas presentados en las figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9

El empleo de estos gráficos depende del análisis realizado anteriormente y para cuencas con datos hidrológicos y climatológicos.

Por ejemplo: La existencia de una estación meteorológica en el interior de la cuenca de drenaje, cercana al sitio del proyecto y que disponga de 20 años o más de registros de lluvias, temperaturas y humedad relativa, significa que se debe seguir la Figura 3.6.

En la Figura 3.2 se muestra los niveles a seguirse dentro del instructivo para este caso.

**FIGURA 3.2 Ejemplo de manejo de la información mediante el uso de las Figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9**



FUENTE: (Villacís & Andrade, 1985)

Finalmente, para analizar el aspecto meteorológico del proyecto, al nivel de prefactibilidad, habrá que aplicar los procedimientos señalados en el Capítulo 6, en los numerales indicados.

Un razonamiento similar se sigue para identificar los métodos de cálculo para caudales líquidos y calidad del agua cualquiera que sea el nivel de información de la cuenca.

### **Uso del esquema presentado en la Figura 3.9**

Este gráfico se usa también en conjunto con el Formulario N° 1 y su función es esencialmente la misma que la de la Figura 3.1. Es decir, define el camino a seguir para realizar las evaluaciones hídricas de un proyecto en el caso de que sea un área o una cuenca hidrográfica sin estaciones de registro en la misma o en las vecinas, pero que se disponga de algún grado de información cartográfica.

## **3.3 PROCEDIMIENTO PARA EL NIVEL DE FACTIBILIDAD**

### **3.3.1 REAJUSTE DEL NIVEL DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA DE DRENAJE.**

Consiste en una actualización del Formulario N° 1 que fue llenado previamente en la fase de prefactibilidad.

Después de realizado el estudio de factibilidad, será necesario reajustar el nivel de información de la cuenca, para lo que se llena nuevamente el formulario indicado siguiendo el proceso descrito en el numeral 3.1.

El reajuste se lo hará en base únicamente al formulario anterior y a los resultados del estudio de factibilidad.

### **3.3.2 IDENTIFICACIÓN DE METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS**

Se sigue un procedimiento similar al señalado en el numeral 3.2 por medio de la utilización de los esquemas de las Figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9, siguiendo el ejemplo de la Figura 3.1.

## **3.4 FUENTES DE INFORMACIÓN**

A continuación se presenta un listado de instituciones donde es posible recabar información respecto a los temas en consideración. Es importante enfatizar que no corresponde a un análisis exhaustivo y se podrían identificar más instituciones que posean datos de interés.

### **3.4.1 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA**

Al evaluar la disponibilidad de información en cuanto a los aspectos hidrológicos, los Anuarios Hidrológicos de las estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) constituyen la fuente más amplia de datos de este tipo. En estos se pueden encontrar caudales, niveles de agua, sedimentos, hidroquímica (calidad del agua) e información de pozos y vertientes para datos de aguas subterráneas. (INAMHI, 2005)

Estudios hidrológicos de proyectos de aprovechamiento de agua como hidroeléctricos, riego, agua potable, realizados por distintas instituciones como universidades, ministerios, municipalidades, consejos provinciales, empresas provadas, entre otros; pueden servir también para obtener cierta información de este tipo.

En el Anexo N° 3, se presenta una tabla donde constan las estaciones hidrométricas con disponibilidad de datos, con su respectiva ubicación, fecha de instalación y levantamiento. La distribución de las estaciones hidrológicas se presenta en el Mapa 5. (Anexo N° 1).

### **3.4.2 INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA**

La información meteorológica es posible encontrarla en los Anuarios Meteorológicos del INAMHI. Un pequeño número de estaciones son monitoreadas por otras entidades públicas y privadas que utilizan dicha información para objetivos propios, siendo un punto clave la transferencia de información a la base de datos del INAMHI para la realización de los Anuarios Meteorológicos, publicaciones que existen desde 1959 hasta el año 2006. (Barros & Troncoso, Atlas climatológico del Ecuador, 2010)

En el Anexo N° 4, se presenta el listado las estaciones meteorológicas con disponibilidad de información en anuarios, con su respectiva ubicación, fecha de instalación y levantamiento.

En el Mapa 6 del Anexo N°1, se presenta la distribución de las estaciones meteorológicas a nivel nacional.

### **3.4.3 INFORMACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AGUA**

Las Fuentes de información existentes en cuanto a calidad del agua se encuentran distribuidas por todo el territorio nacional, ya que estos estudios se han realizado con objetivos específicos y no como un monitoreo permanente de los niveles de contaminación de los ríos

Es así que información de este tipo, es posible encontrarla en:

- *Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)*, donde se encuentran datos de los ríos con concesiones de agua.
- *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)*, información recogida en estaciones Hidrométricas.

- *CONELEC*, empresas generadoras de energía.
- *Municipios o empresas encargadas del tratamiento del agua potable, y prestación de servicios de agua potable y alcantarillado* (como Interagua en Guayaquil, la CRM en Manabí, PREDESUR, etc.)

Actualmente la SENAGUA mediante el Plan Nacional de Monitoreo y Control de la Calidad del Agua, incluido a su vez en el Plan Nacional del Agua, pretende compilar la información existente, y realizar el monitoreo de la calidad del agua tanto de fuentes de abastecimiento para consumo humano, como de cuerpos hídricos receptores de aguas residuales industriales y domésticas faltantes en todo el país, de modo que se puedan establecer las condiciones actuales del mayor número de cuerpos de agua y tenerlas disponibles en inventarios.

Aparte de los datos que sea posible recopilar de las instituciones, es importante realizar un propio muestreo que garantice la veracidad de la información, además que para fines como riego, es necesario conocer la calidad del agua de las fuentes.

Los parámetros más importantes de calidad del agua necesarios para la realización de un estudio dependen del fin que este tenga, ya que el agua puede considerarse óptima para un propósito pero inadecuada para otro.

En el Anexo I, del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundario del Ministerio del Ambiente (TULSMA) Libro VI, publicado en Edición Especial del Registro Oficial 31 de marzo del 2003., que corresponde a la *Norma de Calidad Ambiental y de descarga de Efluentes: Recurso Agua*, se establecen:

- Criterios de calidad para aguas destinadas al consumo humano y uso doméstico, previo a su potabilización.

- Criterios de calidad para la preservación de flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.
- Criterios de calidad para aguas subterráneas.
- Criterios de calidad para aguas de uso agrícola o de riego.
- Criterios de calidad para aguas de uso pecuario.
- Criterios de calidad para aguas con fines recreativos.
- Criterios de calidad para aguas de uso estético.
- Criterios de calidad para aguas utilizadas para transporte.
- Criterios de calidad para aguas de uso industrial

Los criterios importantes de calidad del agua, así como los límites permisibles para cada una de estas clasificaciones se incluye en el Anexo N°8.

Es importante revisar la normativa existente en cada gobierno local para el cual sea dirigido el proyecto, puesto que en algunos existen otros criterios a considerar o a su vez, valores permisibles más exigentes.

#### **3.4.4 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA**

Este tipo de información está disponible en el IGM (Instituto Geográfico Militar), el mismo que se encarga de la elaboración de la cartografía nacional y del archivo de datos geográficos de Ecuador. Su actividad se enmarca en la Ley de la Cartografía Nacional y elabora mapas, cartas y demás documentos cartográficos oficiales del territorio ecuatoriano.

Dentro de las cartas topográficas útiles para los estudios hidrometeorológicos, es posible encontrar las escalas 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:250000.

En el catálogo 1:50.000 existe información disponible de 389 cartas a nivel nacional en esta escala de acuerdo a la Proyección Universal Transversal de Mercator.

Existen gráficos donde se pueden encontrar las cartas topográficas que se requieran en la misma página web del IGM, en los cuales se puede ubicar la región de interés en regiones equivalentes a un  $1^\circ \times 1^\circ$ .

Las cartas disponibles corresponden a las columnas M, N, Ñ y O; y a las filas I, II, III, IV, V, VI y VII. Se escoge una de estas regiones, que serán nombradas de acuerdo a la columna y su fila correspondiente (Figura 3.3).

Estas regiones en una vista ampliada, se encuentran divididas a su vez, en 6 partes, las cuales se encuentran denominadas bajo las letras A, B, C, D, E y F; y cada una de estas letras poseen 4 divisiones más, bajo los números 1, 2, 3 y 4; y son estas las cartas topográficas en la escala 1:50.000 (Figura 3.4)

Por esta razón es que las cartas topográficas poseen un código ubicado en la parte superior derecha, el mismo que refleja esta ubicación dentro de cada región escogida. Las letras y números que siguen a este código corresponden al año de la carta topográfica. (Figura 3.5)

Procedimiento similar es aquel que se sigue con las cartas topográficas en escala 1:25.000

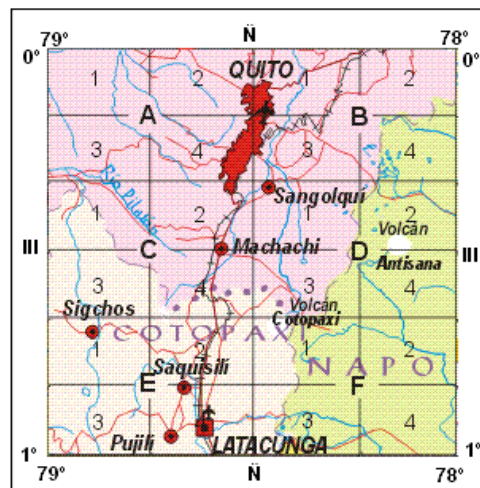


FIGURA 3.3 Mapa del territorio ecuatoriano completo



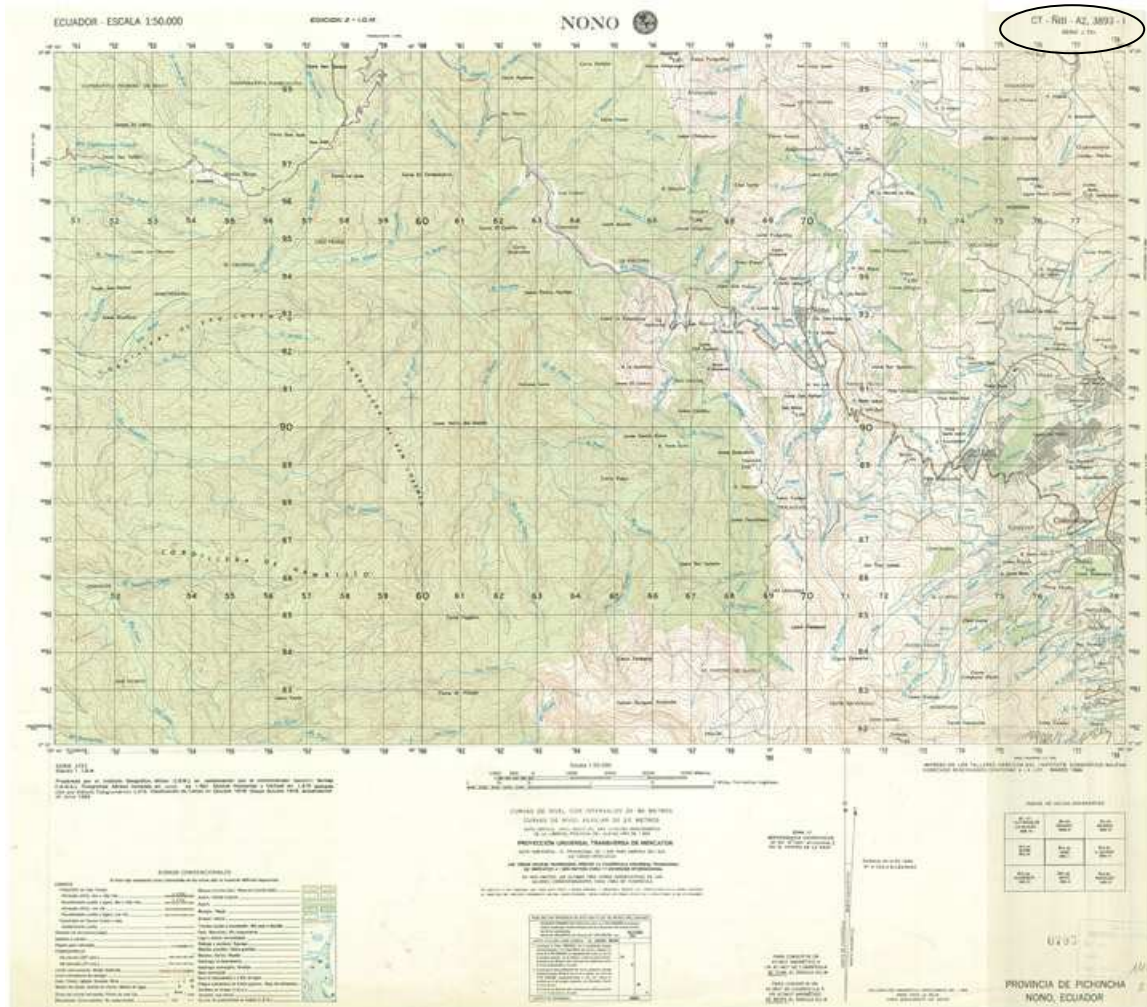
FUENTE: IGM, 2010

FIGURA 3.4 Región de 1°x 1°escogida en el mapa de la figura 3.3



FUENTE: IGM, 2010

**FIGURA 3.5 Carta topográfica Nono. Escala 1:50.000 (CT-ÑIII-A2)**



FUENTE: IGM, 2010

Ministerios, municipalidades, consejos provinciales, CLIRSEN, son entidades en donde se puede encontrar este tipo de información.

La difusión de mapas digitales actualmente se ha generalizado, por lo que es posible encontrar cartas topográficas en diferentes organismos públicos, como ministerios, municipios, entre otros. En páginas web, existen mapas temáticos, entre ellos cartografía a distinta escala sobre el uso del suelo, tipo de suelo, entre otros.

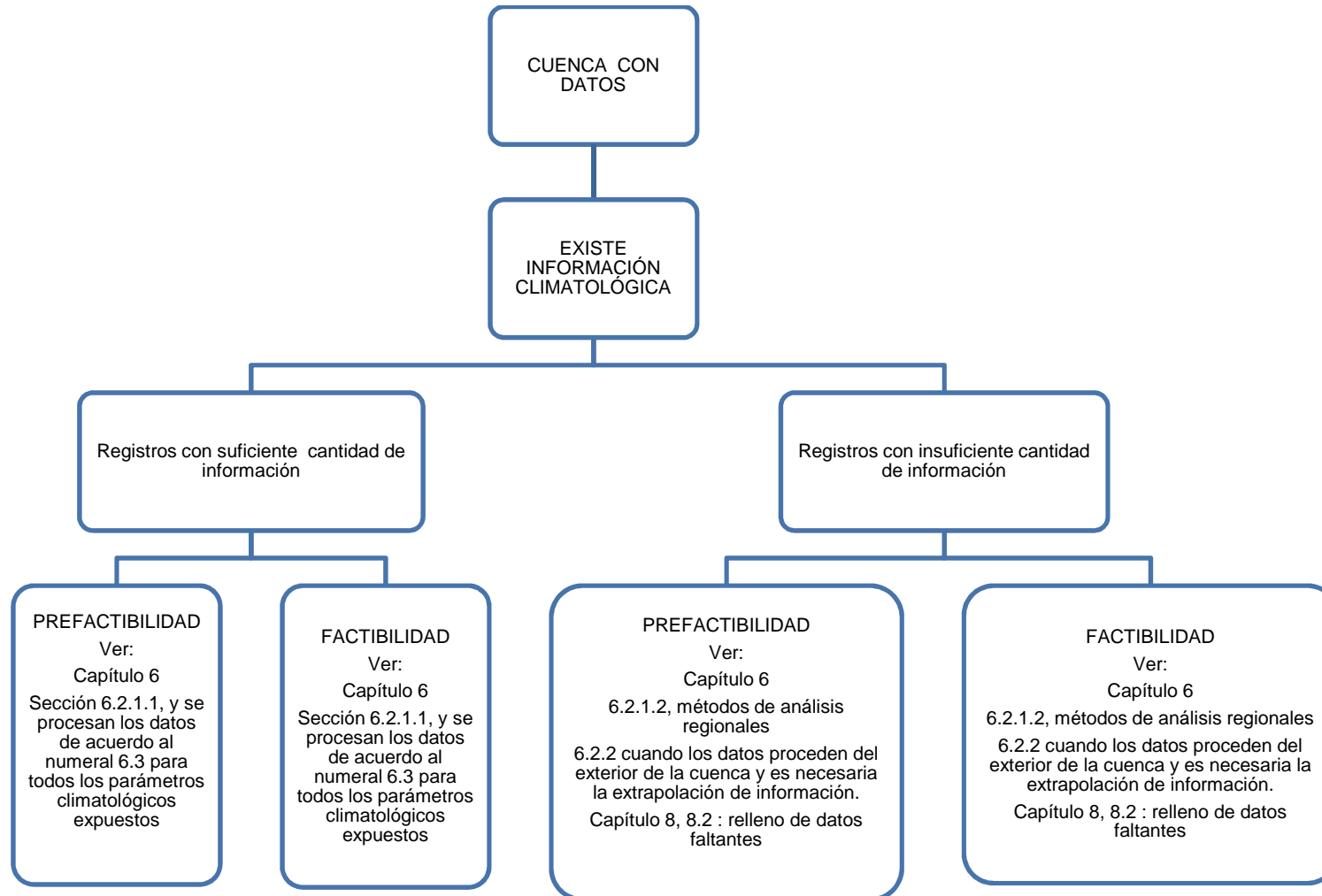
Ejemplo de esto son las páginas web presentadas a continuación:

- *Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM)*  
Dirección URL: <http://www.geoportaligm.gov.ec:8080/portal>  
A más de cartografía de libre acceso disponible como un recurso de geoinformación en esta página, es posible encontrar algunas fotografías aéreas y cartas topográficas escaneadas.
- *Sistemas de información geográfica de la UTPL*  
Dirección URL: <http://sig.utpl.edu.ec/sigutpl/index.php>  
Donde es posible encontrar para la cuenca de Loja, mapas realizados para diferentes fines (entre estos precipitaciones máximas, isotermas, isoyetas para diferentes periodos de retorno, redes viales, zonas climáticas, etc
- *SIG Riego (Instituto Nacional de Riego –INAR-)*  
Dirección URL: <http://www.inar.gov.ec/>  
En esta página, se ha puesto a disposición del público varios *shapes* que permiten añadir a un mapa base, diferentes temas como proyectos del INAR
- *Geoinformación Subcuencas - Sistema de información de las cuencas del río Guayas*  
Dirección URL:  
[http://cuencarioguayas.sni.gov.ec/portal\\_territorial/index.php?option=com\\_content&view=article&id=99&Itemid=168](http://cuencarioguayas.sni.gov.ec/portal_territorial/index.php?option=com_content&view=article&id=99&Itemid=168)  
Mediante un visor se pueden observar datos del clima e hidrología de la cuenca del Río Guayas.
- *Acción ecológica*  
Dirección URL: <http://mapas.accionecologica.org/Table/SHP-LYR/>  
Provee mapas en formato .shp o layers, de temas relacionados a geomorfología, microcuencas, elevaciones y ríos, red hídrica, propiedades del suelo, uso del uso, mapa político del Ecuador, entre otros.

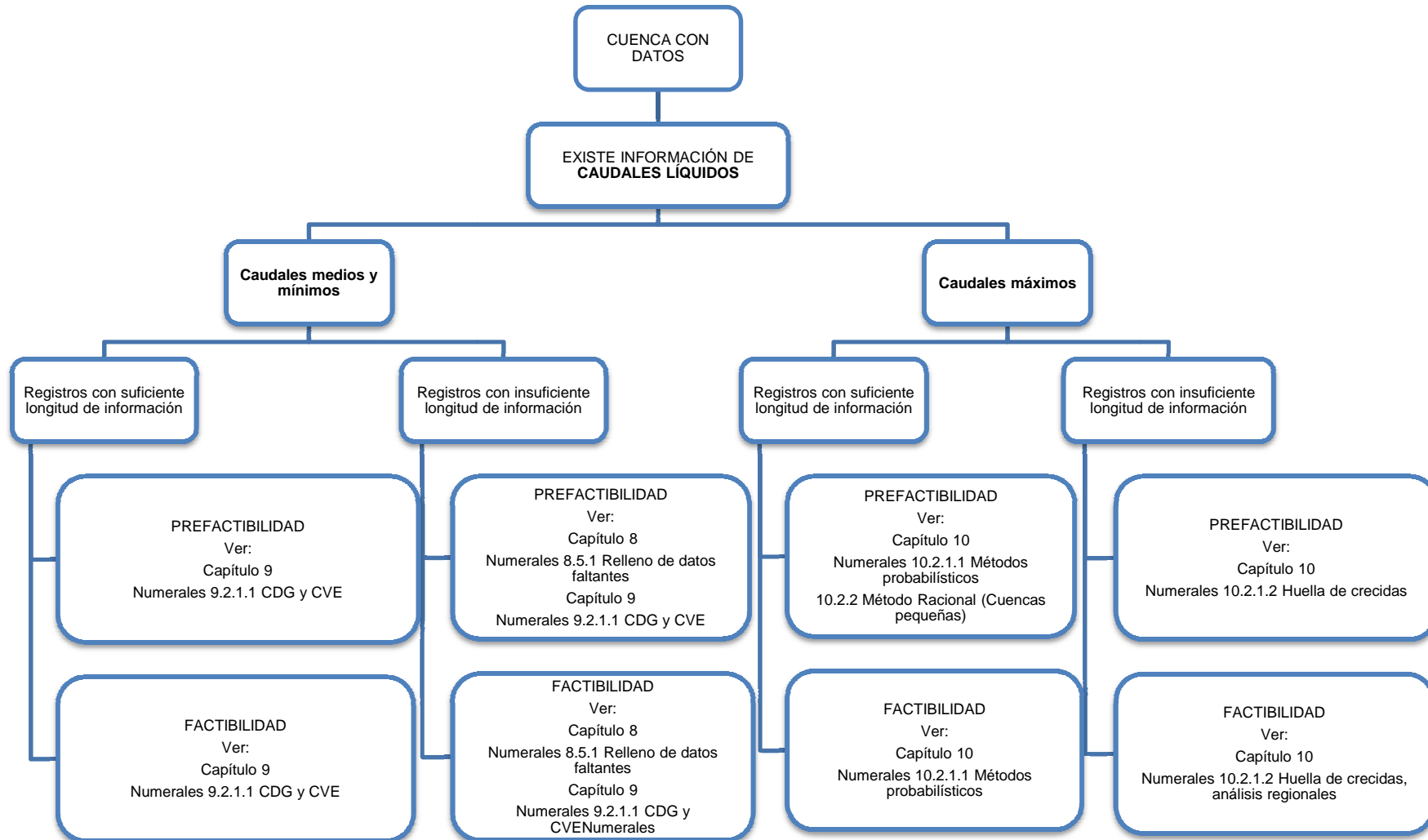
En si, todos estos recursos pueden ser solicitados en las entidades encargadas relacionadas con este tema de tal forma que se puedan contar con los recursos necesarios para hacer los estudios.

Se anexa en este proyecto algunos archivos en formato\*.shp que podrían resultar de utilidad. (Ver Anexo N°8)

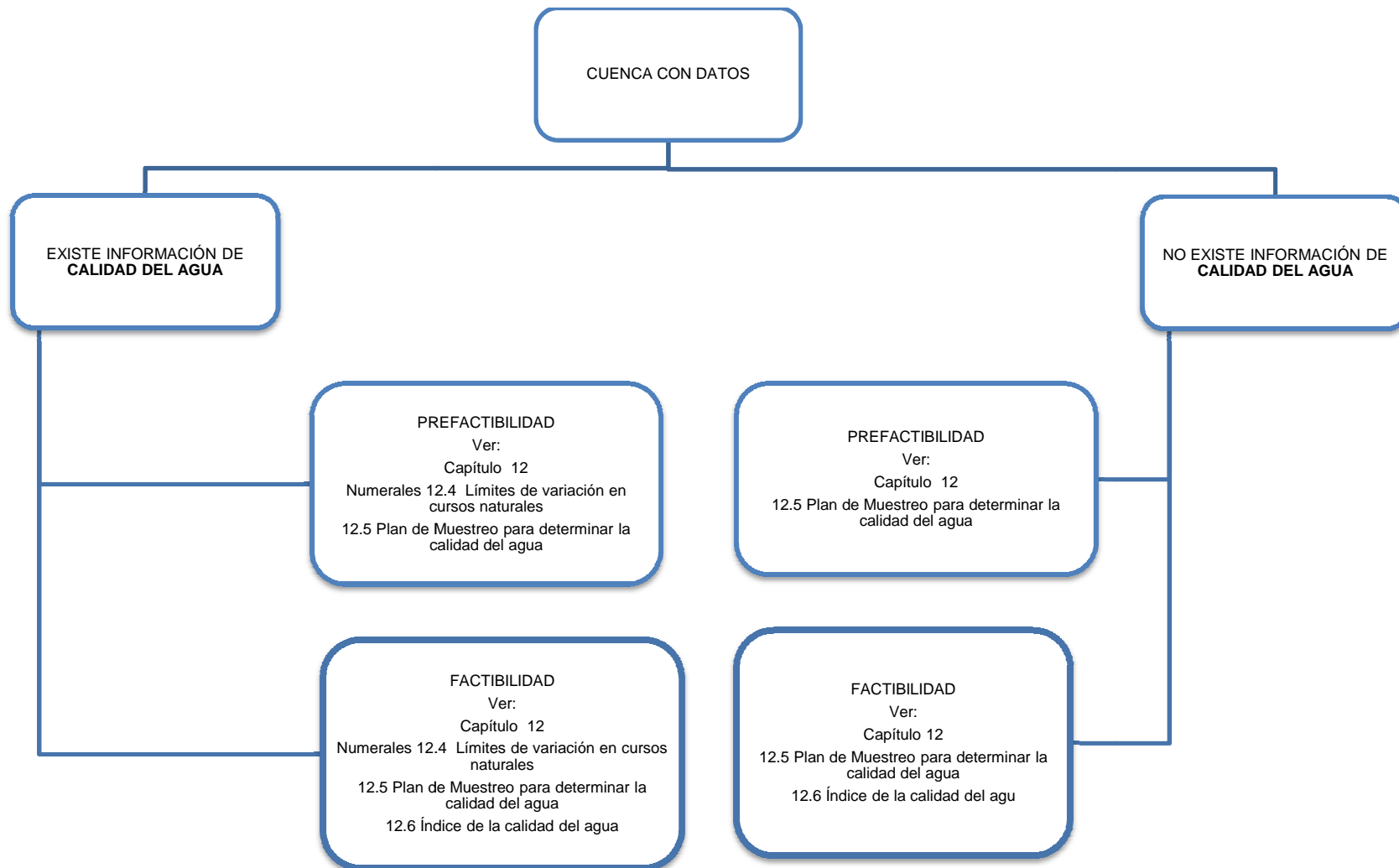
**FIGURA 3.6 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Climatología)**



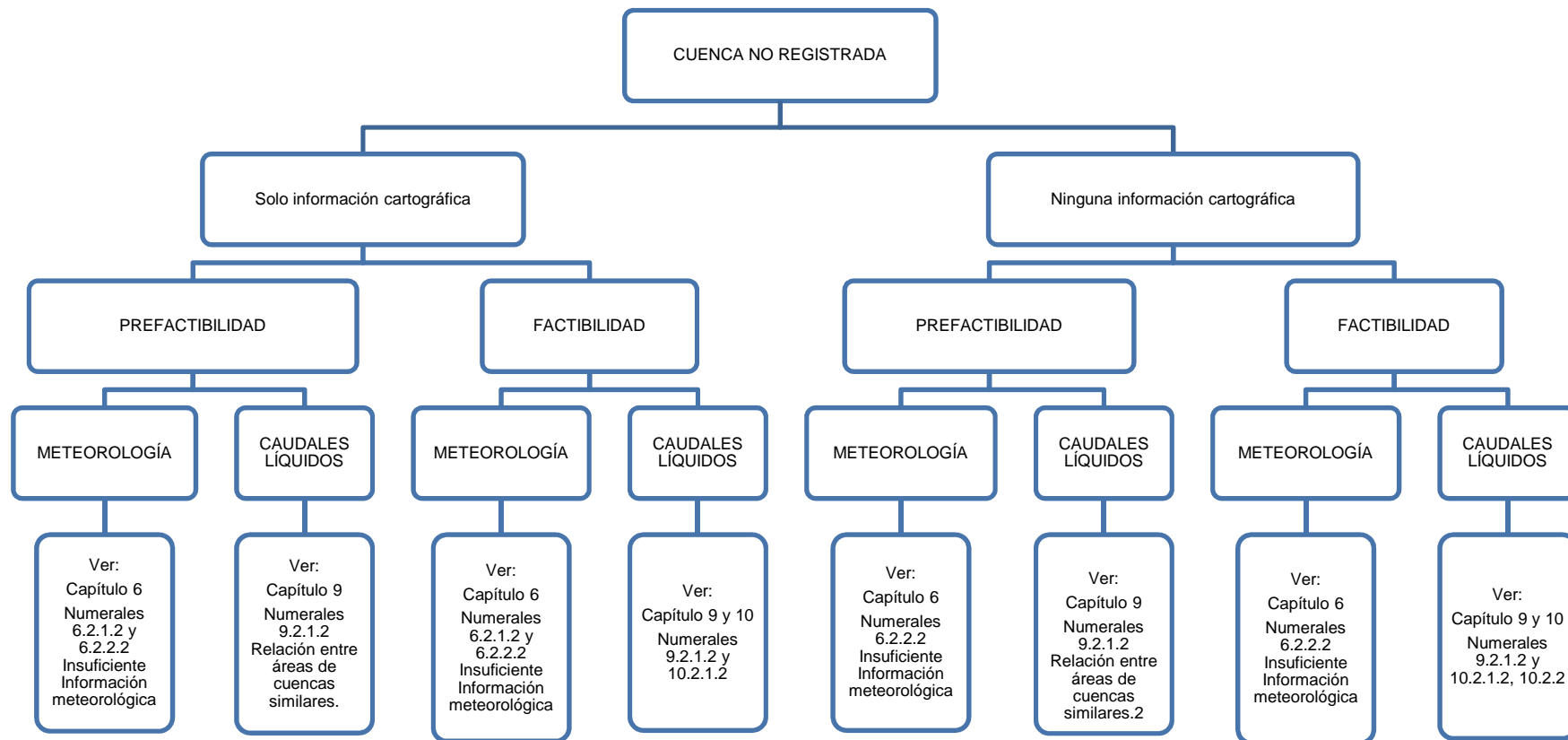
**FIGURA 3.7 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Caudales líquidos)**



**FIGURA 3.8 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Calidad del agua)**



**FIGURA 3.9 Diagrama de identificación de la metodología de cálculo según el nivel de información (Cuenca no registrada)**

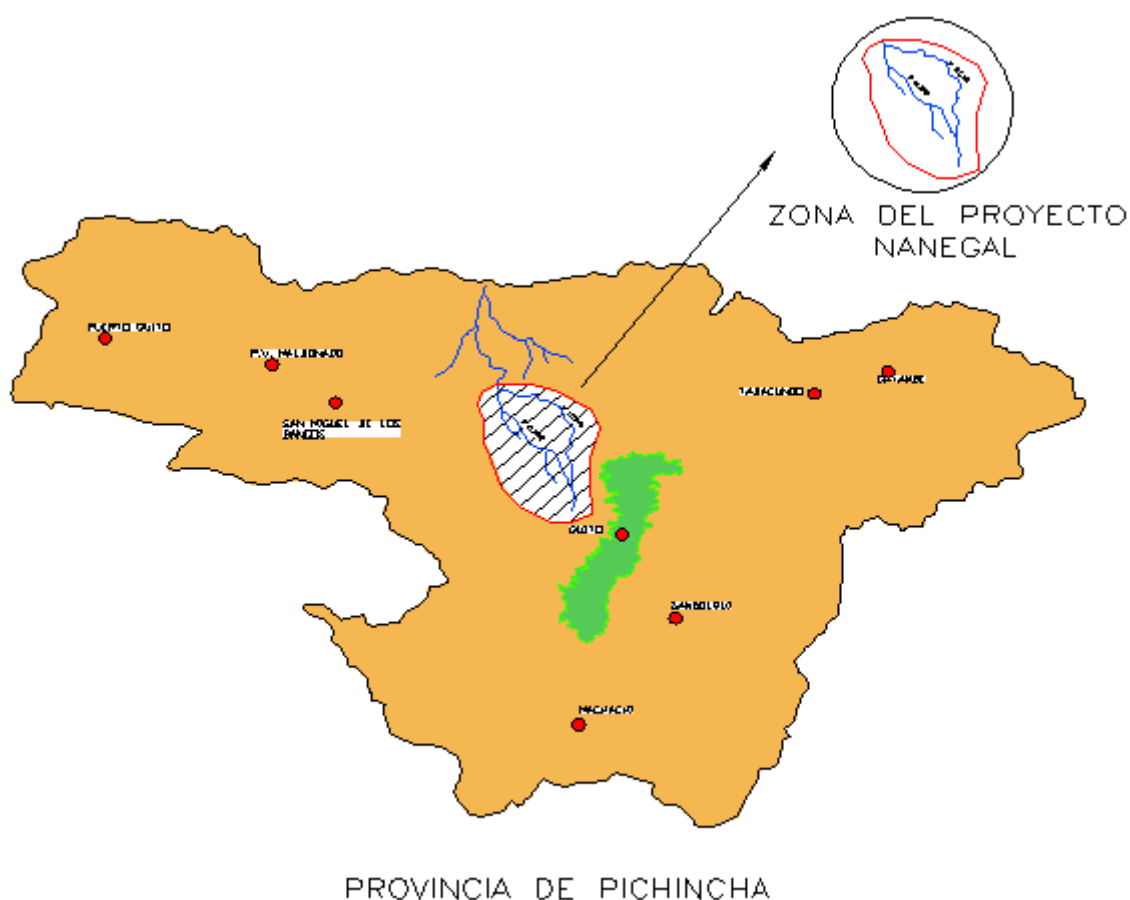




### 3.5 EJEMPLO

Se propone realizar un estudio hidrológico y climatológico para una hidroeléctrica que se desea construir en la cuenca del río Alambi, el cual se encuentra ubicado en la provincia de Pichincha, en la parte noroccidental; por tanto se quiere conocer cuál es la información de la que se dispone y cuáles son los procedimientos a seguir en función de los datos encontrados.

**FIGURA 3.10 Ubicación de la cuenca en estudio**



FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

En base a la ubicación se procede a identificar cual es la información que se dispone para el estudio hidrológico y climatológico, suponiendo un nivel de estudio de diseño definitivo.

El primer paso según el instructivo en mención, consiste en rellenar el Formulario N° 1. (Revisar en el Anexo N° 2, el Formulario N° 1 con la información del ejemplo)

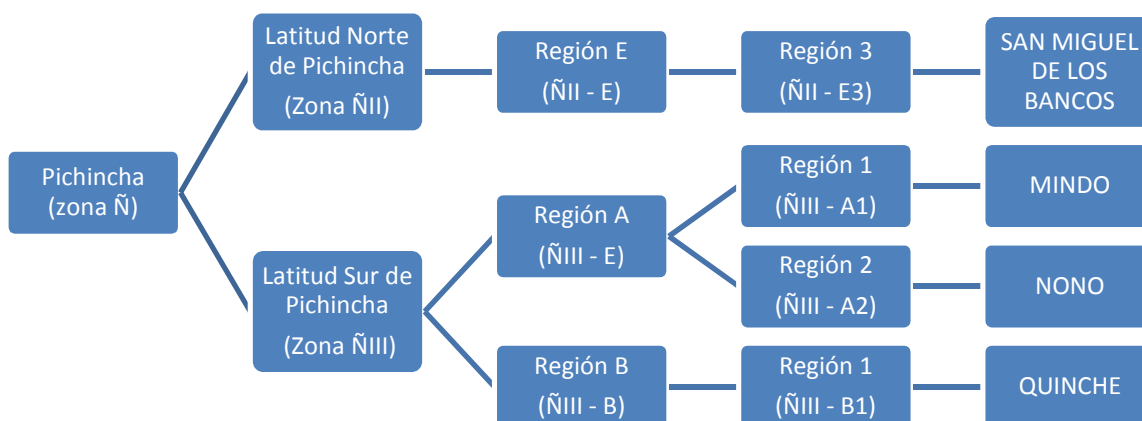
Esta información fue posible obtenerla de los anuarios hidrológicos y meteorológicos, y en algunos estudios mencionados anteriormente, además, archivos \*.shp resultaron de gran utilidad al momento de ubicar las estaciones cercanas al proyecto, tanto meteorológicas como hidrológicas.

### 3.5.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

Para la definición del mapa base de la cuenca se utilizarán las siguientes cartas topográficas del IGM, de escala 1:50000: Calacalí, Nono, El Quinche y San Miguel de los Bancos.

La numeración de las mismas, partiendo del procedimiento detallado en el numeral 3.4.4 de este instructivo, y siguiendo la longitud del río Alambi, son:

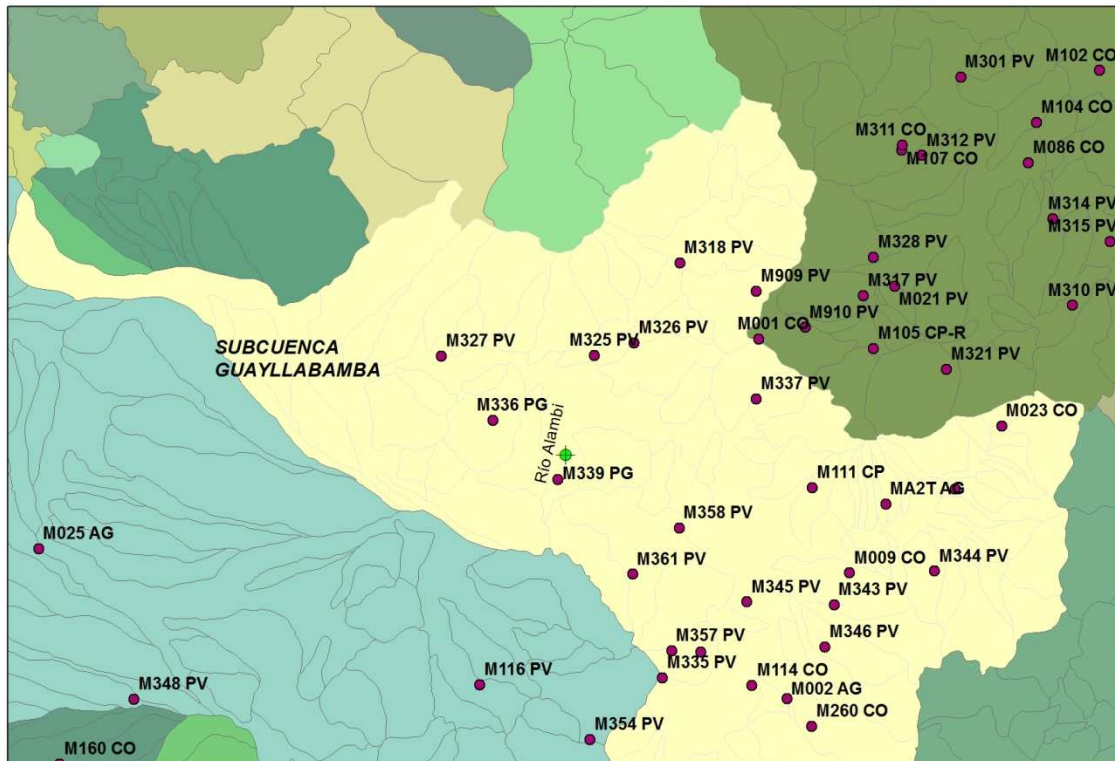
**FIGURA 3.11 Diagrama de flujo para la ubicación de las distintas cartas topográficas a ser utilizadas**



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### 3.5.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

**FIGURA 3.12** Ubicación de las estaciones meteorológicas alrededor del centroide de la cuenca en estudio



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Se hizo acopio de información climática de las estaciones localizadas tanto al interior de la cuenca como en sitios cercanos por medio de la cartografía temática digital (Figura 3.11) y revisión de Anuarios. Las variables consideradas fueron:

- Precipitación mensual acumulada;
- Precipitación máxima en 24 horas, mensual;
- Temperatura media mensual del aire;
- Temperatura máxima absoluta mensual; y,
- Temperatura mínima absoluta mensual;

Las estaciones consideradas se detallan en las Tabla 3.1 y 3.2.

**TABLA 3.1 Estaciones climatológicas principales**

COD.	ESTACION	TIPO	LATITUD				LONGITUD				ELEVACION (m)
			(°)	(')	(")		(°)	(')	(")		
M212	MINDO INECEL	CP	0	2	52	S	78	44	8	W	1235
M213	LA PERLA	CP	0	11	34	N	78	40	10	W	1410
M046	PACHIJAL MASHPI	CP	0	11	22	N	78	57	0	W	560

FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

**TABLA 3.2 Estaciones pluviométricas y pluviográficas**

COD.	ESTACION	TIPO	LATITUD				LONGITUD				ELEVACION (m)
			(°)	(')	(")		(°)	(')	(")		
M339	NANEGALITO	PG	0	3	41	N	78	40	44	W	1615
M361	NONO	PV	0	4	43	S	78	34	19	W	2842
M340	MINDO INAMHI	PV	0	3	1	S	78	46	20	W	1290
M326	SELVA ALEGRE-IMBABURA	PV	0	15	2	N	78	34	24	W	1600
M721	MESA MIRAVALLE(DEL CHONTAL)	PG	0	13	28	N	78	43	52	W	960
M524	CHONTAL ALTO	PG	0	16	0	N	78	45	0	W	1300
M318	APUELA-INTAG	PV	0	1	29	N	78	30	41	W	1590
M358	CALACALI INAMHI	PV	0	0	11	N	78	30	43	W	2843
M327	CHONTAL BAJO(GUAYLL.DJ ALAMBI)	PV	0	14	1	N	78	44	44	W	596

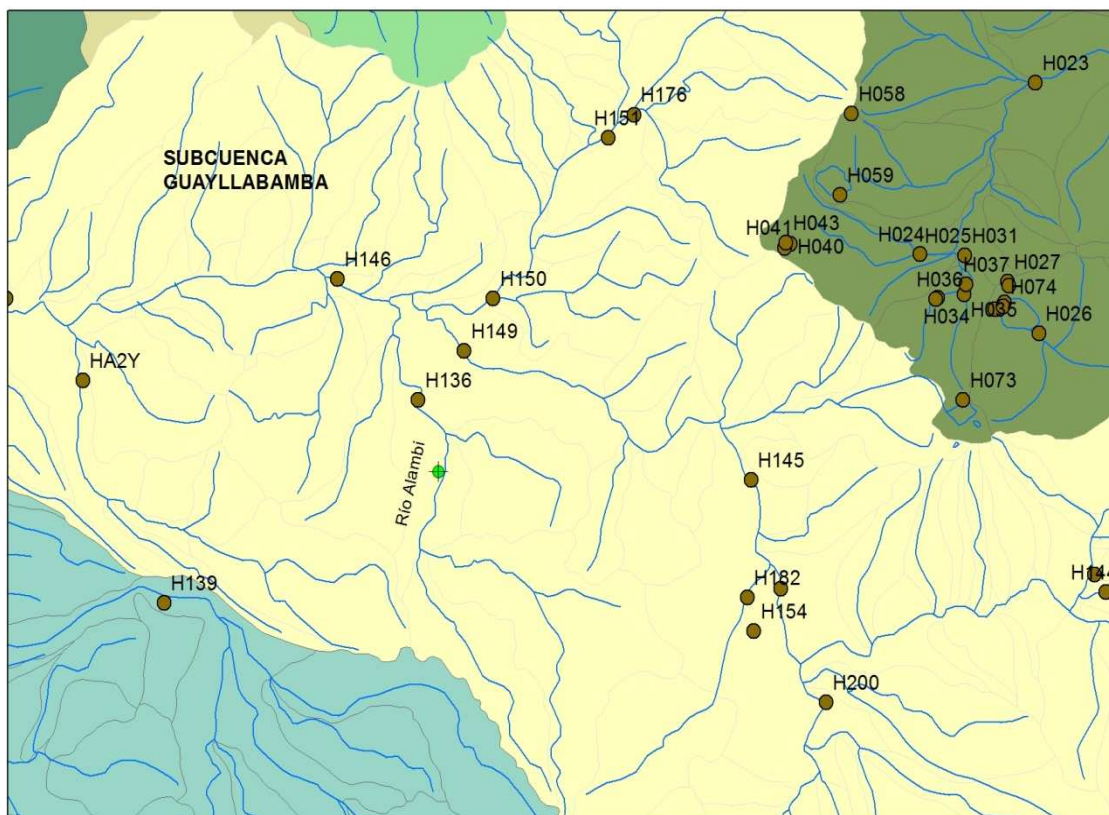
FUENTE: INAMHI, 2005

La disponibilidad de datos de cada estación, e incluso de cada variable, es diferente, y basados en esto, se propone el periodo 1972 – 2006, para el análisis del clima.

### 3.5.3 INFORMACION HIDROMETRICA

Igual procedimiento se realizó con las estaciones hidrológicas, y se identificaron las que se encuentran dentro de la cuenca, y las cercanas ubicadas en cuencas con similares características respecto a su condición hidrológica.

**FIGURA 3.13** Ubicación de las estaciones meteorológicas alrededor del centroide de la cuenca en estudio



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

La información hidrométrica considerada es:

- Niveles medios diarios;
- Niveles máximos y mínimos instantáneos;
- Ecuaciones de las curvas de descarga;
- Caudales medios diarios; y,
- Datos de aforos sólidos.

La información de las estaciones hidrométrica tomadas en cuenta para la caracterización hidrológica consta en la siguiente tabla.

**TABLA 3.3 Estaciones hidrométricas**

COD.	ESTACION	TIPO	LATITUD				LONGITUD				ELEVACION (m)
			(°)	(')	(")		(°)	(')	(")		
H136	ALAMBI EN CHURUPAMBA	LG	0	9	0	N	78	40	50	W	920
H150	INTAG DJ PAMPLONA	LG	0	13	20	N	78	37	25	W	1000

FUENTE: INAMHI, 2005

Luego de revisada la información de niveles, caudales, aforos y curvas de descarga, y considerando la disponibilidad de datos, se establece el período de análisis: 1965-1998.

#### 3.5.4 INFORMACIÓN ACERCA DE CALIDAD DEL AGUA

En los anuarios hidrológicos de los últimos años, se incluyen los resultados de los análisis físico - químicos del agua; sin embargo para las estaciones en mención, no ha sido posible recabar información de esta fuente. Los análisis de calidad de agua deben basarse en muestras tomadas del río para este estudio propiamente.

#### 3.5.5 USO DE LAS FIGURAS 3.1, 3.6, 3.7, 3.8 Y 3.9.

Con los datos disponibles, y mediante la Figura 3.1 se continúa en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8, ya que se trata de una cuenca registrada que posee datos al interior de la misma y en cuencas vecinas.

La Figura 3.6 correspondiente a Meteorología, al ser una cuenca en la que existe información de este tipo, con suficiente cantidad de información, lleva a revisar el Capítulo 6 (Caracterización del clima de las cuencas), numeral 6.3 para poder procesar la información.

La Figura 3.7 de Caudales líquidos, se indica primero a los caudales medios y mínimos, para lo cual existe información con registros apropiados, e indica

revisar el Capítulo 8 (Validación de información y relleno de datos faltantes) para luego ser procesada como se indica en el Capítulo 9 (Caudales medios y mínimos). De igual manera, respecto a caudales máximos, y teniendo las mismas características en información se indica revisar el capítulo 10, numeral 10.2.11 para procesar estos datos.

La Figura 3.8 de Calidad del Agua, se indica que al no poseer información de estudios anteriores en el río y al no existir análisis físico – químicos realizados en las estaciones hidrométricas del INAMHI, es necesario realizar un muestreo en el sitio de la obra.

## **CAPÍTULO 4**

# **CARACTERIZACIÓN FÍSICO – GEOGRÁFICA DE LAS CUENCAS DE DRENAJE**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Es reconocida la influencia directa que tiene la geomorfología y la localización geográfica en el clima y en el movimiento en la superficie terrestre. Esta interacción tiene gran complejidad ya que son múltiples los factores que inciden en el escurrimiento superficial, afectando la entrada, acumulación y salida del agua en la cuenca.

El estudio sistemático de los parámetros físicos y geográficos de las cuencas es de gran utilidad práctica en la Hidrología, pues con base en ellos se puede lograr la transferencia de información de un sitio a otro con escasa información.

Este instructivo presenta la metodología para el cálculo de los principales factores para caracterizar a la cuenca y al cauce principal.

### **4.2 METODOLOGÍA**

#### **4.2.1 SISTEMA DE REFERENCIA**

Generalmente en hidrología, se trabaja con cartas topográficas, mapas y fotografías aéreas, y más recientemente con los modelos digitales de terreno para la estimación de los parámetros fisiográficos; muy pocas veces se realizan



mediciones directas del terreno. Como se mencionó en el capítulo III, esta información está disponible en el Instituto Geográfico Militar (IGM).

#### **4.2.2 MEDICIONES SUPERFICIALES**

##### **Delimitación de la Cuenca**

La cuenca está definida como la región que recibe las precipitaciones y que, después de los procesos hidrológicos resultantes en pérdidas y retardos, conduce al punto de salida (OMM, 1994).

La línea divisoria (límite) de las aguas de la cuenca es un límite físico y cualquier precipitación dentro de ésta se dirige hacia la salida de esta cuenca, mientras que cualquier precipitación al exterior de este límite drena a una cuenca y salida diferentes. En algunos casos, el límite de la cuenca no se puede determinar con facilidad, por ejemplo cuando la cabecera de la corriente principal está formada en un valle muy plano o en un pantano.

La cuenca es usualmente definida usando cartas topográficas y fotografías aéreas.

##### **Línea divisoria de aguas**

Comprende los límites determinados en el numeral anterior.

Para su determinación se utilizan curvígrafos o programas que permitan suplir este instrumento como Autocad y software similares, con los cuales se trabaja mediante la digitalización de las cartas topográficas o fotografías aéreas y el uso de las herramientas que los sistemas de información geográfica presentan.

##### **Área de drenaje**

El área de drenaje, es el área plana (proyección horizontal) de la cuenca.

Para este fin el método más utilizado ha sido la planimetría, sin embargo, como se mencionó en la metodología para determinar el perímetro de la cuenca, los software especializados están sustituyendo este método.

### **Forma de la cuenca**

Es muy importante, ya que se relaciona directamente con el tiempo de concentración en la cuenca

Para definir característica se utilizan:

- ***Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad (Kc)***

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo equivalente al área de la cuenca. Se define por la ecuación:

$$K_C = 0,282 * P * A^{1/2} \quad (4.1)$$

En donde:

Kc = coeficiente de compacidad;

P = perímetro de la cuenca, (km); y,

A = área de drenaje de la cuenca, (km<sup>2</sup>).

Con este índice se obtiene como conclusiones:

- Mientras más irregular es una cuenca, esta presenta un mayor Kc
- Una cuenca circular, posee un Kc mínimo, igual a 1

- **Factor de forma (Kf)**

Es la relación que existe entre el ancho medio, y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial hace referencia a la distancia existente entre la cabecera y desembocadura del curso más largo de agua.

El ancho medio, se obtiene dividiendo el área de la cuenca, para la longitud axial de la misma.

$$Kf = B/L \quad (4.2)$$

En donde:

B = ancho medio de la cuenca, (km); y,

L = longitud axial de la cuenca (km).

Como se tiene que  $B = A/L$ , la ecuación se resume en:

$$Kf = A/L^2 \quad (4.3)$$

En donde:

A = área de la cuenca, (km<sup>2</sup>).

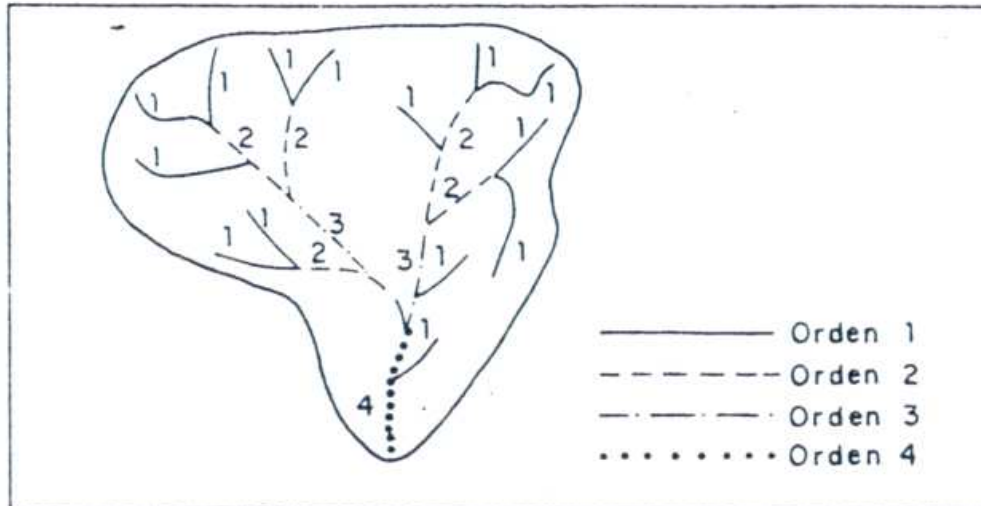
### **Orden de la cuenca**

El orden de las corrientes de agua, hace alusión al grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca. (Ver Figura 4.1)

- **Corrientes de primer orden:** Pequeños canales sin tributarios
- **Corrientes de segundo orden:** Corresponde a la unión de dos corrientes de primer orden

- **Corrientes de orden  $n+1$ :** cuando dos corrientes de orden  $n$  se unen.

**FIGURA 4.1 Orden de la cuenca**



FUENTE: Monsalve, G.

Para ubicar dentro de la cuenca el orden que tiene, se procede a observar las corrientes de agua desde las periféricas hasta las que constituyan el cauce principal en si. El orden de la cuenca será el orden más alto que llegue a identificarse hasta llegar al cauce principal.

### **Densidad de drenaje**

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca con su área total (Ver Figura 4.2)

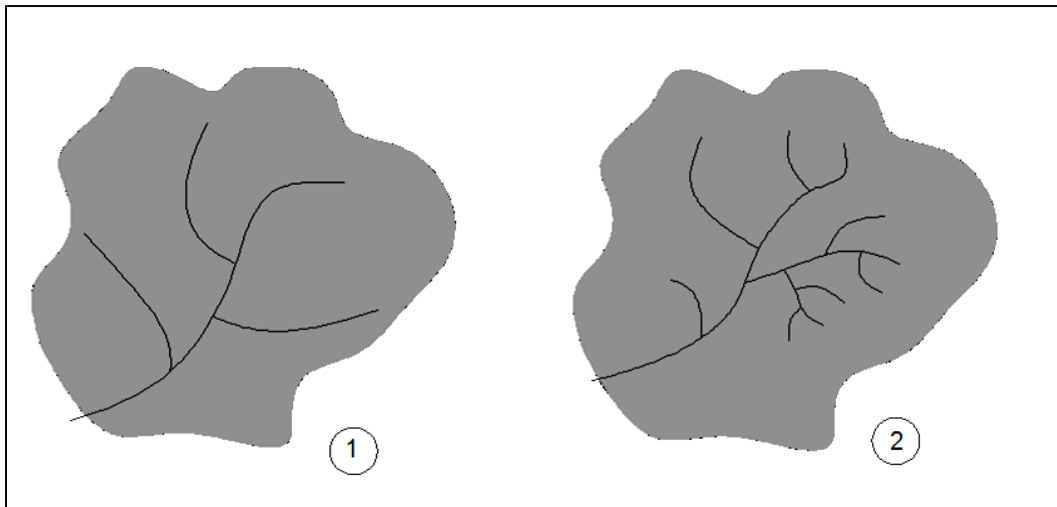
Este parámetro se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$D_d = L/A \quad (4.4)$$

En donde,

L = longitud total de las corrientes de agua, (km); y,

A = área total de la cuenca, (km<sup>2</sup>)

**FIGURA 4.2 Densidad de drenaje**

1.- Baja densidad de drenaje 2.- Alta densidad de drenaje

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Dd usualmente toma valores entre  $0,5 \text{ km/km}^2$  para cuencas con drenaje pobre hasta  $3,5 \text{ km/km}^2$  para cuencas con muy buen drenaje. (Monsalve, 1995)

### **Sinuosidad de las corrientes de agua**

Es la relación que existe entre la longitud del río principal medida a lo largo de su cauce,  $L$ , y la longitud del valle del río principal medida en línea curva o recta,  $L_t$ .

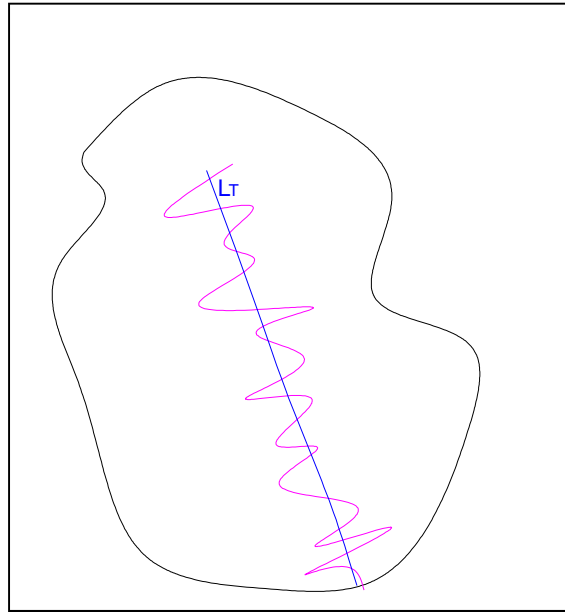
$$S = \frac{L}{L_t} \quad (4.5)$$

En donde:

$L$  = largo del cauce principal, (km); y,

$L_t$  = longitud del río principal medido en línea recta, (km).

**FIGURA 4.3 Sinuosidad de las corrientes**



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Este parámetro es útil para determinar la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente.

Un valor de  $S$  menos o igual a 1,25 indica una baja sinuosidad y se define entonces, como un río con alineamiento “recto” (Monsalve, 1995).

## **CARACTERÍSTICAS DEL RELIEVE DE LA CUENCA**

### **Pendiente de la cuenca**

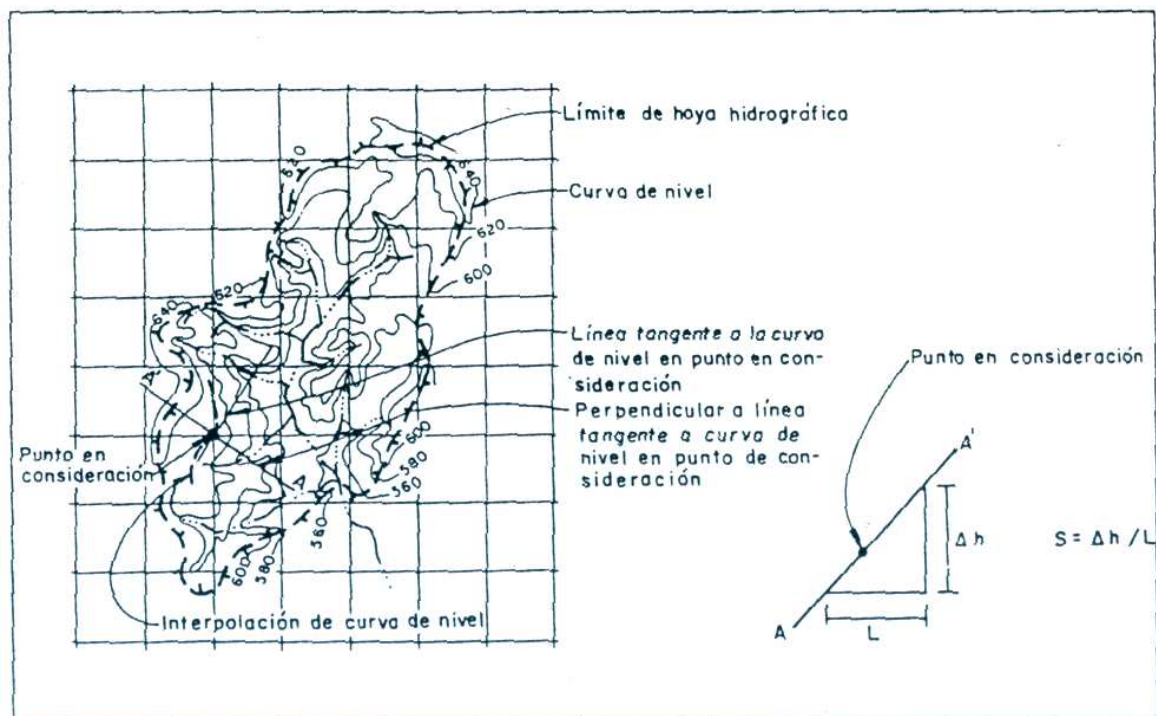
Esta característica controla en gran medida la velocidad con la que se da la escorrentía superficial, y afecta por ende, el tiempo que tarda el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las cuencas. (Monsalve, 1995)

- ***Método de las tangentes***

Se considera uno de los métodos más completos. Consiste en determinar la distribución porcentual de las pendientes de los terrenos por medio de una muestra estadística de las pendientes normales a las curvas de nivel.

Se recomienda tomar una muestra al menos de 40 puntos. (Ver Figura 4.4).

**FIGURA 4.4** Pendiente de la cuenca hidrográfica. Método de las tangentes.



FUENTE: Monsalve, G.

La fórmula que debe aplicarse para esto es:

$$(4.6)$$

En donde:

Scuencia<sub>i</sub> = pendiente para cada uno de los puntos en consideración

n = número de puntos considerados.

### Curva hipsométrica

Constituye una síntesis del relieve representado por las curvas de nivel, y ponderar los elementos de superficie correspondientes a los diferentes intervalos de altitud mediante una función no lineal de la pendiente media en cada intervalo.

#### **Tabla de apoyo al cálculo de la curva hipsométrica:**

Para facilitar la construcción de la curva, es necesaria la elaboración de una tabla con los siguientes parámetros (Tabla 4.1):

- **Columna 1:** Cotas, intervalo de clase, (msnm). Esta columna se llena, poniendo en cada casillero las cotas correspondientes a las curvas de nivel que atraviesan a la cuenca en estudio, desde la mayor a la menor
- **Columna 2:** Cota media del intervalo, (msnm). Corresponde a la media entre dos cotas
- **Columna 3:** Área, (km<sup>2</sup>). Mediante los métodos anteriormente descritos para hallar el área de la cuenca, se pueden determinar las áreas existentes entre curvas de nivel, con lo cual se obtiene el área parcial.
- **Columna 4:** Área acumulada, (km<sup>2</sup>). Corresponde a la suma de las áreas parciales conforme se desciende en altitud.
- **Columna 5:** Porcentaje de área, (%). Representa el porcentaje del área total, que ocupa el área parcial.
- **Columna 6:** Porcentaje acumulado de área, (%). Es la suma del porcentaje de las áreas parciales conforme se desciende en altitud.
- **Columna 7:** Cota \* área parcial. (*columna 2 \* columna 3*)



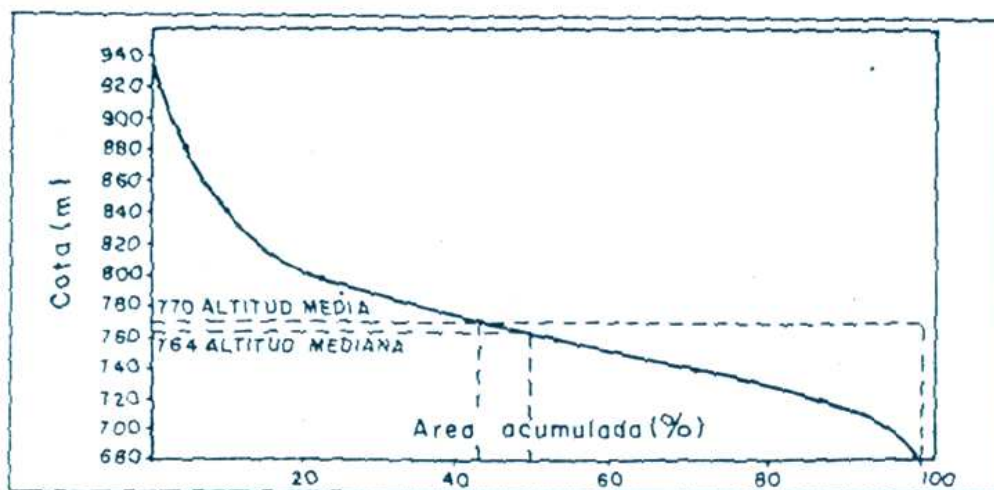
**TABLA 4.1** Tabla de apoyo para la construcción de la curva hipsométrica

COTAS (msnm)	COTA MEDIA (msnm)	AREA (km <sup>2</sup> )	AREA ACUMULADA	% DE ÁREA	% DE ÁREA ACUMULADA	COTA*AREA PARCIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<b>TOTAL</b>						

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### Gráfico de la Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica relaciona la cota en m, (eje y), con el área acumulada ya sea en porcentaje o km<sup>2</sup> (eje x), tal como se muestra en la Figura 4.5.

**FIGURA 4.5** Curva hipsométrica de una cuenca hidrográfica

FUENTE: Monsalve, G.

Se grafican los valores menores de cada intervalo de cotas, con excepción de los valores máximos y mínimos de cota hallados, contra su correspondiente área acumulada.

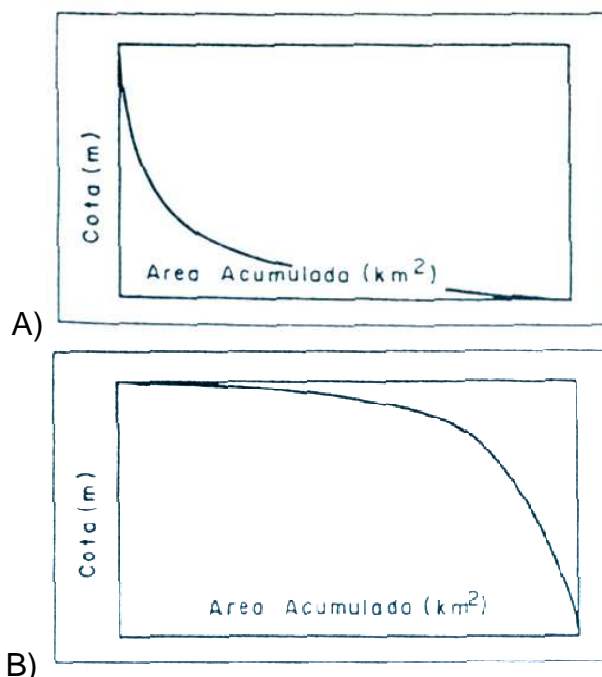
Al valor de la cota mayor encontrada le corresponde el cero por ciento del porcentaje de área acumulada. Al valor de la cota mínima encontrada le corresponde el ciento por ciento del porcentaje de área acumulada.

La curva hipsométrica por tanto, representa el porcentaje de área acumulado igualado o excedido para una cota determinada (Monsalve, 1995)

Estas curvas sirven también para definir características fisiográficas de las cuencas hidrográficas.

En la Figura 4.6, A) se tiene una cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas, mientras que en B) es posible observar una cuenca con valles profundos y altiplano.

**FIGURA 4.6 Ejemplos de curvas hipsométricas**



FUENTE: Monsalve, G.

### **Cota media de la Cuenca**

Este parámetro se considera importante por la influencia que tiene sobre la precipitación, sobre las pérdidas de agua por evaporación y transpiración y, consecuentemente, sobre el caudal medio (Monsalve, 1995)

Para hallarlo, se aplica la fórmula:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Cota media intervalo } i * \text{Área } i)}{\sum_{i=1}^n (\text{Área } i)} \quad (4.7)$$

En donde:

n = número de intervalos de clase.

En la Tabla 4.1, utilizada como apoyo para obtener la curva hipsométrica, se tienen ya estos valores por lo cual la aplicación de la fórmula se simplifica.

### **Pendiente de la corriente principal**

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua depende de la pendiente de sus canales fluviales (Monsalve, 1995). Cuando la pendiente es más pronunciada la velocidad es mayor.

Este índice proporciona una idea sobre el tiempo de recorrido del agua a lo largo del perfil longitudinal del río.

Debido a que el tiempo de recorrido varía en toda la extensión del curso de agua, es necesario dividir a la corriente en varios trechos rectilíneos. Se

recomienda un mínimo de 8 tramos que sean representativos de acuerdo al cambio de pendiente que la corriente presente.

Para el cálculo de la pendiente, será necesaria la construcción de una tabla de apoyo (Tabla 4.2) que permita realizar los cálculos necesarios en cada uno de los tramos.

#### **Tabla de apoyo al cálculo de la pendiente de la corriente principal**

- **Columna 1:** Cotas intervalo de clase, (msnm). En esta columna se encuentran las cotas entre las cuales se ubica cada uno de los tramos del río.
- **Columna 2:** Diferencia de cotas, (m). La diferencia entre la cota mayor menos la cota menor, será el resultado que debe calcularse en esta columna.
- **Columna 3:** Distancia horizontal entre cotas  $l_i^*$ , (m). Corresponde a la distancia existente entre las curvas de nivel en consideración (cotas), presentada en la carta topográfica. Para obtener este dato será necesario medirlo directamente en la carta a través de los métodos descritos con anterioridad, como Autocad, o curvímetro.
- **Columna 4:** Distancia inclinada entre cotas  $l_i^{**}$ , (m). Una vez que se tiene la distancia vertical entre los límites de un tramo (Columna 2) y la distancia horizontal entre los mismo (Columna 3), mediante el teorema de Pitágoras es posible hallar la distancia inclinada entre estos puntos.
- **Columna 5:** Distancia inclinada acumulada, (m). Corresponde a la suma de las distancias inclinadas que se vayan sumando hasta el punto en consideración.

- **Columna 6:** Pendiente por segmento  $S_i$ . Se obtiene dividiendo la distancia vertical (Columna 2) para la distancia horizontal (Columna 3)
- **Columna 7:**  $S_i^{(1/2)}$ . A los valores de la Columna 6, se eleva a (1/2), es decir, se saca la raíz cuadrada de cada uno de ellos.
- **Columna 8:**  $l_i^{**}/(S_i^{(1/2)})$ . Se procede a dividir la (Columna 4) para la (Columna 7)

Cuando todos estos valores se encuentran disponibles en la tabla, se saca la sumatoria de la Columna 3, Columna 4 y Columna 8.

**TABLA 4.2** Tabla de apoyo para el cálculo de la pendiente de la corriente

Cotas intervalo de clase (msnm)	Diferencia de cotas (m)	Distancia horizontal entre cotas $l_i^*$ (m)	Distancia inclinada entre cotas $l_i^{**}$ (m)	Distancia inclinada acumulada (m)	Pendiente por segmento $S_i$	$S_i^{1/2}$	$l_i^{**}/(S_i^{1/2})$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
TOTAL	-			-	-	-	

FUENTE: Monsalve, G

Para sacar la pendiente, que se denominará  $S_{CAUCE}$ , se aplica la siguiente fórmula:

$$S_{CAUCE} = \left( \frac{\sum l_i^{**}}{\sum \left( l_i^{**} / S_i^{1/2} \right)} \right)^2 \quad (4.8)$$

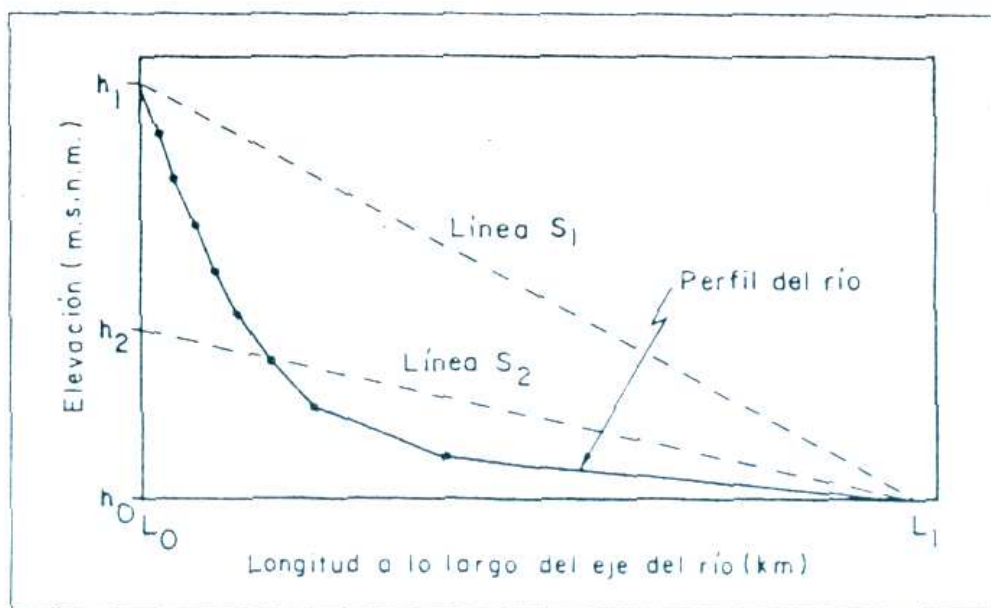
En donde:

$l_i^{**}$  = distancia inclinada entre cotas

$S_i$  = pendiente por segmento

El gráfico resultante será Elevación vs. Longitud a lo largo del eje del río, similar al perfil del río que se puede observar en la Figura 4.7 donde también se suele poner una línea que represente la elevación media de la cuenca (Línea  $S_2$ ), la misma que representa el corte y relleno del perfil de la cuenca.

**FIGURA 4.7 Pendiente de la corriente principal**



FUENTE: Monsalve, G.

#### 4.2.2.1 Suelos

Los suelos tienen influencia directa en el fenómeno de la escorrentía. Es importante por ello definir su clasificación y el uso que se le dé.

Respecto a este análisis lo que se pretende es proveer una visión general acerca del suelo de la cuenca, es decir, el tipo de suelo y uso del suelo. Muchas veces resulta importante también la granulometría.

La información acerca de tipo y uso del suelo está disponible en la cartografía temática del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP); en el Instituto Nacional de Riego (INAR), en el Ministerio de Medio

Ambiente (MAE), entre otras instituciones públicas que dispongan de estos datos. En el CD del Anexo N°7, se pueden encontrar estos mapas disponibles en formato \*.shp.

Las inspecciones de campo y fotografías aéreas resultan también de utilidad, actualmente mediante *Google Earth*, software de libre acceso a través de internet, se puede analizar la naturaleza de la superficie dentro del área de drenaje.

### **Grupos Hidrológicos de Suelos**

Para sistematizar las características de los suelos después de la recopilación de la información general de las unidades de suelos distribuidas en las cuencas o zonas de estudio, la textura de los suelos debe ser verificada en base a los mapas originales de suelos, definiendo con mayor precisión este parámetro que se relaciona estrechamente con la tasa de infiltración. (Ven Te Chow, 1987)

El Grupo Hidrológico de Suelos (GHS) es uno de los parámetros requeridos para la determinación de los picos de escorrentía, mediante el método propuesto en el Engineering Field Manual del Soil Conservation Service (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), 1971, Capítulo 2, Estimación de la Escorrentía (Estimating Runoff).

El Potencial de escorrentía de los GHS está en función de la distribución espacial en las subcuencas hidrográficas como unidades de análisis de factores como la textura, de la tasa de infiltración de los suelos, de la profundidad efectiva, del drenaje de los suelos y del movimiento del agua en el suelo. Así:

$$PE = f (I, T, S, D, Nf, M)$$

En donde:

PE = Potencial de escurrimiento

T = Textura del suelo

I = Infiltración del agua en el suelo

Pe = Profundidad efectiva del suelo

D = Drenaje del suelo

Nf = Presencia de napa freática

M = Movimiento del agua en el suelo

En una primera aproximación el GHS se asigna al suelo un código alfanumérico, según los Rangos de Características de los Grupos Hidrológicos de suelos que se presenta a continuación.

La primera aproximación de GHS es confrontada con la proveniente del análisis de las unidades de suelos respecto a la profundidad efectiva de los suelos, confirmando o modificando el primer resultado.

Siendo el procedimiento propuesto del SCS un sistema condicional de menos a más, así, a las características de los suelos del Grupo A les corresponde el más bajo potencial de escurrimiento y al Grupo D el alto potencial de escurrimiento. Así, por ejemplo: si (condicional) un suelo es clasificado como del grupo A por sus características de textura – infiltración, pero si el mismo es un suelo superficial del tipo C, el potencial de escurrimiento está dado por el último. Finalmente, el GHS ponderado de las subcuencas, o zonas de estudio se define sobre la base de la tasa de infiltración de los suelos en estos lugares



**TABLA 4.3 Rangos de las características de los grupos hidrológicos de suelos**

GRUPO	CLASE TEXTURAL	TASA DE INFILTRACIÓN (mm/hora)	PROF. EFECTIVA DEL SUELO cm / Denominación	DRENAJE DE LOS SUELOS	MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO	
<b>A</b>	Arenoso	12	160	Muy profundos	Muy Exc. drenados	Muy rápido
	Areno franco	11	145		Excesivamente drenados	
	Franco arenoso	10	130		Algo exc. drenados	Rápido
<b>B</b>	Franco	9	115	Profundos	Mod. bien drenados	Moderado
	Franco limoso	8	100	Moderadamente profundos	Bien drenados	Optimo
	Limoso	7	85			
<b>C</b>	Franco arcillo arenoso	6	70	Superficiales	Mod. bien drenados	Moderado
	Franco arcilloso	5	55		Imperfectamente drenados	Lento
	Franco arcillo limoso	4	40			
<b>D</b>	Arcillo arenoso	3	25	Muy superficiales	Escasamente drenados	Muy lento
	Arcillo limoso	2	10	Ext. superficiales		
	Arcilloso	1	0		Muy esc. drenados	

FUENTE: Engineering Field Manual (SCS, 1982).

### Descripción de las características de los grupos hidrológicos de suelos (SCS, 1982).

- **Grupo A: Suelos con bajo potencial de escorrentía**

Comprende suelos de texturas arenosas a franco arenosas. Son suelos profundos. Poseen tasas de infiltración cuando están muy húmedos de 10 a 12mm/hora, muy rápida. El drenaje natural de los suelos varía de muy excesivamente drenados a excesivamente drenados o algo excesivamente drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de muy rápida a rápida.

- **Grupo B: Suelos con moderado potencial de escorrentía**

Comprende suelos de texturas: franco, franco arenosas a limosas. Son suelos moderadamente profundos a profundos. Poseen una infiltración cuando están muy húmedos de 7 a 9mm/hora, rápida. El drenaje natural de estos suelos puede variar de algo excesivamente drenados a moderados ó bien drenados. La movilidad del agua en el suelo variar de rápida a moderadamente rápida u óptima.

- ***Grupo C: Suelos con moderadamente alto potencial de escorrentía***

Comprende suelos de texturas: franco arcillo arenoso, franco arcilloso y franco arcillo limoso. Son suelos superficiales a moderadamente profundos. Poseen una infiltración cuando están muy húmedos de 4 a 6mm/hora, moderada. El drenaje natural de estos suelos puede variar de bien drenados a moderadamente bien drenados e imperfectamente drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de óptima a moderadamente lenta o lenta.

- ***Grupo D: Suelos con alto potencial de escorrentía***

Comprende suelos de texturas: arcillo arenoso, arcillo limoso y arcillo. Son suelos extremadamente superficiales a superficiales. Poseen una infiltración cuando están muy húmedos de 4 a 6mm/hora, rápida. El drenaje natural de estos suelos puede variar de bien drenados, moderadamente bien drenados a bien drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de lenta a muy lenta.

### **4.3 EJEMPLO**

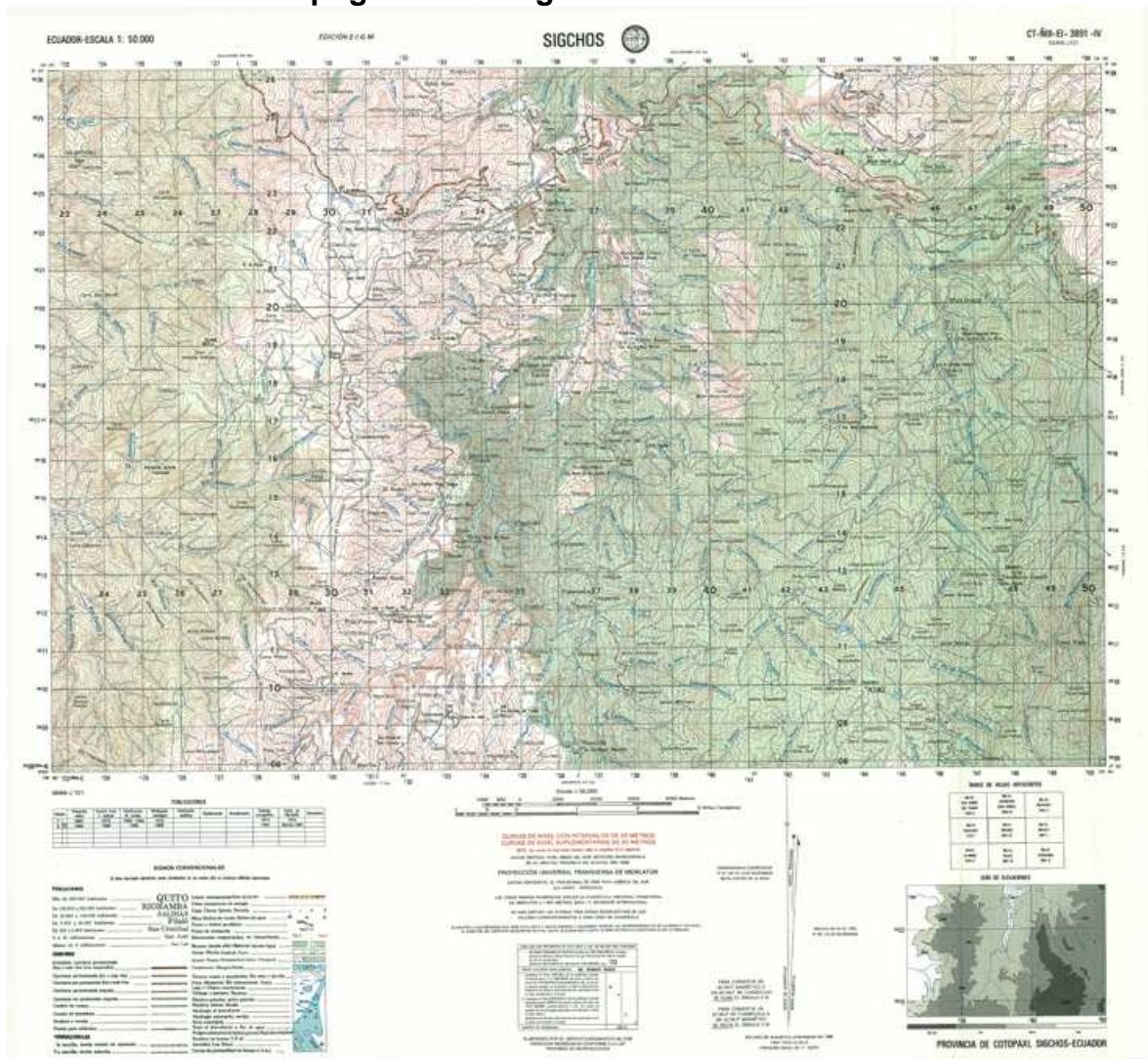
Para este punto, se ha escogido por efecto de disponibilidad de datos y metodologías, una cuenca ubicada en la Provincia de Cotopaxi, En la zona conocida como Sigchos, en esta se aplicarán cada uno de los procedimientos mencionados en este instructivo con el fin de caracterizar a la cuenca respecto a los aspectos físico – geográficos.

De la carta topográfica se pueden extraer las cotas de la cuenca, las distancias horizontales, la forma de los cauces para determinar el orden, el agrupamiento de los cauces dentro de la cuenca. El resto de datos se deben calcular.

La carta topográfica de Sigchos, tal como se la adquiere en el IGM, se presenta en la Figura 4.8, como se ha explicado anteriormente de esta es posible obtener datos como las cotas de la cuenca, las distancias horizontales, la forma de los cauces para determinar el orden, el agrupamiento de los cauces dentro de la cuenca.

Se trabajará con la cuenca hidrográfica del río Amanta.

**FIGURA 4.8 Carta topográfica de Sigchos**



FUENTE: IGM, 2010



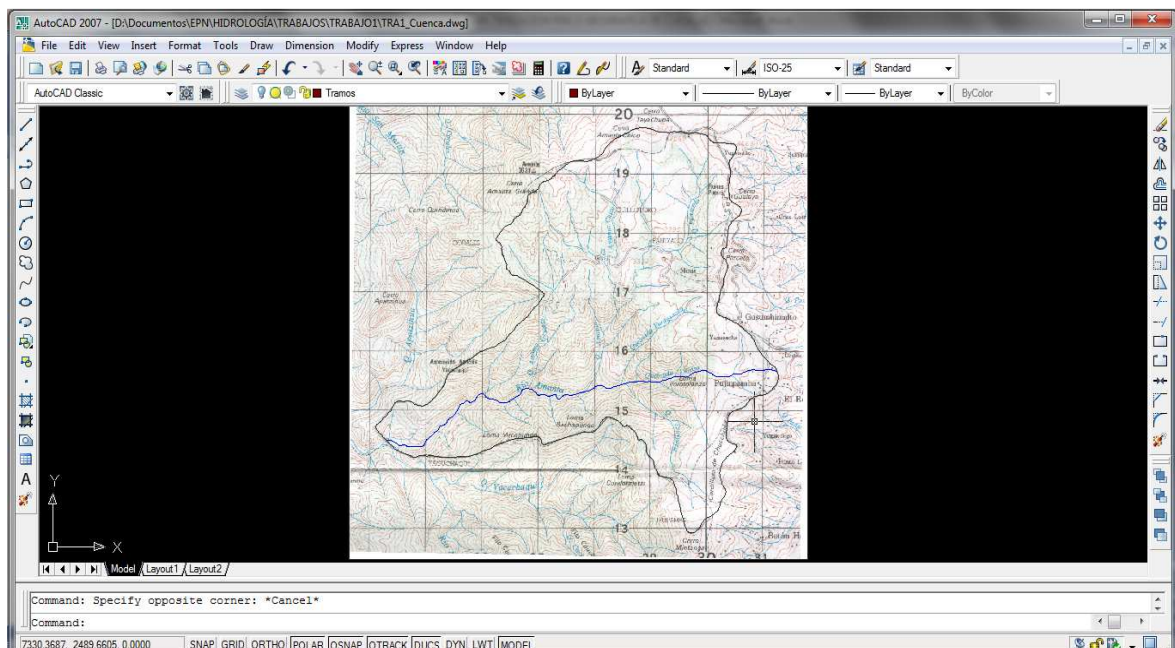


## Perfil de la corriente principal

Para hallar el perfil del cauce principal y sus demás características, se procedió a escanear la zona con la cual se trabajará, importar la imagen a AutoCad y reescalarla, de tal manera que cada uno de los cuadrados, tengan las mismas dimensiones tanto dentro del programa como en la carta topográfica.

Uno de los métodos para hallar dimensiones dentro de este programa consiste en repasar con polilíneas lo que se desea medir, en este caso el cauce principal (Figura 4.10)

**FIGURA 4.10** Demostración acerca del uso de las polilíneas de autocad para el cálculo de las características de la cuenca



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Entonces, midiendo esta línea, se determina que el cauce principal tiene una longitud de 7,76km. (Figura 4.11)

**FIGURA 4.11** Cauce principal de la cuenca del río Amanta

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### Área de drenaje

Es calculada midiendo el área dentro de los límites de la cuenca, igualmente aplicando la herramienta del programa para este fin. (Figura 4.12)

**FIGURA 4.12** Área de la cuenca del río Amanta

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### Forma de la cuenca

- **Coefficiente de compacidad ( $K_c$ )**

$$K_c = 0.28 \frac{P}{A^{1/2}}$$

$$K_c = 0.28 * \frac{26.48 \text{ km}}{(23.48 \text{ km}^2)^{1/2}} = 1.53$$

- **Factor de forma**

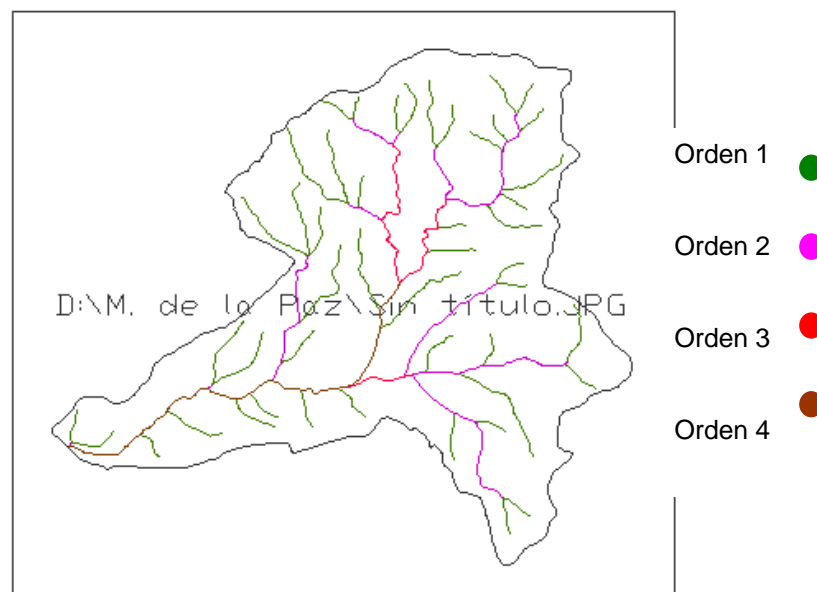
$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

$$K_f = \frac{23.48 \text{ km}^2}{(7.76 \text{ km})^2} = 0.39$$

### Orden de la cuenca

Para fines demostrativos, se han coloreado los distintos órdenes de los ríos dentro de la cuenca, de tal manera que esta cuenca es de orden 4, que es el nivel más alto determinado para los ríos del sitio. (Figura 4.13)

**FIGURA 4.13 Orden de la cuenca del río Amanta**



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### Densidad de drenaje

Al medir la longitud de las polilíneas trazadas sobre los ríos de la cuenca, se obtuvo que:

$$Dd = L_{CAUCES} / A$$

$$Dd = 57.94 \text{ km} / 23.48 \text{ km}^2 = 2.47 \text{ km/km}^2$$

Lo cual indica que existe muy buen drenaje dentro de la cuenca en estudio.

### Sinuosidad de la corriente

Se procedió a trazar una línea recta del cauce principal, se midió y se obtuvo la sinuosidad para esta cuenca, tal como se indica en la Figura 4.14

**FIGURA 4.14 Longitud real y longitud en línea recta del cauce principal**



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

$$S = L / L_T$$

$$S = 7.76 \text{ km} / 7.03 \text{ km} = 1.10$$



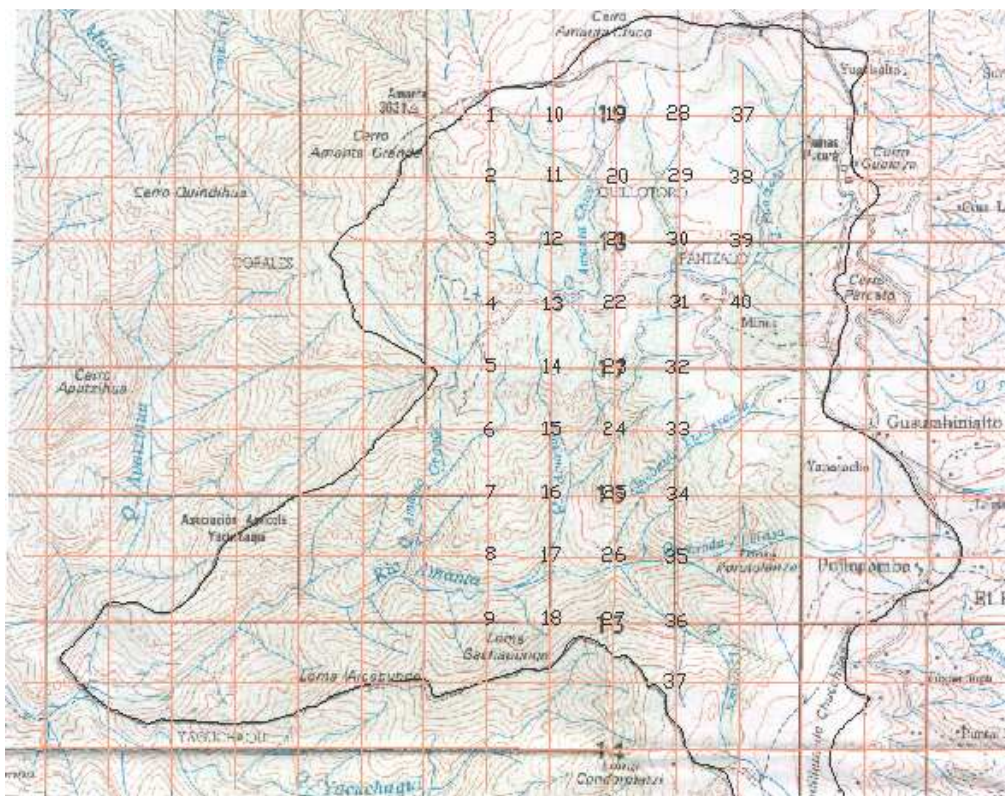
Por lo que se puede concluir que este cauce tiene un alineamiento recto.

### Pendiente de la cuenca

- **Método de las tangentes**

Se toman 40 puntos dentro de la cuenca (Figura 4.15), para esto se utilizan las curvas de nivel entre las cuales se encuentra el punto para así poder determinar la altura y distancia entre las mismas. Con estos datos fue posible determinar la pendiente. Esto se hace con los 40 puntos, y se aplica la fórmula 4.6. (Ver Tabla 4.4)

**FIGURA 4.15** Método de las tangentes aplicado para la cuenca en estudio



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

$$S_{CUENCA_i} = \tan \alpha = \frac{\Delta h}{l}$$

**TABLA 4.4** Tabla de apoyo para el cálculo de la pendiente media de la cuenca del río amanta.

PUNTO	Ah (m)	l (m)	TAN
1	40	84,45	0,47
2	40	133,15	0,30
3	40	166,04	0,24
4	40	95,49	0,41
5	40	180,39	0,22
6	40	73,93	0,54
7	40	73,60	0,54
8	40	57,40	0,70
9	40	43,59	0,92
10	40	283,71	0,14
11	40	231,10	0,17
12	40	289,88	0,13
13	40	82,72	0,48
14	40	307,37	0,13
15	40	53,22	0,75
16	40	73,81	0,54
17	40	78,61	0,50
18	40	62,10	0,64
19	40	104,86	0,38
20	40	142,46	0,28
21	40	294,73	0,13
22	40	234,21	0,17
23	40	93,88	0,42
24	40	28,65	1,39
25	80	123,63	0,64
26	40	45,96	0,87
27	40	59,39	0,67
28	40	407,71	0,09
29	40	454,57	0,08
30	40	225,47	0,17
31	40	243,83	0,16
32	40	256,21	0,15
33	40	218,04	0,18
34	40	48,58	0,82
35	40	47,93	0,83
36	40	53,11	0,75
37	40	172,69	0,23
38	40	347,71	0,11
39	40	605,59	0,06
40	40	166,54	0,24
<b>PROMEDIO</b>			0,41
<b>SUMA</b>			16,78

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

$$S_{CUENCA} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{CUENCA_i}}{n} = \frac{16.78}{40} = 0.42$$

### 4.3.1 CURVA HIPSOMÉTRICA

Se seleccionaron 8 regiones determinadas por cambios significativos en la pendiente dentro de la cuenca.

Para la construcción de esta curva, se aplicó la tabla 4.1, la misma que servirá también para el cálculo de la cota media de la cuenca. Los cálculos se reportan en la Tabla 4.5

**TABLA 4.5** Tabla de apoyo para la construcción de la curva hipsométrica de la cuenca del río amanta.

COTAS (msnm)	COTA MEDIA (msnm)	AREA (km2)	AREA ACUMULADA	% DE ÁREA	% DE ÁREA ACUMULADA	COTA*AREA PARCIAL
3635	3517,5	8,886	8,886	37,84	37,84	31256,505
3400	3300	5,85	14,736	24,91	62,76	19305
3200	3100	1,869	16,605	7,96	70,72	5793,9
3000	2900	1,935	18,54	8,24	78,96	5611,5
2800	2700	1,714	20,254	7,30	86,26	4627,8
2600	2500	1,239	21,493	5,28	91,54	3097,5
2400	2300	1,027	22,52	4,37	95,91	2362,1
2200	2040	0,96	23,48	4,09	100,00	1958,4
<b>TOTAL</b>	–	23,48	–	–	–	74012,705

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Con esta tabla, se realiza un gráfico de dispersión, cota media vs. Área acumulada o porcentaje de área acumulada (Ver Figura 4.16).

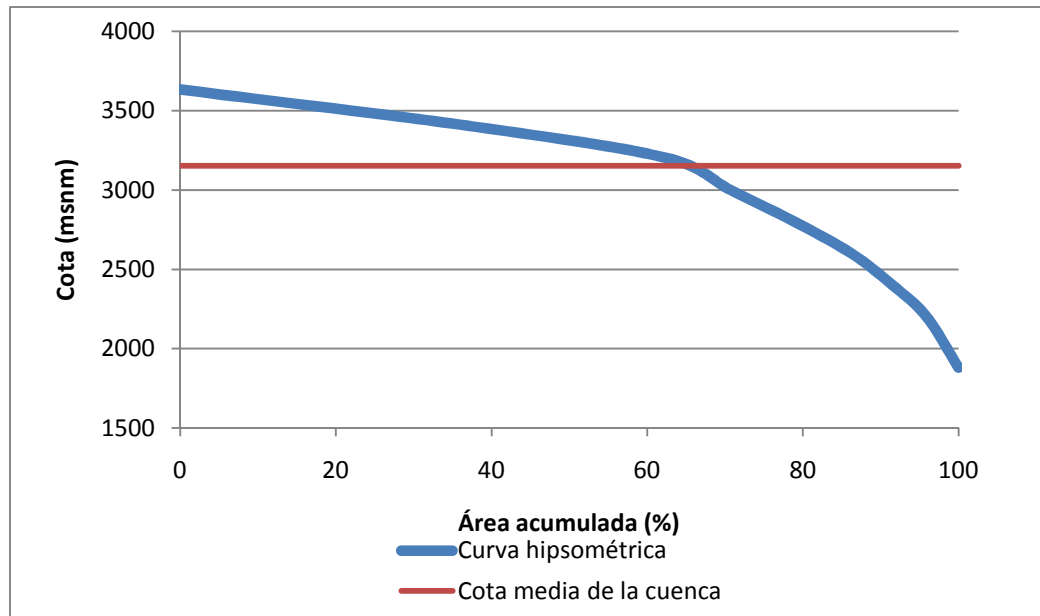
#### Cota media de la cuenca

De la tabla 4.4 extraemos los parámetros que permitan aplicar la ecuación 4.7, correspondientes a las sumatorias de las columnas 7 y columna 3, y se grafica la línea que corresponde a la recta que se observa en la Figura 4.16

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Cota media intervalo } i * \text{Área } i)}{\sum_{i=1}^n (\text{Área } i)}$$

$$E = \frac{74012,705}{23,48} = 3152,16 \text{ msnm}$$

**FIGURA 4.16** Curva hipsométrica y cota media de la cuenca del Río Amanta

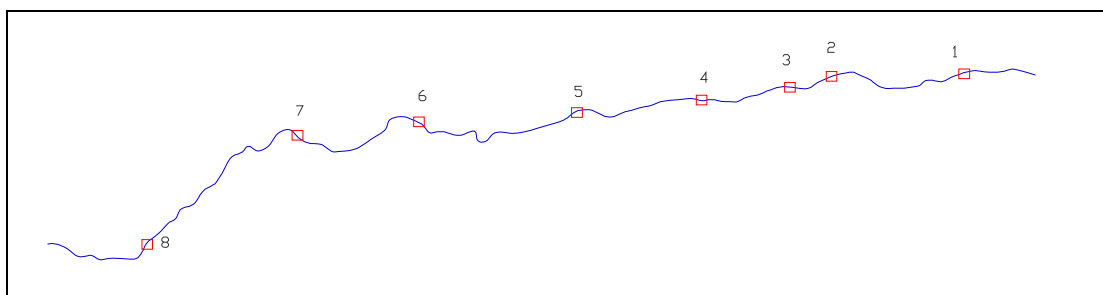


ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### Pendiente media del cauce

Se procedió a escoger 8 puntos, que representan los cambios de pendiente más importantes dentro de la cuenca, dividiendo al cauce principal en 9 tramos. (Figura 4.17)

**FIGURA 4.17** Puntos seleccionados dentro del cauce principal



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Se procede a llenar los requerimientos de la Tabla 4.2 que sirve de apoyo para la construcción de la pendiente media del cauce y se determinan todos los valores requeridos en la misma. (Ver Tabla 4.6)

**TABLA 4.6** Tabla de apoyo para el cálculo de la pendiente media de la corriente

PUNTOS	Cotas intervalo de clase (msnm)	Diferencia de cotas (m)	Distancia horizontal entre cotas $l_i^*$ (m)	Distancia inclinada entre cotas $l_i^{**}$ (m)	Distancia inclinada acumulada (m)	Pendiente por segmento $S_i$	$S_i^{1/2}$	$l_i^{**}/(S_i^{1/2})$
A	3440							
		40	495	496,61	496,61	0,08	0,28	1746,99
1	3400							
		200	992	1011,96	1508,57	0,20	0,45	2253,74
2	3200							
		200	300	360,56	1869,13	0,67	0,82	441,59
3	3000							
		200	653	682,94	2552,07	0,31	0,55	1234,03
4	2800							
		200	905	926,84	3478,91	0,22	0,47	1971,57
5	2600							
		200	1242	1258,00	4736,91	0,16	0,40	3134,92
6	2400							
		200	975	995,30	5732,21	0,21	0,45	2197,57
7	2200							
		200	1442	1455,80	7188,01	0,14	0,37	3909,04
8	2000							
		88,11	754	759,13	7947,14	0,12	0,34	2220,70
B	1911,89							
		-	7758	7947,14	-	-	-	19110,15
<b>TOTAL</b>								

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

$$S_{CAUCE} = \left( \frac{\sum l_i^{**}}{\sum \left( l_i^{**} / S_i^{1/2} \right)} \right)^2$$

$$S_{CAUCE} = \left( \frac{7947,14}{19119,15} \right)^2 = 0,17$$

## **Suelos**

Mediante fotografía aérea, obtenida en Google Earth, es posible observar las características generales de la zona (Figura 4.18).

Para esto se procedió a guardar la imagen de la zona, georeferenciarla, y ubicar dentro de la misma la cuenca en estudio. Una vez realizado esto, se puede ver que la zona aun no ha sido invadida por actividades antrópicas en su mayor parte, por lo cual conserva el verde característico de este tipo de suelos.

Para definir con exactitud los tipos de suelo y el uso del mismo dentro de la zona de estudio, se utilizaron mapas en formato \*.shp.

De todo esto puede concluirse que los suelos de esta cuenca corresponden a Inceptisoles, es decir, suelos poco evolucionados que no presentan todos los horizontes en su perfil.

La textura de los mismos se halla en el orden de media a moderadamente gruesa. (Figura 4.21)

La mayor área dentro de esta cuenca corresponde a bosques no intervenidos, seguidos por pastos y arbustos, y una pequeña zona, dedicada al cultivo especialmente de maíz. (Figura 4,18, 4.19, 4.20)

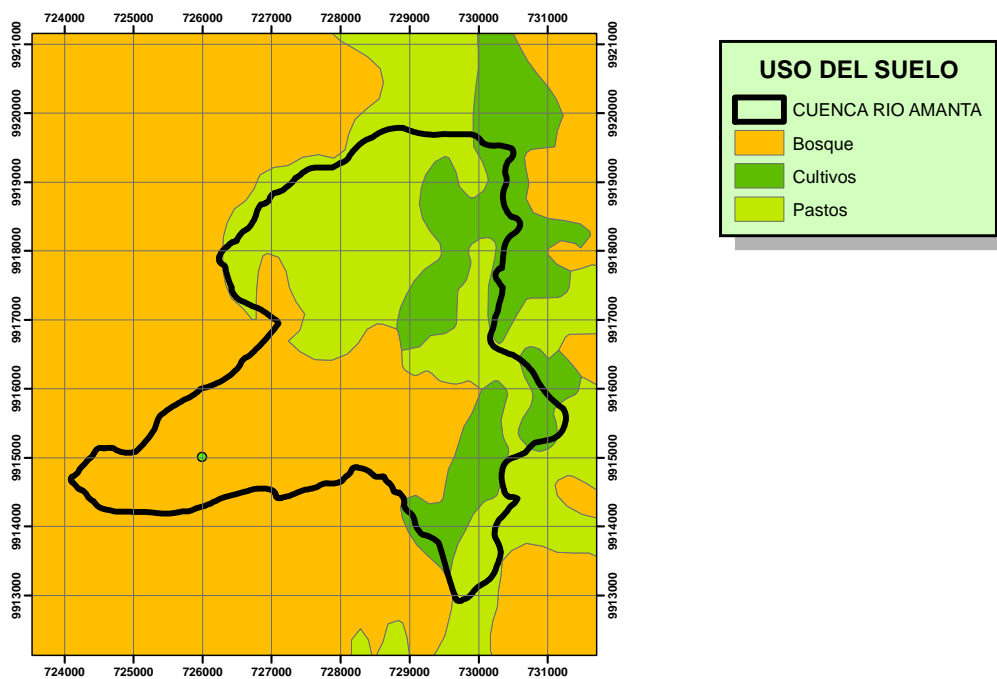
**FIGURA 4.18 Fotografía aérea de la zona en estudio**



FUENTE: Google Earth, 2010

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

**FIGURA 4.19 Uso del suelo de la cuenca del Río Amanta**

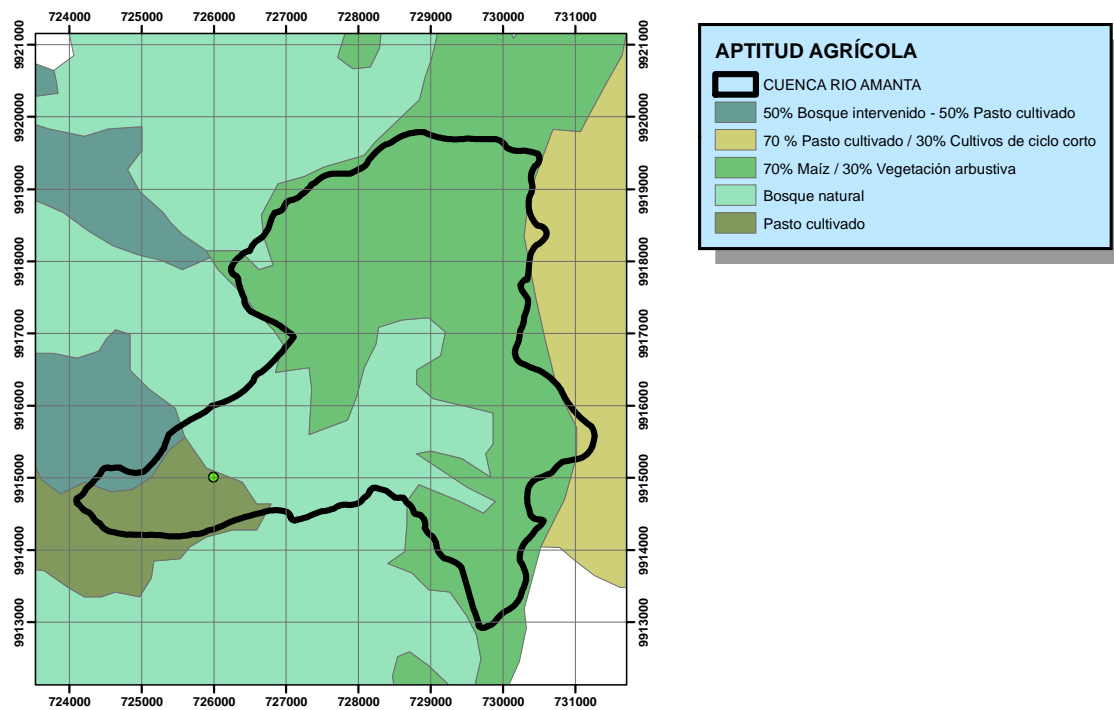


FUENTE: MAE, 2010.

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.



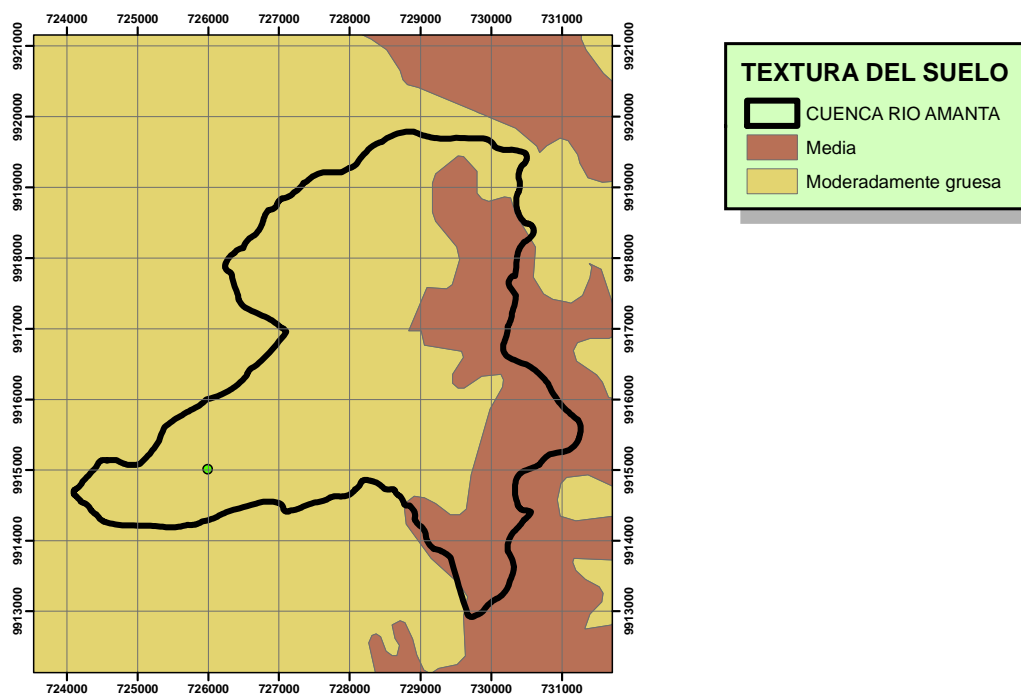
**FIGURA 4.20 Aptitud agrícola de la cuenca del Río Amanta**



FUENTE: MAE, 2010

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

**FIGURA 4.21 Textura del suelo dentro de la cuenca del Río Amanta**



FUENTE: MAE, 2010

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.



Con esto, y análisis posteriores es posible aplicar la metodología GHS, del Soil Conservation Service (SCS), en la cual se resumen las características del suelo importantes para los estudios hidrológicos. (Tabla 4.7)

**TABLA 4.7 Características de los suelos de la zona en estudio**

Símbolo	Características de los suelos						GHS
	Textura		Tasa de Infiltración	Profundidad efectiva del suelo	Drenaje natural de los suelos	Movimiento del agua	
	Símbolo	Clase textural					
	FoArLo	Franco arcillo limoso	4	Ext. superficiales	Imperfectamente drenados	Lento	D
	FoLo	Franco limoso	8	Mod. profundos	Moderadamente bien drenados	Moderado	C

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

A partir de esta tabla se concluye que el 80% de la cuenca posee una infiltración cuando sus suelos están muy húmedos de 4 a 6mm/hora, moderada. El drenaje natural de estos suelos puede variar de bien drenados a moderadamente bien drenados e imperfectamente drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de óptima a moderadamente lenta o lenta; y el 20% restante presentan una infiltración cuando están muy húmedos de 4 a 6mm/hora, rápida. El drenaje natural de estos suelos puede variar de bien drenados, moderadamente bien drenados a bien drenados. La movilidad del agua en el suelo varía de lenta a muy lenta.

## **CAPÍTULO 5**

### **RECONOCIMIENTO DE CAMPO**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Consiste en la inspección visual de la cuenca de drenaje de un determinado curso de agua y de aquellas instalaciones que tengan relación directa con los proyectos (estaciones de medición, otras estructuras hidráulicas existentes, etc.)

Este instructivo es guía acerca de como recolectar todas aquellas características de interés que han sido observadas y que podrían en algún grado ser de utilidad para el estudio hidrológico. Es importante enfatizar que la mayoría de las observaciones realizadas son de tipo cualitativo y que eventualmente durante el curso de esta actividad de campo y de así requerirlo la calidad de información hidrometeorológica disponible, se recopilaría datos cuantitativos. Además, esta tarea se la realiza normalmente antes del inicio de los estudios propiamente dichos.

#### **5.2 APLICABILIDAD**

La información recolectada durante la visita de reconocimiento de campo, por su calidad cualitativa difícilmente es susceptible de evaluaciones analíticas directas, pero para los ingenieros con cierta experiencia resulta de mucho valor ya que facilitan los estudios comparativos entre cuencas hidrológicas.

Estas “comparaciones” que se involucran con el “criterio del ingeniero”, son más simples y se refieren a que considerando el hecho de que el clima y la escorrentía líquida – sólida son altamente influenciadas por las condiciones orográficas, morfológicas, de cobertura vegetal natural o inducida, resulta más fácil hacer estudios de semejanza y correlación entre cuencas conocidas ya que además se dispone del conocimiento físico de las zonas.

Para facilitar esta tarea se recomienda transcribir las observaciones de campo a los formularios que se presentan a continuación y que cumplen dos propósitos: el primero de no confiar exclusivamente a la memoria del que visitó la zona, las características observadas de la cuenca y, el segundo de uniformizar la información para que pueda ser utilizada más eficientemente en los estudios comparativos.

### **5.3 TIPO DE RECONOCIMIENTO**

Se refiere a:

- Reconocimiento de las estaciones hidrométricas y de los sitios de aprovechamiento;
- Reconocimiento de las condiciones de drenaje de la cuenca;
- Identificación de huellas de crecidas máximas en las estaciones hidrométricas, las cuales disponen de limnímetros y otras facilidades para la obtención de información hidrométrica;
- Toma de muestras de material de arrastre en bancos existentes en las inmediaciones de los sitios de implantación de obras y muestras para determinar la calidad del agua; y,
- Sondeo a pobladores del lugar

Para cada uno de estos temas, se han preparado los siguientes formularios, así:

- Formularios de Estaciones de Medición
  - Formulario N° 2 (Revisar Anexo N°2)

Da una descripción muy resumida de lo más relevante de la(s) estación(es) hidrométricas a ser consideradas

- Formulario de la Cuenca Hidrográfica
  - Formulario N° 3 (Revisar Anexo N°2)

Tiene por finalidad señalar aquellas características observables de una cuenca de drenaje que afectan a cada uno de los eventos hidrológicos.

En la Tabla 5.1 se enumeran algunos eventos hidrológicos y sus repercusiones en la cuenca.

**TABLA 5.1 Eventos hidrológicos y características de una cuenca a las que más los afectan**

EVENTO	CARACTERÍSTICA
Caudal líquido medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnitud de la lluvia</li> <li>• Fuente de humedad de la cuenca</li> <li>• Altitud de la cuenca</li> <li>• Cubierta vegetal</li> <li>• Explotación hídrica del río</li> <li>• Tipo de suelo</li> </ul>

**TABLA 5.1 Continuación**

Caudal de crecida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnitud y tipo de lluvia</li> <li>• Fuente de humedad</li> <li>• Cobertura vegetal</li> <li>• Tipo y densidad de drenaje de la cuenca</li> <li>• Relieve de la cuenca</li> <li>• Pendiente del río</li> <li>• Forma de la cuenca</li> <li>• Pendiente del río</li> <li>• Forma de la cuenca</li> <li>• Pendiente de la cuenca</li> </ul>
Caudal sólido en suspensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnitud de la lluvia</li> <li>• Tipo de lluvia</li> <li>• Relieve de la cuenca</li> <li>• Densidad de drenaje de la cuenca</li> <li>• Tipo de suelo</li> <li>• Cobertura vegetal</li> <li>• Densidad de vías de penetración</li> <li>• Factor viento</li> </ul>
Caudal sólido de arrastre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo y densidad de drenaje de la cuenca</li> <li>• Tipo de suelo</li> <li>• Pendiente del río</li> <li>• Pendiente de la cuenca</li> </ul>

FUENTE: (Villacís & Andrade, 1986)

Las interrelaciones indicadas no se muestran en ese orden en el formulario pero pueden ser obtenidas de él.

El mismo formulario da la posibilidad de anotar algunas características de obras hidráulicas cuando las hubiere. Las características de obras existentes en la zona son importantes por cuanto dan una apreciación del funcionamiento

hidráulico del río ante la presencia de estructuras hidráulicas, sobre todo en cuanto a caudales sólidos.

El llenar los formularios descritos no requiere explicación adicional, ya que son bastante claros y concisos, sin embargo más adelante en el ejemplo se muestra cómo llenar los formularios.

Aparte de las anteriores consideraciones y dependiendo de la disponibilidad de información, se puede considerar durante la visita de campo y posteriormente en el curso de los estudios, el tomar ciertos datos de campo tales como:

Aforos líquidos		Ver capítulo 7
Muestras para:	Calidad del agua	Ver capítulo 12

Igualmente, el formulario contempla en el numeral 8, el anotar ciertas características del sitio de probable implantación de obras del proyecto. Estas observaciones son útiles sobre todo si la cuenca no está registrada, así:

- En *Tramo de río en la toma* se debe indicar lo mejor posible (no necesariamente con un levantamiento) las características geométricas de tal modo que se pueda tener una apreciación cualitativa de la capacidad portante del río no solo en crecidas sino también en sedimentos. De tal manera, se tendría un punto de comparación con los datos transpuestos de otras cuencas.
- En *Tramo de río en el desfogue* se debe indicar algo semejante a lo anterior pero con especial atención a los niveles de inundación.
- En *Estimación del caudal líquido* se anota una apreciación expeditiva visual que se relacione con la velocidad del flujo, turbiedad, pendiente del tramo y área transversal.

A la vez que se reconocen todo este tipo de características en el sitio de estudio, es importante el respaldo fotográfico de las mismas, como por ejemplo:

- Uso del Suelo
- Tipo de cauce
- Tipo de suelo
- Inmediaciones al río
- Laderas
- Cubierta vegetal

Es decir, cualquier evidencia que se considere relevante para definir puntos importantes o problemáticos.

Se recomienda que se vaya marcando el número de la fotografía con el sitio y descripción de la misma.

## **5.4 EJEMPLO**

La finalidad de este ejemplo es demostrar cómo deben llenarse los formularios anteriormente descritos en el reconocimiento de campo.

Para ejemplo de este capítulo, se ha tomado una visita realizada a la Cuenca del río San Francisco, dentro de la cuenca del río Jubones. Se realizó una visita a la estación hidrométrica Jubones DJ S. Francisco, y se tomaron los datos necesarios para llenar los formularios 2 y 3 propuestos en este capítulo.

En el Anexo N° 2 se presenta la manera correcta de cómo llenar estos formularios.

Los anexos fotográficos que sustentan la información recolectada se presentan a continuación.

**FOTOGRAFÍA 1 Sección de la Estación Hidrométrica Río Jubones D.J. San Francisco**



FECHA: 29 de julio de 2009

**FOTOGRAFÍA 2 Vista de pastos y matorrales en la cuenca del Río San Francisco**



FECHA: 29 de julio de 2009



**FOTOGRAFÍA 3 Reconocimiento Estación Río San Francisco A.J. Jubones**

FECHA: 10 de diciembre de 2009

**FOTOGRAFÍA 4 Banco de piedra, grava y arena – Río Jubones D.J. San Francisco**

FECHA: 29 de julio de 2009

## **CAPÍTULO 6**

### **CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA CUENCA DE ESTUDIO Y SITIOS DE OBRA**

#### **6.1 INTRODUCCIÓN**

El régimen hidrológico de una cuenca se encuentra en estrecha dependencia de las características físicas, geológicas, topográficas y climáticas, es por ello que el estudio de los factores climáticos es de mucha importancia. En la actualidad, el análisis del clima tiene gran trascendencia por los impactos que tiene sobre la economía, así como para la planificación de obras donde es necesario conocer el comportamiento del tiempo a lo largo del día, durante los meses del año, o en varios años.

La caracterización climática consiste en evaluar para las cuencas de interés, basados en el cálculo y análisis estadístico, los valores medios y extremos de las series anuales y mensuales de las variables meteorológicas.

Este instructivo propone la metodología para evaluar las condiciones climáticas de la zona de estudio, mostrando detalladamente los procedimientos para obtener los valores característicos y poder conocer el comportamiento del clima en la zona estudiada

### 6.1.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE EN LOS ANUARIOS METEOROLÓGICOS

Por cada una de las estaciones climatológicas de la Red del INAMHI de las cuales se han recopilado datos, se presenta una estadística mensual y anual en los Anuarios cuya información procesada es agrupada y clasificada de acuerdo al siguiente detalle:

- Heliofanía (horas y décimos).
  - Suma mensual
  - Total anual
  
- Temperatura del aire a la sombra, en grados centígrados (°C).

Temperaturas Extremas:

- Máxima absoluta en 24 horas y fecha producida
- Mínima absoluta en 24 horas y fecha producida

Temperatura Ambiente

- Media máxima mensual
- Media mínima mensual
- Media mensual
- Media anual

- Humedad Relativa (%):
  - Máxima en 24 horas y fecha producida
  - Mínima en 24 horas y fecha producida
  - Media mensual
  
- Temperatura del punto de rocío (°C).
  - Media mensual
  - Media anual
  
- Tensión del vapor (HP).

- Media mensual.
- Media anual.
- Precipitación (mm)
  - Suma mensual
  - Suma anual
  - Máxima en 24 horas y fecha producida ( mes )
  - Máxima en 24 horas durante el año
  - Número de días con precipitación.
- Evaporación Potencial (mm).
  - Suma mensual
  - Suma anual
  - Máxima en 24 horas y fecha producida ( mes )
  - Máxima en 24 horas durante el año
- Nubosidad (octavos de cielo cubierto).
  - Media mensual
  - Media anual
- Viento.

Para cada una de las direcciones N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, tenemos:

- Velocidad media mensual (m/s)
- Frecuencia (%)
- Velocidad media anual (m/s)
- Frecuencia (%)

Calma

- Frecuencia (%)

Número de observaciones:

- Valor acumulado para tres observaciones diarias

Mayor valor de viento de las observaciones(m/s):

- Velocidad del viento y dirección

Velocidad media del viento, anemómetro totalizador, (Km/h).

- Media mensual.
- Media anual

Los valores anuales se obtienen si existen los 12 valores mensuales y corresponden a medias anuales, sumas anuales o extremos anuales, dependiendo del elemento meteorológico considerado. (INAMHI, 2005)

Dependiendo del tipo de estación meteorológica que se contemple, se puede encontrar o no ciertos parámetros.

Es posible también encontrar datos del clima en estaciones meteorológicas que se encuentren en áreas de influencia de proyectos, aeropuertos, entre otros, que recogen información de acuerdo a sus necesidades.

## **6.2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE UNA CUENCA**

Primero es necesario ubicar el lugar del proyecto o la cuenca con la cual se trabajará, e identificar las estaciones climatológicas que pertenecen a la misma.

En el caso de que no existan estaciones cercanas se realizará un análisis regional para establecer la tendencia de la zona. Este procedimiento se explicará más adelante.

Al caracterizar el clima de una determinada cuenca es necesario evaluar principalmente:

- Precipitación
- Temperatura
- Humedad

- Nubosidad
  
- Evaporación

Para tener una visión amplia de la situación, la OMM aconseja trabajar series de 30 años de datos, en nuestro medio el IRD ha recomendado trabajar con un mínimo de 10 años de datos.

### **6.2.1 DATOS AL INTERIOR DE LA CUENCA**

Al menos debe disponerse de una estación (CP – climatológica principal, AR – aeronáutica, CO – climatológica ordinaria, PV – pluviométrica, PG - pluviográfica) al interior de la cuenca de drenaje del río hasta la sección de interés.

Las estaciones a considerarse deben ser tales que se localicen cerca al centroide de la cuenca, de entre las cuales pueden considerarse una o varias, cuyos registros sean lo más confiables y extensos posibles. (Villacís & Andrade, 1985)

Es recomendable trabajar con más de una estación meteorológica. Esto obedece a que cuando se trabaja en función de cuenca, es posible percibir una variación geográfica de las precipitaciones, la misma que puede ser influenciada por efectos locales o factores orográficos (Monsalve, 1995). La temperatura también varía, disminuye con la altura a una tasa promedio de unos 0,65 °C/ 100 m. (Barry & Chorley, 1985), y algo parecido sucede con la humedad absoluta del aire que depende de la temperatura

Al considerar varias estaciones para los cálculos se evitan errores debido a la naturaleza de los datos, es decir, anomalías que surgieron en una estación meteorológica durante algún periodo.

Cuando existen varias estaciones ubicadas en una zona que posee las mismas características, el análisis de todas estas resulta innecesario, por lo cual se puede

utilizar la información histórica de una sola estación, y utilizar las demás para completar los datos faltantes con las estaciones vecinas.

### **Suficiente información**

- Se debe hacer constar la existencia de registros de precipitaciones, cuyas series deben posibilitar el cálculo directo de las lluvias, temperatura y demás parámetros mes a mes, además el análisis frecuencial de lluvias intensas.
- Las series de datos deben ser representativas en el tiempo.
- El acopio de la información se hará desde las fuentes (Ver Capítulo 3, detalle de las instituciones que disponen de datos meteorológicos)
- Relleno de datos faltantes mediante uno de los métodos estadísticos utilizados comúnmente. (Villacís & Andrade, 1985)
- Procesamiento de los datos en sí, lo cual se explicará posteriormente.

### **Insuficiente información**

Se trabajará con la información existente de los parámetros meteorológicos, y los vacíos en las series se las rellenarán con los valores medios del periodo, o para alcanzar mayor exactitud se pueden extender las series por correlaciones. (Ver Capítulo 8)

Se tomarán en cuenta las lluvias máximas anuales en horas registradas en la estación.

Se hará referencia a curvas regionales de los parámetros meteorológicos en consideración, de tal manera, que el análisis del sector proporcione información acerca del sitio del proyecto.

Para el cálculo de intensidades de precipitaciones máximas se puede utilizar la metodología publicada por el INAMHI, en el documento “Estudio de intensidades”, donde se presentan ecuaciones zonificadas para el cálculo de intensidades máximas de la forma:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} * P_{máx} \quad (6.1)$$

En donde,

I = intensidades máximas (mm/hora)

T = periodo de retorno (años)

t = tiempo de duración de la intensidad (minutos)

K, m, n = constantes de ajuste de la ecuación determinada aplicando el procedimiento de mínimos cuadrados.

### **Obtención de intensidades máximas**

El primer paso es ubicar el centro de la cuenca, y determinar sus coordenadas. El *Estudio de Lluvias Intensas* realizado por el INAMHI en 1999 zonificó al Ecuador en 35 zonas homogéneas de intensidad, de tal manera que al realizar un estudio es posible ubicar a la cuenca dentro de estas, y con ello se pueden obtener tener la(s) ecuación(es) para hallar la intensidad para diferentes periodos de retorno.

Para poder aplicar estas ecuaciones es necesario disponer de los datos de intensidad de precipitación diaria con periodo de retorno ( $I_{d_{TR}}$ ) y el tiempo, que en este caso corresponde al tiempo de concentración en la cuenca.

Las ecuaciones representativas de las zonas de intensidades, el mapa de zonificación y los mapas de isoyetas para distintos periodos de retorno están disponibles en el Anexo N°7.



Para hallar el tiempo de concentración ( $t_c$ ) existen varias fórmulas empíricas que facilitan su cálculo tal como lo mencionan Monsalve. G y Chow V.T. en sus publicaciones.

Una de las fórmulas más aceptadas, es la de Kirpich (1940)

$$t_c = 3,989 * L^{0,77} * S^{-0,385} \quad (6.2)$$

Donde:

$t_c$  = tiempo de concentración, (min);

L = longitud del cauce principal de la cuenca, (km); y,

S = pendiente media del cauce

Ubicando las coordenadas del centro de la cuenca en cada uno de los mapas de isoyetas y utilizando interpolaciones es posible hallar la intensidad de precipitación del sitio de interés. Los periodos de retorno que se pueden encontrar en estos mapas corresponden a 5, 10, 25, 50 y 100 años, por lo que se recomienda trabajar con los mismos para facilitar los cálculos.

Con esta información, es posible obtener las intensidades máximas de precipitación.

### **6.2.2 DATOS EN EL EXTERIOR DE LA CUENCA DE DRENAJE**

Se deben considerar las estaciones de interés existentes en el exterior de la cuenca de drenaje hasta la sección de interés.

Luego se procede de la siguiente manera:

- Ubicación de estaciones en los mapas disponibles
- Selección de estaciones a utilizarse

- Análisis de los registros de tempestades

Con la información procesada, se debe elaborar un mapa de isolíneas (isoyetas, isotermas) que permitan el cálculo de la precipitación y de las temperaturas multianuales ponderadas para los puntos, tanto para la estación proveedora de registros así como del sitio de estudio.

También resultan de gran utilidad otros métodos de interpolación, de tal manera que cuando dentro de la cuenca no existan datos, se los puedan obtener a través de distintos procedimientos usando estaciones de la misma región próximas a la cuenca, como por ejemplo:

- Polígonos de Thiessen o Voronoi
- Métodos basados en un peso lineal e inversamente proporcional a la distancia
- Métodos basados en funciones polinomiales suavizadas (splines)
- Métodos geo-estadísticos (Moreano, 2008)

### **Suficiente información**

En caso de existir suficiente información se procederá como se lo hace con datos al interior de la cuenca con suficiente información.

### **Insuficiente información**

Si ninguna de las estaciones tiene suficiente información, se escogerán las que en mayor grado tengan datos y se procederá como se lo hace con datos al interior de la cuenca con insuficiente información.

## **6.3 PROCESAMIENTO DE DATOS**

### **6.3.1 PRECIPITACIÓN**

En el análisis de la precipitación es necesario conocer:

- Distribución mensual de la precipitación
- Distribución anual de la precipitación
- Variación espacial y altitudinal de la precipitación
- Valores característicos de la pluviosidad mensual
- Valores característicos de la pluviosidad anual

Para los cálculos, será necesaria la construcción de una tabla de apoyo (Tabla 6.1) en la cual se irán ubicando los valores correspondientes a la precipitación media mensual de los 12 meses de cada año en consideración para cada estación.

#### **Tabla de apoyo para el análisis de la precipitación**

- En la columna 1, se pondrá el año respectivo, y de la columna 2 a la columna 13, los valores de las precipitaciones de enero a diciembre.

Cuando existen faltantes en los datos se aplicará la metodología explicada en el capítulo 8 para rellenar datos.

- Cuando se han extraído los valores de los respectivos Anuarios Meteorológicos, se calculan:

-

- *Los valores medios, máximos y mínimos mensuales*, Para ello se cuenta con las filas 2, 3 y 4. Por ejemplo, para el mes de enero se calculará entre todos los años considerados, el valor medio, el valor máximo y mínimo de ese mes.
- *los valores medios, máximos y mínimos anuales*, que se ubicarán en las columnas 14, 15 y 16. Por ejemplo, para el año 2005 se consideran los 12 meses de ese año para hallar el valor medio, máximo y mínimo.
- Se calcula la precipitación anual mediante la suma de las precipitaciones de todos los meses (columna 17), lo cual representa la cantidad de lluvia por año, y entre estos se obtiene el valor medio, máximo y mínimo.
- Se obtienen los valores medios, máximos, mínimos de los resultados mensuales, y estos se dispondrán en las columnas 14, 15 y 16. Tomando en cuenta que, el valor medio mensual se obtiene de los valores medios de los meses, y los valores máximo y mínimo mensual a partir de los extremos medios mensuales

Actualmente, las hojas de datos digitales, permiten realizar el procesamiento de datos de una forma más simple.

**TABLA 6.1** Tabla de apoyo para cálculos de precipitaciones por estación meteorológica

PRECIPITACIÓN																	
ESTACION: _____		LATITUD: _____		CUENCA: _____													
CODIGO: _____		LONGITUD: _____		PROVINCIA: _____													
TIPO: _____		ELEVACION: _____		INSTITUCION: _____													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MED	MAX	MIN	SUM
1																	
2	MED																
3	MAX																
4	MIN																

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida

### Variación estacional de la precipitación

- ***Hietograma de láminas de precipitación mensual***

Este gráfico permite la visualización de lo que ocurre a lo largo del año mediante barras que representan la cantidad de precipitación por mes.

En base a la Tabla 6.1, con los valores medios obtenidos (Fila 2), se saca un promedio por cada uno de los meses. Estos valores son los que muestran el comportamiento de la zona de estudio de manera general.

Se realiza un gráfico de barras, en el eje x se ubican los meses del año y en el eje y la precipitación media mensual del rango de años con los que se esté realizando el estudio. También se puede utilizar una línea de tendencia para explicar este comportamiento.

Cuando los gráficos estén listos, se identifica el régimen de precipitación de la zona y se sacan las conclusiones respectivas.

### **Variación interanual de la precipitación**

Este gráfico, generalmente realizado mediante una línea de tendencia, permite identificar la propensión que sigue la precipitación con el transcurso de los años.

Para ello es necesario disponer de las precipitación anuales (Columna 17 de la Tabla 6.1) en el eje de las ordenadas, y en las abscisas el año al que correspondan.

### **Variación altitudinal de la precipitación**

Es necesario analizar la distribución de la precipitación en la cuenca considerando las variaciones debido a factores orográficos tal como se mencionó anteriormente.

Para esto se grafica una línea de tendencia donde se relacionan la media de las precipitaciones interanuales (promedio de la columna 17) en el eje y; con la altitud de la estación meteorológica en el eje x; lo que da como resultado varios pares ordenados dependiendo del número de estaciones con las cuales se trabaje.

### **Valores característicos de la pluviosidad mensual**

Dentro de los valores característicos de la pluviosidad constan: la lluvia mensual media, mínima y máxima. Estos datos fueron obtenidos en la Tabla 6.1.

- La lluvia mensual media se obtiene sacando el promedio de los valores medios de cada uno de los meses (fila 2, columna 14)
- La lluvia mensual máxima, se obtiene sacando el valor superior entre los valores máximos mensuales (fila 3, columna 15)
- La lluvia mensual mínima, se obtiene sacando el valor más bajo entre los valores mínimos mensuales (fila 4, columna 16)

Cuando se han considerado varias estaciones, debe hacerse análisis de la tendencia de la zona para obtener una conclusión.

### **Valores característicos de la pluviosidad anual**

Estos corresponden a la cantidad media, máxima y mínima del total de precipitación por año.

Estos valores fueron calculados en la Tabla 6.1, y los valores requeridos son los que se encuentran en la parte de los resultados, (columna 17, fila 1, 2 y 3)

En el caso de que sea necesario obtener un valor de precipitación media de la cuenca, se utilizan métodos como el Polígono de Thiessen, tomando en cuenta los promedios entre todos los años en consideración para cada una de las estaciones ubicadas dentro de la cuenca o sitio de estudio, o también a partir de isoyetas dibujadas con la información de las estaciones disponibles.

### **6.3.2 TEMPERATURA**

En el análisis de la temperatura de una cuenca o sitio de obra, es necesario conocer:

- Temperaturas medias mensuales
- Temperaturas medias anuales
- Variación de la temperatura media anual
- Variación altitudinal y espacial de la temperatura

Para la obtención de esta información, se usará una tabla de apoyo muy similar a la elaborada para precipitación. Se seguirá el procedimiento descrito en los pasos 1, 2 y 4 para la elaboración de una la tabla de apoyo para la temperatura. Se

incorporan a esta tabla tres casilleros más que deben ser llenados con los promedios de los valores de las columnas 14, 15 y 16.

**TABLA 6.2** Tabla de apoyo para cálculos de temperaturas por estación meteorológica

TEMPERATURA																
ESTACION: _____				LATITUD: _____				CUENCA: _____								
CODIGO: _____				LONGITUD: _____				PROVINCIA: _____								
TIPO: _____				ELEVACION: _____				INSTITUCION: _____								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MED	MAX	MIN
1																
														MED		
2	MED															
3	MAX															
4	MIN															

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### Temperaturas medias mensuales

Las temperaturas medias mensuales hacen referencia a la temperatura media, mínima y máxima de rangos mensuales de tiempo.

Estos valores se determinaron en la Tabla 6.2

- Temperatura media mensual se obtiene calculando el promedio de las medias mensuales de temperatura ( fila 2, columna 14)
- La temperatura mensual máxima, se obtiene sacando el valor superior entre los valores máximos mensuales (fila 3, columna 15)



- La lluvia mensual mínima, se obtiene sacando el valor inferior entre los valores mínimos mensuales (fila 4, columna 16)

### **Temperaturas medias anuales**

Las temperaturas medias anuales hacen referencia a la temperatura promedio del año entre todos los años en consideración. En la Tabla 6.2, los casilleros que se encuentran entre las filas 1 y 2 son los que proporcionan esta información.

- Temperatura media anual, es la media de los valores medios anuales de los años que conforman la serie.
- Temperatura máxima anual, corresponde al valor extremo medio superior, es decir, la columna de las temperaturas máximas anuales, de las cuales se obtendrá el máximo valor entre las mismas.
- Temperatura mínima anual, que se obtiene sacando la mínima temperatura entre la columna de temperaturas mínimas anuales. Es decir, se obtiene el extremo medio inferior de estas temperaturas.

### **Variación de la temperatura media anual**

La variación de la temperatura media anual se puede observar mediante un gráfico que refleje la tendencia de la temperatura en los años en consideración.

Para ello se grafica la serie temporal, ubicando en el eje x los años analizados, y en el eje y la temperatura media anual.

El resultado corresponderá a una serie, con la cual se procederá a obtener una línea de tendencia entre los puntos de la misma, de tal manera que se pueda generalizar un comportamiento.

Es común el utilizar el concepto de *media móvil* (ver glosario) para este análisis.

### **Variación altitudinal y espacial de la temperatura.**

Como se mencionó anteriormente, la temperatura es una variable que se ve influenciada por la altitud, por ello es necesario representar esta variación a través de un gráfico de dispersión, ubicando en el eje x la altitud de las diferentes estaciones, y en el eje y la temperatura media anual del periodo en análisis para cada estación. El resultado será una serie de puntos con lo cual se debe establecer una tendencia.

También resulta de gran utilidad para observar la variación altitudinal y espacial de la temperatura la elaboración de un mapa de isotermas de la zona evaluada.

### **6.3.3 HUMEDAD RELATIVA**

Al igual que en el análisis de las temperaturas, se utilizan los datos medios y medios extremos.

Respecto a la humedad relativa es necesario obtener:

- La variación altitudinal y espacial de la humedad relativa

### **Variación altitudinal y espacial de la humedad relativa**

Se elabora una tabla de apoyo similar a las anteriores, y se seguirán los pasos 1, 2 y 4 de lo descrito en precipitación.

**TABLA 6.3** Tabla de apoyo para cálculos de humedad relativa por estación meteorológica

HUMEDAD RELATIVA																
ESTACION: _____				LATITUD: _____				CUENCA: _____								
CODIGO: _____				LONGITUD: _____				PROVINCIA: _____								
TIPO: _____				ELEVACION: _____				INSTITUCION: _____								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MED	MAX	MIN
1																
														MED		

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Con los datos de altitud de las estaciones y la humedad relativa media multianual (resultados de la última fila de la tabla), se elabora un gráfico de dispersión como los mencionados anteriormente. Con esto se obtiene una tendencia para la zona en estudio.

#### 6.3.4 NUBOSIDAD

Respecto a esta característica, se debe hacer un análisis espacial y temporal.

Se elabora una tabla de apoyo, y se sigue la misma metodología mencionada anteriormente.

La representación se la puede hacer mediante un gráfico de nubosidad media (octas) vs. Meses del año con líneas de tendencia para cada una de las estaciones, de tal manera que se pueda observar el comportamiento de la nubosidad de los distintos sitios de una cuenca durante los meses del año.

**TABLA 6.4** Tabla de apoyo para el análisis de nubosidad

NUBOSIDAD																
ESTACION: _____				LATITUD: _____				CUENCA: _____								
CODIGO: _____				LONGITUD: _____				PROVINCIA: _____								
TIPO: _____				ELEVACION: _____				INSTITUCION: _____								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MED	MAX	MIN
1																
2	MED															
3	MAX															
4	MIN															

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### 6.3.5 EVAPORACIÓN

Este análisis se lo hace en base de series de datos anuales medios y extremos, y corresponde a la evaporación del tanque que es la evaporación que se mide en altura o lámina de agua, (mm); y es equivalente a la evaporación de un litro de agua en una superficie libre de un metro cuadrado.

El análisis que se debe hacer:

- Variación temporal entre varios años de cada estación
- Variación altitudinal y espacial

Para ello se propone la construcción de una tabla de apoyo como las elaboradas anteriormente (Tabla 6.5).

**TABLA 6.5** Tabla de apoyo para el análisis de la evaporación

EVAPORACIÓN																	
ESTACION: _____				LATITUD: _____				CUENCA: _____									
CODIGO: _____				LONGITUD: _____				PROVINCIA: _____									
TIPO: _____				ELEVACION: _____				INSTITUCION: _____									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MED	MAX	MIN	SUM
1																	
2	MED																
3	MAX																
4	MIN																

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Se siguen los pasos 1,2 y 4 de la explicación para llenar la tabla de precipitación. Con ello, es posible determinar:

### Variación temporal de la evaporación

La variación temporal de la evaporación se puede evidenciar mediante un gráfico que muestre la tendencia que existe en los diferentes meses del año, tomando en cuenta los valores promedios mensuales de las series de datos anuales. Para esto se deberá realizar un gráfico con líneas que indiquen las tendencias de tiempo, o a su vez un diagrama de barras de evaporación vs. meses del año.

Se toma en cuenta para ello la fila 2 (Valores medios de evaporación mensual).

En este punto se puede realizar un gráfico para observar la variación interanual de evaporación, para lo cual se grafica ya sea con líneas de tendencia o barras, la sumatoria de evaporación anual vs. año

### **Variación espacial de la evaporación**

Cuando se realizan análisis con varias estaciones es posible evidenciar la variación que existe en distintos lugares. Se realiza entonces un gráfico de la media de las sumatorias anuales de cada una de las estaciones, y se grafica en el eje y, los valores de la evaporación, y en el eje x, la altitud a la que se encuentran las estaciones en mención.

Otra forma para la representación, consiste en un gráfico donde se encuentren las líneas de tendencia para cada una de las estaciones, en el eje y se ubica la evaporación media mensual (mm), y en el eje x, los meses del año.

## **6.4 CLASIFICACIONES CLIMÁTICAS**

La realidad climática ecuatoriana no se trata solamente de un régimen único rico en variantes, sino de un mosaico de climas ligados a sistemas regionales y micro-regionales de gran diversidad, condicionados en parte por las características geográficas. Es esta diversidad la que otorga al país paisajes que pueden transformarse radicalmente en cortas distancias. Este aspecto es acentuado aún más por la irregularidad de los elementos climáticos. (Pourrut, 1995)

Existen clasificaciones climáticas difundidas a nivel mundial, sin embargo se han realizado estudios para adaptarlas a la realidad del territorio nacional. A continuación se citan algunas de ellas.

### **6.4.1 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA PROPUESTA POR BLANDIN, C., 1989. EN “ANÁLISIS Y ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS EN EL ECUADOR”. INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA. QUITO.**

Propone una clasificación del clima de Ecuador de acuerdo a Köppen, en los siguientes términos:

- **Clima Tropical “A”:** Af - clima tropical húmedo, Am - clima tropical monzón; y, Aw - clima tropical sabana.
- **Clima Templado “C”:** Cf -Clima Mesotérmico húmedo; Cw - Clima Mesotérmico Semihúmedo.
- **Clima Seco “B”:** B - Clima seco templado; y, Bt - clima seco tropical.
- **Climas de Altura “E”.**

En esta clasificación se puede añadir los climas subtropicales y el clima de la región oriental o amazónica que tienen características específicas diferentes a los demás tipos de clima. (Barros & Troncoso, 2010)

Se presenta también un análisis detallado de los tipos de clima por regiones, como se indica a continuación:

- **Región Litoral:** Af - Tropical húmedo; Am - Tropical monzón; Aw -Tropical sabana; y, Bt - Tropical seco.
- **Región Interandina:** Cf - Clima Mesotérmico húmedo; Cw - Clima Mesotérmico Semihúmedo; B- Clima templado seco; y, E - Clima de páramo
- **Región Oriental O Amazonica:** Afa - Clima amazónico. (Barros & Troncoso, 2010)

#### **6.4.2 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA PROPUESTA POR POURRUT, P., EN “LOS CLIMAS DEL ECUADOR – FUNDAMENTOS EXPLICATIVOS”. ORSTOM. (1995)**

Los parámetros utilizados para esta clasificación son las precipitaciones (totales anuales y regímenes) y temperatura. Conociendo la ubicación del sitio de estudio, se puede situar dentro de una clasificación climática, y con ello identificar otras

características de la región en cuestión que pueden ser comparados con los ya obtenidos en los análisis climatológicos anteriores.

Estos, se detallan en la Tabla 6.6 donde se mencionan principales características en cuanto a variables anuales.

En la Figura 6.1 se muestran los diferentes tipos de clima según Pourrut distribuidos en el territorio nacional.

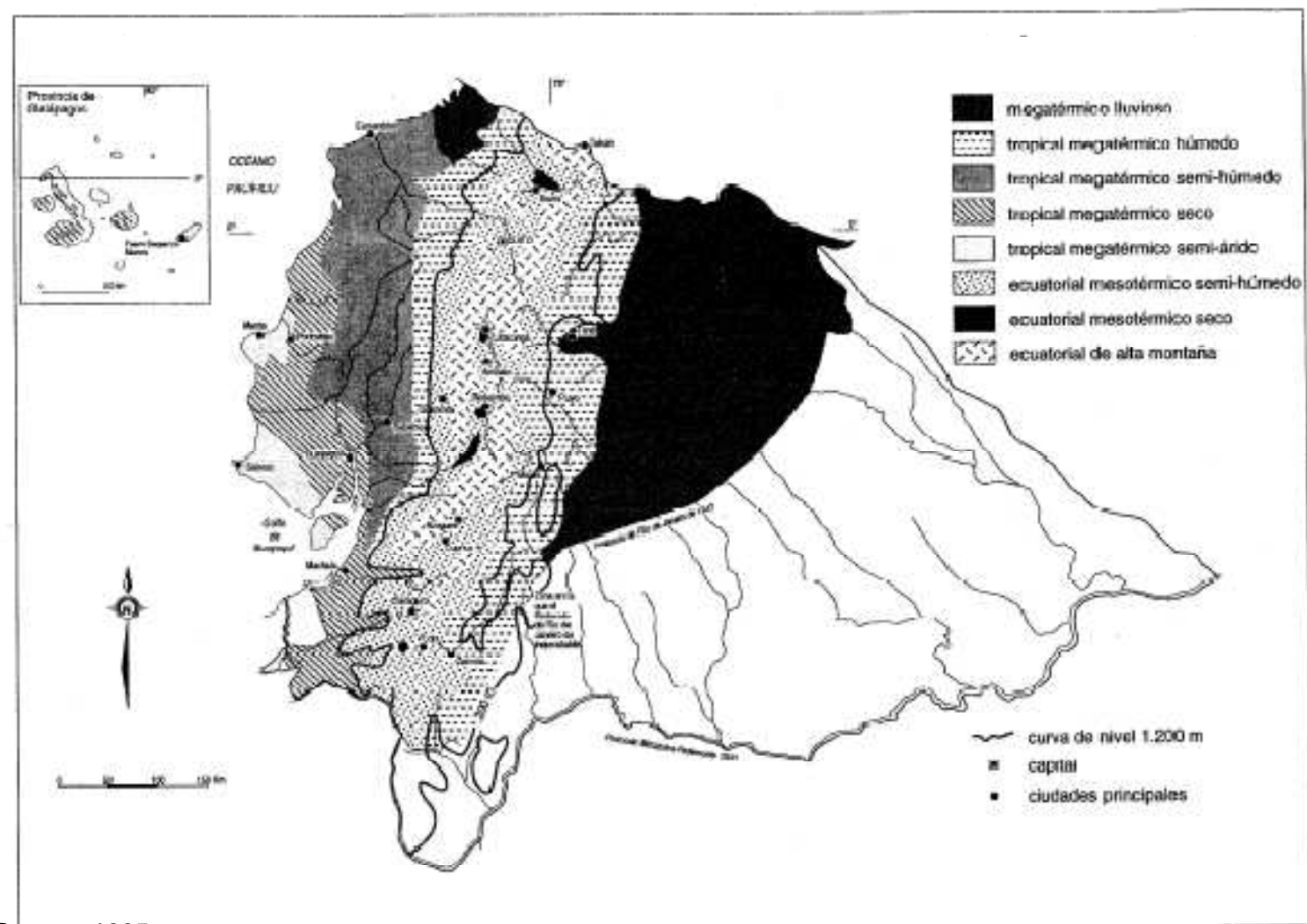


**TABLA 6.6 Principales características generales de los climas del Ecuador según P. Pourrut**

TIPO DE CLIMA	Tropical megatérmico semi-árido	Tropical megatérmico seco a semi-húmedo	Tropical megatérmico húmedo	Tropical megatérmico muy húmedo	Uniforme megatérmico muy húmedo	Ecuatorial mesotérmico semi-húmedo a húmedo	Ecuatorial mesotérmico seco	Ecuatorial frío de alta montaña	Ecuatorial insular
<b>Regimen de lluvias (número de estaciones)</b>	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda	2 húmeda 2 seca	2 húmeda 2 seca	2 húmeda 2 seca	2 húmeda 2 seca
<b>Altura de las lluvias</b>	$P \leq 500$	$500 < P \leq 1.000$	$1.000 < P \leq 2.000$	$P > 2000$	$P > 2000$	$600 < P \leq 2.000$	$P \leq 600$	$800 \leq P < 2.000$	$200 < P \leq 2.000$
<b>Temperatura media (°C)</b>	$T \geq 22$	$T \geq 22$	$T \geq 22$	$T \geq 22$	$T \geq 22$	$12 \leq T \leq 22$	$12 \leq T \leq 22$	$T < 12$	$22 \leq T$
<b>Duración de la insolación (número de horas)</b>	$1.000 \leq I \leq 1.500$	$800 \leq I \leq 1.300$	$600 \leq I \leq 1.000$	$400 \leq I \leq 800$	$800 \leq I \leq 1.500$	$1.000 \leq I \leq 2.000$	$1.800 \leq I \leq 2.500$	$1.000 \leq I \leq 2.200$	$1.800 \leq I$
<b>Humedad relativa (%)</b>	$50 < h < 70$	$60 < h < 85$	$70 < h < 90$	$90 < h$	$90 < h$	$65 < h < 85$	$50 < h < 80$	$80 < h$	$50 < h < 80$
<b>Meses secos ** (número)</b>	12	$8 < N \leq 11$	$6 < N \leq 8$	$2 < N \leq 6$	$N \leq 2$	$2 < N \leq 8$	$8 < N \leq 12$	$N \leq 4$	$4 < N \leq 12$
<b>Déficit hídrico ** (mm)</b>	$900 < D$	$700 < P \leq 900$	$250 < P \leq 700$	$D \leq 500$	$D \leq 100$	$D \leq 150$	$150 \leq P \leq 600$	$D \leq 100$	$500 \leq I \leq 1.400$

FUENTE: Clima del Ecuador. P. Pourrut.

FIGURA 6.1 Repartición de los principales climas según Pourrut



FUENTE: Pourrut, 1995

La descripción de los climas se presenta a continuación: (Pourrut, 1995)

## **REGIÓN COSTANERA**

### ***Clima tropical megatérmico árido a semiárido.***

- Ubicación: Península de Santa Elena, el cabo San Lorenzo, y la franja litoral meridional.
- Temperaturas medias anuales: 24°C
- Temperaturas máximas anuales: 32°C (rara vez superadas)
- Temperaturas mínimas anuales: 16°C
- Precipitaciones anuales: Inferiores a 500 mm (concentradas de enero a abril)

Dada la influencia de la corriente fría de Humboldt, es en el cabo de Salinas donde se observan los valores mínimos anuales de lluvia y temperatura. Entre julio y octubre el cielo se caracteriza por un cielo muy nuboso, neblinas, y garúas sin impacto notable en la vegetación. Principal consecuencia de las abundantes lluvias provocadas por el fenómeno del Niño que sobreviene episódicamente y son las ocasiones en que el paisaje se reverdece. La irregularidad interanual de las precipitaciones es elevada, superior a 4.

### ***Clima tropical megatérmico seco a semi-húmedo***

- Ubicación: Situado al este del clima anterior y su influencia se extiende 60 km al este.
- Temperaturas medias anuales: superiores a 24°C.
- Precipitaciones anuales: entre 500 y 1000 mm (de diciembre a mayo)

La vegetación está constituida principalmente de un bosque seco en donde predominan los ceibos.

### ***Clima tropical megatérmico húmedo***

- Ubicación: Se inicia cerca de Esmeraldas para desaparecer a nivel del golfo de Guayaquil. Corresponde a una franja cuyo ancho máximo es ligeramente inferior a 110 km.
- Precipitación total anual: entre 1000 y 2000 mm (de diciembre a mayo)
- Temperaturas medias anuales: 24°C
- Humedad relativa: 70% – 90%

La vegetación es una selva densa de árboles de hojas caducas.

## **REGIÓN ANDINA**

### ***Clima tropical megatérmico muy húmedo***

- Ubicación: Al ser un clima de transición entre los de la región andina y los de las zonas litoral y amazónica, está presente en las vertientes exteriores de las dos cordilleras, entre los 500 y 1500 msnm aproximadamente.
- Temperaturas medias anuales: Varían considerablemente según altitud
- Humedad relativa: 90%
- Precipitaciones anuales: superiores a 2000 mm, pudiendo alcanzar los 4000mm

La vegetación es esencialmente selvática, pero una explotación descontrolada asociada a intensa deforestación por implantación de pastizales.

***Clima ecuatorial mesotérmico semi- húmedo a húmedo***

- Ubicación: Zona interandina
- Precipitaciones anuales: entre 500 y 2000 mm (de febrero a mayo y de octubre a noviembre)
- Temperaturas medias anuales: 12 – 20°C
- Temperaturas mínimas anuales: no inferiores a 0°C
- Temperaturas máximas anuales: no mayores 30°C
- Humedad relativa: Valores comprendidos entre 65% y 85%.

La vegetación natural ha sido reemplazada ampliamente por pastizales y cultivos.

Este clima es el más característico de la zona interandina pues, salvo en los valles abrigados y las zonas situadas por encima de los 3200 msnm, ocupa la mayor extensión.

***Clima ecuatorial mesotérmico seco***

- Ubicación: Valles interandinos abrigados de menor altura
- Temperaturas medias anuales: 12 – 20°C
- Precipitaciones anuales: < 500 mm
- Humedad relativa: 50 – 80%

Cielo generalmente poco nuboso, presenta dos picos pluviométricos separado por dos estaciones secas.

### ***Clima frío ecuatorial de alta montaña***

- Ubicación: Zona interandina, por encima de los 3000 msnm.
- Temperaturas medias anuales: entre 4 y 8°C
- Temperaturas máximas anuales: 20°C
- Temperaturas mínimas anuales: 0°C
- Precipitación anual: 800 – 2000 mm
- Humedad relativa: superior al 80%

La vegetación natural es llamada matorral en el piso más bajo, es reemplazada en el piso inmediatamente superior por un espeso tapiz herbáceo frecuentemente saturado de agua, llamado páramo.

## **REGIÓN AMAZÓNICA**

### ***Clima uniforme megatérmico muy húmedo***

- Ubicación: Cuenca amazónica, abarca igualmente parte de la región septentrional de la provincia costanera de Esmeraldas.
- Temperatura media anual: 25°C
- Precipitaciones anuales: superior a 3000 mm (máximo en julio – agosto)

- Humedad relativa: superior al 90%

El cielo está permanentemente cubierto por nubes. Debido a que no existe reposo del ciclo vegetativo, la vegetación es una selva siempre verde

## **REGIÓN INSULAR**

### ***Clima ecuatorial insular***

- Ubicación: Archipiélago de Galápagos
- Temperaturas medias anuales: 23°C

Además de las características presentadas en la Tabla 6.7, se puede indicar que en esta región existen diferentes topoclimas. De manera general, se deben distinguir zonas bajas de altas puesto que en las primeras, hay estaciones húmedas de alrededor de 3 meses de duración cada una, centradas en febrero y en los meses de junio a septiembre; mientras que en zonas altas, se distinguen neblinas y garúas en los meses de noviembre a febrero.

## **6.5 EJEMPLO<sup>2</sup>**

La finalidad de este ejemplo es aplicar la metodología propuesta en este instructivo para la realización de estudios climatológicos.

La cuenca seleccionada para este fin corresponde a la del Río Alambi. La metodología para seleccionar las estaciones meteorológicas apropiadas para el estudio fue detallada en el ejemplo del capítulo 3, donde también se encuentra el mapa de la ubicación de la cuenca y de las estaciones meteorológicas.

---

<sup>2</sup> El ejemplo se fundamenta en el "Estudio Climatológico e Hidrológico de la Hidroeléctrica Nanegal", (EPN - MEER, 2008).

En las siguientes tablas se presentan las estaciones meteorológicas y pluviométricas que serán utilizadas para el efecto.

**TABLA 6.7 Estaciones meteorológicas**

COD.	ESTACION	TIPO	LATITUD				LONGITUD				ELEVACION (m)
			(°)	(')	(")		(°)	(')	(")		
M212	MINDO INECEL	CP	0	2	52	S	78	44	8	W	1235
M213	LA PERLA	CP	0	11	34	N	78	40	10	W	1410
M046	PACHIJAL MASHPI	CP	0	11	22	N	78	57	0	W	560

FUENTE: INAMHI, 2010

**TABLA 6.8 Estaciones pluviométricas**

COD.	ESTACION	TIPO	LATITUD				LONGITUD				ELEVACION (m)
			(°)	(')	(")		(°)	(')	(")		
M339	NANEGALITO	PG	0	3	41	N	78	40	44	W	1615
M361	NONO	PV	0	4	43	S	78	34	19	W	2842
M340	MINDO INAMHI	PV	0	3	1	S	78	46	20	W	1290
M326	SELVA ALEGRE-IMBABURA	PV	0	15	2	N	78	34	24	W	1600
M721	MESA MIRAVALLE(DDEL CHONTAL)	PG	0	13	28	N	78	43	52	W	960
M524	CHONTAL ALTO	PG	0	16	0	N	78	45	0	W	1300
M318	APUELA-INTAG	PV	0	1	29	N	78	30	41	W	1590
M358	CALACALI INAMHI	PV	0	0	11	N	78	30	43	W	2843
M327	CHONTAL BAJO(GUAYLL.DJ ALAMBI)	PV	0	14	1	N	78	44	44	W	596

FUENTE: INAMHI, 2010

La disponibilidad de datos de cada estación, e incluso de cada variable, es diferente, sin embargo se estableció el periodo 1972 – 2006, para el análisis del clima.

### 6.5.1 PRECIPITACIÓN

Para lograr una mayor representatividad de la información sobre precipitación se consideró principalmente las estaciones:

- M339 - Nanegalito. Estación representativa de la parte baja de la cuenca, sitio cercano a la captación del Proyecto - Central Hidroeléctrica Nanegal.
- M358 - Calacalí INAMHI. Estación que caracteriza las precipitaciones en la cabecera de la cuenca.



El periodo de datos fue homogenizado a los años 1972-2006, con los procedimientos que constan en el Capítulo 8.

Se construyeron tablas de apoyo para la evaluación de los aspectos climatológicos de las estaciones enumeradas en las Tablas 6.7 y 6.8, como se presenta a continuación:

**TABLA 6.9 Ejemplo de tabla de apoyo elaborada para los cálculos de la precipitación**

**ESTACION:** CALACALI INAMHI      **LATITUD:** 00°00'11" N      **CUENCA:** Esmeraldas  
**CODIGO:** M358      **LONGITUD:** 78°30'43" W      **PROVINCIA:** Pichincha  
**TIPO:** PV      **ELEVACION:** 2843 msnm      **INSTITUCION:** INAMHI

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1972													
1973													
1974													
1975													
1976	96,7	57,3	112,0	112,9	53,0	34,5	0,0	0,7	5,7	75,3	178,2	<b>128,9</b>	<b>855,2</b>
1977	39,6	61,7	209,1	183,3	180,5	56,6	10,3	33,7	120,9	126,0	9,1	80,2	<b>849,3</b>
1978	78,1	141,2	238,8	224,3	12,6	2,1	127,7	0,9	60,3	0,6	40,5	25,7	<b>952,8</b>
1979	67,3	62,0	239,8	156,2	129,6	7,3	5,9	82,4	30,9	24,6	39,4	17,4	<b>862,8</b>
1980	185,6	250,0	101,1	106,7	7,2	12,3	0,5	4,6	33,2	138,3	60,7	74,1	<b>974,3</b>
1981	38,9	195,1	205,5	351,5	12,7	13,6	61,1	24,2	43,6	49,0	50,4	110,1	<b>1155,7</b>
1982	100,0	184,8	84,2	196,9	182,9	1,9	18,8	0,7	28,9	137,5	192,1	224,6	<b>1353,3</b>
1983	63,5	96,8	226,1	156,9	89,0	12,8	0,9	88,5	0,0	64,1	110,0	98,4	<b>1007,0</b>
1984	57,2	127,4	126,0	219,6	33,5	26,6	28,1	11,5	91,9	65,3	77,4	16,6	<b>881,1</b>
1985	56,9	48,8	76,7	98,8	126,8	24,8	1,9	29,8	36,1	9,7	23,7	115,3	<b>649,3</b>
1986	168,4	221,9	205,6	199,7	146,1	4,2	0,0	10,1	18,1	143,9	<b>53,8</b>	49,5	<b>1221,3</b>
1987	82,1	59,0	193,1	120,9	100,7	19,1	37,5	21,5	59,8	33,7	72,7	1,8	<b>587,8</b>
1988	126,1	114,6	37,4	280,2	25,9	79,3	2,2	9,9	91,1	44,1	<b>388,0</b>	60,5	<b>1259,3</b>
1989	189,9	98,4	231,4	42,8	90,5	73,9	14,9	5,0	74,7	122,5	94,4	110,8	<b>942,0</b>
1990	51,0	75,5	82,3	112,4	17,8	2,3	17,0	8,2	18,4	185,6	14,1	53,0	<b>637,6</b>
1991	102,9	38,8	146,8	52,7	164,2	25,0	56,3	0,0	36,3	3,7	98,8	132,2	<b>857,7</b>
1992	72,5	113,1	21,2	71,0	51,7	0,0	0,6	4,0	77,8	73,5	32,9	29,7	<b>548,0</b>
1993	123,1	209,8	257,7	184,2	50,2	0,0	0,0	0,0	62,2	55,8	86,2	153,9	<b>1183,1</b>
1994	291,1	181,9	353,3	115,6	65,0	1,9	0,0	9,2	0,0	83,9	131,1	126,8	<b>1359,8</b>
1995	27,8	69,0	195,3	112,7	120,3	41,7	48,5	17,9	21,7	150,4	148,7	18,0	<b>972,0</b>
1996	161,1	122,9	192,3	199,7	204,9	88,3	23,2	28,6	105,2	93,4	15,6	100,3	<b>1335,5</b>
1997	233,1	70,2	140,3	86,0	31,0	53,5	0,4	0,0	58,6	33,4	228,4	32,3	<b>967,2</b>
1998	13,8	131,5	116,8	142,4	82,1	30,9	50,9	71,8	41,0	88,2	66,6	6,9	<b>842,9</b>
1999	46,6	72,6	98,9	105,8	64,8	40,1	17,2	34,7	54,3	5,3	49,0	131,8	<b>721,1</b>
2000	127,6	192,9	162,2	185,0	134,4	40,9	18,5	1,2	83,0	6,8	3,0	68,3	<b>1023,8</b>
2001	61,5	87,1	141,6	15,0	39,5	2,8	49,9	0,0	44,9	1,9	44,8	117,6	<b>606,6</b>
2002	32,9	75,4	115,3	204,4	32,5	16,3	0,0	0,0	1,6	113,6	<b>162,3</b>	134,4	<b>888,7</b>
2003	37,2	104,0	117,9	233,8	11,4	20,3	6,4	0,0	30,5	58,2	62,0	51,2	<b>893,2</b>
2004	84,7	30,9	73,4	141,0	73,4	6,9	10,0	1,3	45,1	77,1	78,6	70,0	<b>692,4</b>
2005	82,6	177,4	117,3	51,0	31,4	17,9	4,5	10,0	26,0	20,2	45,1	87,3	<b>670,7</b>
2006	45,4	83,0	116,5	108,7	35,7	28,4	0,5	0,0	9,5	41,9	104,8	108,4	682,8
<b>MED</b>	95,0	114,7	152,8	147,5	77,5	25,4	19,8	16,5	45,5	68,6	89,1	81,8	917,2
<b>MAX</b>	291,1	250,0	353,3	351,5	204,9	88,3	127,7	88,5	120,9	185,6	388,0	224,6	1359,8
<b>MIN</b>	13,80	30,90	21,20	15,00	7,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	3,00	1,80	548,00

\* Valores que poseen negrita y cursiva son valores rellenados con la media mensual

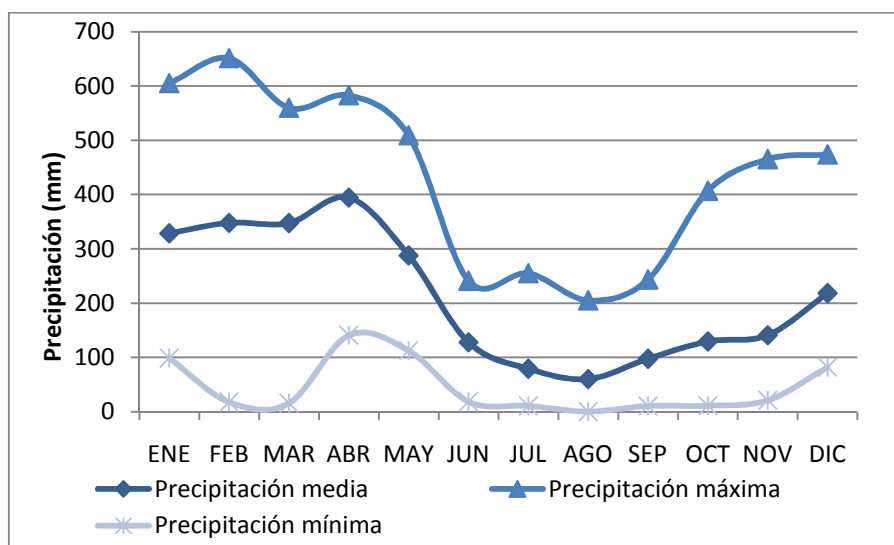
\* Valores sombreados fueron rellenados mediante una correlación con estaciones cercanas

FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

### Variación estacional de la precipitación

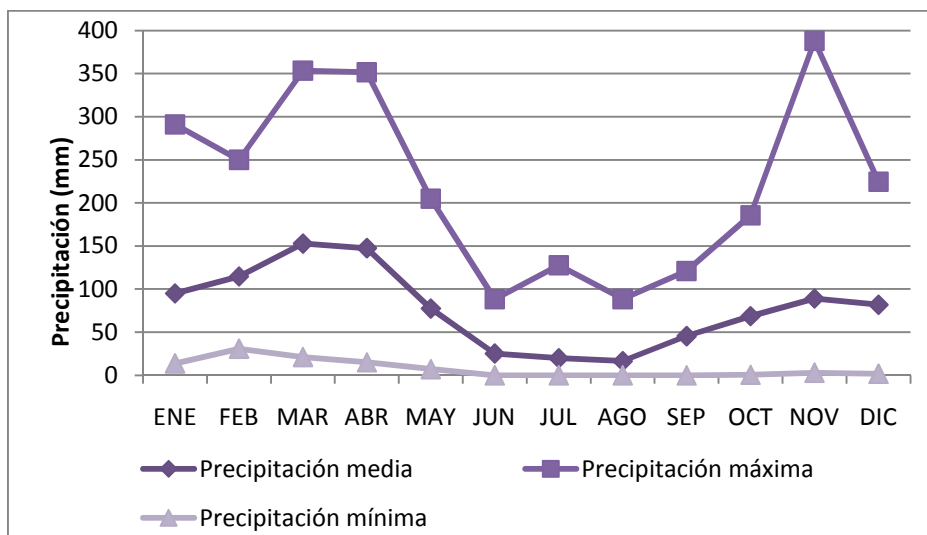
Los gráficos 6.1 y 6.2 muestran la variación estacional de las precipitaciones; la menor lluvia se registra entre los meses de junio a septiembre, mientras que entre octubre y mayo se puede observar la marcada temporada de lluvias.

**GRÁFICO 6.1 Variación estacional de la precipitación. Estación Nanegalito.**



FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

**GRÁFICO 6.2 Variación estacional de la precipitación. Estación Calacalí - INAMHI**

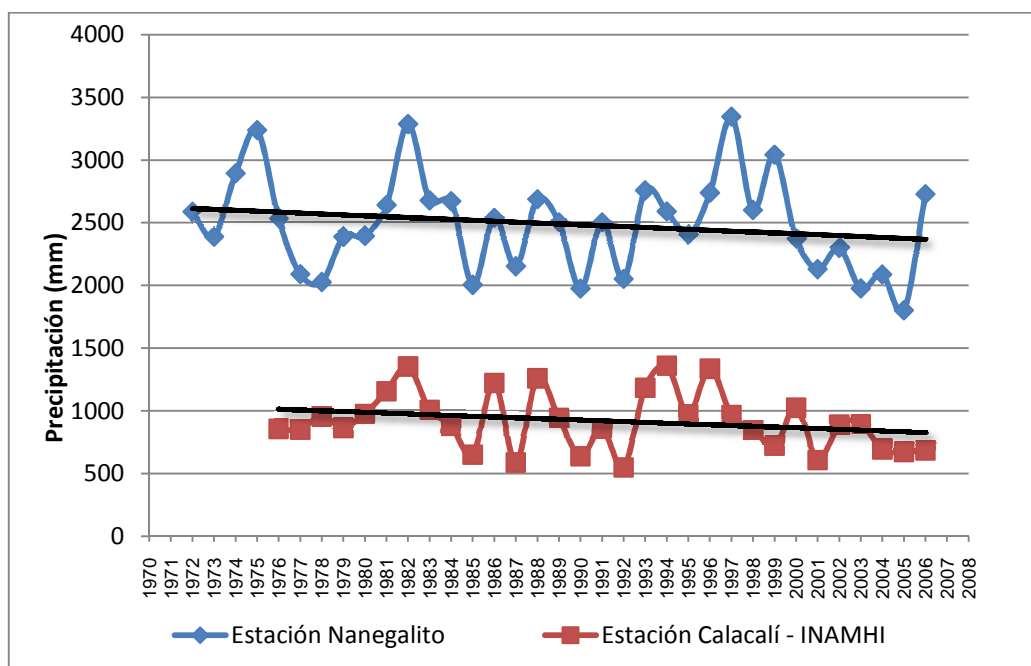


FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

### Variación interanual de la precipitación

El Gráfico 6.3 muestra la variación interanual de la precipitación en función de los registros de las 2 estaciones. La tendencia que se presenta es de cierto decrecimiento de las lluvias, principalmente en el período 2001-2006.

**GRÁFICO 6.3 Variación interanual de la precipitación**

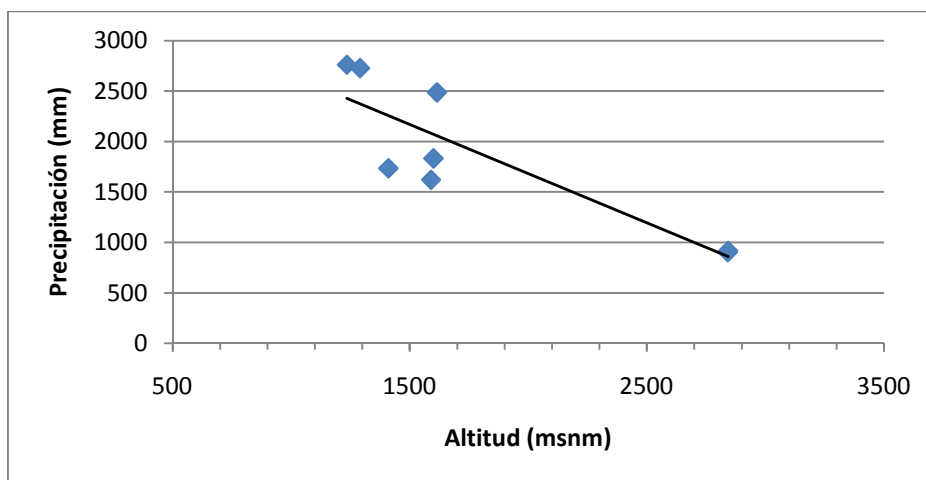


FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

### Variación altitudinal de la precipitación

En el Gráfico 6.4, se destaca la variación de la precipitación con la altitud en valores medios anuales. En este es posible apreciar un notable decrecimiento de las lluvias en función de la altitud, tendiendo a un gradiente de 130mm, por cada 100m aproximadamente.

Para esto se tomaron en cuenta las estaciones de las Tablas 6.8 y 6.9.

**GRÁFICO 6.4 Variación altitudinal de la precipitación**

FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

### Valores característicos de la precipitación

**TABLA 6.10 Valores característicos de la precipitación mensual y anual**

ESTACION	PRECIPITACION MENSUAL (mm)			PRECIPITACION ANUAL (mm)		
	MAX	MED	MIN	MAX	MED	MIN
NANEGALITO	651	213	0.3	3345	2488	1801
CALACALI-INAMHI	388	78	0.0	1360	917	548

FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

Se obtuvieron los valores característicos siguiendo el procedimiento detallado en el instructivo. En la Tabla 6.9 se pueden observar las estimaciones realizadas de donde se extrajeron los valores característicos para la estación Calacalí – INAMHI.

### Mapa de isoyetas

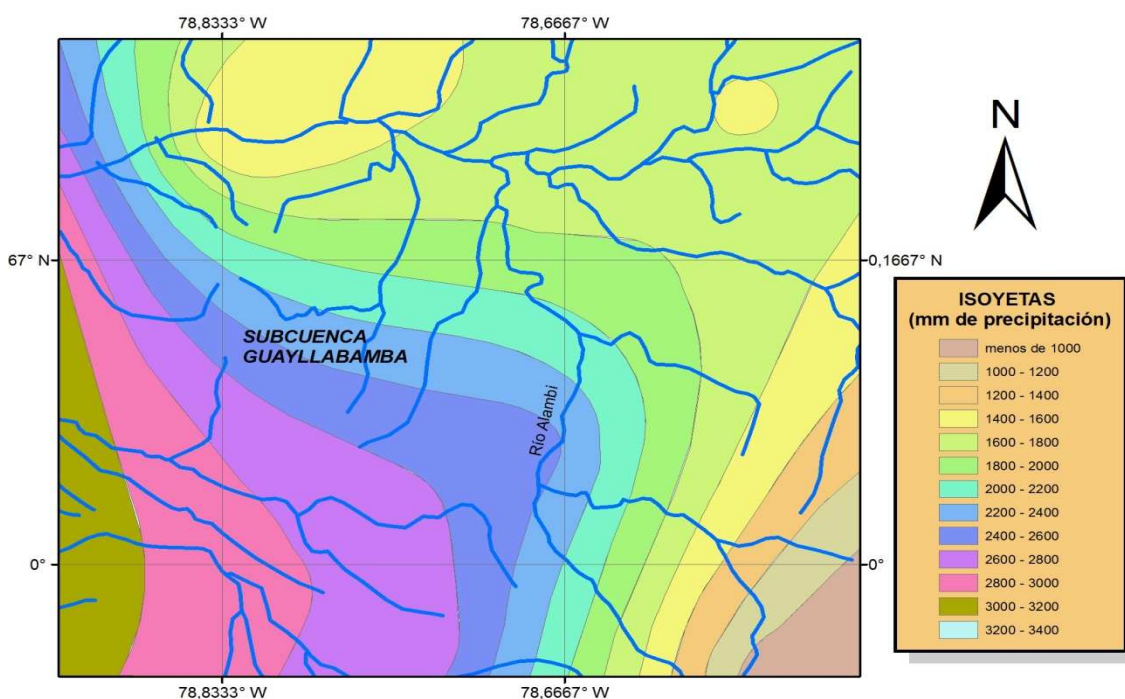
Para la elaboración del mapa, se aplica el programa llamado Surfer. Los datos necesarios corresponden a las precipitaciones medias anuales de las estaciones. Al poseer las coordenadas de las estaciones y los valores de las precipitaciones, el programa realiza una interpolación, en este caso el método escogido para la interpolación fue el método de Kriging, graficando de esta forma las isolíneas que representen niveles similares de precipitación, es decir las isoyetas.

Este gráfico tiene la facilidad de poder ser importado a AutoCad, en donde se pueden agregar detalles finales, o también, con el gráfico que resulte se lo puede trasladar a ArcGis.

Otra forma para realizarlo consiste en utilizar la herramienta de geoestadística de ArcGis, que a partir de una tabla de coordenadas con el dato de la precipitación, interpola los valores según el método que se escoja.

En este ejemplo, lo que se hizo fue obtener una imagen donde se encuentren graficadas las isoyetas del programa Surfer8, posteriormente se importó el gráfico a ArcGis, se georeferenció la imagen y se hizo una superposición de mapas, tal como se indica en la Figura 6.2.

**FIGURA 6.2 Isoyetas de la zona de estudio**



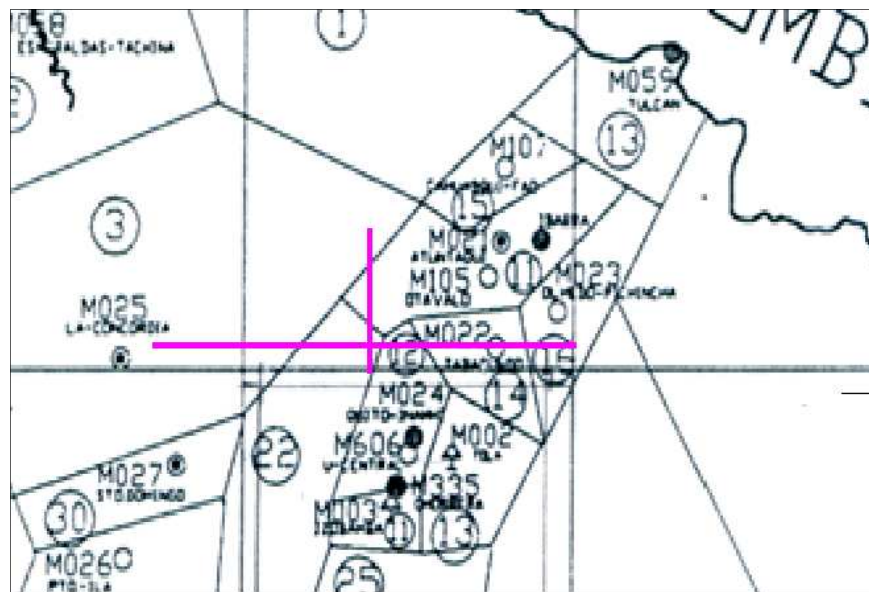
ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### Lluvias intensas

Basado en el procedimiento de Obtención de Lluvias Intensas, se han realizado los cálculos pertinentes para esta cuenca.

Dentro del Mapa de Zonificación (Anexo N°7) se ubicó al centroide de la cuenca, de tal manera que se identificaron las zonas de intensidades a la que pertenece tal como se puede observar en la Figura 6.3:

**FIGURA 6.3 Ubicación de la cuenca en estudio dentro del mapa de zonificación de intensidades.**



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

La cuenca hidrográfica en estudio se localiza en la ladera occidental de la Cordillera Occidental (Zona 22), definida por INAMHI para el estudio de las lluvias intensas. Las intensidades máximas diarias ( $I_{d,Tr}$ ) se determinan de los mapas en función del período de retorno correspondiente, los mismos que se encuentran en el Anexo N°7. de manera similar como se procedió al ubicar la zona.

En la Tabla 6.11 se incluyen los valores de intensidades en función de la duración de la lluvia y el período de retorno.

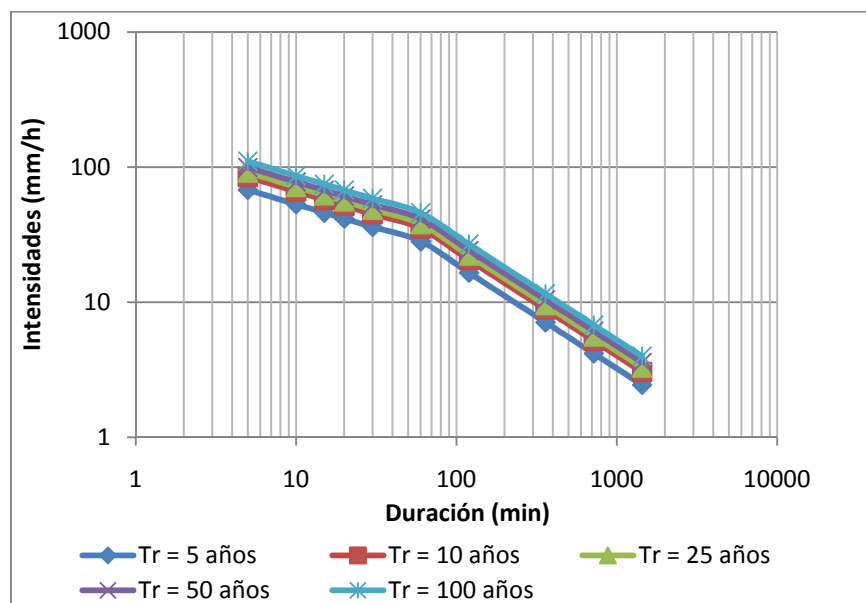
TABLA 6.11 Relaciones Intensidad – Duración - Frecuencia

PERIODO DE RETORNO (años)	INTENSIDADES (mm/h)									
	DURACION (min)									
	5	10	15	20	30	60	120	360	720	1440
5	67.67	52.97	45.90	41.47	35.93	28.13	16.47	7.08	4.16	2.44
10	84.24	65.94	57.14	51.62	44.73	35.01	20.51	8.81	5.17	3.04
25	91.15	71.35	61.83	55.85	48.40	37.88	22.19	9.54	5.60	3.29
50	99.43	77.83	67.45	60.93	52.80	41.33	24.21	10.40	6.11	3.58
100	110.48	86.48	74.94	67.70	58.66	45.92	26.90	11.56	6.79	3.98

FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

Estos valores finalmente son plasmados en un gráfico que representa la relación entre estas 3 variables. (Gráfico 6.5)

GRÁFICO 6.5 Relaciones Intensidad – Duración – Frecuencia para los distintos Periodos de Retorno



FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

## 6.5.2 TEMPERATURA

El análisis de la temperatura se realizó en base a los registros de la estación Meteorológica La Perla (M213), ubicada en la parte baja de la cuenca. El periodo

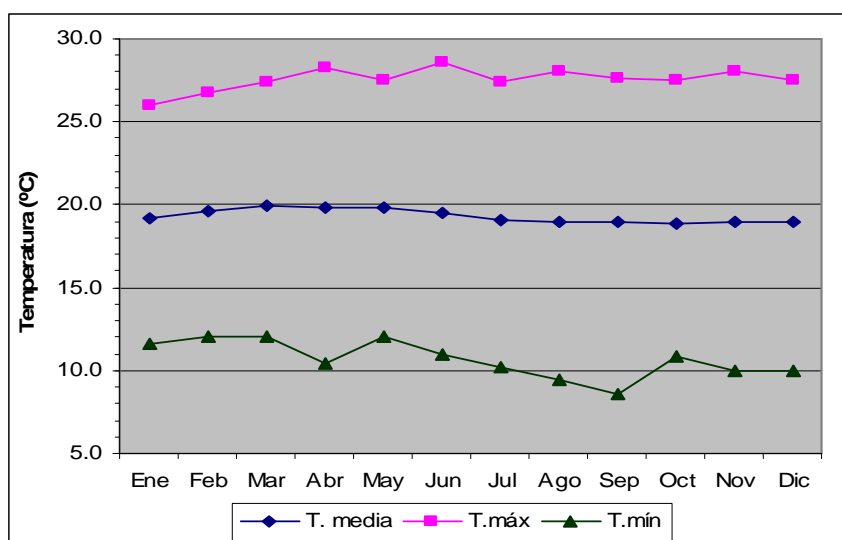
de datos se homogenizó a los años 1982 – 1992, en función de la disponibilidad de información.

### Variación estacional

El Gráfico 6.6 muestra la variación estacional de la temperatura media, máxima y mínima Absoluta. Las máximas temperaturas para este sitio fluctúan entre 26 °C y 30 °C, en tanto que las temperaturas mínimas están en el rango 10 °C - 12 °C. La temperatura media al interior del año varía entre 18 °C y 20 °C.

En general se concluye que no existe variación importante de la temperatura al interior del año en la estación (menor a 2 °C); mas sí es considerable la variación altitudinal de las temperaturas medias y extremas.

**GRÁFICO 6.6 Variación Estacional de la Temperatura. Estación La Perla**



FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

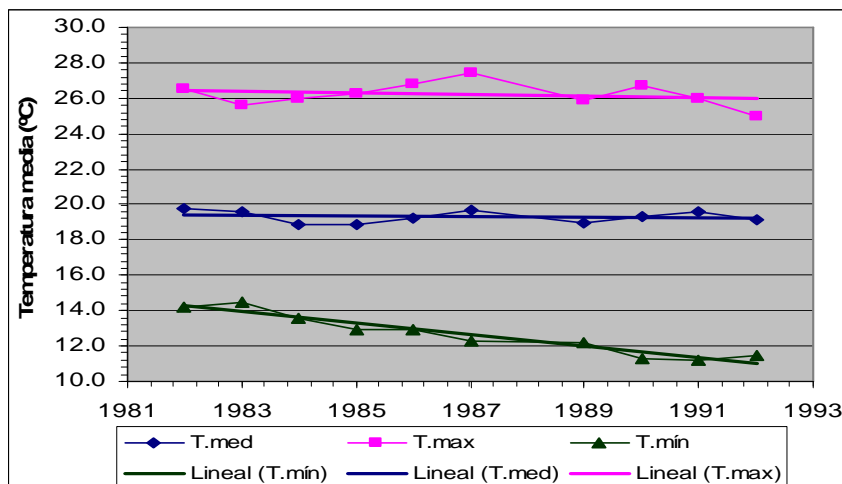
### Distribución Interanual

La distribución interanual de la temperatura (Gráfico 6.7) es leve, llegando a valores del orden de 1 °C. En cuanto a la Temperatura Máxima Absoluta, se destaca que en los últimos años de registro tiende a disminuir a valores menores a los 26 °C, con un pico de aproximadamente 29 °C en el año 1985.



Se destaca el decrecimiento de la Temperatura Mínima Absoluta desde 14 °C hasta los 11 °C, en el período de aproximadamente 20 años.

**GRÁFICO 6.7 Variación Interanual de la Temperatura. Estación La Perla**

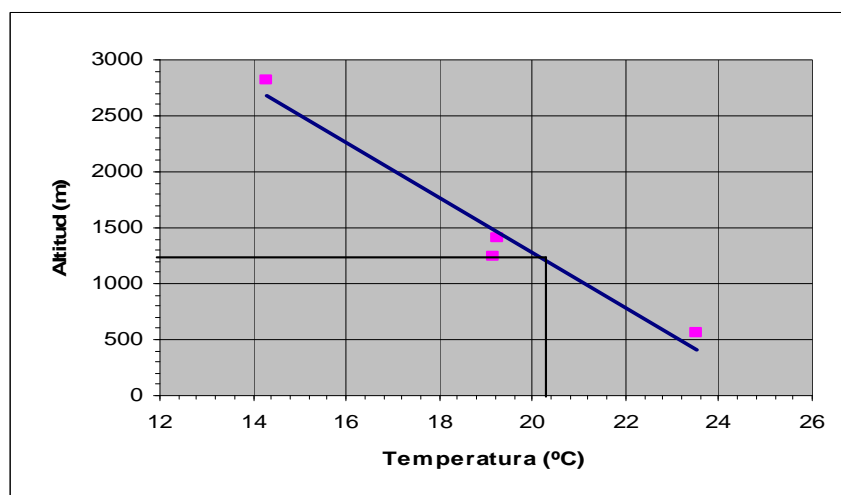


FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

### Variación Estacional

En el Gráfico 6.8 se aprecia el gradiente de temperatura respecto a la altitud, en término de 0.4 °C de disminución por cada 100 m de incremento en altitud.

**GRÁFICO 6.8 Variación Altitudinal de la Temperatura**



FUENTE: (EPN - MEER, 2008)

Las demás variables presentadas en la metodología de este instructivo es imposible determinar debido a la falta de información dentro de los anuarios, la misma que ha sido imposible rellenar debido a la gran extensión de datos faltantes y heterogeneidad de las series existentes. (Ver Capítulo 8)

### **6.5.3 PROGRAMA “SISTEMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA – EPN”**

En el 2008, se presentó el proyecto de titulación “*Sistema de Información para la interpolación espacial y temporal de datos sobre el tiempo atmosférico y el clima del Ecuador*”, el mismo que permite generar información meteorológica en valores mensuales para cualquier sitio geográfico del territorio continental ecuatoriano.

Se utilizan tres modelos de interpolación: Inverse Distance Weighted (IDW), Modificado de Shepard y Kriging Ordinario. Las variables seleccionadas fueron la precipitación y temperatura de 126 estaciones climatológicas a nivel nacional.

Aparte de lo mencionado, este programa puede ser utilizado para encontrar las estaciones climatológicas más cercanas a una coordenada geográfica o decimal.

Esta herramienta resulta útil para los estudios, siendo el limitante la base de datos de 6 años, la cual puede ser ampliada o modificada, ya que esta interpolación es de utilidad para variables aleatorias incluyéndose en estas los caudales.

Con el fin de realizar una comparación, con las estaciones que se cuenta en la base de datos original del programa, se obtendrá la variación estacional y variación interanual de temperatura y precipitación para la cuenca del río Alambi.

Para esto, se escoge un tipo de coordenadas. El programa permite trabajar con coordenadas geográficas y en grados decimales al hacer clic en el menú Archivo.

Una vez seleccionado, se despliega una ventana donde se debe introducir la coordenada para la cual se desea hacer la interpolación (Ver Figura 6.5). Para

proyectos específicos y cuencas hidrológicas, se deben tomar las coordenadas del centro de la misma.

**FIGURA 6.4 Ventana para introducción de coordenadas y búsqueda de las estaciones climatológicas más cercanas del Programa “Sistema de Información Climático”**

Calculo de Distancia - Coordenadas Geográficas

Latitud: 0 ° 5 ' 54 " Norte  Altura:  Distancia: Entre: 0 y 50

Longitud: 78 ° 39 ' 24 " Oeste

Codigo	Nombre	Altitud	Distancia	Latitud	Hemisferio	Longitud	Meridiano
<input checked="" type="checkbox"/>	M001 Inguincho	3185	19,768212	0,2583333	Norte	78,73416667	Oeste
<input checked="" type="checkbox"/>	M002 La Tola	2480	48,664107	0,2294444	Sur	78,36666666	Oeste
<input checked="" type="checkbox"/>	M024 Quito INAMHI	2812	35,20996	0,1666667	Sur	78,48333333	Oeste
<input checked="" type="checkbox"/>	M105 Otavalo	2556	46,781922	0,2377778	Norte	78,25972222	Oeste
<input checked="" type="checkbox"/>	M111 Malchinguí INA...	2840	36,388471	5,555555E-02	Norte	78,33222222	Oeste
<input checked="" type="checkbox"/>	M114 Tumbaco	2348	45,703788	0,2333333	Sur	78,41388889	Oeste
<input type="checkbox"/>	MA2T Tomalon - Tab...	2790	47,623737	3,333333E-02	Norte	78,23333333	Oeste
<input checked="" type="checkbox"/>	MB74 Pomasqui	2402	28,286551	0,05	Sur	78,45	Oeste
<input type="checkbox"/>	A12 Aeropuerto Quit...	2811	33,069173	0,1433333	Sur	78,48333333	Oeste

Método Interpolación: IDW

FUENTE: (Moreano, 2008)

En la figura anterior, se han introducido las coordenadas para la cuenca del río Alambi. En esta ventana es posible encontrar las estaciones más cercanas a este punto al hacer clic en *Buscar*. El programa cuenta con filtros tanto de distancia, como de altura. La ventana de coordenadas geográficas en forma decimal tiene la misma forma y funciones que la ventana de Coordenadas Geográficas.

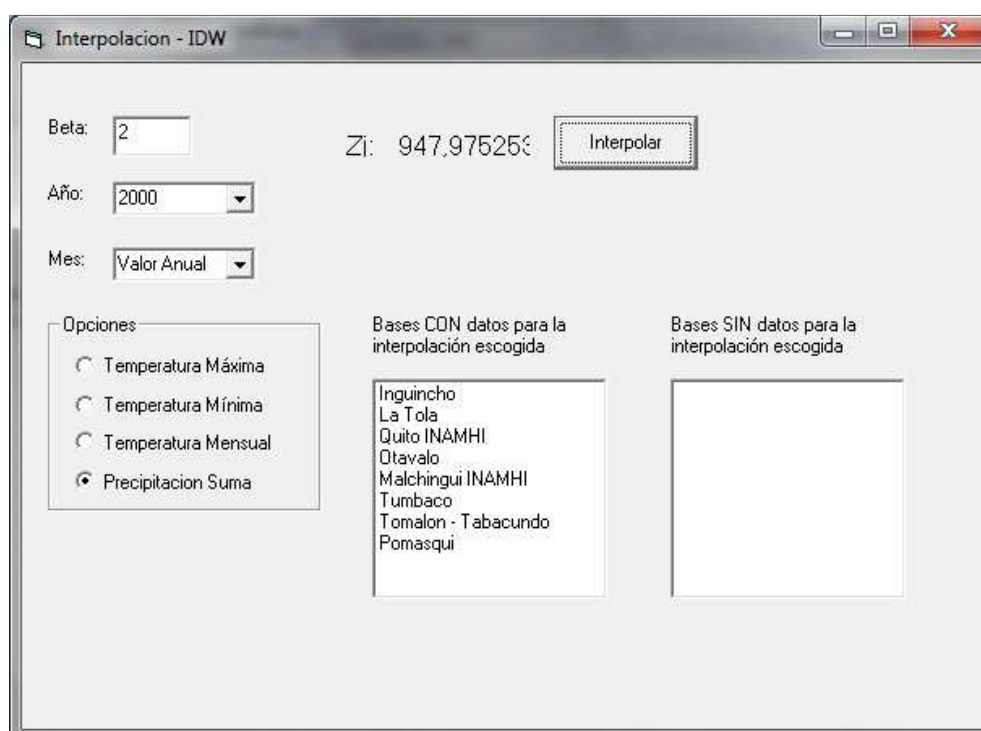
La base de datos existente, no posee todas las estaciones que han publicado información, por lo que al ingresar las coordenadas no aparecen aquellas escogidas para el procesamiento de datos del ejemplo de este instructivo, sin embargo, con la ampliación de la misma, el programa funcionará perfectamente.

La selección de las estaciones se puede hacer de manera individual haciendo clic en el cuadrado a la izquierda del código de cada estación, o de forma total, haciendo clic en el botón *Seleccionar Todo*. Una vez escogidas las estaciones, se

selecciona el método de interpolación en el menú inferior izquierdo y se presiona el botón *Interpolar*. (Moreano, 2008)

En este ejemplo hemos seleccionado el IDW para la interpolación de datos de precipitación, y el Método de Kriging Ordinario para la interpolación de datos de temperatura, siendo los recomendados por el autor para estos fines.

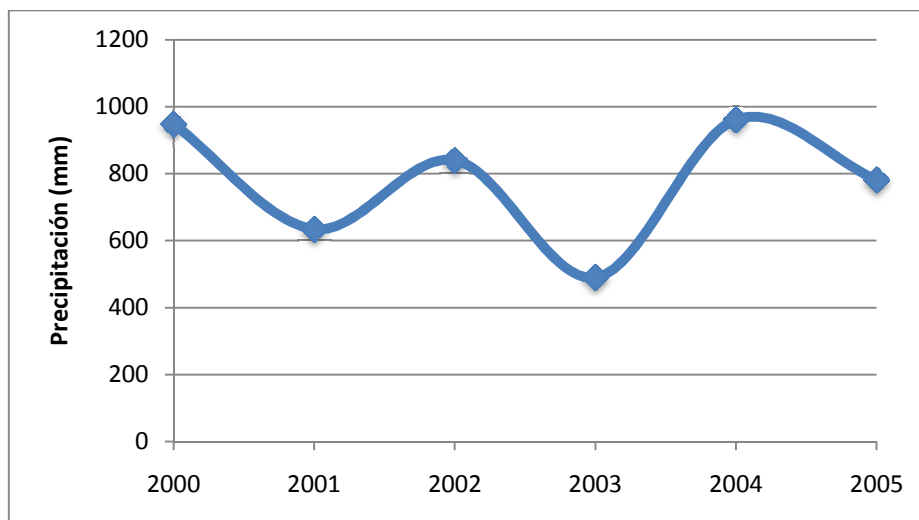
**FIGURA 6.5** Ventana de la interpolación con el método IDW para la obtención de valores de precipitación para la cuenca en estudio



FUENTE: (Moreano, 2008)

A partir de la interpolación IDW del valor anual de precipitación, como se puede ver en la Figura 6.6, se obtiene un valor para el año 2000 entre todas las estaciones escogidas que representa la precipitación anual del centro de la cuenca. Lo mismo se hace para los años 2001, 2002, 2003, 2004 y 2005. A partir de estos datos se puede hacer el gráfico de la variación interanual de la precipitación, el mismo que incluye ya el análisis regional al tomar en consideración varias estaciones con distinta ubicación (Gráfico 6.9).

**GRÁFICO 6.9** Variación interanual de la precipitación para la cuenca en estudio aplicando el Método de Interpolación IDW del Software “Sistema de Información Climática EPN”.



FUENTE: Moreano, 2008

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Al ampliar la base de datos, se podrá realizar este gráfico con el tamaño de la serie sugerida en este instructivo, y con ello facilitar la realización de este tipo de estudios.

## **CAPÍTULO 7**

### **CÁLCULO DE AFOROS LÍQUIDOS Y ELABORACIÓN DE CURVAS DE DESCARGA**

#### **7.1 OBJETIVO**

El caudal o volumen de agua que drena por la sección transversal de una corriente, en la unidad de tiempo, se determina mediante una serie de operaciones de campo que constituyen lo que se llama un aforo. Dicho caudal depende directamente del área de la sección transversal de la corriente ( $A$ ) y de la velocidad media del agua ( $V$ ), obteniendo el caudal por la multiplicación de estos dos factores.

Existen varios procedimientos de campo que se aplican dependiendo fundamentalmente de las condiciones hidráulicas del tramo de río, de la disponibilidad del instrumental y estructuras de medición y del entrenamiento del personal.

Debido a la influencia de alguna de estas limitaciones no es posible ejecutar el aforo por Área y Velocidad, se recurre a otros métodos que se mencionan a continuación.

Los procedimientos de cálculo varían dependiendo del tipo de aforo realizado, y aunque este instructivo no abarca todos ellos, se los mencionará para conocer cuántos métodos hay para el aforo de corrientes de agua con superficie libre, estos son:

- Métodos de Sección y Velocidad
  - Molinete hidráulico
  - Pendiente hidráulica
  - Flotadores
  - Medidores acústicos de flujo
  - Molinetes óptimos
  
- Métodos Químicos
  - Métodos por velocidad de sales
  - Método por disolución de sales
  - Métodos de velocidad por color
  - Método por disolución de colorantes de fluoresceína
  
- Canal Medidor Parshall
  
- Vertederos y Orificios

Aún no es posible la medición continua del caudal por lo que se suelen realizar mediciones cada cierto intervalo de tiempo para determinar la relación entre el nivel y caudal en una estación de aforo, y con los valores que arrojen estas mediciones, se realizan la curva de gastos, curva de calibración o curva de descarga. (IDEAM, 1999)

La obtención de curvas de descarga en las estaciones hidrométricas es una de las tareas principales en hidrología debido a que de ello dependen la correcta estimación del volumen de escorrentía superficial de una cuenca hidrográfica y la cuantificación de los caudales característicos medios y extremos necesarios a un proyecto hidráulico. (Villacís & Andrade, 1986)

## 7.2 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE AFOROS

Se describe un ejemplo de cálculo de aforos más comúnmente usado en nuestro medio y aplicable para trabajos de campo. En este instructivo se omitirá el detalle acerca de los métodos químicos, secciones de control, y aforo con flotadores.

### 7.2.1 AFOROS CON MOLINETE (RELACIÓN SECCIÓN – VELOCIDAD)

El aforo de caudales mediante molinete es el método más conveniente, exacto y económico y sea que el aforo haya sido hecho por vadeo, cable o carro desde un puente o desde un bote y haya sido practicado, en forma completa, por el método de los dos puntos, por el método de 0,6 de la profundidad o por el método de la velocidad superficial. El cálculo es básicamente el mismo, esto es, aplicar la ecuación de continuidad.

$$Q = (A * V) \quad (7.1)$$

En donde:

Q = Caudal aforado, (m<sup>3</sup>/s);

A = Área de la sección transversal en el sitio de medición, (m<sup>2</sup>); y

V = Velocidad medio del flujo por la sección transversal, (m/s)

#### **Cálculo del aforo completo por puntos**

Corresponde al aforo más preciso y su cálculo se describe a través del uso de tres formularios.

- El primer formulario es la hoja de campo del aforo y contiene los datos básicos. (Formulario N° 4 del Anexo N°2)
- El segundo formulario se lo llena en base al anterior pero solo cuando el aforo tiene arrastre y/o esviamiento. (Formulario N° 5 del Anexo N°2)



- El tercer formulario es el que contiene los cálculos finales del aforo y se lo completa en base a los dos anteriores. (Formulario N° 6 del Anexo N°2)

#### **FORMULARIO N° 4**

Es un formulario que se llena durante las operaciones de campo. Se incluyen algunas explicaciones del mismo que facilitan las tareas de cálculo posteriores. (El formulario del ejemplo pertenece al INAMHI).

- La primera columna indica la distancia (en metros) que hay desde el cero del abscisado (normalmente en la orilla izquierda, O.I.) hasta la vertical que se afora.
- La segunda columna indica el calado de agua en la abscisa aforada.
- La tercera columna es usada cuando hay arrastre e indica la distancia vertical que hay desde el punto de suspensión del molinete hasta la superficie del agua.
- La cuarta columna es también usada en el caso de arrastre e indica la profundidad de agua pero afectada del arrastre.
- La quinta columna indica el ángulo de arrastre que el cable de suspensión del molinete hace con la vertical (en el punto de suspensión) y es medido en el instante que el escandallo ha tocado fondo.
- La sexta columna indica la profundidad medida desde la superficie hasta cada punto de la vertical en el que se mide la velocidad con el molinete.
- La séptima columna indica el número de intervalos marcados por el contador del molinete (en forma acústica o digital) en cada punto de la vertical en que se mide la velocidad. Cada intervalo representa 1, 2, 5 ..., etc. revoluciones

completas de la hélice (o copas) del molinete, según la calibración que se haya adoptado al hacer la medición con molinete.

- La octava columna indica el tiempo utilizado para la medición de la velocidad en cada punto de la vertical.
- La novena columna indica cualquier observación que pueda servir de ayuda para el cálculo y validez del aforo.

Se aclara que el formato descrito puede variar de acuerdo a la institución que hace el aforo, pero de manera general contemplan las mismas variables.

### **FORMULARIO N°5**

Se llena este formulario en el caso de que el aforo tenga arrastre (es decir, que el molinete sea arrastrado hacia aguas abajo debido a la velocidad del agua) y/o el molinete no mida la velocidad perpendicular a la sección transversal y debido a condiciones del flujo la mida en forma oblicua (esviajamiento). (Figura 7.1 b)

Las columnas 1 a la 8 se refieren a correcciones de la altura de agua y la 9 y 10 a corrección de la velocidad, así:

- La primera columna es igual a la del formulario anterior

La segunda columna indica la distancia entre el punto de suspensión del cable del aforo (punto A de la Figura 7.1) y la superficie del agua (distancia 'a').

- La tercera columna indica el ángulo vertical ' $\alpha$ ' que forma con la vertical el cable de aforo, cuando éste siendo arrastrado por la corriente, ha tocado fondo con el cable tirante. Se mide una sola vez en esta posición para cada vertical de aforo.
- La cuarta columna indica el "largo del cable sumergido", se identifica como  $h_f$  y es igual a (Ver Figura 7.1 b):

$$h_f = \Delta a + \Delta h + h$$

- La quinta columna contiene la corrección del cable en el aire ( $\Delta a$ ) y que puede ser tomada de la tabla N°1 a la que se entra con la distancia ( $a$ ) y el ángulo ( $\alpha$ ). También puede ser calculada analíticamente con:

$$\Delta a = a * \left( \frac{1}{\cos(\alpha)} - 1 \right)$$

- La sexta columna contiene la corrección  $\Delta h$  para el cable sumergido y se ha obtenido de la Tabla de correcciones, a la que se entra con la distancia ( $a$ ) y el ángulo ( $\alpha$ ) de la tercera columna.
- La séptima columna indica la profundidad real del agua (si no hubiese arrastre) y se la calcula con la fórmula:

$$h = h_f - (\Delta a + \Delta h)$$

- La octava columna indica la profundidad de cada observación ya corregida. Estas profundidades parciales ( $h_p$ ) en cada vertical se corrigen proporcionalmente a la corrección total, es decir

$$(h_p)_{corr} = \left( \frac{h}{h_f} \right) * h_p$$

NOTA: Las correcciones anteriores se hacen siempre que el ángulo ( $\alpha$ ) sea mayor que  $7^\circ$

Para el cálculo del aforo propiamente dicho, en el Formulario N°6 no es necesario el cálculo de la columna (8), el que se hará siempre que se desee dibujar la distribución vertical de las velocidades en cada abscisa aforada.

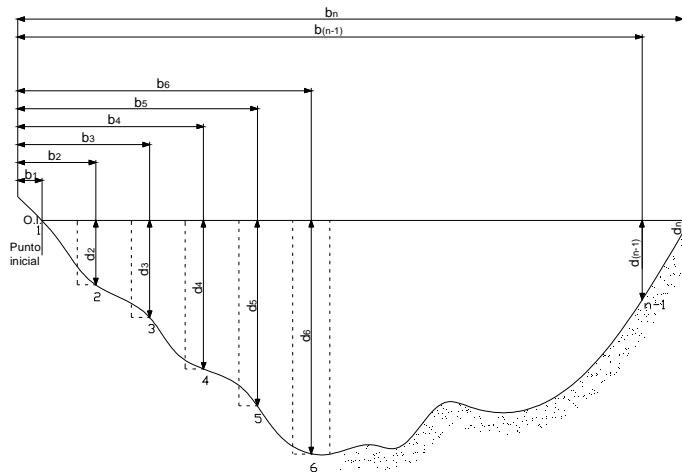
- La novena columna da el ángulo que forman la corriente y la perpendicular al cable de aforo ( $\beta$ )
- La décima columna da el factor de correlación por el que debe multiplicarse la velocidad medida para obtener la componente de la velocidad perpendicular a la sección transversal del río. Se lo calcula analíticamente con:

$$\Delta V = \cos(\beta)$$

Posteriormente se trabajara con las columnas (7) del “Profundidad real”, (10) de “factor de correlación  $\Delta V$ ” y eventualmente con la columna (8) de “Profundidad de la observación”

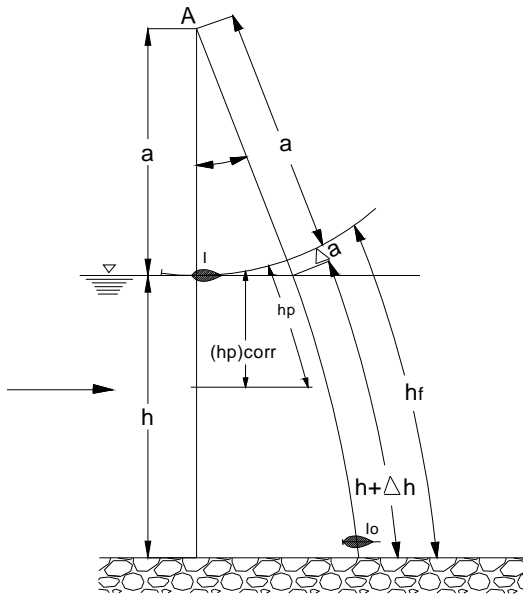
**FIGURA 7.1**

**a. Sección transversal del río aforado**



1,2,3 .... n.	Abcisas aforadas
$b_1, b_2, b_3 \dots b_n$ .	Distancia, en metros, desde el punto inicial al punto que se afora
$d_1, d_2, d_3 \dots d_n$	Altura de agua, en metros, en la abscisa aforada.
Líneas cortadas	Límite de las secciones parciales

### b. Vista de perfil del aforo con molinete en un río.



$l$  = Punto de coincidencia del eje del molinete coaxial

con el nivel del agua

$l_o$  = Punto de tope del escandallo con el fondo

$a$  = Distancia vertical entre el punto de suspensión del cable y superficie del agua

$h$  = profundidad real del agua

$h_p$  = profundidad medida

$\Delta a$  = Error de longitud del cable en el aire

$\Delta h$  = Error de longitud del cable sumergido

$A$  = Punto de suspensión

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

FUENTE: Villacís & Andrade, 1986.

### FORMULARIO N° 6

Este formulario es el que contiene el cálculo final del aforo

- La primera columna es igual a los dos formularios anteriores;
- La segunda columna es igual a la N° 2 del Formulario N°4;
- La tercera columna es igual a la sexta columna del Formulario N°4;
- La cuarta columna es usada en caso de aforo con arrastre y es igual a la séptima columna del Formulario N° 5;
- La quinta columna es el valor calculado de "n", que es el número de revoluciones de la hélice del molinete en un segundo. Este valor se lo obtiene del formulario N°4, de la siguiente forma:

$$n = \frac{(\# \text{ intervalos}) * (\# \text{ de vueltas por intervalo})}{t}$$

Donde,

T = tiempo, (s).

$$n = \frac{(\text{columna 7}) * (\# \text{ de vueltas por intervalo})}{(\text{columna 8})}$$

- La sexta columna indica la velocidad puntual en cada punto de la vertical. Se obtiene utilizando la ecuación de calibración del molinete que corresponde al valor de “n”;

La ecuación varía de acuerdo al tipo de molinete, a la hélice usada y el peso del escandallo, pero en general tienen la forma:

$$V = a * n + b \quad (7.2)$$

En donde:

V = velocidad, (m/s);

n = número de revoluciones por segundo; y,

a,b = constantes de calibración de la hélice.

- La séptima columna indica la velocidad media en cada vertical que puede ser calculada a través de un método gráfico o analítico.

### **Método gráfico**

Se dibuja en papel milimetrado los valores señalados en las columnas 3 y 6. Es decir, se trazarán dos ejes perpendiculares entre sí, que se crucen en el extremo superior izquierdo de la hoja, llevando sobre el eje horizontal, una escala que

represente las velocidades en (m/s) y sobre el vertical de arriba hacia abajo, las profundidades en metros.

### **Método analítico**

Este segundo método se lo define en función de los datos de las columnas 1, 3 y 6 de formulario N° 6

En este se obtiene el área de velocidades ( $A_v$ ) que dividida por la profundidad total ( $d_o$ ) resulta en la velocidad media de la vertical ( $V$ ). (Figura 7.1.a)

- La octava columna indica la velocidad ajustada debido a la oblicuidad del flujo con respecto a la sección transversal. Aquí se anotan los valores de la columna 7 de este formulario multiplicados por los correspondientes valores de la columna 10 del formulario N° 5. (caso de flujo no perpendicular a la sección transversal y cuando el ángulo de esviajamiento sea mayor de 70).
- La novena columna indica el área de cada sección transversal parcial. Como cada sección está asociada a su respectiva velocidad y las dos a la vez, al caudal parcial escurrido, es conveniente dar una explicación algo detallada acerca del método utilizado y que se denomina la “semisección”
  - En este método se asume que la velocidad media en cada vertical representa la velocidad media como un área rectangular parcial
  - Esta área se extiende lateralmente desde la mitad de la distancia de la abscisa anterior, a la mitad de la distancia que hay hasta la abscisa posterior, y verticalmente desde la superficie del agua hasta el fondo de la vertical aforada.
  - La sección transversal está definida por las alturas de agua en las abscisas 1, 2, 3, 4, ..., n.

- El caudal parcial se lo calcula en cada sección parcial de abscisas “x” como:

$$q_x = V_x * \left( \frac{b_x - b_{(x-1)}}{2} + \frac{b_{(x+1)} - b_x}{2} \right) * d_x$$

$$q_x = V_x * \left( \frac{b_{(x+1)} - b_{(x-1)}}{2} \right) * d_x \quad (7.3)$$

En donde:

$q_x$  = caudal a través de la sección parcial ‘x’

$V_x$  = velocidad media en la abscisa ‘x’

$b_x$  = distancia del punto inicial a la abscisa ‘x’

$b_{(x-1)}$  = distancia desde el punto inicial a la abscisa anterior

$b_{(x+1)}$  = distancia desde el punto inicial a la abscisa posterior

El procedimiento es similar cuando la abscisa ‘x’ está en alguna de las orillas. La “abscisa anterior” al comienzo de la sección transversal es considerada coincidente con la abscisa 1, la “abscisa siguiente” al final de la sección transversal es considerada coincidente con la abscisa ‘n’. Así:

$$q_1 = V_1 * \left[ \frac{b_2 - b_1}{2} \right] * d_1, y q_n = V_n * \left[ \frac{b_n - b_{(n-1)}}{2} \right] * d_n \quad (7.4)$$

### **Cálculo del aforo en el método de la velocidad superficial**

Este método se lo utiliza en caso de crecidas o cuando no es necesario mucha precisión. En este caso la velocidad es observada cerca de la superficie del agua y la profundidad total de la vertical se la toma con el escandallo y sin el molinete.



Cuando no es posible fondear el río se toma la sección transversal obtenida en niveles bajos.

El dato de campo se presenta en el formulario de campo (Formulario N°4) y se lo calcula con los Formularios N° 5 y N° 6.

Al llenar el Formulario N° 6, en la columna 7 se anota la velocidad media en la vertical como la obtenida multiplicando la velocidad superficial por un coeficiente; generalmente se escoge un solo coeficiente para todas las verticales.

El coeficiente puede obtenerse de dos maneras:

- Adoptando el valor  $\bar{\beta} = 0,85$  cuando no se dispone de aforos anteriores;
- O, si se dispone de aforos anteriores realizados por el método completo, se procede en primer lugar a determinar (si aún no ha sido hecho), la relación de  $\bar{\beta}$  con la altura limnimétrica.

$$\beta_i = \frac{\text{Velocidad media en la vertical}}{\text{Velocidad superficial en la vertical}} \quad (7.5)$$

Siendo:

i = número de la vertical

Así para cada aforo se tiene  $\bar{\beta}$  con la fórmula:

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n}{n} \quad (7.6)$$

Entonces se grafica los valores  $\bar{\beta}$  vs. Altura limnimétrica respectiva. De este gráfico se obtiene el valor de  $\bar{\beta}$  por el que se multiplica la velocidad superficial

$$V_{media} = \bar{\beta} * V_{superficial} \quad (7.7)$$

### **Cálculo del aforo con el método de los dos puntos**

En este caso la medición de las velocidades ha sido hecha en dos puntos de cada vertical localizados a 0,2 y 0,8 de la profundidad total medidos desde la superficie.

Igualmente, para el cálculo del aforo se utiliza los mismos formularios indicados anteriormente con la diferencia de que el cálculo de la velocidad media en cada vertical (columna 7, Formulario N° 6), se la calcula más simplemente con la fórmula:

$$V_m = \frac{V_{0,2} + V_{0,8}}{2} \quad (7.8)$$

### **Cálculo del aforo con el método de 0,6 de la profundidad**

En este método la velocidad ha sido medida a los 6/10 de la profundidad, contado a partir de la superficie del agua hacia el fondo.

Para el cálculo del aforo se utilizan los mismos formularios indicados previamente con la excepción de que en la columna 7 del Formulario N° 6 se pone directamente la velocidad puntual de la columna 6. Este procedimiento se basa en que a la profundidad citada, la velocidad del agua es muy semejante a la velocidad media de la vertical en que se está haciendo la observación. (Propiedad de la distribución parabólica de velocidades)

$$V_m = V_{0,6} \quad (7.9)$$

### **Cálculo del aforo con el método de los tres puntos**

La velocidad se ha medido a los 2/10, 6/10 y 8/10 de la profundidad medidos desde la superficie. Igualmente se usan los formularios de cálculo ya indicados y la velocidad media se la calcula promediando en primer lugar las velocidades a 0,2 y 0,8 y luego se promedia este resultado con la velocidad a 0,6.

$$V_m = \left( \frac{V_{0,2} + V_{0,8}}{2} + V_{0,6} \right) / 2 \quad (7.10)$$

### **7.2.2 RELACIÓN SECCIÓN – PENDIENTE**

#### **Cálculo del aforo en el método Área – pendiente hidráulica**

Este método es usado para el cálculo de picos de crecida y consiste en usar la pendiente de la superficie del agua, en un tramo uniforme de canal, y el área transversal promedio de aquel tramo para dar el caudal escurrido.

El caudal puede ser calculado a partir de la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * J^{\frac{1}{2}} * A \quad (7.11)$$

En donde:

Q = Caudal, (m<sup>3</sup>/s);

n = coeficiente de rugosidad que dependen de la naturaleza del cauce. (Este valor puede ser obtenido en tablas o a partir de los aforos de la estación hidrométrica más cercana);

J = Pendiente de la superficie del agua = (Desnivel del tramo / longitud del tramo);

R = Radio hidráulico medio del canal, (m) = (A/P);

A = Área mojada media de la sección trasversal del caudal del río, (m<sup>2</sup>); y

P = Perímetro mojado de la sección transversal, (m)

Los datos necesarios para el cálculo provienen:

- De un levantamiento topográfico del tramo apropiado del río y realizado lo más pronto posible, luego de la crecida. Básicamente, se proporcionan distancias horizontales entre perfiles transversales del río y el desnivel entre las mismas (trazas de crecidas).
- De un levantamiento batimétrico que proporciona las secciones transversales en los perfiles (área por encima del nivel del agua y por debajo)
- De observaciones de campo referentes a ciertas características del cauce tales como material del lecho y orillas, tipo de vegetación, etc.

### **7.2.3 SECCIÓN DE CONTROL**

#### **Cálculo del aforo en estructuras hidráulicas**

Se refiere especialmente a vertederos y al canal medidor Parshall, usados en aguas con muy poco calado y bajas velocidades, donde usualmente los otros métodos son imprecisos.

Sus cálculos obedecen a ciertas leyes de la hidráulica cuyas descripción más detallada es posible encontrarla en bibliografía de temas hidráulicos.

## **7.3 DETERMINACIÓN DE CURVAS DE DESCARGA EN RÍOS**

### **7.3.1 DEFINICIONES**

#### **Forma General de la Curva de descarga**

La curva de descarga de un río puede ser una relación única entre nivel de agua y caudal, o bien, para una relación compleja del flujo, puede estar compuesta de

varios tipos de relaciones, en cuyo caso la descarga se define en función no sólo del nivel sino también de la pendiente u otra variable.

Generalmente, las curvas de descarga en la gran mayoría de estaciones hidrométricas consisten de relaciones no sólo entre el nivel y caudal, es decir  $Q = f(h)$  y son usualmente determinadas experimentalmente a partir de mediciones directas de caudal y nivel de agua (aforos)

Si el caudal medido es graficado contra la altura de agua concurrente (en papel milimetrado), los datos definirán una curva que es aproximadamente parabólica y tangente al eje de las ordenadas y que matemáticamente se la expresa por la siguiente ecuación potencial:

$$Q = K(h - h_0)^m \quad (7.12)$$

En donde:

$Q$  = es la descarga que se quiere estimar, ( $m^3/s$ );

$K$  = es un parámetro de la ecuación determinado a partir de los aforos y cuyo valor es igual al caudal que pasa cuando la carga de agua ( $h - h_0$ ) es igual a 1.

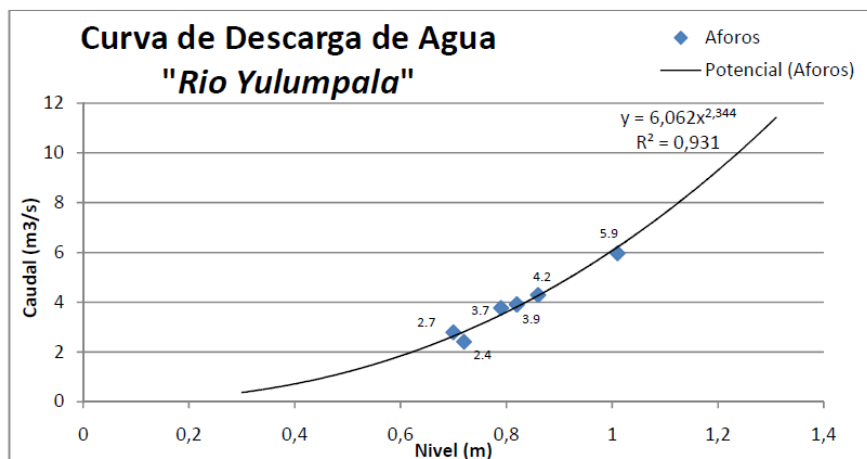
$(h - h_0)$  = tirante de agua en la sección, en que:

$h$  = es la lectura del nivel de agua en la escala ubicada en la sección limnimétrica, en metros. (lectura limnimétrica);

$h_0$  = es la lectura limnimétrica para la cual cesa el escurrimiento, es decir  $Q = 0$ , el valor de  $h_0$  puede ser positivo o negativo y se lo determina a partir de aforos; y,

$m$  = es otro parámetro de la ecuación determinado con los aforos y representa el grado de curvatura o pendiente de la curva de la ecuación indicada.

**FIGURA 7.2 Ejemplo de curva de descarga**



FUENTE: (Tapia, 2009)

Para que el trazado de una curva de descarga sea hecho con un criterio más ilustrado, este instructivo suministra en los numerales siguientes algunos comentarios relativos al problema.

### **Factores que afectan la curva de descarga**

Una premisa básica para la implementación de una estación hidrométrica, es la suposición de que habrá una alta probabilidad de que se pueda mantener una relación única entre nivel de agua y descarga.

Esta particularidad se cumple en la práctica con poca frecuencia ya que el flujo en general altera las características del sitio de medición y consecuentemente la curva de descarga.

Esta inestabilidad de la curva puede deberse a una o varias de las siguientes causas:

- **Inestabilidad de la sección de control:** Es debida a los procesos de socavación y azolve del cauce, detectables mediante aforos más frecuentes o mediante la constatación de fuertes crecidas o persistentes estiajes en los registros de nivel.

- **Anulación del efecto sección de control:** Se da por otra sección de control aguas debajo de la primera, o a un “control de cauce”

La acción de estos dos controles se manifiesta generalmente para niveles altos por medio de una curva de remanso que sumerge a la primera sección de control. Algunos de estos controles se identifican con la confluencia de otro río aguas abajo, manipulación de compuertas en una presa aguas abajo, efectos causados por constricciones del cauce aguas abajo, mareas, etc.

En este caso se tiene la influencia de pendientes variables en los sitios de medición en que la única forma de tomarles en cuenta es disponiendo de otra sección de medición de niveles aguas abajo de la primera.

Cabe señalar que cuando una estación se instala por primera vez, es difícil anticipar los parámetros que afectarán la obtención de una curva de descarga. Sin embargo, posteriormente, una serie de mediciones de nivel y descarga en niveles medios y altos indicarán el tipo de calibración y si es necesario instalar unas segundas reglas para medir continuamente la pendiente de la superficie del agua.

Consecuentemente, es necesario conocer físicamente el tramo en que está ubicada la estación para interpretar mejor la tendencia de las curvas para niveles altos.

- **Efectos de histéresis (o lazo) causados por los niveles ascendentes y descendentes de una onda de crecida:** En el caso de un río con niveles rápidamente ascendentes o rápidamente descendentes, a igualdad de nivel de agua, la descargas serán mayores o menores respectivamente que aquella para flujo uniforme.

Una pendiente continuamente cambiante, como ocurre durante el paso de una onda de crecida causa el que la curva de descarga describa un lazo o histéresis antes que una sola línea curva.

Los errores que provienen del efecto de histéresis son sistemáticos por naturaleza pero tienden a eliminarse uno a otro si la curva de descarga es definida en todo su trazo para la pendiente de flujo uniforme (compensar los aforos que son tomados durante el ascenso y descenso de crecidas).

- **Efectos de histéresis causados por características cambiantes del lecho del río:** Estos tienen que ver con varias formas de rugosidad del lecho como son: la formación de rizos, dunas, lecho plano, ondas inmóviles y antidunas. Por lo general sucede en ríos con lecho arenoso o ríos aluviales. Pero en cuencas de ríos de montaña este efecto puede ser despreciado.
- **Error en la realización de aforos:** Estos tienen que ver con la determinación de la velocidad y área de la sección del río. En cuanto al área, se refiere a un insuficiente número de verticales tomadas y a eventuales arrastres del molinete por la corriente.

En cuanto a la velocidad, se refiere también al escaso número de verticales y puntos de muestreo en cada una y a la adopción de un intervalo de tiempo de medición de la velocidad que no sea representativo (inferior al indicado por el fabricante)

Consecuentemente, aquellos aforos “expeditivos” serán considerados con las debidas reservas.

- **Cambio de cero de la escala:** Debido a problemas surgidos durante el tiempo de operación de una sección limnimétrica, a veces se reinstalan las reglas de medición de nivel (planchas limnimétricas). En este caso, al plotear los aforos, éstos se disponen en otra tendencia y habrá que conocer el historial de la



estación para dar el tratamiento adecuado a esos aforos y no pensar que puede deberse a errores de medición.

- **Separación significativa entre las secciones limnimétrica y de aforos:** Por las dificultades de encontrar una sección de medición apropiada se acostumbra ubicar separadas las secciones de aforo y medición de niveles.

El único criterio que ha seguido en todas las estaciones de esta índole es que no ingrese ningún tributario entre los dos sitios. Sin embargo, debido al probable incremento significativo de caudal entre los sitios, a la pendiente de la superficie de agua, al efecto de fricción del cauce y la forma geométrica de la sección, se produce una gran dispersión de los aforos alrededor de la curva de descarga haciendo difícil su trazado representativo. En este caso, si un número suficiente de aforos no permite identificar las varias curvas se opta por una curva intermedia.

- **Flujo no uniforme en la sección de aforo:** Cuando se instala la estación de medida se procura que el flujo sea lo más uniforme posible, sin embargo, debido a la dinámica de los ríos en el transcurso del tiempo, ocurre muy frecuentemente que el cauce sufre obstrucciones debido al acarreo del material del fondo de dimensiones apreciables. En estos casos, el flujo se vuelve turbulento y el error en la determinación de una velocidad media es significativa. Dado que en la práctica común, no es posible procesar las magnitudes del error en las distintas mediciones, se procura compensar la dispersión de los aforos con el trazo de una línea media de descarga.
- **Otros:** Se presentan muchos otros factores que pueden influir en un trazo representativo de la curva de descarga de un río y que tienen que ver con: descalibración del instrumental de aforo, errores en el cálculo de aforos, desconocimiento del historial de la estación (cuando lo hay y que tiene que ver con traslados de la misma). Etc. (Villacís & Andrade, 1986).

Como se ha visto, las fuentes de variación en la relación natural nivel – descarga, da lugar a errores que son difíciles de especificar. Una descripción cualitativa como la dada, es relativamente fácil, sin embargo, una descripción cualitativa como la dada, es relativamente fácil, sin embargo, una descripción cuantitativa resultaría algo compleja. A pesar de ello, para las estaciones de medición en las cuencas de cabecera de montaña, la asunción de una relación única nivel – descarga por lo menos para periodos de tiempo relativamente largos es una realidad. La sección de control usualmente en roca o grava es muy inestable, hay una cantidad mínima de vegetación en el canal, la pendiente natural del canal es suficientemente empinada para que el efecto de histéresis por cambio de la superficie del agua sea virtualmente despreciable y la ausencia de aluvial en el canal pasa por alto el efecto del cambio del factor de fricción.

### **Representación gráfica de la curva de descarga**

Las relaciones nivel – caudal se obtienen por procedimientos gráficos, analíticos, o una combinación de los dos. Este instructivo utiliza el procedimiento gráfico – analítico. Más adelante se detalla el procedimiento de cálculo.

El objetivo en la determinación de la curva de descarga, es su uso junto con los registros de niveles de agua, pero conocer los caudales que históricamente fluyeron por el sitio de la estación hidrométrica para así poder evaluar debidamente los proyectos hidráulicos.

Respecto a la confiabilidad, la curva de descarga será más confiable cuanto más alta sea la cantidad y calidad de los aforos y cuanto más cuidado se ponga en la interpretación de los mismos para el trazado y extrapolación de dicha curva y más específicamente:

- ***Confiabilidad por representatividad de los aforos***

La curva será tanto más confiable:

- Cuanto más amplio sea el rango de nivel que cubran los aforos;
  - Cuanto más uniforme estén distribuidos en el tiempo (frecuencia de medición);
  - Cuanto mayor el número de verticales y puntos de muestreo de velocidad hayan sido tomados en cada aforo; y
  - Cuanto menos ajustes por “arrastre”, “esviajamiento”, tengan los aforos.
- ***Confiabilidad por interpretación de la tendencia de los aforos***

La curva será más confiable:

- Cuanto más fielmente se interprete las condiciones hidráulicas del flujo para lo que se considera; y,
  - Cuanto mejor definido esté el periodo de validez de cada curva.
- ***Confiabilidad por extrapolación de la curva***

Evidentemente, es en este tramo de la curva donde existe la mayor incertidumbre y la minimización de los posibles errores sólo se logra a través de un conocimiento directo del tramo de río en que está ubicada la estación y con una interpretación ponderada de la tendencia de las velocidades para niveles altos (En el método área - velocidad)

Se debe enfatizar que cualquier extrapolación está abierta a errores serios, ya que no existe un método que se completamente satisfactorio. (Villacís & Andrade, 1986)

En síntesis, la menor o mayor efectividad de la calibración de la curva de descarga, se puede observar en el grado de dispersión de los aforos alrededor de la línea media trazada. Además, lo que juega un papel importante en la definición de curva es, no sólo el conocimiento, sino la experiencia de quien la determine que resulta importante también.

### **7.3.2 MÉTODO DE CÁLCULO**

En esto, se distinguen dos etapas importantes, el gráfico de la curva hasta el nivel máximo registrado, y la obtención de la ecuación de la curva.

#### **Construcción de la Curva de Descarga**

##### ***Datos básicos***

- Tabla de aforos que contenga (como mínimo):
  - la fecha de aforo
  - Altura limnimétrica
  - Caudal
  - El área mojada
  - La velocidad media
  - Observaciones
  
- Una sección transversal de la sección de aforo levantada topográficamente hasta el nivel máximo registrado (como mínimo). No siempre es posible recabar esta información, sin embargo esto podría ayudar a extrapolar el área de la sección hasta el nivel máximo registrado.
  
- Los niveles máximo y mínimo registrados, lo cual permitirá fijar el rango máximo de variación de la curva de descarga.

- Las fechas de los niveles máximos anuales registrados, con el fin de identificar mejor los periodos de validez de las curvas de descarga.
- Las fechas de colocación de estructuras temporales o permanentes aguas arriba o abajo de la estación en el caso de haberlas, estas ayudarán a identificar también los periodos de validez de las curvas.
- Las fechas de reinstalación de la estación o de reubicación de los limnímetros si es que esto sucedió.

### ***Gráfico de aforos, curva de descarga (H vs. Q)***

- Se deben escoger las escalas de tal modo que sean de lectura cómoda, que los aforos se dispongan de forma aproximada a  $45^\circ$ , y que la escala de las ordenadas abarque hasta el máximo nivel registrado (en lo posible).
- Se grafica la altura limnimétrica contra el caudal aforado según el orden cronológico y se los enumera ordenadamente. En el eje de las ordenadas se dispone a la altura, y en las abscisas el caudal. Al graficarlos es conveniente usar distintos colores para cada año y para identificar aquellos aforos hechos durante el ascenso o descenso de crecidas (que se reconocen por la significativa diferencia de alturas limnimétricas al inicio y final del aforo) se marcarán a estos con una flecha vertical hacia arriba o abajo respectivamente. Es posible realizar esto cuando se elabora la curva a mano, en el computador resulta difícil por lo que se debe tener en cuenta cuales son estos puntos en la tabla de datos, ya que por ejemplo, cuando la flecha se encuentra hacia arriba se indica que probablemente el punto marca el caudal por exceso y viceversa si es hecha hacia abajo, consecuentemente la curva de descarga debe compensar estos aforos.
- Al graficar los aforos se reconocerán aquellos que siguen aproximadamente la misma tendencia, cuando los aforos empiezan a dispersarse en otra posición

de tendencia se habrá identificado la curva de descarga para la que se traza una línea suavizada compensando los puntos.

- Cuando se ha localizado el cambio de curva, se comprueba con las fechas recopiladas respecto a niveles máximos, reinstalación de la estación, reubicación de limnímetros, etc.
- Una vez que se han graficado todos los aforos, se dispone de un trazado preliminar de las curvas de descarga, cubriendo unicamente el rango de niveles aforados.

### ***Extrapolación de la curva de descarga***

El grupo de aforos de que normalmente se dispone solo cubren una parte del rango total que requiere la curva de descarga, se hace necesario entonces extrapolar la curva hacia aquellos límites señalados por los niveles mínimo y máximo que han sido registrados en el periodo histórico. Para los dos casos se han establecido varios métodos cuya explicación no consta en este instructivo con excepción del método Área – Velocidad, ya que según lo citado por Andrade y Villacís, por experiencia se puede asumir que los niveles bajos no causan un problema mayor, y que el método A – V mencionado es suficiente para la extrapolación superior.

Esto se realiza eligiendo varios niveles superiores al máximo aforado, incluyendo el nivel máximo histórico y para esos niveles se toma de las curvas de área y velocidad, los respectivos valores de “A” y “Vm” para luego aplicar la ecuación de continuidad  $Q=A*V_m$ , disponiéndose de nuevos pares de puntos (H,Q) a niveles mayores que el máximo aforado, y cubriendo así el rango de la curva de descarga hasta el máximo nivel registrado.

Con estos puntos nuevos, se traza una nueva curva de descarga siguiendo una tendencia significativa, que no tome en cuenta los sesgos del grupo de datos.

Respecto a la forma de la curva de descarga, es importante resaltar que:

- La curva no debe tener pendiente negativa a lo largo de todo su trazo;
- La curva no debe tener punto de inflexión sino que debe cambiar su forma continua y progresivamente;
- El máximo se alcanza al final de la curva;
- La curva es convexa; y,
- La curva tiene un incremento del gradiente de caudal lento al inicio de la misma y más rápido conforme aumenta la altura del nivel de agua.

### ***Obtención de la ecuación de la curva de descarga***

Una vez trazada la curva de descarga, es necesario representarla de manera que facilite el cálculo de caudales. Para ello, o se expresa la curva en forma de una serie de pares de puntos (que son las coordenadas cartesianas), o mediante una ecuación matemática del tipo:

$$Q = K * (h - h_0)^m$$

La misma que puede ser obtenida de forma gráfica o analítica.

La forma analítica permite eliminar el peso que una concentración de aforos bajos tiene en un ajuste analítico por mínimos cuadrados, el mismo que minimiza los desvíos de los aforos con respecto a una cierta línea de ajuste asumiendo tácitamente que todos los aforos pertenecen a la existencia de una relación H – Q constante.

Para determinar las incógnitas K,  $h_0$  y m, se recurre ya sea al papel log – log, o si se trabaja en hoja electrónica, se pueden poner los ejes en escala logarítmica. En

el eje de las ordenadas se llevan los valores de  $(h - h_0)$  y en el de las abscisas los correspondientes de caudales. Se procede de la siguiente forma:

- De la curva realizada de  $h$  vs  $Q$  se obtienen suficientes puntos  $(H,Q)$
- Se elabora una tabla de apoyo con el siguiente encabezamiento:

Punto de la curva	Q	h	$(h-h_0)_1$ $(h_0)_1^*$	$(h-h_0)_2$ $(h_0)_2^*$	$(h-h_0)_3$ $(h_0)_3^*$	.....	$(h-h_0)_n$ $(h_0)_n^*$
-------------------	---	---	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-------	----------------------------

- Se grafican los puntos  $Q - h$  y al unir los puntos se verá si la curva es cóncava o convexa.
- Si es cóncava,  $h_0$  es positivo y se calcula  $(h-(h_0))$  incrementando el valor de 10cm en 10cm hasta que toda la curva o un tramo se rectifique. Para afinar la rectificación se tantea uno o dos valores variando el  $h_0$  en 5cm;
- Si la curva es convexa,  $h_0$  es negativo y se calcula  $(h - (-h_0))$  y se procede nuevamente a dibujar los dos puntos siguiendo el procedimiento anterior;
- Una vez conseguida la rectificación en cualquiera de los dos casos, se procede a definir los parámetros  $K$  y  $m$  de la recta;
- $H_0$  queda definido con aquel valor que rectificó la curva;
- $K$  es el valor del caudal cuando  $(h - h_0) = 1$ ;
- $m$ , la pendiente, es calculada como la razón de la proyección horizontal de un segmento de la recta a la proyección vertical de la misma.

El cálculo del error probable en la determinación de la curva se obtiene como sigue:



- Se construye una tabla que tenga el siguiente encabezado:

AFOROS		Q2 calculado	$\Delta Q = Q2 -$ Q1	$\Delta\sigma = \Delta Q/Q$ *100	$(\Delta\sigma)^2$
h	Q1 medido				

Se calcula el error medio probable

$$\sigma = \mp 0,674 * \sqrt{\frac{\sum(\Delta\sigma)^2}{n}}$$

Donde,

$\Delta\sigma$  = desvío de porcentaje; y,

N = número de aforos

La ecuación obtenida  $Q = K(h - h_0)^m$  es aceptable si  $\sigma \leq 4\%$

## 7.4 EJEMPLO

Respecto a este capítulo, se puede presentar la elaboración de la Curva de Descarga a partir de datos de un aforo realizado.

En el Anexo N°5 se encuentra la tabla donde se presentan los valores obtenidos de un aforo realizado con molinete, la forma como determinar el caudal a partir de estos datos y la Curva de Descarga.

## **CAPÍTULO 8**

# **VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA BÁSICA Y RELLENO DE DATOS**

### **8.1 INTRODUCCIÓN**

En el país es evidente no solamente la falta de información hidrológica y meteorológica, sino también los vacíos existentes en los registros así como los errores existentes en distintas etapas del acopio de información que se reflejan en la inexactitud e incoherencia de los valores dentro de las series de datos.

Sin embargo, al ser la única fuente de información disponible se hace necesario el uso de estos.

Existen distintos métodos que permiten detectar datos sospechosos en las series de datos y otros que posibilitan el completarlas mediante el relleno de datos faltantes, los mismos que se presentan en este instructivo.

### **8.2 RELLENO DE DATOS FALTANTES**

#### **8.2.1 MODELO DE CORRELACIÓN – REGRESIÓN**

El método más utilizado para relleno y extensión de las estadísticas de los fenómenos meteorológicos es la correlación y regresión, ya sea gráfica o analítica de series de datos de estaciones, generalmente cercanas entre sí.

El coeficiente de correlación mide el grado de dependencia entre dos series de datos y por tanto se constituye en una herramienta muy usada en los análisis hidrometeorológicos.

### Metodología

Si se tiene una serie de datos de una estación de la cual se obtendrá información, y a pesar de ser de la extensión necesaria se encuentran vacíos en la misma, se pueden rellenar estos espacios, eligiendo una estación cercana.

Es importante recalcar que no sólo se requiere que la estación esté cerca de la estación en estudio, sino que también cuente con series completas de datos con períodos de registro similares.

La fórmula para calcular el coeficiente de correlación  $r$  entre  $n$  pares de valores de las variables  $x$  e  $y$  es:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8.1)$$

Siendo:

$x$  = variable independiente;

$y$  = variable dependiente;

$\bar{x}$  = promedio de los valores de  $x$ ;  $y$

$\bar{y}$  = promedio de los valores de  $y$ ;

El coeficiente de correlación varía entre  $-1$  y  $1$  y toma el valor de  $1$ , momento denominado de correlación completa positiva, cuando los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con  $x$  e  $y$  aumentando conjuntamente. En cambio, si los pares de datos describen una perfecta línea recta con pendiente negativa, con  $y$  decreciendo cuando  $x$  aumenta, el coeficiente  $r$  toma el valor de  $-1$ , momento denominado de correlación completa negativa. Un

valor de  $r$  cercano a cero indica que las variables  $x$  e  $y$  no están correlacionadas linealmente.

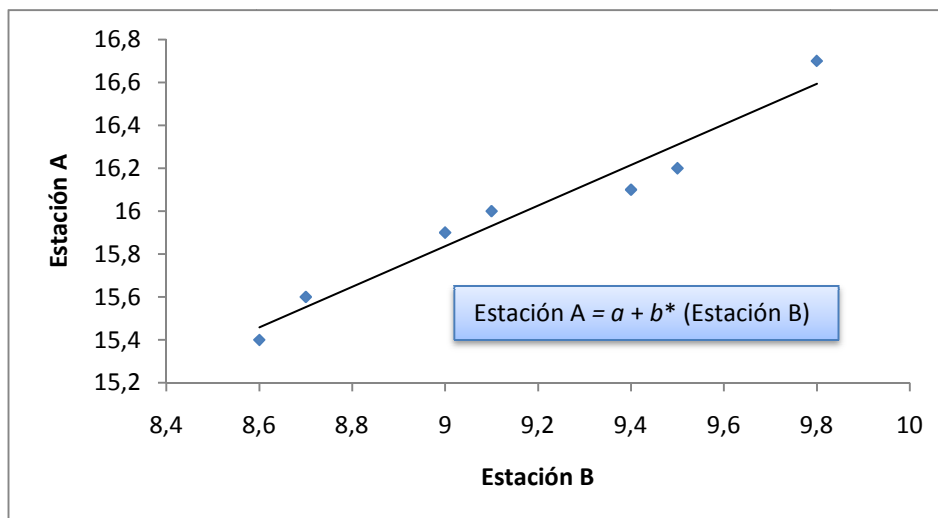
La falta de correlación no implica una falta de asociación pues  $r$  mide sólo una relación lineal, una relación curvilínea estricta no se reflejará necesariamente por un alto valor de  $r$ . En caso contrario, la correlación entre dos variables no garantiza que estén conectadas por una relación de causa.. (OMM, 1994)

Para fines prácticos, se admiten como aceptables aquellas series que presentan su coeficiente de correlación  $r > 0,7$ , para el período común de datos, puesto que dicho coeficiente significa que la dispersión en los datos respecto a la media de una estación se justifica a través de la dispersión de los correspondientes valores de la otra variable respecto a su propio valor medio (Kennedy, J. 1982)

Cuando se ha definido el valor del coeficiente de correlación, y este es el adecuado para explicar una relación lineal entre las dos estaciones, el siguiente paso es aplicar la fórmula,  $y = a + bx$ , que corresponde a la ecuación de la recta.

Para hallar los coeficientes  $a$  y  $b$ , existen fórmulas, no obstante con la utilización de una hoja electrónica, esto se simplifica, puesto que existen comandos que permiten obtenerlos fácilmente, o también, al realizar el gráfico de los pares ordenados de una estación A, y una estación B, se puede elegir obtener una línea de tendencia recta, y en ella mostrar la ecuación de la misma.

De esta manera, para un determinado mes o año, con el valor de la estación B (que será remplazado en la variable independiente) se puede hallar el valor para la estación A.

**FIGURA 8.1 Gráfico de correlación lineal entre dos estaciones**

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

### 8.3 VALIDACIÓN DE DATOS

Estadísticamente las series de registros climáticos e hidrológicos reciben el nombre de muestras aleatorias ya que son datos consecutivos ordenados cronológicamente.

La OMM recomienda trabajar con series de datos de al menos 30 años consecutivos. En nuestro medio resulta difícil acceder a estaciones que posean datos con este número de años y se realizan análisis con series más cortas, siempre y cuando estas sean representativas de la zona.

Previo a la utilización de las series de datos es conveniente someterlas a un control de calidad de las mismas con el fin de identificar valores incorrectos o dudosos, corregirlos si es posible, o sino eliminarlos para que no afecten la bondad de estudios.

Errores cometidos durante la medición, digitalización u omisiones, dan lugar a una falta de homogeneidad de los datos.

### 8.3.1 HOMOGENEIZACIÓN

Los datos de las series climatológicas e hidrológicas debieron haber sido obtenidos bajo las mismas condiciones de experimentación, es decir con los mismos instrumentos y en el mismo lugar de implantación de aparatos y equipos, para que de esta forma se pueda generar una representación de la zona. Siendo así la serie recibe el calificativo de serie homogénea; caso contrario la serie es heterogénea. (Castillo & Sentis, 2001)

Las causas más comunes de la heterogeneidad de las series de datos son:

- Cambio de emplazamiento de la estación,
- Cambio de instrumentación, y;
- Modificación en las técnicas de observación.

Otros factores que causan la heterogeneidad de las series de datos corresponden a eventos especiales que dan lugar a variaciones en el clima de la región, u otros acontecimientos presentados con el paso del tiempo, originados por factores externos como deforestación, formación de pantanos o la acentuada variabilidad climática global (Ríos, 2010).

Los procedimientos de mayor uso en la práctica ingenieril para evaluar la homogeneidad de la información son: el test de rachas o secuencias y las curvas de doble masas.

#### **Prueba de rachas o secuencias**

Este método consiste en establecer la distribución de los elementos en relación con el valor de la mediana por sobre o debajo de esta.

El procedimiento a seguir para realizar este test consiste en:

- Calcular la mediana de la serie de datos, anuales o mensuales, (N);
- Conteo del número de cambios hacia arriba (+) o hacia abajo (-) de la mediana;
- Conteo de número de rachas (NS). Siendo una racha cada cambio de signo que se produzca en el conteo referido en el literal anterior;
- Considerando que NA es el número de valores por encima de la mediana de la serie y NB lo valores por debajo de la mediana, entonces por definición  $NA=NB$  y le corresponden un número determinado de rachas con una probabilidad de excedencia entre 10% y 90% de que sean homogéneas; y,
- Estos valores dependen del número de elementos que posea la serie (Castillo & Sentis, 2001) y se muestran en siguiente tabla:

**TABLA 8.1 Distribución del número de rachas según Thom, recomendado por la OMM**

NA	P 10%	P 90%
10	8	13
11	9	14
12	9	16
13	10	17
14	11	18
15	12	19
16	13	20
17	14	21
18	15	22
19	16	23
20	16	25
25	22	30
30	26	36
35	31	41
40	35	47
45	40	52
50	45	57

FUENTE: Castillo & Sentis, 2001

El conteo de rachas se fundamenta en identificar el número de veces en que los valores ordenados cronológicamente cambian de un valor superior a un valor por debajo de la mediana de la serie.

Una serie no será homogénea si el número de rachas es pequeño, es decir queda por debajo del valor permitido en el intervalo de probabilidad o muy grande (por encima del intervalo).

Cuando el número de rachas está por debajo del intervalo definido, significa que los términos de la serie tienen una alta dependencia positiva y por ende la media de la serie tiene una tendencia a aumentar o disminuir en el tiempo. En el caso contrario, cuando el número de rachas es mayor al valor correspondiente a la probabilidad 90%, denota una alta dependencia negativa y por lo tanto la serie tiende a variar de manera aleatoria.

### **Curvas de doble masa**

Este método, permite demostrar de manera gráfica la relación que existe entre las variables climáticas de estaciones circundantes entre sí, para periodos comunes de información.

El procedimiento se basa en la selección de dos estaciones de una zona, en lo posible estaciones vecinas. Los datos mensuales o anuales de cada una de ellas se acumulan de manera sucesiva para luego realizar un gráfico de pares ordenados de ejes ortogonales, los datos de la estación a ser controlada se los ubicarán en el eje de las ordenadas.

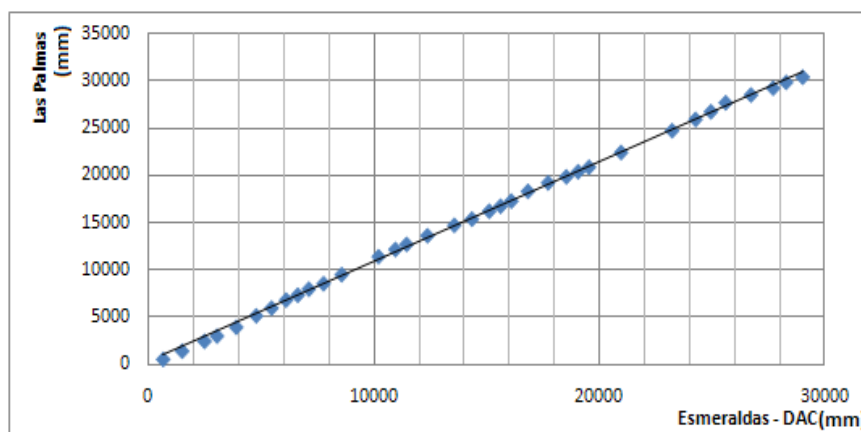
Si se presenta el caso ideal de que la información es correcta a lo largo del periodo considerado, se obtendrá una alineación perfecta con una única tendencia de los pares ordenados, el caso contrario denotará la existencia de información errada que deberá ser corregida a partir de un factor que se obtiene del propio gráfico.



Las curvas de doble masa, además de permitir de manera gráfica analizar la calidad de la información, permiten detectar disminuciones o incrementos de las variables consideradas dentro del periodo de estudio. (Barros & Troncoso, 2010).

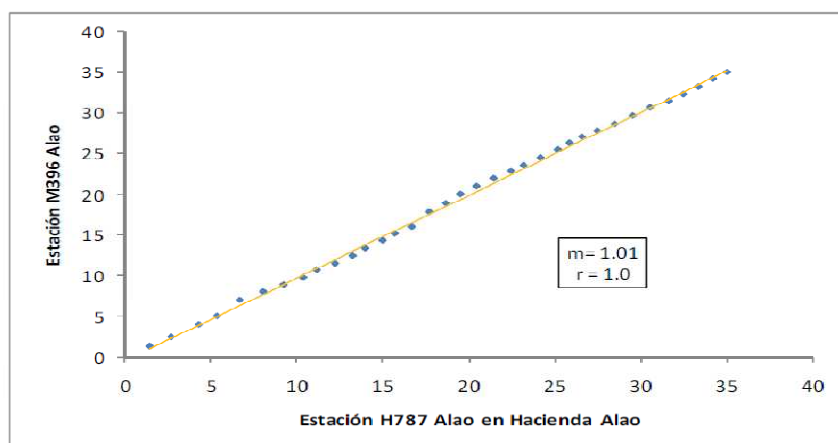
Si la curva de doble masa presenta una tendencia lineal (pendiente constante) se asume en primera instancia la homogeneidad de las series previa la realización de una prueba estadística no paramétrica (prueba de rachas). En el caso de poseer desviaciones importantes o varias pendientes, se identifican los períodos para ser revisados, y corregidos hasta alcanzar la homogeneidad. Estas curvas pueden ser: Precipitación – Precipitación, Caudal – Caudal o Precipitación – Caudal, en caso de estudios hidrológicos.

**GRÁFICO 8.1 Ejemplo de curva de masas Precipitación – Precipitación**



FUENTE: Barros & Troncoso, 2010

**GRÁFICO 8.2 Ejemplo de curva de masas Precipitación - Caudal**



FUENTE: Ríos, 2010

En el caso de existir una serie heterogénea, es posible corregirla si esta serie tiene uno o varios tramos homogéneos.

Cuando se pueden hallar estos tramos homogéneos, la serie se corrige utilizando el tramo más reciente, sin embargo, a veces se da prioridad al tramo más largo.

Las series entonces, pueden corregirse o rellenarse teniendo una serie homogénea que sirva para comparar, en este caso, de otra estación con las características mencionadas con anterioridad.

### ***Problemas más frecuentes***

Los problemas que se pueden encontrar con frecuencia al estudiar una serie climatológica o hidrológica, pueden ser:

- La serie de la estación problema es homogénea, pero es más corta que la serie de la estación A;
- La serie de la estación problema es en conjunto heterogénea, pero tiene tramos de la misma que son homogéneos; y,
- La serie de la estación problema tiene vacíos (no figuran ciertos registros) (Castillo & Sentis, 2001)

Entre los métodos más difundidos para corregir la heterogeneidad, se pueden citar los modelos de correlación, método de las diferencias, utilización de gráficos variable meteorológica vs. cota; curvas regionales, entre otros, explicados anteriormente en la sección 8.2

## **8.4 RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCURRIMIENTO**

Las relaciones lluvia-escorrimento son utilizadas principalmente para el diseño, los pronósticos y la evaluación de caudales. Si los datos de escurrimientos no están disponibles o son insuficientes para una interpretación o extrapolación fiables, las relaciones lluvia- escurrimiento permiten extraer la información de escurrimiento a partir de los registros de precipitación. Debido a que los datos de lluvia no conllevan gran complejidad y son menos costosos de recoger y son generalmente más abundantes que los datos de escurrimiento.

Es posible establecer una relación entre lluvia y escurrimiento para una cuenca determinada, la relación lluvia-escorrimento aplicada con los datos de lluvia, puede dar estimaciones más fiables de la frecuencia de grandes caudales que los que puede dar una relación regional entre las crecidas o una extrapolación basada en los datos de escurrimientos de la cuenca. (OMM, 1994)

### **8.4.1 METODOLOGÍA**

Las relaciones lluvia-escorrimento usualmente se establecen en dos etapas: la determinación del volumen de escurrimiento que resulta de un volumen de lluvia producido durante un período de tiempo dado, y la distribución del volumen de escurrimiento en función del tiempo.

La primera etapa es necesaria debido a la división de la lluvia en evapotranspiración, infiltración y escurrimiento. La segunda se requiere para tomar en cuenta el tiempo de recorrido y la atenuación de la onda de escurrimiento que se genera por la lluvia.

#### **Distribución del escurrimiento en el tiempo**

Para tener en cuenta el tiempo de recorrido y de atenuación de un volumen de agua que descarga la lluvia sobre una cuenca, debe hacerse una evaluación a través del tiempo a la salida de la cuenca. Este paso se logra mediante el uso de

un *hidrograma unitario*, que describe la distribución temporal del escurrimiento que sale de la cuenca.

El método se soporta en datos físico-geográficos de las cuencas de aportación, en las características de usos y tipos de suelos, y en las relaciones intensidad – duración – frecuencia, propios del área de estudio. En este análisis se asume que existe correspondencia entre la distribución de probabilidades de las lluvias intensas de 24 horas y la distribución de probabilidades de los caudales pico de los hidrogramas resultantes. Es decir una lámina de lluvia sobre la cuenca con período de retorno de 100 años necesariamente genera un caudal pico con período de retorno de 100 años.

## **8.5 EJEMPLO**

Para realizar el estudio climatológico de la zona del río Alambi presentado en el Capítulo 6, se tomaron en cuenta los datos correspondientes al periodo de 1972 al 2006 de 10 estaciones. En este ejemplo se validará y rellenará esta información para que pueda ser utilizada en el estudio climatológico.

Como se puede observar en la Tabla 8.2 estas series presentan vacíos, por tanto se mostrará la aplicación de la metodología contenida en este capítulo para rellenar datos faltantes en una serie y validarlos para su posterior utilización. El parámetro escogido para el ejemplo es la precipitación media anual, y la serie de datos seleccionada para aplicar los procedimientos corresponde a la estación M358 (Calacalí – INAMHI)

### **8.5.1 RELLENO DE DATOS FALTANTES.**

Después de una revisión visual de series de datos de las estaciones, es posible observar gran cantidad de vacíos dentro de las mismas, lo cual no permite tener una serie continua y con la extensión necesaria para la realización del estudio.

**TABLA 8.2 Series de datos para el periodo 1972 - 2006 respecto a la precipitación media anual para las estaciones climatológicas seleccionadas**

	M213	M046	M358	M361	M339	M327	M326	M318	M212	M340
1972						2021,5		1869,1		3701,6
1973						1300,3		1620,9		2893,9
1974					2893,6	1685,5		1863,8		-
1975					3238,1	1333,1		1643,8		2982,5
1976			855,2		2529,9	1915,0		1629,9		2900,7
1977	1156,4	3357,6		835,3		816,8		1250,0	2138,5	2123,7
1978	-		952,8	820,5	2026,2	1074,2	1668,1	1288,6	2627,4	2690,7
1979	-		862,8	846,1	2387,3	1555,6	1673,9	1512,6	2459,6	2593,7
1980	-		974,3	962,5	2393,8	1204,1	1822,9	1497,4	2360,1	2400,2
1981	1539,2	2887,6	1155,7	800,8	2641,2		1805,9	1733,9	2338,7	-
1982	2425,4	5111,8	1353,3	1250,7	3286,2	1425,9		2673,1	3718,2	3681,4
1983	2708,6		1007,0	1044,0				1981,2		3582,1
1984	2196,1	3662,5	881,1	906,2	2671,2		2227,8	2219,6	2806,5	2675,2
1985	1370,8	3073,0	649,3	663,4	2004,0			1285,0	2033,3	1899,6
1986	1603,2	3125,9	1221,3	1324,7				1808,3	2483,5	2226,5
1987		-		669,7	2152,2				-	2448,5
1988		-	1259,3					1992,5	-	
1989	1718,4			894,0		1395,8	1833,1		-	
1990	1376,3		637,6	668,1		931,2	1235,8	1107,8		
1991	1433,2		857,7	841,1		1079,5	1605,1			
1992	-		548,0	559,3		1264,9	-			
1993			1183,1		2756,7	1442,8	2093,8	1988,9		
1994			1359,8	1013,9		1753,3	2124,8	1872,3		
1995			972,0	799,9	2403,1	1359,6	1792,9			
1996			1335,5		2738,4		1884,2			
1997			967,2	1071,8	3345,2		2411,1			
1998			842,9	979,9	2600,8	941,6	1711,0	1469,2		
1999			721,1		3041,8	1468,7	2155,6			
2000			1023,8	1052,3	2369,8	1466,7	1996,1			
2001			606,6	573,1	2129,2		1617,2	1269,4		
2002			888,7	893,6	2299,0	1322,9	-			
2003				863,1			1401,9	1109,1		
2004			692,4	791,7	2087,2		1335,1			
2005			670,7	748,5	1801,1	926,3	1296,4	1097,7		
2006			682,8	1259,0	2727,7	1557,7	2110,2	1669,9		

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

### Modelo de correlación – regresión

Como se menciona en el procedimiento, se debe escoger una estación cercana a la estación con la cual se va a trabajar. Para esto se revisa su ubicación en la Figura 3.11, y Tablas 3.1 y 3.2 y se eligen estaciones próximas.

En este caso, para la estación M358 (Calacalí – INAMHI), se escoge la estación M361 (Nono), no solamente por su ubicación sino porque presenta una serie de datos amplia para el periodo elegido.

El primer paso consiste en obtener el coeficiente  $r$ , el mismo que debe ser mayor a 0,7, tal como se manifiesta en el instructivo.

Se extraen los pares ordenados de periodo común entre las dos estaciones, y con ello se construye una tabla de apoyo que permita calcular los valores para aplicar la Ecuación 8.1

**TABLA 8.3** Tabla de apoyo para la obtención del coeficiente  $r$  para la aplicación del modelo de correlación – regresión

	Y	Y - Ymed	(Y - Ymed) <sup>2</sup>	X	X - Xmed	(X - Xmed) <sup>2</sup>	(X - Xmed)*(Y - Ymed)
1979	862,8	-35,1	1229,0	846,1	-61,1	3729,7	2141,0
1980	974,3	76,4	5843,5	962,5	55,3	3061,3	4229,5
1981	1155,7	257,8	66482,9	800,8	-106,4	11314,9	-27427,1
1982	1353,3	455,4	207428,2	1250,7	343,5	118011,9	156457,6
1983	1007,0	109,1	11912,2	1044,0	136,8	18722,1	14933,9
1984	881,1	-16,8	280,8	906,2	-1,0	0,9	16,3
1985	649,3	-248,6	61780,7	663,4	-243,8	59424,5	60591,1
1986	1221,3	323,4	104615,3	1324,7	417,5	174330,1	135046,6
1990	637,6	-260,3	67733,8	668,1	-239,1	57155,1	62220,0
1991	857,7	-40,2	1612,6	841,1	-66,1	4365,4	2653,2
1992	548,0	-349,9	122400,0	559,3	-347,9	121014,5	121705,3
1994	1359,8	461,9	213391,2	1013,9	106,7	11391,0	49302,5
1995	972,0	74,1	5497,2	799,9	-107,3	11507,2	-7953,4
1997	967,2	69,3	4808,4	1071,8	164,6	27102,6	11415,8
1998	842,9	-55,0	3020,3	979,9	72,7	5289,4	-3997,0
2000	1023,8	125,9	15861,6	1052,3	145,1	21062,3	18277,9
2001	606,6	-291,3	84830,7	573,1	-334,1	111603,7	97300,7
2002	888,7	-9,2	83,9	893,6	-13,6	184,2	124,3
2004	692,4	-205,5	42212,6	791,7	-115,5	13333,7	23724,4
2005	670,7	-227,2	51600,4	748,5	-158,7	25176,6	36043,3
2006	682,8	-215,1	46249,6	1259,0	351,8	123783,3	-75663,2
<b>Sumatoria</b>	897,9		1118874,8	907,2		921564,4	681142,834

M358 = Y, M361 = X

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Al aplicar la ecuación mencionada, se tiene que:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{681142,834}{\sqrt{921564,4 * 1118874,8}} = 0,7$$

Definido el valor r, y siendo el adecuado para explicar una relación lineal entre las dos estaciones, se obtiene la ecuación  $y = b + ax$  que representa a la misma mediante mínimos cuadrados. Para ello se utiliza una hoja electrónica que permite la obtención de la misma:

$$y = 0,7391x + 227,35$$

La ecuación  $M358 = 227,35 + 0,7391 * M361$ , permite entonces hallar los valores para la estación Calacalí INAMHI, a partir de los valores de la Estación Nono.

De tal manera que los datos de la estación Calacalí – INAMHI, son los siguientes:

**TABLA 8.4 Datos rellenos de la estación M358 Calacalí – INAMHI, mediante correlación con la estación M339 Nono.**

	M358	M361		M358	M361
1972			1990	637,6	668,1
1973			1991	857,7	841,1
1974			1992	548	559,3
1975			1993	1183,1	
1976	855,2		1994	1359,8	1013,9
1977	844,7	835,3	1995	972	799,9
1978	952,8	820,5	1996	1335,5	
1979	862,8	846,1	1997	967,2	1071,8
1980	974,3	962,5	1998	842,9	979,9
1981	1155,7	800,8	1999	721,1	
1982	1353,3	1250,7	2000	1023,8	1052,3
1983	1007	1044	2001	606,6	573,1
1984	881,1	906,2	2002	888,7	893,6
1985	649,3	663,4	2003	865,3	863,1
1986	1221,3	1324,7	2004	692,4	791,7
1987	722,3	669,7	2005	670,7	748,5
1988	1259,3		2006	682,8	1259
1989	888,1	894	*Valores sombreados han sido rellenos mediante correlaciones		

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

De esta manera se procede con todas las estaciones que sean necesarias para el estudio.

### 8.5.2 VALIDACIÓN DE DATOS

Una vez conformada la base de datos de precipitación para el período escogido, se procede a realizar pruebas de calidad de información: curvas de doble masa y pruebas estadísticas de secuencias, tal como se explicó en el numeral 8.3.

#### Prueba de rachas

Se toma la serie de datos rellenada, y con eso se procede a realizar el test de rachas.

Para esto se construye una tabla de apoyo, y se siguen las indicaciones del numeral 8.3.1.1

**TABLA 8.5 Test de rachas de precipitación. Estación Calacalí – INAMHI**

Año	P (mm)	NA	NS	Año	P (mm)	NA	NS
1976	855,2	-	1	1992	548	-	0
1977	849,3	-	0	1993	1183,1	+	1
1978	952,8	+	1	1994	1359,8	+	0
1979	862,8	-	1	1995	972	+	0
1980	974,3	+	1	1996	1335,5	+	0
1981	1155,7	+	0	1997	967,2	+	0
1982	1353,3	+	0	1998	842,9	-	1
1983	1007	+	0	1999	721,1	-	0
1984	881,1	-	1	2000	1023,8	+	1
1985	649,3	-	0	2001	606,6	-	1
1986	1221,3	+	1	2002	888,7	-	0
1987	587,8	-	1	2003	893,2	+	1
1988	1259,3	+	1	2004	692,4	-	1
1989	942	+	0	2005	670,7	-	0
1990	637,6	-	1	2006	682,8	-	0
1991	857,7	-	0	<i>mediana</i>	<b>888,7</b>	<b>15</b>	<b>15</b>

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

P = precipitación media anual, (mm); NA = número de valores por sobre la mediana de la serie; y, NS = número de rachas.

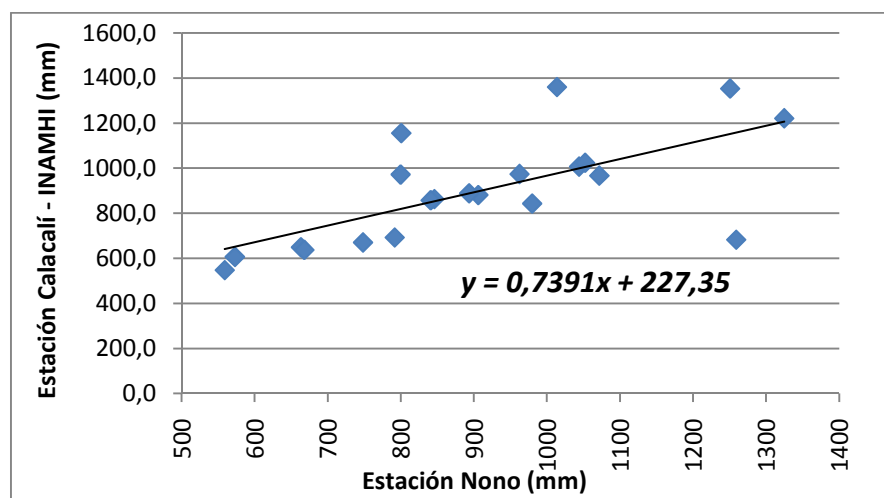


En este ejemplo se puede apreciar que existen 15 valores superiores a la mediana en la serie, (NA). En la tabla 8.1, se indica un intervalo entre 12 y 19 variaciones de signo o rachas (NS) para cumplir con la homogeneidad de la serie, por tanto se puede concluir que esta serie es homogénea ya que existen 15 rachas. El conteo de rachas se fundamenta en identificar el número de veces en que los valores anuales ordenados cronológicamente cambian de un valor superior a un valor por debajo de la mediana de la serie. (Ríos, 2010)

### Curvas de doble masa

En el siguiente Gráfico 8.3 se presenta una curva de masas precipitación – precipitación realizada con dos estaciones climatológicas cercanas.

**GRÁFICO 8.3** Curva de masas realizada con estaciones climatológicas cercanas al sitio de interés



FUENTE: María de la Paz Almeida R.

## **CAPÍTULO 9**

### **DETERMINACIÓN DE CAUDALES MEDIOS Y MÍNIMOS**

#### **9.1 INTRODUCCIÓN**

Muchas veces, la factibilidad de un proyecto se basa fundamentalmente en la disponibilidad de agua de las fuentes, por tanto la variabilidad espacial y temporal de los recursos hídricos es importante.

El estudio de los caudales medios de los ríos en los tramos de interés del proyecto, o sea aquellos con los que se diseñarán captaciones y obras accesorias, juntos con la obtención de las curvas de duración de caudales diarios, permiten definir la capacidad disponible en las fuentes superficiales para satisfacer la demanda y las necesidades de regulación.

El presente instructivo presenta entonces el procedimiento para la elaboración de Curvas de Duración General (CDG) y Curvas de Variación Estacional (CVE), como metodología para evaluar los caudales medios y los caudales mínimos de las cuencas, si se dispone de suficiente información. Se analizan también las relaciones utilizadas para transferir información de una cuenca a otra.

## 9.2 CAUDALES MEDIOS

### 9.2.1 METODOLOGÍA

#### **Suficiente información**

Se debe disponer de registros de caudales medios diarios o mensuales, de un periodo representativo de al menos de 10 años. El análisis hidrológico respecto a caudales medios debe concretarse mediante la Curva de Duración General (CDG), que consiste en la contabilización de la recurrencia de valores de caudales dentro de determinados rangos, con el fin de calcular las frecuencias relativas y absolutas de las mismas (Villacís & Andrade, 1985). Además, resulta de interés la Curva de Variación Estacional (CVE), que muestra las tendencias de acuerdo con los periodos lluviosos o secos.

Se debe obtener también la serie de caudales mensuales y anuales, y calcular sus valores característicos estadísticos para entender su comportamiento.

#### ***Curva de Duración General (CDG)***

Esta curva, llamada también curva de permanencia o persistencia de caudales, puede ser definida con caudales diarios, mensuales y anuales. Consiste en la representación gráfica en orden decreciente de los caudales observados ( $Q_i$ ), asociados a una frecuencia o duración que suele expresarse en porcentaje.

La duración representa el intervalo de tiempo durante el cual los caudales ( $Q_i$ ) son iguales o superiores a un valor específico  $Q_j$ .

En la curva de duración general (CDG), constan los caudales con su correspondiente probabilidad de ser igualados o excedidos.

Así por ejemplo:  $Q_{90\%}$  es un caudal que es igualado o excedido el 90% de las veces; es decir, el 90% de los caudales de la serie igualan o exceden al  $Q_{90\%}$ .

La curva de caudales medios mensuales, tiene una apariencia ligeramente diferente a la de caudales medios diarios, ya que al trabajar con caudales medios mensuales no se detectan las variaciones que ocurren dentro del mes, por lo que esta curva proporciona menos información en consideraciones de diseño. (Villacís & Andrade, 1985)

En síntesis, la CDG: “es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado. Es una gráfica que tiene el caudal,  $Q$ , como ordenada y el número de días del año (generalmente expresados en % de tiempo) en que ese caudal,  $Q$ , es excedido o igualado, como abscisa. La ordenada  $Q$  para cualquier porcentaje de probabilidad, representa la magnitud del flujo en un año promedio, que espera que sea excedido o igualado un porcentaje,  $P$ , del tiempo.” (S/A)

La CDG es usada frecuentemente para determinar el caudal de diseño de un proyecto hidráulico.

Para la construcción de la curva, se sigue el siguiente procedimiento con la Tabla de apoyo 9.1:

*Tabla de apoyo a la construcción de la Curva de Duración General.*

- **Columna 1.-** En esta columna se ubica el número de orden, ( $m$ );
- **Columna 2.-** Se ponen todos los caudales anuales, mensuales o diarios de la serie considerada;
- **Columna 3.-** Se copian los caudales de la columna (2) y se ordenan de forma descendente los valores;
- **Columna 4.-** Se calcula el porcentaje de ocurrencia, dividiendo cada uno de los números de orden de la columna 1, para el número total de datos ( $n$ ), y se multiplica este valor por 100.

$$P^* = m/n * 100$$

(9.1)

**TABLA 9.1** Tabla de apoyo para la construcción de la CDG

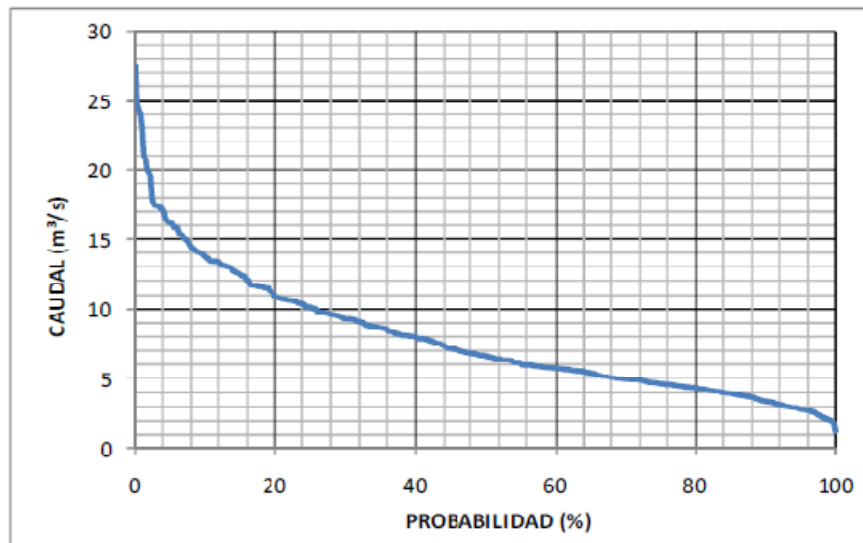
(1)	(2)	(3)	(4)
m	Caudales $Q_i$ (m <sup>3</sup> /s)	Caudales $Q_i^*$ (m <sup>3</sup> /s)	$P^* = m/n * 100$ (%)
1			
2			
3			
.			
.			
.			
.			
.			
n			
$\bar{Q}$			

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Finalmente, mediante un gráfico de dispersión, se obtiene la Curva de Duración General, ubicando en el eje de las abscisas las probabilidades de ocurrencia (columna 2) contra los caudales de la columna (3) (Ver Figura 9.1).

Los caudales correspondientes a la probabilidad de excedencia que interesa se obtienen o del gráfico de la curva de duración general, o por interpolación entre los valores  $P_i(\%)$  calculados.

**FIGURA 9.1** Ejemplo de una Curva de Duración General



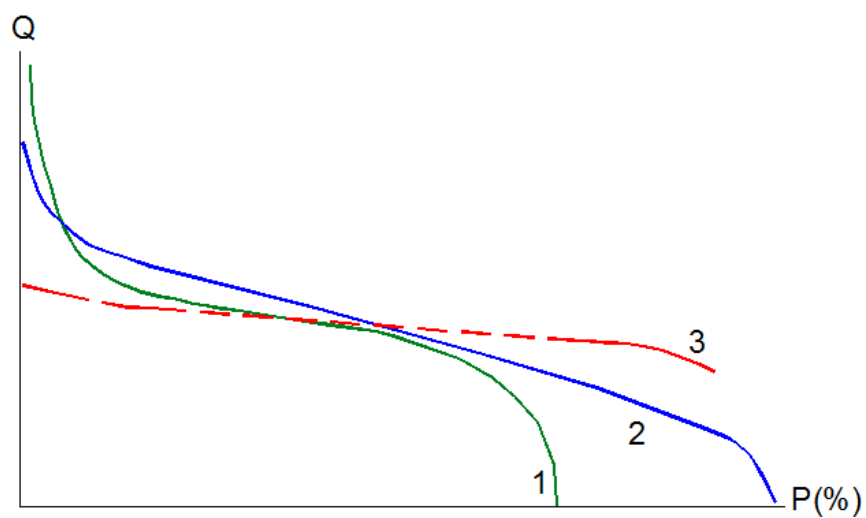
FUENTE: Ríos, L. 2010

Características de la curva de duración general

Las CDG, desde permiten deducir algunas propiedades de las cuencas.

Algunos casos de esto son: (Figura 9.2)

**FIGURA 9.2** Tipos de CDG



FUENTE: Andrade, 2007

1. Cuenca muy deforestada, que presenta suelos con baja capacidad de infiltración (permeabilidad baja); esta cuenca el 30% del tiempo no presenta caudal.
2. Corresponde a una cuenca con caudales más uniformes, con mayor capacidad de autorregulación de caudales, presenta mayor infiltración, posiblemente con la existencia de buena cubierta vegetal.
3. Corresponde a una cuenca “hipolética” donde el caudal es relativamente constante; la permeabilidad es alta, de forma general la retención de agua es buena. Probablemente puede tratarse de una cuenca de páramo, con cubierta vegetal densa; o de un embalse de regulación con caudal casi constante.

Este tipo de curvas, permite detectar cambios en el uso del suelo.

### **Curva de variación estacional (CVE)**

La curva de variación estacional indica la probabilidad de que los caudales medios mensuales puedan ser excedidos o superados.

Para la elaboración de la misma es necesario disponer series de caudales medios mensuales.

A continuación, se presentan dos tablas de apoyo para la construcción de la CVE.

#### *Tabla de apoyo a la construcción de la Curva de Variación Estacional*

En esta tabla se ubicarán los datos de los caudales medios mensuales desde el mes de enero hasta diciembre de cada uno de los años en consideración.

Posteriormente, en la hoja de cálculo, se obtendrán las características estadísticas:  $\bar{Q}$  (caudal medio), S (desviación estándar), Cv (coeficiente de variación) y Cs (Coeficiente de asimetría).

Estos conceptos estadísticos no serán revisados en este instructivo, sin embargo, para facilitar el manejo del mismo, se presenta a continuación las fórmulas requeridas para obtener estos valores: (Ver Tabla 9.2)

**TABLA 9.2 Fórmulas estadísticas requeridas para llenar la Tabla 9.3**

Características estadísticas de la muestra	Fórmula
Media de la serie	$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i)}{n}$
Desviación típica o estándar	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n - 1}}$
Asimetría o sesgo	$a = \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^3 * \frac{n}{(n - 1) * (n - 2)}$
Coficiente de asimetría	$Cs = a/S^3 ; \text{ si } a \rightarrow 0$
Coficiente de variación	$Cv = S/\bar{Q}; \text{ si } a \rightarrow 0$

FUENTE: Villacís & Andrade, 1986

En donde,

$Q_i$  = valores de los caudales de la serie, ( $m^3/s$ )

$n$  = número de datos

**TABLA 9.3 Determinación de las características estadísticas de las series mensuales de caudales**

AÑO	CAUDALES MEDIOS MENSUALES ( $m^3/s$ )											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
$\bar{Q}$												
$S$												
$Cv$												
$Cs$												

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.



Una vez que las características estadísticas mensuales han sido determinadas, se procede a llenar la siguiente tabla de apoyo. (Tabla 9.4)

Tabla de Apoyo 9.4

Mediante esta tabla se determinan caudales mensuales con probabilidad de ser, igualados o excedidos, ( $Q_p$ ).

En el método analítico se utiliza la ecuación:

$$Q_p = \bar{Q} + K_p * S \quad (9.2)$$

En donde:

$Q_p$  = caudales mensuales con probabilidad de ser, igualados o excedidos, ( $m^3/s$ );

$\bar{Q}$  = Caudal medio del mes en consideración

$K_p$  = Coeficiente de distribución

$S$  = desviación estándar

- Cuando,  $(-0,5 \leq C_s \leq 0,5)$ , se recomienda aplicar la función de densidad de probabilidades normal, por tanto  $K_p = z$ , donde  $z$  corresponde a al coeficiente de la distribución normal
- Cuando  $C_s$  no se encuentra dentro del rango para anterior, se recomienda utilizar la función Log Normal , en donde  $Y = \ln Q$ , y de estos nuevos valores se obtiene  $\bar{Y}$ ,  $S_y$ ,  $Cv_y$  , que son las características estadísticas para los nuevos valores  $Y$ .

Un nuevo  $C_{s_y}$ , debe estar entre  $-0,5 \leq C_{s_y} \leq 0,5$

Se tiene entonces que:

$$Y_p = \bar{Y} + K_p * S_y$$

Y posteriormente, el caudal se puede hallar el caudal mediante la relación:

$$Q_p = e^{Yp}$$

- Cuando  $C_s$  tienda a 1,14, se suele utilizar la distribución Gumbell o Pearson tipo III

$K_p$ , entonces, se encuentra relacionado a la probabilidad de ocurrencia establecida.

Las tablas de las distribuciones de probabilidades se encuentran disponibles en el Anexo N°6.

Más explicación acerca de estas probabilidades, es posible encontrarla en bibliografía, como: Hidrología en la Ingeniería, de Monsalve, G.

**TABLA 9.4 Tabla de apoyo para la construcción de la CVE**

P (%)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10												
20												
30												
40												
50												
60												
70												
80												
90												

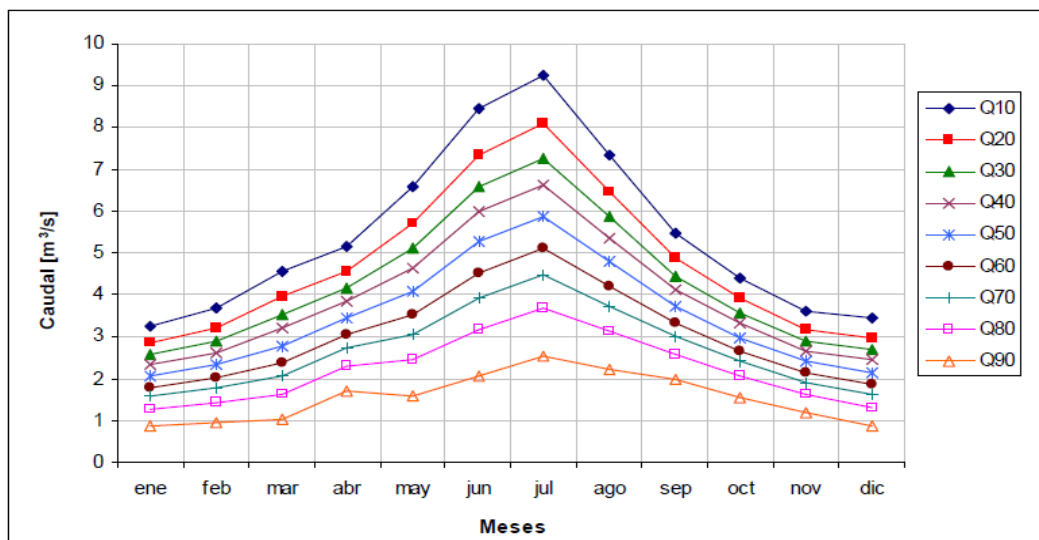
ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

A partir de esta tabla, se procede a graficar la Curva de Variación Estacional.

Para cada una de las probabilidades se grafica una curva ubicando en el eje X los meses del año, y en el eje Y los respectivos caudales ( $Q_p$ ) calculados.

En un mismo gráfico se plasman todas las curvas de las diferentes probabilidades.

**FIGURA 9.3 Ejemplo de curva de variación estacional (CVE)**

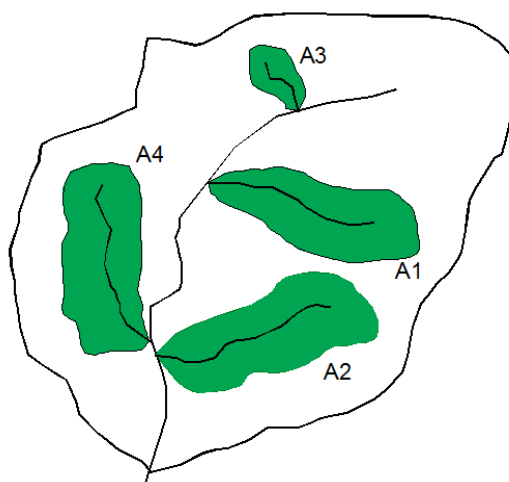


FUENTE: Costa, 2009.

### Insuficiente información

Cuando la cuenca en estudio no posee datos de caudales, el deducir una propia CDG no es posible, sin embargo existe un método que permite relacionar dos cuencas hidrológicamente similares.

**FIGURA 9.4 Esquema de cuencas vecinas**



ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Siendo la cuenca 1, similar en condiciones hidrológicas a la cuenca 2 (cuenca de interés); para la cuenca 2 que no posee datos, es posible deducir su propia curva suponiendo que la relación  $Q/A$ , para cada porcentaje del tiempo es igual a la de la cuenca con datos de caudal, siendo  $A$  el valor correspondiente al área de drenaje.

$$Q_2 = \frac{A_2}{A_1} * Q_1 \quad (9.3)$$

En donde,

$A_1$  = Área de drenaje de la cuenca 1, ( $\text{km}^2$ );

$Q_1$  = Caudal de la cuenca 1, ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$A_2$  = Área de drenaje de la cuenca 2, ( $\text{km}^2$ );

$Q_2$  = Caudal de la cuenca 2, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Se recomienda aplicar el método siempre y cuando la relación entre el área de la cuenca más grande y el área de la cuenca más pequeña no sea mayor a 1,5.

Cabe señalar que el uso de este método exige verificaciones en campo por medio de la instalación de limnímetros o realización de aforos en la sección de interés.

### 9.3 CAUDALES MÍNIMOS

La práctica hidrológica nacional considera tomar como caudales limitantes del uso del recurso hídrico (caudales mínimos) a los valores correspondientes a las frecuencias 70, 80, 90 o 95% de que estos valores sean igualados o excedidos, tomando como base la serie de caudales medios diarios o mensuales.

### 9.3.1 METODOLOGÍA

En el presente instructivo se considera la metodología mediante la curva de duración general para determinar los caudales mínimos para las cuencas de drenaje:

Se consideran caudales mínimos a los valores comprendidos en un rango de probabilidad de excedencia entre el 70 y 99% dada en la curva de duración general, por fines de evaluación de su variabilidad temporal.

Según (Andrade, 1992), los inconvenientes que se presentan al determinar los caudales mínimos en base a la curva de duración general, se enuncian a continuación:

- Se considera solo datos históricos y la distribución de probabilidades empírica no asocia una distribución teórica que permita incluir el riesgo de que se presenten caudales menores o mayores a los observados;
- La curva de duración general no considera los periodos específicos de ocurrencia o su estacionalidad.
- Los caudales con probabilidad de excedencia del 90 o 95%, no están directamente relacionados a los caudales mínimos consecutivos de 15, 30 o 60 días, u otro periodo.

### 9.4 EJEMPLO

Para la cuenca del Río Alambi, se desea determinar los caudales medios y mínimos. Para esto se graficará la CDG de tal manera que se puedan obtener las respectivas conclusiones.

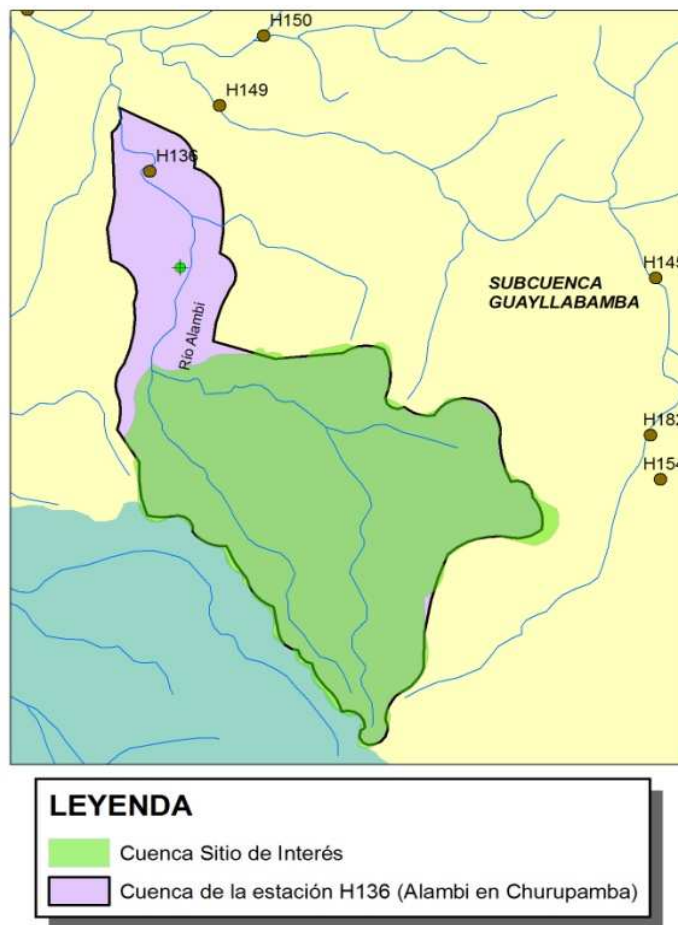
El ejemplo para este instructivo, se ha realizado en base al Estudio Climatológico e Hidrológico de la Central Hidroeléctrica Nanegal, (EPN - MEER, 2008)

El análisis de caudales se realizó principalmente con los registros históricos de la estación Alambi en Churupamba (H136), y se apoyó también en los datos de la estación Intag D.J. Pamplona (H150).

Con los registros de caudales medios diarios de las estaciones ya referidas, se conformó una base de datos para el período 1965-1998 en valores diarios; la información presenta vacíos en algunos meses y años.

Los caudales de la estación hidrométrica Alambi en Churupamba se transfirieron al sitio de interés mediante la relación de proporcionalidad de áreas entre las cuencas consideradas (Ver Figura 9.5), explicado procedimiento cuando no existe suficiente información.

**FIGURA 9.5** Transferencia de datos entre la cuenca de la Estación H136 Alambi en Churupamba y la cuenca del sitio de interés

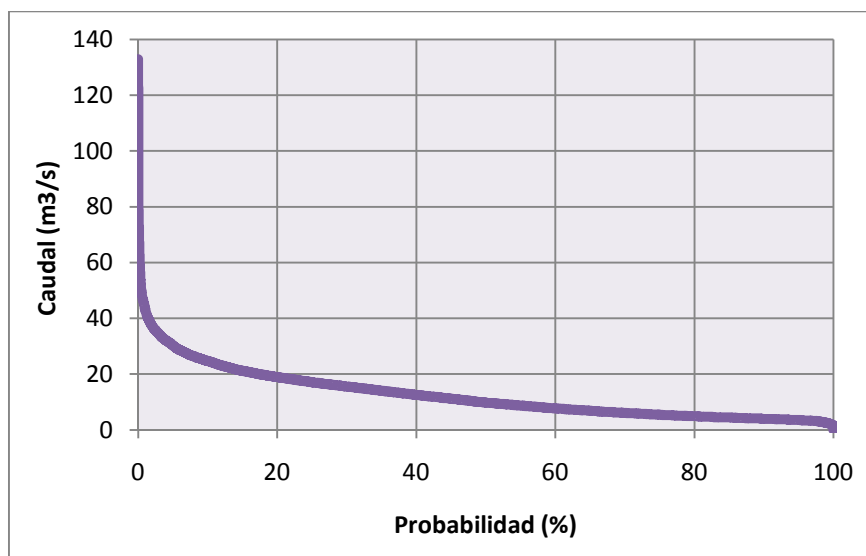


ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

#### 9.4.1 CURVA DE DURACIÓN GENERAL

Se tomaron los datos de caudales medios diarios, y se los dispuso como se explica en la tabla 9.1. (Ver Anexo N°8).

La curva de duración general resultante se muestra en el Gráfico 9.1:

**GRÁFICO 9.1 Curva de duración general para la cuenca de interés**

FUENTE: EPN – MEER, 2009

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

Los caudales característicos obtenidos a partir de este análisis son los siguientes:

**TABLA 9.5 Caudales del río Alambi**

Prob. (%)	Q (m³/s)
5	30,33
10	24,68
20	18,88
30	15,52
40	12,52
50	9,73
60	7,65
70	6,01
80	4,86
90	3,93
95	3,50
100	0,86

FUENTE: EPN – MEER, 2009

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.



### **Programa CDG 1.07**

Para determinar en las Curvas de Duración General, los caudales característicos y el área bajo el caudal medio, en la Escuela Politécnica Nacional se creó una aplicación con la herramienta MACROS en Microsoft Excel denominada CDG 1.07. Esta aplicación comprende un programa en el lenguaje Basic, que permite generar tablas de resumen con caudales característicos, la gráfica de la curva de duración general y el área bajo el límite del caudal medio de la serie en la CDG (Ríos, 2010)

La aplicación consta de tres (3) hojas de cálculo que son:

- *Datos*: ingreso de datos a analizar (caudales medios diarios o mensuales);
- *Resultados*: hoja en donde se presentan las coordenadas de la curva de duración general absoluta y otros parámetros; y,
- *Curva*: se muestra la forma gráfica de la curva de duración general.

A continuación se describen las herramientas y botones de las hojas de cálculo:

#### ***Datos***

Los valores a analizar están conformados por una matriz de  $n \times 12$  elementos, de acuerdo a la forma de presentación de los caudales diarios en un anuario hidrológico. Los valores deben guardar los límites de la matriz antes mencionada y en lo posible tener un formato de acuerdo a las configuraciones del sistema operativo. (Ríos, 2010)

El botón *GENERAR CAUDALES* calcula todos los parámetros de la curva de duración general, volúmenes de autorregulación natural con los datos ingresados.

El botón *OTRO CÁLCULO* permite limpiar la memoria interna de la aplicación para poder realizar otro cálculo.

La *TOLERANCIA* se refiere al rango de error absoluto en la determinación de los caudales y sus respectivas coordenadas. Mientras más datos existan el error disminuirá; este valor debe ser ingresado por el usuario.

**FIGURA 9.6** Ventana para ingresar datos en el Programa CDG 1.07

DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	23,5309	19,3826	13,2317	11,9443	15,6635	17,4515	9,94164	8,65424	5,14963	6,43704	7,15226	12,9456
2	26,4634	14,7337	13,3032	14,3045	15,6635	18,1667	11,9443	9,01185	5,50724	5,72181	5,93638	11,6582
3	21,8859	19,025	16,0211	14,6621	15,5204	18,0952	11,2291	8,51119	5,43572	5,93638	4,86354	11,6582
4	19,8118	19,8118	13,8754	13,9469	14,9482	14,9482	11,0145	8,58271	6,79405	8,2251	5,93638	10,6509
5	18,6674	23,2449	13,8039	13,8754	14,09	14,8052	9,72708	8,29662	6,15095	5,3642	11,8728	7,50988
6	19,3111	26,3918	18,2383	13,4463	13,5178	16,0211	9,58403	8,15358	6,15095	4,93506	10,7284	7,93901
7	17,9522	26,4634	15,4489	14,8767	14,3045	15,6635	9,65555	7,43835	5,29267	4,57745	10,0847	8,58271
8	22,6011	24,1031	15,3774	20,1694	14,233	14,09	9,87012	7,29531	5,29267	3,21852	9,65555	12,2304
9	18,4528	20,9561	18,4528	25,319	16,8078	13,8754	9,1549	9,51251	5,22115	3,07547	21,0277	12,9456
10	18,8105	22,172	20,9561	16,9509	15,0913	13,5893	10,4423	8,65424	5,86486	2,93243	21,3853	16,3072
11	16,3787	23,3164	18,3098	15,9495	16,8793	13,3032	14,376	7,86749	5,57876	4,00527	21,5998	14,1615
12	16,2356	26,1058	16,0211	23,6025	19,4542	12,4449	11,7297	8,01053	5,14963	4,00527	17,4515	12,731
13	16,2356	22,1005	16,9509	18,5959	28,1799	13,3747	9,94164	7,65292	2,43177	5,57876	17,7376	14,8052
14	20,5985	20,8131	21,0992	18,0237	24,7468	11,6582	11,1575	8,86881	7,72444	7,00922	17,38	12,3734
15	19,5972	20,3839	16,7363	21,6714	22,4581	11,8012	11,2291	7,79597	6,43704	10,0132	25,319	11,086
16	21,2422	19,2396	16,5217	21,0992	19,6687	12,1588	9,65555	8,01053	6,36551	16,8078	18,0237	11,6582
17	20,8131	18,0237	15,2343	20,3124	19,025	11,086	10,0847	7,93901	5,65029	17,6661	26,3918	11,6582
18	15,3774	16,8078	15,1628	18,7389	19,2396	13,8039	9,87012	7,86749	6,43704	18,3813	22,5296	10,3708
19	19,025	16,3787	16,0211	17,8807	17,5946	12,588	9,44099	8,36815	5,29267	8,72576	31,1123	8,36815
20	17,7376	16,3072	16,5217	17,4515	17,7376	13,0171	8,58271	8,66617	4,57745	6,72313	27,3932	13,5893
21	16,8078	16,4502	16,1641	16,4502	20,0979	12,4449	8,58271	8,58271	7,22379	6,86617	27,7508	9,94164
22	15,9495	15,6635	19,5972	17,0939	19,2396	11,8728	8,43967	7,29531	5,29267	15,2343	33,4011	11,5151
23	14,8767	15,0108	17,8807	17,4515	10,025	12,1588	8,51119	7,08074	5,93766	7,79597	23,7455	14,1615

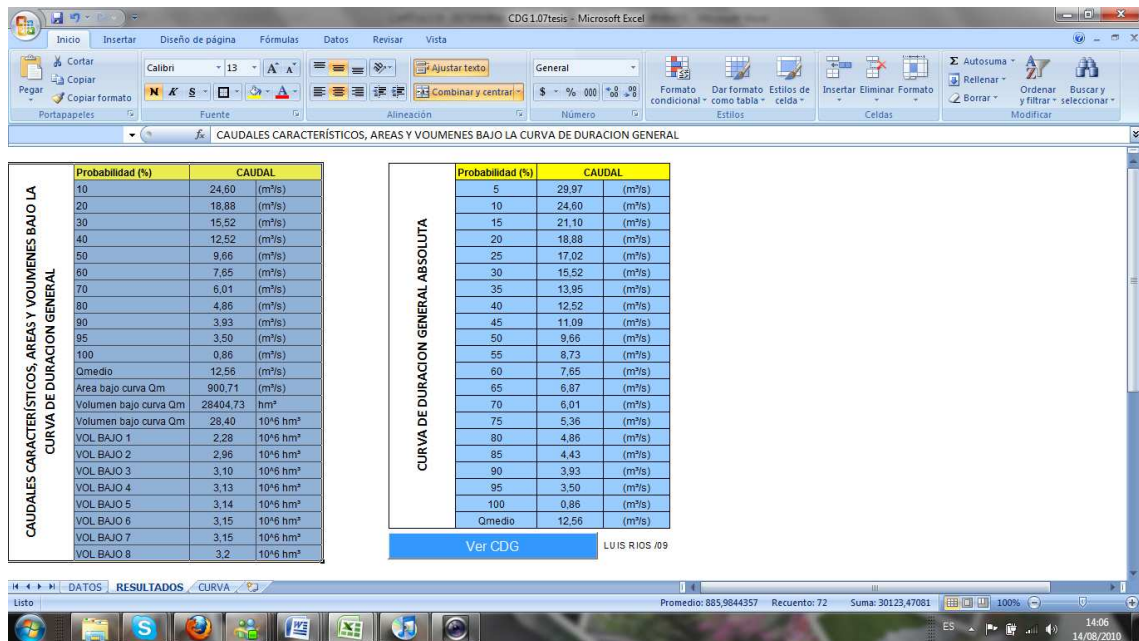
FUENTE: Ríos, 2010

## Resultados

Se muestran las coordenadas de la curva de duración general, caudal medio y también los volúmenes de autorregulación natural que se extrae de las áreas bajo la CDG.

El botón *VER CDG*, permite acceder a la hoja CURVA y visualizar la forma gráfica de la curva de permanencia de caudales. (Ríos, 2010)

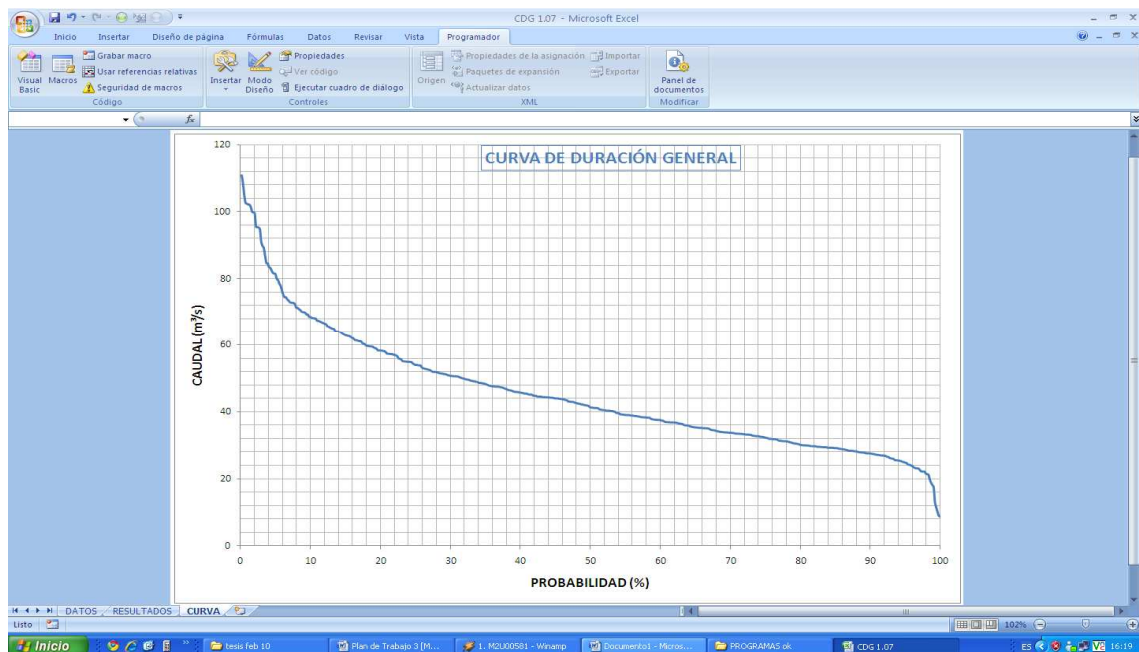
**FIGURA 9.7 Ventana de Resultados del Programa CDG 1.07.**



FUENTE: Ríos, 2010

### Curva

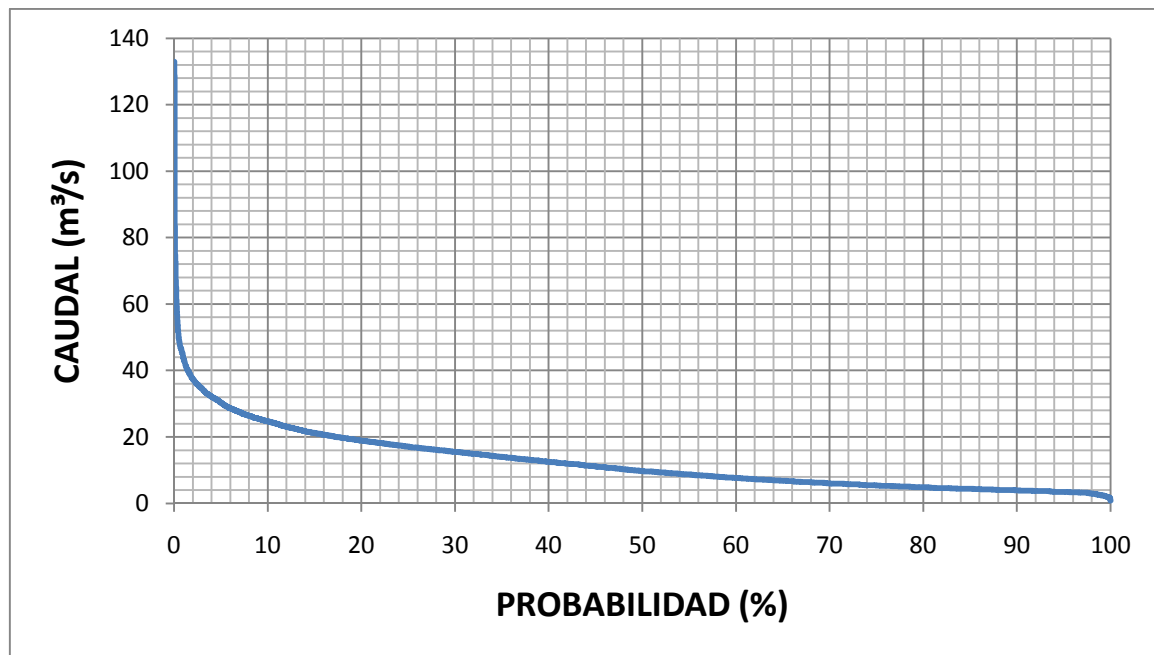
**FIGURA 9.8 Ventana del gráfico de la curva del Programa CDG 1.07.**



FUENTE: Ríos, 2010

Una vez que los datos de la cuenca en estudio se ingresaron, los resultados con el programa fueron:

**GRÁFICO 9.2** Curva de Duración General obtenida con el Programa CDG 1.07 para la cuenca en estudio.



PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

Con lo cual se puede observar, que la el programa representa una herramienta muy útil, puesto que se obtuvieron los mismos resultados que el trabajo realizado con la aplicación del procedimiento del numeral 9.2.1.1

**TABLA 9.6** Caudales característicos, áreas y volúmenes bajo la CDG obtenidos mediante el uso del Programa CDG 1.07

Probabilidad (%)	CAUDAL	
10	24,60	(m³/s)
20	18,88	(m³/s)
30	15,52	(m³/s)
40	12,52	(m³/s)
50	9,66	(m³/s)
60	7,65	(m³/s)
70	6,01	(m³/s)
80	4,86	(m³/s)
90	3,93	(m³/s)
95	3,50	(m³/s)
100	0,86	(m³/s)
Qmedio	12,56	(m³/s)

Probabilidad (%)	CAUDAL	
Area bajo curva Qm	900,71	(m <sup>3</sup> /s)
Volumen bajo curva Qm	28404,73	hm <sup>3</sup>
Volumen bajo curva Qm	28,40	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 1	2,28	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 2	2,96	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 3	3,10	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 4	3,13	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 5	3,14	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 6	3,15	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 7	3,15	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>
VOL BAJO 8	3,2	10 <sup>6</sup> hm <sup>3</sup>

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

**TABLA 9.7 Valores característicos de la Curva General de Duración, mediante el programa CDG 1.07**

Probabilidad (%)	CAUDAL	
5	29,97	(m <sup>3</sup> /s)
10	24,60	(m <sup>3</sup> /s)
15	21,10	(m <sup>3</sup> /s)
20	18,88	(m <sup>3</sup> /s)
25	17,02	(m <sup>3</sup> /s)
30	15,52	(m <sup>3</sup> /s)
35	13,95	(m <sup>3</sup> /s)
40	12,52	(m <sup>3</sup> /s)
45	11,09	(m <sup>3</sup> /s)
50	9,66	(m <sup>3</sup> /s)
55	8,73	(m <sup>3</sup> /s)
60	7,65	(m <sup>3</sup> /s)
65	6,87	(m <sup>3</sup> /s)
70	6,01	(m <sup>3</sup> /s)
75	5,36	(m <sup>3</sup> /s)
80	4,86	(m <sup>3</sup> /s)
85	4,43	(m <sup>3</sup> /s)
90	3,93	(m <sup>3</sup> /s)
95	3,50	(m <sup>3</sup> /s)
100	0,86	(m <sup>3</sup> /s)
Qmedio	12,56	(m <sup>3</sup> /s)

PROCESAMIENTO: María de la Paz Almeida R.

El programa da directamente el resultado del caudal medio calculado, que corresponde a  $12,56 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La práctica hidrológica nacional considera tomar como caudales limitantes del uso del recurso hídrico (caudales mínimos) a los valores correspondientes a las frecuencias 80, 90 o 95% de que estos valores sean igualados o excedidos, tomando como base la serie de caudales medios diarios o mensuales. Por lo cual el caudal mínimo ( $Q_{90\%}$ ) corresponde a  $3,93 \text{ m}^3/\text{s}$

Además, relacionando la CDG de la cuenca en estudio con la Figura 9.2 es posible observar que la forma de la curva analizada corresponde a una cuenca donde el caudal es relativamente constante; la permeabilidad es alta, y de forma general la retención de agua es buena.

## **CAPÍTULO 10**

### **DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS**

#### **10.1 INTRODUCCIÓN**

Los caudales máximos superan ampliamente los valores normales en los cauces de los ríos; presenta gran interés práctico el poder conocer sus valores, debido a que son muy importantes en el diseño de obras hidráulicas y para la gestión de recursos hídricos y ordenamiento territorial.

Este instructivo presenta la metodología para determinar estos caudales y además, se propone el procedimiento cuando no se dispone de suficiente información.

##### **10.1.1 DEFINICIONES**

Determinar con un nivel de aproximación razonable la magnitud de las crecientes que se podrían presentar durante la vida útil de una obra, permitirá el diseño de estructuras con una gran confianza en cuanto a los aspectos técnicos y económicos.

La estabilidad de una obra durante la vida útil, depende en gran medida de la capacidad para soportar los efectos que se producen sobre la estructura cuando existen caudales mayores. (Aguilera, 2007)

Se ha considerado de interés, incluir en el presente instructivo los conceptos y métodos prácticos resultantes de la experiencia de profesionales del país en el desarrollo de proyectos.

Existen varios métodos utilizados para el cálculo de caudales máximos, basado en la clasificación general que se anota a continuación (Ulloa, 1989):

- **Directos:** Llamados también de determinación por indicios, son aquellos que utilizan datos obtenidos en el campo por el hidrólogo con el fin de definir a partir de ellos solamente, la magnitud de las crecidas del cauce estudiado. Son métodos que se emplean cuando se carece de registros y son de mucha ayuda cuando no se dispone de información para verificar los resultados de los cálculos.
- **Empíricos:** Se suele denominar métodos empíricos y buscan definir los caudales que escurren en una crecida mediante fórmulas que proporcionan resultados similares a las observaciones realizadas en determinadas áreas.
- **Empírico – analíticos:** A diferencia de los anteriores estos métodos hacen ciertas consideraciones que se traducen en hipótesis de partida, sobre el fenómeno de escorrentía para obtener los caudales de crecida a partir de pocos datos.
- **Estadísticos:** Son los que parten de series de datos de caudales, crecida máxima anual por ejemplo, de las que se calculan ciertos parámetros estadísticos (media, desviación típica, entre otros) que sirven para determinar los caudales máximos esperados mediante distribuciones probabilísticas (Gumbel, Pearson, Binomial, etc.)
- **Estocásticos:** Mediante una serie de caudales existentes, genera una nueva serie de similares características estadísticas, utilizando para ello los diferentes parámetros de la primera y un modelo estocástico. Requieren de



amplia información de la zona de estudio para producir resultados satisfactorios.

- **Analíticos:** Son los que permiten realizar un análisis de los fenómenos que originan las crecidas, se representa la relación existente entre ello mediante expresiones matemáticas, es decir, mediante un modelo se representa una realidad física. La complejidad del mismo dependerá de la precisión que se requiera de los elementos con que se cuente y de la calidad y cantidad de la información disponible.
- **Probabilísticos:** Debido a que las crecidas son eventos en que se agrupan los casos más desfavorables de variables como una lluvia de ocurrencia  $T_r$ , repartición espacial y temporal de la misma, coeficientes de escorrentía, etc.; vendrá definida por la combinación de probabilidades de ocurrencia conjunta de las mismas, hecho que se puede expresar mediante la teoría de probabilidades.

La aplicación de estos métodos debe considerar en primera instancia, la exactitud que se desee tener en los resultados obtenidos.

Las distribuciones de probabilidad teórica de mayor empleo en hidrología son: la distribución normal, Gamma de dos parámetros, Gamma de tres parámetros o Pearson tipo III, Distribución Gumbel y Log-Gumbel, y la Log Pearson tipo III (Monsalve, 1995)

De estas distribuciones teóricas, sin que exista un análisis regional que lo justifique, es la de Gumbel en relación con el cálculo de caudales máximos (Villacís & Andrade, 1986)

La descripción detallada de la teoría acerca de estas distribuciones, se las puede encontrar en varios libros de hidrología, tales como:

- Monsalve, G. *Hidrología en la Ingeniería*.

- Chow V. T. *Hidrología aplicada*
- Viessman W. et. al. *Introduction to hydrology*
- Linskey, K.; Kohler, M.; Paulhus, J. *Hidrología para ingenieros*

Otros conceptos de importancia implicados en la probabilidad en hidrología, son:

### **Periodo de retorno**

Representa el intervalo promedio de tiempo durante el cual un determinado caudal es igualado o excedido al menos una vez. El periodo de retorno  $T_r$  está relacionado con la probabilidad de que determinado valor ser igualado o excedido

$$T_r = \frac{1}{P} \quad (10.1)$$

En donde:

$T_r$  = periodo de retorno, (años); y,

$P$  = probabilidad complementaria o de excedencia.

Y esta probabilidad  $P$ , está definida mediante la relación:

$$P = \frac{m}{n} * 100 \quad (10.2)$$

En donde:

$m$  = número de orden de la serie de caudales ordenado de mayor a menor;

$n$  = número total de valores de la serie; y,

$p$  = probabilidad, (%).

Así por ejemplo, si una crecida de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  tiene un periodo de retorno (o intervalo de recurrencia) de 25 años, esto significa que el máximo anual será igual o excederá los  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  a intervalos de tiempo que, en promedio, son de 25 años en longitud; o que la probabilidad de que el máximo anual exceda  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  en cualquier año es  $1/25$ .

### **Elección del periodo de retorno**

La solución ideal al problema del diseño se lograría si el hidrólogo pudiese suministrar al ingeniero hidráulico un estimado racional de la máxima crecida que ocurriría en el sitio seleccionado para la estructura durante la vida útil futura del proyecto. Desafortunadamente, el hidrólogo no puede hacer tal estimado, limitándose a proporcionar un estimado de la máxima crecida que razonablemente puede ser esperada con *una probabilidad específica*. En todo caso, las políticas que deben guiar al ingeniero cuando adopta tales previsiones, deben ser derivadas de consideraciones económicas, éticas y políticas tanto como en los criterios técnicos fundamentales de hidrología, hidráulica y diseño estructural. Como resultado, el complejo problema de elección del periodo de retorno de la crecida de diseño del aliviadero es resuelto finalmente por experiencia y criterio antes que por un rígido procedimiento técnico. (Villacís & Andrade, 1986)

En relación con proyectos de obras hidroeléctricas, o multipropósito, sin duda el costo de las obras en sí, como también las pérdidas ocasionadas a las actividades productivas de los usuarios, son los factores prevalecientes. Bajo estas consideraciones, la elección del periodo de retorno depende exclusivamente de la vida económica del proyecto, es decir, del tiempo necesario para que se recupere la inversión. (Villacís & Andrade, 1986)

La Figura 10.1, proporciona una ayuda para escoger un periodo de retorno de la crecida de diseño. El gráfico representa en abscisas el periodo de retorno, en el eje de las ordenadas el periodo de la vida del proyecto y en líneas inclinadas la probabilidad de falla en  $n$  años.

Este gráfico obedece a la ecuación:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (10.3)$$

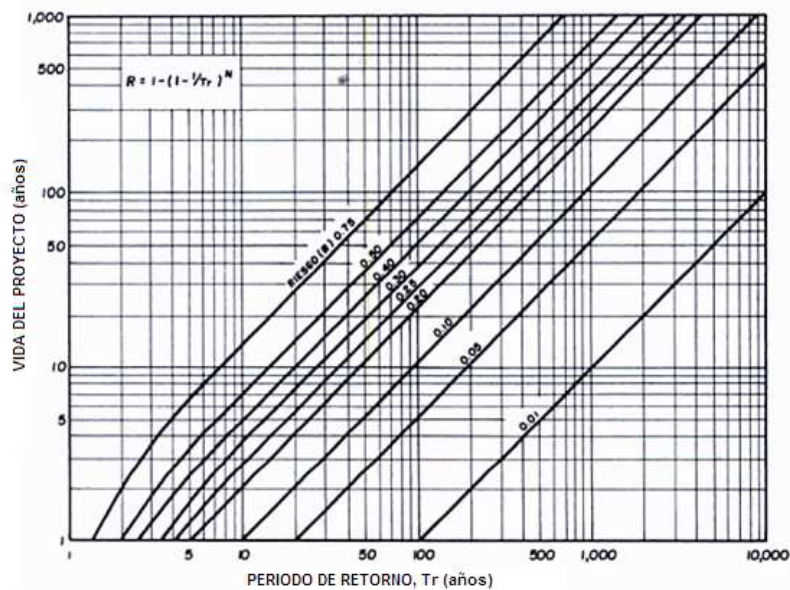
En donde:

T = periodo de retorno para el diseño, (años);

N = vida útil del proyecto, (años); y,

R = riesgo asumido asociado al periodo de retorno "T".

**FIGURA 10.1 Representación de la relación entre el periodo de retorno de la avenida de diseño, la vida útil de la obra y el riesgo que tal avenida sea igualada o excedida**



FUENTE: Campos, D.

Por ejemplo, si se desea saber el periodo de retorno de la crecida de diseño para un proyecto hidroeléctrico en que se supone que la inversión hecha se revertirá en un plazo de 10 años, asumiendo una probabilidad de no falla del 80% (o  $R = 0,2$ ) se tiene:

En el gráfico se puede ver que para  $N = 10$  y  $R = 0,2$ , el valor de  $T = 45$  años. Con la ecuación 10.3 que se encuentra en la página anterior se verificará este valor.

### **Serie anual**

Está formada por el conjunto de caudales máximos instantáneos anuales (un valor por año) que han sido registrados en un sitio de interés específico de un río. La serie anual es:

$$Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_i, \dots, Q_n$$

En donde,

$Q_i$ , caudal máximo instantáneo del año  $i$ , ( $m^3/s$ ); y,  
 $n$ , número total de años registrados.

En la conformación de esta serie anual se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se lista todos los años de registro y en orden cronológico;
- Los picos anuales corresponden a un registro limnigráfico. Y si un pico anual pudo haber ocurrido mientras el limnógrafo estuvo dañado, se debe hacer un estimado. En este caso, el estimado se lo utiliza únicamente para determinar el número de orden de los caudales en la serie ya completada y el punto estimado no se grafica en el papel de probabilidades;
- El año puede ser incompleto, pero si se determina que el caudal máximo corresponde al periodo de invierno y/o, si por análisis comparativo con estaciones adyacentes, se comprueba que en el periodo faltante no hubo crecidas mayores, entonces se lo toma como máximo anual;

- Se debe hacer constar las crecidas históricas anteriores al periodo de registro de la estación (aquellas que, con alguna confiabilidad, se hayan determinado por los trazos de la crecida, consulta a habitantes del lugar, etc.);
- Cuando los datos correspondan a lecturas limnimétricas, entonces se obtendrán los caudales máximos medios diarios ( $Q_d$ ) para hacer el estudio de frecuencias. Luego se hace el análisis de frecuencias de crecidas de los  $Q_i$  y  $Q_d$  de la estación limnigráfica más cercana (mismo orden de magnitud en área) y para varios T se deduce  $Q_i / Q_d$ . Esta relación se aplica a los  $Q_d$  obtenidos en la serie de nuestro interés directo. En este caso; entonces, se necesita recopilar los  $Q_i$  y  $Q_d$  de la estación en comparación.

### **Intervalos de confianza**

Además de los errores que provienen de la inexactitud de las observaciones experimentales, tales como toma de datos de campo de nivel y aforos y al procedimiento que incluye traducción de rollos limnigráficos, cálculo de aforos y extrapolación de la curva de descarga; la estimación de las descargas de crecidas por medio del análisis frecuencial para un seleccionado periodo de retorno T está sujeta a dos clases de errores:

- El primer error del modelo que es un error sistemático; la distribución de probabilidad que se usa para ajustar los caudales registrados, puede no ser la verdadera distribución de los caudales instantáneos. Al respecto, es poco lo que se puede hacer para corregir este error.
- El segundo tipo de error es el error de muestreo en el tiempo que es un error randómico. Las series históricas son demasiado cortas y constituyen una sola muestra de la población de caudales máximos y consecuentemente los estimados de la media, desviación estándar y coeficiente de asimetría son solo aproximaciones de los verdaderos parámetros para la distribución.

Por todo esto es necesario calcular los límites entre los que el valor real de una crecida de cierto periodo de retorno debería estar. Este intervalo es llamado el intervalo de confianza y puede ser estimado en cada caso particular.

En un sentido estricto, estos límites de confianza deberían ser calculados de acuerdo al tipo de distribución de probabilidad que fue seleccionado para registrar los caudales instantáneos máximos. Sin embargo, en proyectos de mediana o pequeña magnitud, es suficiente definir un intervalo de confianza aproximado mediante la aplicación de la TABLA 10.1 propuesta por L. Beard. Ver Anexo

**TABLA 10.1 Coeficiente de la desviación standard para intervalos de confianza**

NIVEL DE SIGNIFICACIÓN	AÑOS DE REGISTRO (N)	FRECUENCIA DE EXCEDENCIA EN PORCENTAJE						
		0,1	1	10	50	90	99	99,9
0,05	5	4,41	3,41	2,12	0,95	0,76	1	1,22
	10	2,11	1,65	1,07	0,58	0,57	0,76	0,94
	15	1,52	1,19	0,79	0,46	0,48	0,65	0,8
	20	1,23	0,97	0,64	0,39	0,42	0,58	0,71
	30	0,93	0,74	0,5	0,31	0,35	0,49	0,6
	40	0,77	0,61	0,42	0,27	0,31	0,43	0,53
	50	0,67	0,54	0,36	0,24	0,28	0,39	0,49
	70	0,55	0,44	0,3	0,2	0,24	0,34	0,42
100	0,45	0,36	0,25	0,17	0,21	0,29	0,37	
0,25	5	1,41	1,09	0,68	0,33	0,31	0,41	0,49
	10	0,77	0,6	0,39	0,22	0,24	0,32	0,39
	15	0,57	0,45	0,29	0,18	0,2	0,27	0,34
	20	0,47	0,37	0,25	0,15	0,18	0,24	0,3
	30	0,36	0,29	0,19	0,12	0,15	0,2	0,25
	40	0,3	0,24	0,16	0,11	0,13	0,18	0,22
	50	0,27	0,21	0,14	0,1	0,12	0,16	0,2
	70	0,22	0,17	0,12	0,08	0,1	0,14	0,18
100	0,18	0,14	0,1	0,07	0,09	0,12	0,15	
0,75	5	-0,49	-0,41	-0,31	-0,33	-0,68	-1,09	-1,41
	10	-0,39	-0,32	-0,24	-0,22	-0,39	-0,6	-0,77
	15	-0,34	-0,27	-0,2	-0,18	-0,29	-0,45	-0,57
	20	-0,3	-0,24	-0,18	-0,15	-0,25	-0,37	-0,47
	30	-0,25	-0,2	-0,15	-0,12	-0,19	-0,29	-0,36
	40	-0,22	-0,18	-0,13	-0,11	-0,16	-0,24	-0,3
	50	-0,2	-0,16	-0,12	-0,1	-0,14	-0,21	-0,27
	70	-0,18	-0,14	-0,1	-0,08	-0,12	-0,17	-0,22
100	-0,15	-0,12	-0,09	-0,07	-0,1	-0,14	-0,18	

TABLA 10.1 Continuación

NIVEL DE SIGNIFICACIÓN	AÑOS DE REGISTRO (N)	FRECUENCIA DE EXCEDENCIA EN PORCENTAJE						
		0,1	1	10	50	90	99	99,9
0,95	5	-1,22	-1	-0,76	-0,95	-2,12	-3,41	-4,41
	10	-0,94	-0,76	-0,57	-0,58	-1,07	-1,65	-2,11
	15	-0,8	-0,65	-0,48	-0,46	-0,79	-1,19	-1,52
	20	-0,71	-0,58	-0,42	-0,39	-0,64	-0,97	-1,23
	30	-0,6	-0,49	-0,35	-0,31	-0,5	-0,74	-0,93
	40	-0,53	-0,43	-0,31	-0,27	-0,42	-0,61	-0,77
	50	-0,49	-0,39	-0,28	-0,24	-0,36	-0,54	-0,67
	70	-0,42	-0,34	-0,24	-0,2	-0,3	-0,44	-0,55
	100	-0,37	-0,29	-0,21	-0,17	-0,25	-0,36	-0,45

FUENTE: L. Beard

El proceso se reduciría a lo siguiente:

- El caudal máximo para un cierto periodo de retorno (T), calculado con una cierta longitud de registro (N), deberá estar entre un límite superior  $Q_{Ts}$  y un límite inferior  $Q_{Ti}$  para un nivel dado de significación ( $\alpha$ );

$$Q_{Ti} \leq Q_T \leq Q_{Ts} \text{ con "nivel de significación } \alpha \text{"}$$

- Se ingresa a la Tabla 10.1 para encontrar el coeficiente por el que deberá multiplicarse la desviación standard de la serie histórica y este producto deberá sumarse o restarse al valor de  $Q_T$  según el caso, así:

$$(Q_T)_s = Q_T + k_1 * S$$

$$(Q_T)_i = Q_T + k_2 * S$$

$k_1$  y  $k_2$  se obtienen de la Tabla a la que se ingresa con  $P = 1/T * 100$  con "N" y con " $\alpha$ ". Ejemplo: para  $T = 10$  años,  $N = 20$  años y  $\alpha = 5\%$  (0,05 y 0,95)

Se obtiene de la tabla;  $k_1 = +0,64$ ,  $k_2 = 0,42$

Luego se calcula los valores  $(Q_T)_s$  y  $(Q_T)_i$



Finalmente el intervalo de confianza para un nivel de significación  $\alpha$ , queda definido por el límite superior e inferior. En realidad, al diseñador sólo le interesa el valor de  $Q_T$  (Valor de la curva media) y el  $(Q_T)_s$  que le indica hasta que valor máximo de caudal podría esperar para el mismo periodo de retorno "T" y un nivel de confianza  $(100 - \alpha)$ . Consecuentemente, el caudal de diseño estará ubicado entre  $Q_T$  y  $(Q_T)_s$  y su elección queda a criterio del ingeniero responsable del proyecto.

Cuando se haya trabajado con la serie transformada (caso de las distribuciones Log – Normal, Log Pearson), los intervalos de confianza se calculan antes de tomar los antilogaritmos de Log QT, es decir:

$$\begin{aligned} \log(Q_T)_s &= \log(Q_T) + (k_1) * Slog \\ \log(Q_T)_i &= \log(Q_T) + (k_2) * Slog \\ Y, (Q_T)_s &= 10^{\log(Q_T)_s}; (Q_T)_i = 10^{\log(Q_T)_i} \end{aligned}$$

### **Confiabilidad**

Los resultados que se obtengan con un análisis frecuencial son confiables en tanto que los datos básicos satisfagan ciertos criterios con respecto a:

- **Calidad de los datos.-** Es decir, que sean niveles instantáneos con registros continuos en el año, que la curva de descarga en el tramo de extrapolación sea representativa, que haya consistencia de los caudales máximos con las estaciones de aguas arriba y/o aguas abajo
- **Aleatoriedad y tamaño de la muestra.-** Los picos anuales deben ser independientes, es decir que el caudal máximo de un año no sea consecuencia de la misma tormenta que produjo el máximo anual del año anterior. Cuanto mayor sea el número de años, más confiables son los parámetros estadísticos (media, varianza, sesgo) necesarios en el análisis frecuencial, este tamaño de la muestra de caudales puede variar dependiendo de la variabilidad de las características climáticas y físicas de la región, en

todo caso para la aplicación del análisis frecuencial no se recomienda una serie anual menor de 10 años.

- **Homogeneidad de la serie de caudales máximos.-** Los valores anuales deben ser de tipo similar, de una población cuyas características sean invariantes en el tiempo, es decir, que no contengan una mezcla de caudales naturales y caudales regulados por el hombre, que no estén mezclados los datos limnigráficos y limnimétricos; que físicamente en los estados de cobertura vegetal en la cuenca no haya habido cambios bruscos, etc.

Suponiendo que se hayan cumplido los anteriores requerimientos, la confiabilidad de los resultados dependerá también de cuan fielmente se haya identificado la distribución de probabilidad teórica (normal, Gumbel, Log Pearson, etc.) con los caudales máximos de la serie estudiada. Al respecto no hay una estandarización fija que permita suponer que una distribución de probabilidad determinada sea claramente superior a otra. Intuitivamente, no existe razón alguna para que una distribución única sirva para todos los ríos. Es por todo esto, y considerando que estas incertidumbres inherentes al análisis frecuencial de crecidas, no pueden ser eliminadas por ningún truco matemático, es que se encuentran algunos resultados con más de una distribución y la decisión final de cual resultado usar para propósitos de diseño, depende del juicio del diseñador y de las características extrahidrológicas del proyecto particular (características físicas de las estructuras hidráulicas, objetivo del proyecto, etc.)

## 10.2 METODOLOGÍA

Hay dos enfoques básicos para definir las curvas de frecuencia de crecidas: el gráfico y el analítico.

- **Gráfico.-** Las frecuencias de crecidas son evaluadas simplemente ordenando los caudales registrados según el orden de magnitud, graficándolos en un

papel de probabilidad, y considerando que una curva suavizada sugerida por aquella ordenación de valores es representativa de las posibilidades futuras.

- **Analítico.-** Se ejecutan los cálculos analíticos necesarios para la aplicación del concepto de distribuciones teóricas de probabilidad (Normal, Gumbel, Log Pearson, etc.)

Este instructivo proporciona ambos procedimientos y con el objeto de ilustrar más ampliamente las bondades y limitaciones de los mismos, se proporciona a continuación un análisis resumido:

### **Ajuste Gráfico**

- El ajuste gráfico no requiere ninguna asunción respecto al tipo o características de la distribución.
- El procedimiento es simple y puede ser hecho rápidamente
- La relación de la curva a los caudales máximos se puede observar de forma rápida en el gráfico.
- Los caudales históricos (antes del funcionamiento de la estación) pueden ser incluidos racionalmente en el gráfico.
- Aun cuando se use la misma fórmula para definir la posición de los caudales en el gráfico, diferentes analistas dibujarán curvas de frecuencia un tanto distintas.
- El fenómeno de la crecida y sus resultados no pueden ser descritos por dos o tres parámetros.
- Una curva es ajustada por inspección a los puntos ploteados y aunque el método involucra el factor personal del analista, es a menudo más confiable

que una estimación matemática de los parámetros de distribución hecha por uno de los tres métodos convencionales (mínimos cuadrados, momentos, máxima verosimilitud) ya que, estos no toman en cuenta los factores hidrológicos del fenómeno de crecida y a menudo conducen a resultados absurdos. (Un método no es mejor porque conduce a respuestas uniformes, si aquellas respuestas son uniformemente equivocadas) (Villacís & Andrade, 1986)

### **Ajuste analítico**

- Para la misma distribución teórica, cada analista, usando la misma serie de datos, conseguiría la misma respuesta.
- El ajuste puede ser hecho rápidamente con un computador
- El resultado puede ser completamente descrito por unos pocos parámetros
- La relación de la distribución teórica de probabilidades tiende a ser algo arbitraria
- Ninguna distribución teórica ajustará todos los datos de crecida y por su naturaleza no pueden producir una solución completamente satisfactoria en todos los casos.
- Las características de un conjunto de datos tienden a ser oscurecidos si no son graficados.
- No está disponible ningún método objetivo que permita incorporar las crecidas históricas (antes de la instalación de la estación de registro) en los cálculos analíticos.
- Tiene la ventaja de que el grado de confiabilidad de los estimados de caudales con cierta frecuencia si puede ser evaluado.

## Datos básicos

En este manual se pone énfasis al nivel máximo instantáneo anual (un valor por año), y en suma se requerirá:

- La serie anual de niveles máximos instantáneos: un valor máximo en cada año y registrado en la estación limnigráfica y a falta de estos, se utilizará los caudales diarios máximos obtenidos con los registros limnimétricos (un valor por año)
- La crecida histórica máxima correspondiente al periodo anterior al de instalación de la estación.
- La(s) curva(s) de descarga en el estación que permita convertir los niveles a caudales.

### 10.2.1 SUFICIENTE INFORMACIÓN

Para el caso de disponibilidad de registros hidrométricos junto al sitio de interés (serie homogénea y representativa), se debe proceder al análisis probabilístico de los valores máximos instantáneos anualmente registrados en la estación estudiada.

### Procedimiento de cálculo para métodos probabilísticos

#### Ajuste Gráfico

Los datos de caudal son graficados en coordenadas cartesianas y las escalas se escogen de manera que para las ordenadas se usa la escala aritmética o logarítmica, y para las abscisas una escala de probabilidades que es variable de acuerdo al tipo de distribución de probabilidad teórica (las más usadas son la normal y de Gumbel). Consecuentemente se dispondrá de varios tipos de papeles

para graficar tales como aritmético – normal, logarítmico – normal, aritmético – gumbel, logarítmico – gumbel, etc.

El procedimiento de elaboración del gráfico es el siguiente:

- Los datos se ordenan de acuerdo a la magnitud, empezando con el más grande primero (orden descendente). Así, a cada valor de caudal queda asignado un número de orden “m” que va desde 1 a  $n$ , donde  $n$  es el número total de valores.
- A cada valor ordenado del caudal se le asigna una probabilidad o intervalo de recurrencia a través de una fórmula previamente escogida. La utilizada en este instructivo es la de Weibull que se expresa como:

$$p = \frac{m}{n+1} * 100 \quad (10.4)$$

En donde,

$p$ , probabilidad de que el caudal sea igualado o excedido (en concordancia con el ordenamiento de mayor a menor)

$m$ , número de orden ( $m = 1, 2, \dots, n$ )

$n$  = Número total de valores anuales en la serie

- Se grafican los puntos, poniendo en ordenadas las magnitudes del caudal y en las abscisas su correspondiente probabilidad de excedencia. Se recomienda que los puntos se ploteen en los papeles de probabilidad disponibles (generalmente los cuatro tipos disponibles en el mercado, normal / log – normal / Gumbel / Log – Gumbel)
- El siguiente paso es trazar una línea recta a través de los puntos graficados tratando de compensar visualmente la dispersión. El objetivo de que sea una línea recta, es que se trata de extrapolar magnitudes de caudal que

corresponden a periodos de retorno mayores a la longitud de la serie histórica disponible, lo cual se logra más racionalmente a través de una línea recta. La “compensación visual” debe considerar el tipo de escala usada tanto en ordenadas como en abscisas.

- El paso final consiste en seleccionar de entre los varios ajustes gráficos, aquel que corresponda a la menor dispersión de los puntos de la recta trazada.

En el caso de que sea posible más de uno de los ajustes gráficos y si la diferencia en los valores extrapolados es significativa, se optará por aquel ajuste cuyos valores sean consistentes con la realidad física del fenómeno crecida en la cuenca estudiada. Para el efecto, se compara con los caudales específicos de crecida de cuencas vecinas o similares física y climatológicamente, siendo necesario para esto, la experiencia del ingeniero que hace la selección.

En la realización del ajuste gráfico hay la posibilidad de involucrar aquella(s) crecida(s) histórica(s) ocurridas antes del funcionamiento de la estación hidrométrica que se estudia. El procedimiento seguido requiere un ligero cambio como se explica a continuación:

- Cuando hay una crecida histórica, mayor que cualquier otra que haya sido registrada durante el periodo de funcionamiento de la estación, y no hay más indicios de lo que haya ocurrido durante el periodo de aquella crecida histórica deberá calcularse con los valores de  $m = 1$ , y  $n =$  el número de años contabilizados entre el año de la crecida histórica y el final del registro. Entonces es posible la aplicación de la ecuación 10.4 como antes.

Los otros datos registrados con el limnógrafo se procesan como se indicó anteriormente. La ventaja de esta crecida histórica es que se tiene un punto adicional mayor que facilite el trazo de la recta de ajuste de caudales máximos anuales.

- Cuando hay datos de una crecida histórica, que se sabe que fue la máxima hasta que una crecida mayor ocurrió durante el periodo de funcionamiento de la estación, entonces el tratamiento es algo distinto, lo cual se podrá apreciar de mejor manera en el ejemplo al final del capítulo, conjuntamente con los papeles de probabilidad mencionados.
- Es importante mencionar que aunque se decida emplear únicamente el ajuste analítico, es conveniente hacer el ajuste gráfico puesto que:
  - Permite visualizar el comportamiento de los caudales
  - Sirve como ayuda para la elección del cálculo analítico con la distribución de probabilidad teórica, que podría ser la más probable de interpretar correctamente el fenómeno crecida de la cuenca (se refiere al gráfico cuyos puntos se dispersan menos de la recta), y se elegirá la distribución a la cual correspondería el papel del gráfico.

### **Ajuste analítico**

Las descargas de crecidas anuales pueden ser consideradas que obedecen a una cierta distribución de probabilidad, tal como la de Gauss (normal), de valores extremos tipo I (Gumbel), etc., que interpretará tan fielmente como sea posible las observaciones disponibles de caudal y seguidamente, una vez hecho el ajuste, se asume que esta misma ley de probabilidades es satisfactoria más allá de cualquiera de los extremos del periodo de observación y que (sujeta a ciertas reservas) permite el cálculo de una descarga de baja probabilidad ( $T = 50, 100, 500$ , etc. Años)

Es conveniente señalar que por lo general, las series de caudales instantáneos máximos tienen coeficientes de asimetría positivos y correspondientemente, las leyes de probabilidad que posiblemente se identificarían mejor son las asimétricas, sin embargo también se utiliza las distribuciones simétricas previa una transformación matemática del valor original del caudal (es el caso del ajuste



log – normal. Sea que la distribución sea asimétrica o simétrica, todas ellas están en función de un cierto número de parámetros estadísticos que tienen como objeto la determinación cuantitativa de:

- El valor central o dominante de la serie de caudales (en este instructivo, es la media)
- La dispersión de los varios términos de la serie alrededor del valor central (desviación estándar, varianza)
- Las características de forma de la distribución estadística de la variable (sesgo, coeficiente de asimetría)

Fundamentalmente, el ajuste analítico consistirá entonces en:

- Disponer de la serie anual de caudales máximos instantáneos.
- Calcular los parámetros estadísticos de esta serie, en este instructivo se lo hace por el *método de momentos*, así:

Media aritmética	$\bar{Q} = \frac{(\sum_{i=1}^n Q_i)}{n}$
Desviación estándar	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n - 1}}$
Coeficiente de asimetría	$C_A = \frac{n}{(n - 1)(n - 2)} * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^3}{S^3}$
Coeficiente de variación	$C_V = \frac{S}{\bar{Q}}$

Cuando según la distribución se ha optado por una transformación logarítmica, se ha la siguiente sustitución en las cuatro fórmulas indicadas:

$$\overline{\text{Log } Q} \text{ en lugar de } \bar{Q}$$

*Log Qi en lugar de Qi*

*Slog en lugar de S*

- Escoger el tipo de distribución de probabilidad a ser usada (como se indicó al final del ajuste gráfico, es necesario hacer este ajuste para ayudarse en la selección.

La elección racional de una distribución de probabilidad teórica a ser usada con una serie de tiempo de datos de crecidas es algo difícil. Generalmente la elección es hecha subjetivamente sobre la base de la experiencia regional del hidrólogo o de la institución para la cual trabaja. En este instructivo se sugiere aparte del ajuste gráfico, la necesidad de considerar los siguientes criterios (Tabla 10.2) para la selección de la distribución (Villacís & Andrade, 1986):

**TABLA 10.2 Criterios para la elección del tipo de distribución de probabilidad para el cálculo de caudales máximos.**

DISTRIBUCIÓN	CRITERIOS
Normal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El rango teórico de los valores de la distribución va de <math>-\infty</math> a <math>+\infty</math> (y las crecidas solo tienen valores positivos)</li> <li>• Sería aceptable cuando la serie tenga un coeficiente de asimetría entre "0" y "0,5"</li> <li>• También cumpliría con la distribución si con un conteo de los caudales máximos se determina que: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 50% de los valores están entre los límites señalados por <math>(\bar{Q} - 2/3S)</math> y <math>(\bar{Q} + 2/3S)</math></li> <li>○ 68% entre <math>(\bar{Q} - S)</math> y <math>(\bar{Q} + S)</math></li> <li>○ 95% entre <math>(\bar{Q} - 2S)</math> y <math>(\bar{Q} + 2S)</math></li> </ul> </li> </ul>
Log Normal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El rango teórico de los valores de la distribución va de "0" a <math>+\infty</math></li> <li>• Como los logaritmos atenúan el sesgo, sería preferible que el coeficiente de asimetría de la serie no difiera sensiblemente de "0" (positivo o negativo)</li> <li>• También deberá cumplirse los porcentajes dados para 50%, 68% y 95%.</li> <li>• Aplicable a series en donde <math>C_s \geq 3C_v + C_v^3</math></li> </ul>

TABLA 10.2 Continuación

Gumbel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El rango es positivo</li> <li>• Sería aceptable cuando el coeficiente de asimetría no sea muy diferente de <math>C_S = 1,14</math></li> </ul> <p>Al respecto, cuando <math>C_S &lt; 1,14</math> se exageran los valores de baja probabilidad y con <math>C_S &gt; 1,14</math> se subestiman los mismos (lo contrario es cierto para valores de alta probabilidad de ocurrencia)</p>
Log Gumbel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los mismos criterios que para Gumbel siendo más restrictiva con el valor de <math>C_S = 1,14</math></li> </ul>
Gamma de tres parámetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango positivo</li> <li>• No hay restricciones en cuanto al valor de <math>C_S</math></li> </ul>
Log Pearson III	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_S</math> debe ser mayor que <math>2C_V</math> para que no haya valores negativos</li> <li>• Se puede calcular para cualquier valor de <math>C_S</math></li> </ul>

FUENTE: (Andrade, 1986)

Como un criterio general se puede indicar que las distribuciones más usadas en nuestro medio para crecidas instantáneas (serie anual) son: Gumbel, Log Normal y Log Pearson. Cabe además enfatizar que cuando se usa una distribución en la que en primer lugar hay que hacer una transformación (log normal, log Gumbel, Log Pearson), se está introduciendo algún error en las estimaciones de los caudales de diseño debido precisamente a este artificio matemático.

- Se calculan los caudales del periodo de retorno que interesa a través de la fórmula general de frecuencia

$$Q_T = \bar{Q} + k_T S \quad (10.5)$$

En donde,

$Q_T$  = Caudal del periodo de retorno que se busca, ( $m^3/s$ );

$\bar{Q}$  = Caudal medio de la serie histórica, ( $m^3/s$ );

$K_T$  = Factor de frecuencia para cada "T" y que varía según el tipo de distribución de probabilidad escogida y que consta en forma de tablas (Ver tablas en el Anexo

Nº 6 para distribución normal y log-normal, la distribución Gumbel, la Gamma de tres parámetros o Pearson tipo 3); y, S, Desviación estándar de la serie histórica (m<sup>3</sup>/s)

Cuando la serie es transformada logarítmicamente se tiene:

$$\log(Q_T) = \overline{\log(Q)} + K_T S_{\log} \quad (10.6)$$

En que,

Log Q<sub>T</sub> = logaritmo del caudal para un periodo de retorno T

$\overline{\log Q}$  = Es el promedio de los logaritmos de los caudales de la serie histórica.

K<sub>T</sub> = Factor de frecuencia propio de la distribución escogida y se da en tablas.

S<sub>log</sub> = Desviación estándar de los logaritmos de los caudales de la serie.

Consecuentemente el valor de Q<sub>T</sub> sería:

$$Q_T = 10^{\log(Q_T)} \quad (10.7)$$

Si se ha calculado los caudales de diseño con más de una distribución, el siguiente paso es seleccionar los resultados para diseño.

- Se calcula el intervalo de confianza para los resultados de la distribución escogida.

En este instructivo se calcula esta banda de confianza para los resultados de la distribución escogida.

En este instructivo se calcula esta banda de confianza en forma muy simplificada a través del método propuesto por L. Beard (U.S. Army Corps of Engineers) y para el que se utiliza la Tabla 10.1.

### 10.2.2 INSUFICIENTE INFORMACIÓN

Cuando la serie de caudales máximos de la estación no sea representativa, se anotarán los valores existentes como referencia y se aplicará una fórmula regional para el cálculo de crecidas.

Cuando los estudios hidrológicos se están realizando en cuencas con área de drenaje pequeñas, se puede utilizar el método racional, que permite calcular caudales máximos en función de las precipitaciones.

La determinación del caudal máximo se puede realizar también en base a las huellas de las crecidas y las características geométricas del cauce. Las huellas de los niveles máximos alcanzados por el agua deben ser detectadas en distintos sitios a lo largo del río y en ambas orillas, por cuanto los perfiles longitudinales del nivel de agua en ellos, pueden ser diferentes uno al otro. El cálculo de la pendiente media del nivel de agua se realiza tomando en cuenta ambos perfiles por medio de nivelación.

El tramo del río debe ser en lo posible rectilíneo y homogéneo, en el cual se determinan 3 secciones transversales ubicadas a una distancia más o menos igual entre ellos.

Como sección mojada del tramo se toma el valor medio aritmético de las áreas de las tres secciones transversales.

El cálculo de la crecida máxima se realiza por la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{A * I^{(1/2)} * R^{(2/3)}}{n} \quad (10.8)$$

Donde,

A = sección mojada

$I$  = pendiente media del nivel de agua

$n$  = coeficiente de rugosidad

$R$  = radio hidráulico ( $R = A/P$ )

$P$  = perímetro mojado de la sección transversal media

### **10.2.3 DATOS EN EL EXTERIOR DE LA CUENCA DE DRENAJE**

Cuando no existe información hidrométrica disponible en el lugar requerido, deben estimarse los caudales a partir de estadísticas obtenidas en ríos análogos.

## CAPÍTULO 11

### MÉTODO RACIONAL

#### 11.1 INTRODUCCIÓN

Este método es uno de los más usados en nuestro medio debido a lo sencillo que es y por los pocos datos necesarios, y según la experiencia de varios técnicos es aplicable para cuencas pequeñas (menores a 5 km<sup>2</sup>), duración máxima de la lluvia de 30 minutos, tiempos de concentración de 12 horas. (Ulloa, 1989)

#### 11.2 METODOLOGÍA

Este método se basa en la suposición de que los caudales máximos originados por un evento de precipitación son producidos cuando la duración de las mismas es igual al tiempo de concentración, momento en que toda la cuenca está aportando al caudal de salida.

La ecuación utilizada es:

$$Q_{TR} = \frac{C * I_{TR} * A}{3,6} \quad (11.1)$$

En donde:

$Q_{TR}$ , Caudal máximo para un tiempo de retorno  $Tr$ , (m<sup>3</sup>/s);

$C$ , Coeficiente de escorrentía;

$I_{TR}$ , Intensidad de precipitación, (mm/h); y,  
 A, Área de la cuenca, (km<sup>2</sup>).

Para esto, la caracterización físico – geográfica de la cuenca resulta de mucha utilidad, puesto que varios de los datos que se necesitan han sido obtenidos en el mismo.

### 11.2.1 OBTENCIÓN DE INTENSIDADES MÁXIMAS

Como ya se explicó en el capítulo 6 (Caracterización Climática), en la sección 6.2.1.2, el Ecuador se encuentra dividido en 35 zonas homogéneas de intensidad, por lo que se encuentra el centro de la cuenca, y teniendo en cuenta que se tratan de cuencas pequeñas con las que se puede trabajar con este método es posible ubicarla dentro de una de estas, de tal manera que se pueda tener una ecuación para hallar la intensidad para diferentes periodos de retorno.

Para poder aplicar estas ecuaciones, es necesario disponer de los datos de intensidad de precipitación diaria con periodo de retorno ( $I_{dTR}$ ) y el tiempo, que en este caso corresponde al tiempo de concentración en la cuenca.

Este procedimiento se explica con detalle en el capítulo 6.

Para hallar el tiempo de concentración ( $t_c$ ) existen varias fórmulas empíricas que facilitan su cálculo tal como lo mencionan Monsalve. G y Chow V.T. en sus publicaciones.

Una de las fórmulas más aceptadas, es la de Kirpich (1940)

$$t_c = 3,989 * L^{0,77} * S^{-0,385} \quad (11.2)$$

Donde:

$t_c$  = tiempo de concentración, (min);



L = longitud del cauce principal de la cuenca, (km); y,

S = pendiente media del cauce

Los datos de  $I_{d_{TR}}$ , se encuentran disponibles en mapas de isoyetas para los distintos periodos de retorno, y ubicando las coordenadas del centro de la cuenca en cada uno de estos, mediante interpolación, es posible hallar la intensidad de precipitación del sitio de interés. Los periodos de retorno que se pueden encontrar en estos mapas corresponden a 5, 10, 25, 50 y 100 años, por lo que se recomienda trabajar con los mismos para facilitar los cálculos. Estos mapas se los puede encontrar en el Anexo N°7.

Con esta información, es posible obtener la  $I$  necesarias en la ecuación de caudal máximo, para distintos periodos de retorno.

### **11.2.2 COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA**

El coeficiente de escorrentía  $C$  es la variable con menos precisión del método racional ya que en él están inmersas varias características como la permeabilidad, pendiente, encharcamiento, cualidades y condiciones del suelo como su tipo y uso, además de la intensidad de las lluvias, la proximidad del nivel freático. (Chow, Maidment, & Mays, 1987)

Su uso en la ecuación del método racional implica una relación fija entre la tasa de escorrentía máxima y la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje, por lo cual se debe escoger un coeficiente razonable que represente los efectos integrados de todos estos factores.

Estos coeficientes se encuentran tabulados en algunas fuentes, sin embargo se debe tener en cuenta la realidad de nuestro territorio, donde así como podemos encontrar extensas planicies, es posible encontrar pendientes muy pronunciadas. En muchas de estas se presentan pendientes de máximo 7%, lo cual para el Ecuador es una pendiente considerada como leve, es por eso que esto se convierte en un aspecto a considerarse al momento de escoger una tabla para los coeficientes de escorrentía.

Una tabla sugerida para este fin puede ser la siguiente, tomada de Benitez et. Al. (1980)

**TABLA 11.1 Coeficientes de escorrentía para diferentes superficies**

COBERTURA DEL SUELO	TIPO DE SUELO	PENDIENTE (%)				
		> 50	20-50	5-20	1-5	0-1
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

FUENTE: Benitez et. Al., 1980

El último dato necesario es el área de la cuenca, obtenida ya en la caracterización físico - geográfico de la cuenca, con lo cual es posible obtener el valor del caudal máximo para un determinado tiempo de retorno.

## **CAPÍTULO 12**

### **CALIDAD DEL AGUA**

#### **12.1 INTRODUCCIÓN**

La disponibilidad de un recurso no se refiere únicamente a la abundancia o escasez relativas, sino también a su calidad, la misma que puede ser un limitante para usos específicos.

La calidad del agua, es un tema muy complejo, puesto que obedece a múltiples factores como: la composición de los suelos de la cuenca, el régimen hidrológico, características hidráulicas del sistema fluvial, época del año. Además de esto, muchas veces las características del agua se ven afectadas por las actividades humanas que se realizan dentro de la cuenca y que por escorrentía superficial o descarga directa llegan a los cuerpos hídricos.

Para los estudios hidrológicos, el análisis de la calidad del agua comprende principalmente la evaluación de las aguas superficiales: (agua de lluvia, escorrentías, lagos, lagunas, ríos, caudal freático que aflora, entre otros). En este instructivo, el enfoque se realizará hacia ríos, lagos, lagunas y estuarios y trata en detalle la toma de datos de su calidad para utilizarla en distintas actividades.

## 12.2 USOS DEL AGUA

El punto de partida para las evaluaciones de calidad del agua es una descripción de las utilidades que soportará cada cuerpo hídrico, pues son distintos los requerimientos para cada tipo de uso.

La norma ecuatoriana, en el Anexo 1 - Libro VI - TULSMA, establece las siguientes clasificaciones para usos de las aguas superficiales, subterráneas, marítimas y de estuarios:

- **Consumo humano y uso doméstico.-** Corresponde al agua que se emplea en actividades como:
  - Bebida y preparación de alimentos para consumo;
  - Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas; tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios; y,
  - Fabricación o procesamiento de alimentos en general.
- **Preservación de Flora y Fauna.-** Se entiende por uso del agua para preservación de flora y fauna, el empleo en actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas asociados, sin causar alteraciones en ellos, o para actividades que permitan la reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies bioacuáticas en cualquiera de sus formas, tal como en los casos de pesca y acuicultura
- **Agrícola.-** Corresponde a las aguas empleadas para la irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias;

- **Pecuario.-** Son aquellas empleadas para el abrevadero de animales, así como otras actividades conexas y complementarias que establezcan los organismos competentes.
  
- **Recreativo.-** Se entiende por uso del agua para fines recreativos, la utilización para:
  - Contacto primario, como en la natación y el buceo, incluidos los baños medicinales y,
  
  - Contacto secundario como en los deportes náuticos y pesca.
  
- **Industrial.-** Se entiende por uso industrial del agua su empleo en actividades como:
  - Procesos industriales y/o manufactureros de transformación o explotación, así como aquellos conexas o complementarios;
  
  - Generación de energía y
  
  - Minería.
  
- **Transporte.-** Aquellas que son empleadas para la navegación de cualquier tipo de embarcación o para la movilización de materiales inocuos por contacto directo.
  
- **Estético.-** El uso estético del agua se refiere al mejoramiento y creación de la belleza escénica.

Y en base a estas, se muestran los parámetros físicos, químicos y biológicos que deben ser analizados, los límites permisibles para cada uno de ellos, y algunas restricciones especiales.

## 12.3 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

Las sustancias que alteran la calidad del agua, pueden ser clasificadas en 4 grandes grupos:

- **Físicas.-** Estas características están asociadas con la apariencia del agua, su color o turbidez, temperatura, sabor y olor;
- **Químicas.-** Las diferencias químicas entre aguas son evidentes, algunas veces, observando sus reacciones, como el comportamiento comparativo de aguas duras y blandas en el lavado;
- **Biológicas.-** Los agentes biológicos son muy importantes, ya que son de prioridad en lo relacionado a la salud de las personas, y también pueden ser significativos a la hora de modificar las características tanto físicas, como químicas del agua; y,
- **Radiológicas.-** Los factores radiológicos deben ser considerados en áreas donde exista la posibilidad de que el agua pueda haber tenido contacto con sustancias radioactivas. (Corbitt, 2003)

### 12.3.1 PARÁMETROS FÍSICOS

El agua, de acuerdo con el uso que se le pretenda dar, debería tener ausencia de cualquier impureza que resulte perjudicial para la vista, gusto u olfato. Las características físicas del agua incluyen:

- **Turbidez.-** Cuando existe presencia de material suspendido, como podría ser arcilla, sedimentos, materia orgánica en tamaño pequeño, plancton y otros materiales inorgánicos en agua, se hace alusión a la turbidez. Cuando esta medida excede los 5 NTU ya es fácilmente detectable en un vaso con agua, y eso normalmente ya es inaceptable aunque sea solo por razones

estéticas. En ríos, después de un evento de precipitación, esta característica suele modificarse. (Corbitt, 2003).

Esta característica se mide mediante un instrumento llamado Turbidímetro. No se recomienda el uso del espectrofotómetro, ya que no ha sido diseñado para ello, y las unidades con las que reporta el valor no pueden ser asociadas con las normas ecuatorianas.

- **Color.-** El material orgánico que proviene de la vegetación y ciertas sustancias inorgánicas, confieren al agua color. En algunas ocasiones un número excesivo de algas o microorganismos, pueden aportar color al agua, dándole tonos verdosos; aguas con materia orgánica pueden presentar color amarillo - café, las aguas residuales presentan un color grisáceo, las industriales dependen del tipo de proceso, materias primas, etc. (Corbitt, 2003).
- **Sabor y olor.-** El sabor y olor del agua se originan por la introducción de sustancias ajenas a la propia agua, como pueden ser: compuestos orgánicos, gases disueltos, sales inorgánicas; los mismos que pueden provenir de diversas fuentes. Algunas sustancias que no son dañinas pueden dar un sabor u olor al agua, que no es agradable. Como ejemplo, se tiene al sulfato de magnesio, sulfato de sodio, o cloruro de sodio. (Corbitt, 2003).
- **Temperatura.-** Para abastecimiento humano es deseable que el agua permanezca fresca casi constantemente y no tenga fluctuaciones de temperatura más que unos pocos grados. El agua de regiones montañosas generalmente cumple esta condición. (Corbitt, 2003).

### 12.3.2 PARÁMETROS QUÍMICOS

Debido a la composición de las rocas, el agua puede presentar disueltos distintas sales y minerales que provienen de las mismas. Además, por las

actividades antropogénicas se pueden introducir a las corrientes otro tipo de sustancias.

La información que puede obtenerse de un análisis químico es: la posible presencia de sustancias perjudiciales o desagradables, el potencial del agua para afectar sistemas de abastecimiento, riego o tratamiento y la tendencia del agua a manchar ropa, objetos, entre otras.

A continuación se presenta una breve descripción de algunos de los parámetros más comunes a tomar en cuenta para los análisis, con sus posibles orígenes.

- **Cloruros.-** la mayoría de aguas contienen cloruros en solución. La cantidad presente puede ser debido a: extracción de depósitos sedimentarios marinos, a la intrusión salina de agua de mar, por contaminación con salmuera, o de residuos industriales. Cuando las concentraciones exceden los 250 mg/l, el sabor es apreciable. Un aumento de contenido de cloruros en el agua puede indicar que existe contaminación aguas arriba de la corriente con aportes de alcantarillado, particularmente cuando se sabe que la cantidad de cloruros es baja o debe serlo;
- **Alcalinidad.-** La producen en el agua los carbonatos, bicarbonatos, e iones OH;
- **Dureza.-** El contenido mineral del agua refleja su movimiento a través de los minerales que conforman la corteza de la tierra. Causantes de la dureza son las sales de calcio y magnesio.

Conviene recordar también que la dureza temporal es menos grave que la dureza permanente (Casares, S/f)

Las aguas duras, retardan la acción limpiadora de jabones y detergentes, cuando se calientan depositan duras incrustaciones en las tuberías, ollas, utensillos de cocina, resistencias calefactoras. (Corbitt, 2003);



- **pH.** Este indica la concentración de iones hidrógeno en el agua. Es también una medida del contenido ácido o alcalino;
- **Oxígeno disuelto.-** El agua tiene disueltos los gases que hay en el aire; oxígeno nitrógeno, CO<sub>2</sub>, entre otros. La cantidad de gases es variable y cambia con la presión atmosférica y temperatura; además de estos cambios, la proporción de oxígeno está sujeta a variaciones por la presencia de seres vivos que lo absorben o producen, y por las materias orgánicas o minerales susceptibles de oxidarse (Casares, S/f); y,
- **Químicos potencialmente tóxicos.-** El agua puede contener sustancias tóxicas en solución por presencia en el entorno o contaminación antropogénica. Cuando el agua va a ser destinada a usos domésticos, consumo humano, para agricultura, pecuario, o recreativo, hay que tener especial atención con estos, puestos que la presencia de alguna sustancia química en una concentración mayor a la permitida según la legislación, indicaría que el suministro no debe utilizarse. Ejemplo de estos son los metales pesados, pesticidas, etc. En este punto es que se refleja la importancia de la identificación de industrias aguas arriba, ya que nos dan la pauta del posible contenido del agua que se desea utilizar.

### 12.3.3 PARÁMETROS BIOLÓGICOS

Son múltiples los animales y vegetales que se pueden encontrar en el agua, sean macroscópicos o microscópicos y también son indicadores del estado ecológico del entorno acuático. (Metcalf & Eddy, 1998)

Dentro de los microbiológicos, ciertas especies de peces como las truchas y salmón, dan indicios de aguas con buena calidad, ya que son muy sensibles a la contaminación. Aguas muy contaminadas no presentan vida.

En cuanto a parámetros microbiológicos, son de vital importancia cuando el objetivo del uso del agua tiene que ver con el consumo humano y usos domésticos, ya que el agua es un medio para transmisión de enfermedades.

En nuestro medio, el parámetro común que se investiga es la presencia de *coliformes*, y algunos patógenos específicos y virus.

Otros indicios biológicos acerca de la calidad del agua, son los Biofilms (películas biológicas que se depositan sobre algunas superficies). Cuando son verdes, indican buena calidad del agua, cuando son cafés o negras ponen de manifiesto la mala calidad del agua. (presencia de organismos anaerobios)

Las características descritas anteriormente son generales y los análisis que deben realizarse al agua dependerán directamente de la normativa ambiental, normas sectoriales y del reconocimiento de campo que da indicios de posibles contaminantes del agua.

En la Tabla 12.1 se mencionan algunas variables básicas, sugeridas por la OMM, con base en la guía operativa GEMS/AGUA

**TABLA 12.1 Variables básicas relativas a la calidad del agua**

<b>CALIDAD GENERAL DEL AGUA</b>			
	<i>Ríos</i>	<i>Lagos y embalses</i>	<i>Aguas subterráneas</i>
Descarga/ nivel del agua	x	x	x
Sólidos suspendidos totales	x	-	-
Temperatura	x	x	x
pH	x	x	x
Conductividad	x	x	x
Oxígeno disuelto	x	x	x
Turbidez	-	x	-
<b>SALES DISUELTAS</b>			
	<i>Ríos</i>	<i>Lagos y embalses</i>	<i>Aguas subterráneas</i>
Calcio	x	x	x
Magnesio	x	x	x
Sodio	x	x	x
Potasio	x	x	x

Tabla 12.1 Continuación

<b>CALIDAD GENERAL DEL AGUA</b>			
	<i>Ríos</i>	<i>Lagos y embalses</i>	<i>Aguas subterráneas</i>
Cloruro	x	x	x
Fluoruro	-	-	x
Sulfato	x	x	x
Alcalinidad	x	x	x
<b>NUTRIENTES</b>			
Nitrato más nitrito	x	x	x
Amoníaco	x	x	x
Fosfato total disuelto	x	x	-
Fósforo total en suspensión	x	x	x
Fósforo total no filtrado	x	x	-
Sílice reactivo	x	x	-
<b>MATERIA ORGÁNICA</b>			
	<i>Ríos</i>	<i>Lagos y embalses</i>	<i>Aguas subterráneas</i>
Clorofila a	x	x	-

FUENTE: GEMS/AGUA

## 12.4 LÍMITES DE VARIACIÓN EN LOS CURSOS NATURALES: LAGOS, LAGUNAS, RÍOS, VERTIENTES

La calidad del agua en los cuerpos hídricos no es constante en el tiempo ya que está sujeta a cambios. Algunos parámetros de la calidad muestran relación entre la velocidad de cambio en el tiempo, otros se alteran independientemente.

La aproximación de los valores recogidos en el muestreo a los verdaderos valores, dependerá de la variabilidad de los parámetros y del número de muestras que se tomen.

Las variaciones de la calidad del agua independientemente a la introducción de contaminantes, se producen por el aumento o disminución en el volumen o flujo de agua. Esta variabilidad puede ser de dos clases, al azar o cíclica.

Las variaciones al azar se refieren a hechos inesperados que pueden ocurrir sin previo aviso, en cualquier momento y son impredecibles, como tormentas súbitas que dan lugar a mayor flujo seguido por corrientes y filtraciones contaminadas y desborde de alcantarillados; descargas industriales ocasionales, descargas agrícolas individuales, fugas, accidentes.

Las variaciones cíclicas por otro lado, se refieren a ciclos anuales o en un lapso de tiempo fijo, como por ejemplo patrones regulares de lluvias, cambios de temperatura estacionales, ciclos diarios causados por la fotosíntesis que afectan el OD y pH, ciclos anuales que reflejan descargas industriales. Y algunos ciclos semanales de origen artificial. (OMM, 1983)

#### **12.4.1 RÍOS**

La variabilidad de la calidad del agua es más pronunciada en ríos que en otros cuerpos hídricos, y los rangos serán mayores cuanto más cerca esté el punto de muestreo a la fuente u origen de la variabilidad, refiriéndose en este caso a efluentes arrojados al río, la unión con otro cuerpo hídrico al cauce principal, o su división en varias corrientes.

Conforme aumenta la distancia a la fuente, la mezcla longitudinal suaviza las irregularidades y se necesitan pocas muestras para encontrar límites dados de confianza. Sin embargo, conforme aumenta la distancia entre la fuente de variabilidad y el punto de muestreo no solo habrá reducción en el rango de variación sino también se presentará dilución y algunos parámetros se verán disminuidos debido a la auto-purificación del río, por depósito o adsorción.

Un incremento de caudal de un río conduce a:

- Una dilución de los contaminantes que entran con el agua residual;
- Un incremento en los sólidos en suspensión procedentes de la escorrentía superficial y de la perturbación de los sedimentos del fondo;

- Una liberación de los materiales adsorbidos por los sedimentos o precipitados (por ejemplo fosfatos, metales pesados);
- Un incremento en la demanda de oxígeno bioquímico causado por la agitación de las sustancias reductoras del lecho del río;
- Una disminución de la relación entre agua subterránea y escorrentía superficial en el caudal del río que generalmente conduce a una disminución del pH;
- Un lavado de los microorganismos bénticos, y una reducción en la concentración de los microorganismos acuáticos y en el tiempo de residencia
- Una atenuación de los efectos ocasionados por las súbitas entradas de contaminantes;
- Una reducción de la absorción de la radiación solar y la disminución asociada de la actividad fotosintética; y,
- Una mayor turbulencia y una mejor aereación. (OMM, 1994).

Cuando al aumentar el caudal del río, existe una ocupación de las planicies de inundación, se puede dar lugar a algunos efectos importantes en la calidad del agua, tales como:

- Una atenuación de la crecida relacionada con un almacenamiento adicional en el valle y en la orilla, que conduce a una reducción general de los efectos del aumento de caudal;
- Un incremento de la relación superficie – volumen de agua, que favorece la absorción de la radiación solar y la actividad fotosintética;

- Una reducción de la velocidad de la corriente en la planicie de inundación, que conduce a una disminución de la reaeración y a un depósito de los sólidos en suspensión fuera del canal fluvial principal;
- Un intenso contacto con el sedimento anteriormente depositado, con diferentes tipos de estructuras del suelo, depósitos, etc., que pueden contaminar el río.

La disminución del volumen de agua en los ríos, originan efectos contrarios a los que se producen por incrementos de caudal. Además de esto, los períodos de poca agua van acompañados por una variación diurna relativamente alta en las características de la calidad del agua, como el oxígeno disuelto, el dióxido de carbono, el pH y la temperatura. En climas áridos, es importante el efecto de la evaporación en la concentración de las diferentes sustancias disueltas en el agua. En climas fríos, los períodos de estiaje en invierno también pueden ser períodos de déficit de oxígeno, cuando existan capas de hielo que interfieran con el proceso de reaeración. (OMM, 1994)

#### **12.4.2 LAGOS**

Los lagos, son cuerpos de agua dulce parcialmente encerrados, circundados por tierra, que presentan un comportamiento sujeto a una amplia variedad de influencias, que a diferencia de los ríos actúan en tres dimensiones. Por ello existen factores que ocasionan variaciones temporales y espaciales en la distribución de la calidad del agua.

Un lago, puede ser caracterizado por parámetros morfométricos, hidrológicos, químicos, biológicos y de sedimentación, dependiendo de su edad, historia, clima y del agua que contenga. Cada lago responde de manera distinta a estos factores que combinados, causan las mayores variaciones de la calidad del agua tanto en espacio como en tiempo.

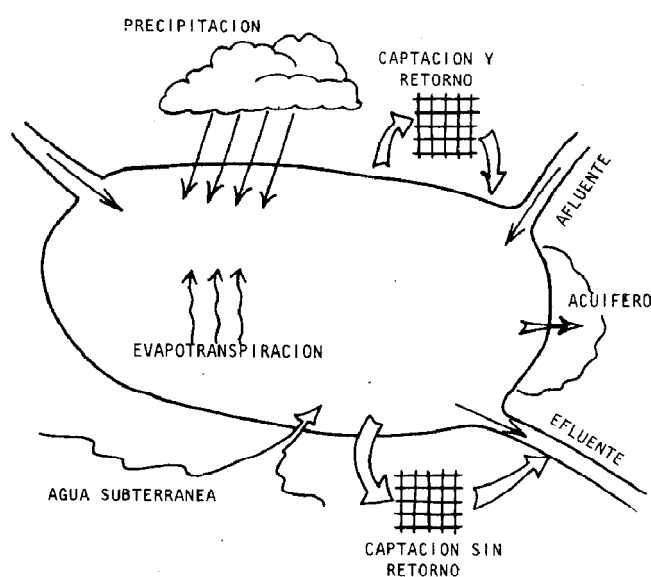
### El contenido del agua, estratificación y actividad biológica en el lago como factores de variación de la calidad del agua

La composición del agua de un lago, dependerá del contenido del mismo, lo cual tiene relación con el balance entre entradas y salidas, y también entre el intercambio existente entre los sedimentos, el agua, y la producción de materia orgánica por actividad biológica. (OMS, 1983).

Las mayores entradas de un lago son los ríos y arroyos que pueden llevar consigo gran variedad de materiales sean estos naturales o artificiales, además, descargas directas domésticas, agrícolas e industriales. Los egresos ocurren por medios similares, siendo el principal el río de salida del lago, además de captaciones para uso público o industrial. Puede haber también movimiento subterráneo del agua.

El tiempo de retención por ende, será el total del agua que entra, dividido para el volumen del lago, y debería ser el tiempo utilizado para alcanzar el equilibrio después de un gran cambio en la entrada. Esto ocurre muy rara vez. El grado de mezcla varía por la localización de las entradas y salidas, la configuración del lago (forma, dimensiones)

**FIGURA 12.1 Balance esquemático del agua de un lago**



FUENTE: (OMM, 1983)

En lagos, la masa de agua y una buena mezcla lateral, proveen de inercia ante cualquier cambio rápido que resulte por modificaciones en entradas y salidas.

Muchos lagos muestran marcadas variaciones estacionales debido a la estratificación térmica, la inversión y actividad biológica. Dependiendo del tipo del lago, el muestreo puede llevarse a cabo con estimación de tendencia estacional, los mismos que marcan los ciclos naturales del lago. (OMM, 1983)

## **12.5 PLAN DE MUESTREO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL AGUA**

El siguiente plan es un modelo realizado en base a la experiencia en muestreos con ayuda bibliográfica y que constituye una guía para la determinación de la calidad del agua.

### **12.5.1 PLANIFICACIÓN DEL MUESTREO**

En el reconocimiento de campo se pueden identificar características importantes del cuerpo hídrico, para orientar el proceso de muestreo.

En la visita al lugar será importante considerar:

- Posibles constituyentes del agua: los olores y colores son dan pautas acerca de presencia de contaminantes físicos y químicos;
- Los factores que pueden influenciar directa o indirectamente en la calidad del cuerpo de agua, en consideración. Estos incluirán todas las descargas o captaciones tanto puntuales como difusas que podían tener un efecto significativo, el tipo de suelo, el uso del suelo, el clima, la hidrología, la industrialización y agricultura, que deben ser evaluadas también con el fin de identificar posibles contaminantes en el agua; y,



- Ubicación de un posible sitio de muestreo, tomando en cuenta que las muestras deben ser representativas (que los parámetros en la muestra deben tener el mismo valor como en el cuerpo de agua en el lugar y tiempo de muestreo) por lo cual en el sitio de muestreo el cuerpo hídrico debe estar mezclado totalmente; además se debe tener en cuenta la accesibilidad y seguridad para quienes realizarán este procedimiento.

Una vez que esto ha sido identificado y registrado se procede a planificar el muestreo, tomando en cuenta:

- Registrar y describir los sitios de descarga aguas arriba del punto de muestreo, analizando las actividades de la misma y ubicando posibles contaminantes;
- Recolectar cualquier dato existente sobre la calidad del cuerpo de agua o alguna parte de él, que fueron analizadas anteriormente. La edad de los datos, obviamente afectará su valor el momento de tomarlo en consideración; y,
- Reunir la información disponible en cuanto a los parámetros y límites permisibles según el uso del agua, requerimientos de calidad e importancia y preparar un inventario de los parámetros que deben mandarse a analizar en el laboratorio, y aquellos que durante el muestreo deben ser medidos in-situ.

### **12.5.2 MUESTREO**

Como se mencionó anteriormente, las variaciones cíclicas hacen que la calidad del agua no sea constante a lo largo del tiempo, por ello, cuando se toman muestras a intervalos constantes en un mismo periodo del ciclo (por ejemplo una misma estación del año, una misma hora en el día, una mismo periodo de precipitación), no son representativas en el tiempo, no indican que está ocurriendo en el resto del ciclo y por ende los resultados sucesivos no permitirán evaluar cambios en la calidad del agua.

El programa de muestreo puede contener tiempos de muestreo al azar, es decir sin planificación en un lapso de tiempo determinado, pero lo importante es que estén distribuidos más o menos uniformemente a través del año de tal manera que se cubran las variaciones cíclicas.

Si se conoce el tiempo de mayor variabilidad o pico de la calidad del agua, puede ser conveniente incrementar la frecuencia de muestreo en tales tiempos o desviar hacia ellos el monitoreo. En tiempos de verano o sequías, cuando los ríos presentan menor caudal, es conveniente incrementar la frecuencia de muestreo, lo mismo debe hacerse en tiempos estacionales o actividades regulares agrícolas e industriales.

Los lagos están sujetos a periodos regulares de cambio rápido debido a su estratificación térmica e inversión. (OMS, 1983)

Los procedimientos para realizar un muestreo deben consultarse en la bibliografía adecuada. Una fuente recomendada es la *Guía Operacional de GEMS/Agua*, publicada por CEPIS, donde se detalla como se debe llevar a cabo los procedimientos de un muestreo en los cuerpos hídricos, los cuidados que deben mantenerse con las muestras para evitar cambios en los resultados y procedimientos especiales de toma de muestras en ríos y lagunas; de igual forma, literatura respecto a calidad del agua, orientan acerca de los procedimientos de muestreo.

Las muestras deben llevarse a un laboratorio certificado, y con los resultados que se tenga, comparar con la normativa mencionada.

## **12.6 INDICE DE CALIDAD DEL AGUA**

El Índice de Calidad del Agua (ICA), surge a partir de la necesidad de dar una interpretación a los datos obtenidos por medio de los análisis de laboratorio respectivos.

Este índice, intenta dar un valor representativo e indicativo del nivel de contaminación, de tal manera que pueda ser comparable, se lo pueda enmarcar dentro de ciertos rangos y permita detectar tendencias. Por cuestiones de practicidad, este índice reduce la cantidad de parámetros analizados, por resulta sacrificada alguna información, lo cual es una desventaja, además de la falta de ajuste a distintos tipos de ecosistemas y la sensibilidad de los resultados a la forma en que el índice fue elaborado (problemas de ambigüedad, eclipsamiento y rigidez)

Se debe tener precaución al usar los índices de calidad de agua, y utilizarlos de manera crítica, de esta forma será una herramienta para resumir y simplificar la información, haciéndola entendible para el público en general.

Uno de índices de calidad del agua más difundidos es el *National Sanitation Foundation NSF – Water Quality Index*, desarrollado por un panel de 142 expertos en distintos ámbitos de la gestión de los recursos hídricos. Como otros índices creados a partir de 1965, fue desarrollado en tres pasos: selección de las posibles variables, desarrollo de funciones y pesos de cada parámetro, y finalmente la adición de las variables seleccionadas. La clasificación que ofrece este índice está enfocado a aguas cuyas captaciones estén orientadas al uso humano.

Otros índices desarrollados y ampliamente difundidos son el ISQA (Índice Simplificado de Calidad del Agua), el cual se basó en 5 parámetros fisicoquímicos y planteó una clasificación de la calidad del agua para 6 usos específicos del recurso, entre los cuales se destaca el abastecimiento para consumo humano; y el desarrollado por Dinius, que consiste en un ICA conformado por 12 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, el cual también se basó en el método Delphi, pero a diferencia del ICA-NSF, cuya clasificación está orientada a aguas a ser empleadas como fuente de captación para consumo humano, considera 5 usos del recurso: consumo humano, agricultura, pesca y vida acuática, industrial y recreación. (Torres, Cruz, & Patiño, 2009)

Los ICA más recientes, cuyo objetivo fundamental es la evaluación de la calidad del agua para consumo humano previo tratamiento, incluyen dentro de su estructura parámetros fisicoquímicos y microbiológicos directamente relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua.

Montoya y Contreras, plantearon el ICA empleado como herramienta de indicación en el estudio sobre aguas superficiales del Estado de Jalisco-México, conformado por 18 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos agrupados en 4 categorías: cantidad de materia orgánica; materia bacteriológica presente; características físicas y materia orgánica. Este índice considera 9 usos, dentro de los cuales se destaca el abastecimiento público.

### **Metodología**

La metodología propuesta por (Bascaran, 1979) para el análisis del Índice de Calidad del Agua (ICA), es la más difundida en nuestro medio. Esta es ampliamente utilizada debido a su diseño sencillo y a que permite incluir  $n$  variables en la integración, previa ponderación de su magnitud; siendo entonces aplicable a series de datos, tanto numerosas como pequeñas.

Los parámetros que se toma en cuenta son 10:

- pH
- Conductividad
- Oxígeno disuelto
- Reducción del permanganato
- Coliformes
- Nitrógeno amoniacal
- Cloruros
- Temperatura
- Detergentes
- Aspecto

Este índice se calcula a partir de la fórmula:

$$ICA = \frac{k \cdot \sum (P_i \cdot C_i)}{\sum P_i} \quad (12.1)$$

En donde:

$C_i$  = Valor porcentual asignado a los parámetros

$P_i$  = Peso asignado a cada parámetro

$k$  = constante

Con el fin de calcular todos los valores necesarios para obtener el índice de calidad del agua, se construirá la siguiente tabla de apoyo (Tabla 12.2).

**TABLA 12.2** Tabla de apoyo para el cálculo del ICA

PARÁMETRO	Peso	A	Valoración porcentual $C_i$	$P_i \cdot C_i$
		-	-	
	$\Sigma P_i$	K		
		ICA		
		CA		

ELABORADO POR: María de la Paz Almeida R.

- El primer paso consiste en ir ubicando los distintos parámetros que se han obtenido mediante los análisis de laboratorio y que coinciden con los parámetros utilizados en la metodología de Bascaran (Tabla 12.3 y 12.4)

- En la segunda columna, correspondiente a Peso, se ubica la ponderación para cada uno de los parámetros en cuestión, los mismos que se encuentran en las tablas mencionadas anteriormente.
- En la tercera columna, se ubica el valor de los análisis de laboratorio para los distintos parámetros, tomando en cuenta que las unidades concuerden con las que se especifican en las tablas de Bascaran.
- La cuarta columna corresponde al valor porcentual. En las Tablas 12.3 y 12.4, se puede observar debajo de cada parámetro una serie de valores analíticos, para los cuales hay un valor porcentual establecido. Pocas veces el dato del laboratorio coincidirá con los valores analíticos de las tablas, por lo cual se debe realizar una interpolación para hallar el porcentaje específico para dicho valor, ubicando el rango de valores analíticos de las tablas en donde se encuentra el dato disponible.

Respecto a la Tabla 12.4, es importante mencionar que la misma debe ser referencial, y sería lo indicado el estudio de cada región o ecosistema para establecer para cada una de estas, los valores porcentuales de los parámetros en cuestión, y el peso de estos dentro del cálculo de índice de calidad.

- En la quinta columna ( $P_i \cdot C_i$ ) se procederá a multiplicar los valores del peso (Columna 2) por las valoraciones porcentuales (Columna 4).
- Se suman todos los valores de las columnas 2 y 5
- La constante  $k$  toma los siguientes valores:
  - 1: para aguas claras sin aparente contaminación
  - 0,75: para aguas con ligero color, espumas, ligera turbidez aparente no natural

- 0,50: para aguas con apariencia de estar contaminada y fuerte olor
- 0,25: para aguas negras que presenten fermentaciones y olores.

Esto se podrá determinar mediante el formulario de muestreo del Capítulo 5 (Reconocimiento de Campo) donde se registraron estos detalles en la visita al sitio.

- En el casillero de ICA se aplica la ecuación para el cálculo de la misma, multiplicando el valor de  $k$  por la sumatoria de la columna 5, y dividido para la sumatoria de la columna 2.
- Con el valor que se obtenga, es posible dar un criterio cualitativo acerca del agua en análisis según el uso que se le pretenda dar. (Tabla 12.6). Esto se ubicará en el último casillero, correspondiente a CA.

**TABLA 12.3 Valor porcentual asignado a los diez parámetros propuestos por Bascaran**

PARÁMETRO	pH	Conductividad	Oxígeno disuelto	Reducción del permanganato	Coliformes	Nitrógeno amoniacal	Cloruros	Temperatura	Detergentes	Aspecto	Valoración porcentual
<b>Valor analítico</b>	1 / 14	> 16.000	0	> 15	> 14.000	> 1,25	> 1 500	≥ 50 / ≤ -8	≥ 3,00	Pésimo	0
	2 / 13	12.000	1	12	10.000	1,00	1 000	45 / -6	2,00	Muy malo	10
	3 / 12	8.000	2	10	7.000	0,75	700	40 / -4	1,50	Malo	20
	4 / 11	5.000	3	8	5.000	0,50	500	36 / -2	1,00	Desagradable	30
	5 / 10	3.000	3,5	6	4.000	0,40	300	32 / 0	0,75	impropio	40
	6 / 9,5	2.500	4	5	3.000	0,30	200	30 / 5	0,50	Normal	50
	6,5	2.000	5	4	2.000	0,20	150	28 / 10	0,25	Aceptable	60
	9	1.500	6	3	1.500	0,10	100	26 / 12	0,10	Agradable	70
	8,5	1.250	6,5	2	1.000	0,05	50	24 / 14	0,06	Bueno	80
	8	1.000	7	1	500	0,03	25	22 / 15	0,02	Muy bueno	90
7	< 750	7,5	< 0,5	< 50	0,00	0	21 / 16	0,00	Excelente	100	
<b>Unidades medida</b>	Udad	µmhos/cm	mg/l	mg/l	nmp / 100 ml	ppm	ppm	° C	mg/l	Subjetiva	%
<b>Peso</b>	1	4	4	3	3	3	1	1	4	1	-

NOTA: Los valores analíticos que corresponden a un valor porcentual menor que 50, se entienden como no permisibles.



**TABLA 12.4 Unidades porcentuales de otros parámetros que intervienen en la calidad del agua**

PARÁMETRO	Dureza	Sólidos disueltos	Plaguicidas	Grasas y aceites	Sulfatos	Nitratos	Cianuros	Sodio	Calcio	Magnesio	Fosfatos	Nitritos	DBO5	Valor porcentual
Valor analítico	> 1.500	> 20 000	> 2	> 3	>1.500	> 100	> 1	> 500	> 1.000	> 500	> 500	> 1	> 15	0
	1.000	10.000	1	2	1.000	50	0,6	300	600	300	300	0,5	12	10
	800	5.000	0,4	1	600	20	0,5	250	500	250	200	0,25	10	20
	600	3.000	0,2	0,6	400	15	0,4	200	400	200	100	0,2	8	30
	500	2.000	0,1	0,3	250	10	0,3	150	300	150	50	0,15	6	40
	400	1.500	0,05	0,15	150	8	0,2	100	200	100	30	0,1	5	50
	300	1.000	0,025	0,08	100	6	0,1	75	150	75	20	0,05	4	60
	200	750	0,01	0,04	75	4	0,05	50	100	50	10	0,025	3	70
	100	500	0,005	0,02	50	2	0,02	25	50	25	5	0,01	2	80
	50	250	0,001	0,01	25	1	0,01	15	25	15	1	0,005	1	90
< 25	< 100	0	0	0	0	0	0	< 10	< 10	< 10	0	0	< 0,5	100
<b>Unidades medida</b>	mg CaCO <sub>2</sub> /l	mg/l	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	%
<b>Peso</b>	1	2,0	2,00	2	2	2	2	1	1	1	1	2	3	-

**TABLA 12.5 Aptitud del agua para distintos usos en función del ICA**

ICA	USO PÚBLICO	RECREACIÓN	PESCA Y VIDA ACUÁTICA	AGRICULTURA E INDUSTRIA	NAVEGACIÓN
100 - 90	Aceptable No requiere de purificación	Aceptable para todo tipo de deporte acuático	Aceptable para todo tipo de organismos	Aceptable. No requiere de purificación	Aceptable para todo tipo de navegación
90 - 80	Requiere de una ligera purificación			Requiere una ligera purificación	
80 - 70	Mayor necesidad de tratamiento	Aceptable pero no recomendable	Excepto especies muy sensibles	Sin tratamiento para la industria normal	
70 - 60					
60 - 50	Dudoso	Dudoso para contacto directo	Dudoso para especies sensibles	Con tratamiento para la mayor parte de la industria	
50 - 40			Solo para organismos muy resistentes		
40 - 30	Inaceptable	Sin contacto con el agua	Inaceptable	Uso muy restringido	Contaminado
30 - 20		Muestras obvias de contaminación			
20 - 10		Inaceptable		Inaceptable	Inaceptable
10 - 0					

## 12.7 EJEMPLO

### 12.7.1 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA

El ejemplo se basa en los datos que han sido registrados en el Estudio de Impacto Ambiental Preliminar realizado para la Hidroeléctrica Jondachi.

Se desea conocer la calidad del agua de un punto ubicado dentro del río Jondachi. El reconocimiento de campo muestra que el cuerpo hídrico atraviesa áreas dedicadas a la agricultura y ganadería, y las comunidades de La Merced de Jondachi y Narupa, por lo que se encuentra contaminada por las descargas de aguas negras de dichas comunidades.

Es importante indicar que durante la investigación de campo no se evidenció el consumo directo del río para actividades humanas, pero si el del recurso con fines de pesca pero sobretodo de recreación. Se realiza una primera toma de muestras, se deberá tomar otra muestra más al menos en periodo de estiaje.

Se define como punto para muestreo las coordenadas:

- Longitud: 187431
- Latitud: 9921323

Durante la investigación *in situ*, el río Jondachi se encontraba muy crecido, llevando gran cantidad de sólidos en suspensión. La energía que llevaba no permitió la toma de muestras de ictiofauna o macroinvertebrados.

Tomando en consideración lo anteriormente descrito, y la Tabla 12.1, los parámetros a ser analizados y los resultados de laboratorio son los siguientes:

TABLA 12.6 Resultados de los análisis de laboratorio de las muestras de agua

<b>ANÁLISIS DE AGUA</b>		
<b>Análisis físicos y químicos</b>	<b>Concentraciones</b>	<b>Unidades</b>
Sólidos suspendidos Totales	382	mg/l
DBO5	8	mg/l
DQO	20	mg/l
<b>ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</b>		
Coliformes Totales	35	NMP/100ml
Coliformes Fecales	11	NMP/100ml
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>		
Color	87.5	Pt-Co
Turbiedad	143	U.N.T.
Temperatura	19	oC
Conductividad	32	us/cm
pH	8.16	
Sólidos Totales	398	mg/l
Sólidos Disueltos	23	mg/l
<b>CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS</b>		
Alcalinidad Total	20	CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidad Bicarbonatos	20	CaCO <sub>4</sub>
Anhídrido Carbónico libre	0.25	CO <sub>2</sub>
Calcio	6.8	Ca 2
Cloruros	4.46	Cl
Dureza Total	24	CaCO <sub>3</sub>
Dureza Cálcica	17	CaCO <sub>4</sub>
Fluor	0.1	F
Fosfatos	0.12	PO <sub>4</sub>
Hierro Total	1.15	Fe 3
Hierro Soluble	0.88	Fe 3
Hierro Coloidal	0.27	Fe 3-
Magnesio	1.7	Mg 2-
Manganeso	0.2	Mn 2
Amoníaco	0.82	NH <sub>3</sub>
Nitratos	0.52	NO 3
Nitritos	0.04	NO 2-
Potasio	0.6	K
Sodio	3.8	Na
Sulfatos	9.35	SO 4 2-

FUENTE: (Arregui, 2008)

### Comparación con la norma

En este caso, el uso que se pretende dar al agua es el de generación de energía eléctrica, respecto a esto, la normativa vigente que define los parámetros y límites permisibles (Anexo 1 del Libro VI del TULSMA) establece que *“para el uso industrial, se deberán observar los diferentes requisitos de calidad correspondientes a los respectivos procesos, aplicando el criterio de tecnología limpia que permitirá la reducción o eliminación de los residuos (que pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos)”*. Por tanto, no existen criterios específicos dentro de la misma, con los que puedan ser comparados los valores obtenidos para determinar si el agua es idónea para este fin. Lo que debe pretender el análisis físico, químico y microbiológico del agua en este caso, es constatar la posible existencia de componentes del agua que puedan reducir la vida útil de turbinas, conductos, y demás materiales con los que se ve relacionada el agua en proyectos de este tipo, es decir, determinar si el agua es apta para esta finalidad.

En el caso de que el uso que se le quiere dar al agua estaría destinado con el consumo humano con tratamiento previo, se debería comparar con la Tabla 1 del Anexo N°1 del TULSMA, y establecer cuales parámetros se encuentran sobre la norma para escoger el tratamiento adecuado antes de que sea utilizada por la población.

**TABLA 12.7 Ejemplo de comparación de los análisis realizados con las normas ambientales según el uso del agua**

COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA AMBIENTAL				
Análisis físicos y químicos	Concentraciones	Unidades	Límite máximo permisible consumo humano	Condición
Sólidos suspendidos Totales	382	mg/l	-	-
DBO5	8	mg/l	2	No Cumple
DQO	20	mg/l	-	-
<b>Análisis Microbiológico</b>				

COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA AMBIENTAL				
Análisis físicos y químicos	Concentraciones	Unidades	Límite máximo permisible consumo humano	Condición
Coliformes Totales	35	NMP/100ml	3000	Cumple
Coliformes Fecales	11	NMP/100ml	600	Cumple
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS				
Color	87,5	Pt-Co	100	Cumple
Turbiedad	143	U,N,T,	100	No Cumple
Temperatura	19	oC	+/- 3°Ta	Cumple
Conductividad	32	us/cm	-	-
pH	8,16		-	-
Sólidos Totales	398	mg/l	-	-
Sólidos Disueltos	23	mg/l	-	-
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS				
Alcalinidad Total	20	CaCO <sub>3</sub>	-	-
Alcalinidad Bicarbonatos	20	CaCO <sub>4</sub>	-	-
Anhídrido Carbónico libre	0,25	CO <sub>2</sub>	-	-
Calcio	6,8	Ca 2	-	-
Cloruros	4,46	Cl	250	Cumple
Dureza Total	24	CaCO <sub>3</sub>	500	Cumple
Dureza Cálctica	17	CaCO <sub>4</sub>	-	-
Fluor	0,1	F	1,5	Cumple
Fosfatos	0,12	PO <sub>4</sub>	-	-
Hierro Total	1,15	Fe 3	1	No Cumple
Hierro Soluble	0,88	Fe 3	-	-
Hierro Coloidal	0,27	Fe 3-	-	-
Magnesio	1,7	Mg 2-	-	-
Manganeso	0,2	Mn 2	-	-
Amoniaco	0,82	NH <sub>3</sub>	1	Cumple
Nitratos	0,52	NO 3	10	Cumple
Nitritos	0,04	NO 2-	1	Cumple
Potasio	0,6	K		No Cumple
Sodio	3,8	Na	200	Cumple
Sulfatos	9,35	SO 4 2-	400	Cumple

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

FUENTE: (TULSMA, 1992; Arregui, 2008)

Como se puede ver, existen parámetros que no se encuentran bajo los límites establecidos que sirven como referencia para escoger un proceso de tratamiento del agua. Existen ciertos parámetros que no han sido comparados con la norma puesto

que al escoger los parámetros para el análisis en laboratorio no se contempló el uso humano.

### **Índice de calidad del agua**

De los parámetros de los resultados de laboratorio (Tabla 12.6), se toman aquellos contenidos en la Tabla 12.3 y 12.4.

De acuerdo al valor reportado en los análisis, se ubica dentro de los rangos de valor analítico y se obtiene un valor en porcentaje. Debido a que los valores no siempre son exactos se utiliza la interpolación para hallar el valor porcentual que se atribuye a un valor analítico.

Por ejemplo, para coliformes totales, se atribuye un peso de 3. El valor analítico es de 35 NMP/100ml. Con este valor se recurre a la Tabla 12.3, y el rango donde se encuentra este valor, corresponde a <50 NMP/100ml, rango al que se le otorga una valoración porcentual equivalente al 100%, tal como se puede aplicar en la Tabla 12.8.

Se aplica la fórmula 12.1, y se obtiene el valor del ICA.

**TABLA 12.8** Tabla de apoyo para el cálculo del índice de calidad del agua (ICA)

PARÁMETRO	PESO	VAL. PORC.	Pi*Ci
	Pi	Ci	
DBO5	3	100	300
Coliformes Totales	3	100	300
Conductividad	4	100	400
pH	1	86,8	86,8
Sólidos Disueltos	2	100	200
Calcio	1	100	100
Cloruros	1	98,216	98,216
Dureza Total	1	100	100
Fosfatos	1	99	99
Magnesio	1	100	100
Amoníaco	3	17,2	51,6
Nitratos	2	100	200
Nitritos	2	64	128
Sodio	1	100	100
Sulfatos	2	96,26	192,52
<b>Sumatoria</b>	<b>28</b>		<b>2456,136</b>
<b>K</b>	1,00		
<b>ICA</b>	87,72		
<b>CA</b>	0,88		

ELABORACIÓN: María de la Paz Almeida R.

$$ICA = \frac{k * \sum(P_i * C_i)}{\sum P_i} = \frac{1 * 2456,136}{28} = 87,72$$

Finalmente, se compara el valor del ICA con la Tabla 12.5, de la cual se concluye que el agua puede ser utilizada para cualquier fin, requiriendo en este caso una ligera purificación para uso doméstico y agricultura. Para el caso específico de este tipo de actividad, los valores registrados en la Tabla 12.6 no representan peligro para la misma.





## **CAPÍTULO 13**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **13.1 CONCLUSIONES**

- Estos instructivos se han elaborado para personas que presentan un conocimiento previo en hidrología. Se ha intentado por medio de este simplificar el procesamiento de datos hidrometeorológicos recopilando bibliografía y añadiendo gráficos y tablas que ayuden a una mejor disposición de datos para ser tratados posteriormente.
- El nivel de prefactibilidad, factibilidad y diseño definitivo requieren estudios hidrológicos y climatológicos, al avanzar de un nivel a otro es importante ir obteniendo información más precisa para definir las características físicas, climatológicas e hidrológicas del sitio de estudio.
- Actualmente las políticas ecuatorianas respecto al recurso hídrico están enfocadas a su gestión integral, por lo cual se ha creado la Secretaría Nacional del Agua que regula todas las actividades relacionadas a este recurso dentro del país, de tal manera que se puedan evitar problemas como su sobreexplotación y por ende pérdida en la calidad y cantidad de agua de las fuentes; uso de tecnología anticuada, proyectos sin planificación, acelerada deforestación de cuencas, y los efectos del cambio climático.

- Los proyectos hidroeléctricos son los que mayor demanda de caudales hídricos tienen ocupando el 82% del total de caudales asignados en concesiones, le sigue en porcentaje el riego con un 14% aproximadamente, y el resto de usos (industria, agua potable, uso doméstico, entre otros) ocupa tan solo el 4%.
- Al realizar un reconocimiento del sitio de obra es importante tomar en cuenta características físico – geográficas de la cuenca, las condiciones de drenaje, huellas de crecidas máximas, reconocimiento de las estaciones hidrométricas y sus condiciones actuales, sitios de aprovechamiento del agua, fuentes contaminantes del cuerpo de agua, características físicas del agua; datos que podrían en algún grado ser de utilidad al estudio hidrológico. Es importante enfatizar que la mayoría de las observaciones realizadas son de tipo cualitativo y que eventualmente durante el curso de esta actividad de campo y de así requerirlo la calidad de información hidrometeorológica disponible, se recopilaría datos cuantitativos. Para evitar perder detalles los formularios presentados resultan de gran utilidad
- Se propone para un estudio climatológico completo de las cuencas ecuatorianas, el análisis de precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación, heliofanía y nubosidad, y se establecen tablas de las cuales resulta simple extraer información para realizar la caracterización del clima. De igual forma se sugiere la aplicación de la clasificación climática propuesta por Pourrut, dado que se basa en un estudio exhaustivo hecho dentro del país; con lo cual se deja de lado otras clasificaciones muy difundidas pero poco aplicables para la ubicación del Ecuador.
- El método recomendado en este instructivo para realizar aforos de un río es el aforo con molinete, ya que considera las variaciones de velocidad de la corriente en varios puntos de la sección transversal con lo cual se puede obtener un

promedio que toma en cuenta los efectos causados por la fricción con las superficies.

- En el país existen gran cantidad de vacíos dentro de las series de datos hidrológicos y climatológicos, por ello los métodos para relleno de datos faltantes mediante correlaciones, y la validación de información mediante los test de rachas y curvas de calibración se hacen imprescindibles para asegurar la calidad de los estudios.
- Para la determinación de caudales medios y mínimos el análisis mediante la Curva de Duración General es el método recomendado a pesar de tener varias limitaciones como se ha mencionado anteriormente para la determinación de caudales mínimos.
- La calidad del agua es un concepto relativo que debe fundamentarse en el uso que se pretende darla. En el país no existe aún un estudio que permita establecer un índice de calidad del agua adaptado a las condiciones de los diferentes ecosistemas, sin embargo se propone en este instructivo un método que ha sido utilizado por los expertos dentro del país con relativa eficacia.
- En cuanto a caudales ecológicos, no existe normativa ambiental general que expresamente ponga de manifiesto los parámetros que deben ser considerados para su cálculo, pudiéndose encontrar diferentes metodologías en publicaciones realizadas dentro del país. Actualmente varios estudios han demostrado que debería hacerse una evaluación holística y particular para cada curso de agua, sin embargo la falta de información hace difícil poder aplicar procedimientos de este tipo.
- Se ha aprovechado el software desarrollado dentro de la Escuela Politécnica Nacional para fines hidrológicos y climatológicos, los mismos que han permitido

la simplificación de tareas como encontrar estaciones meteorológicas cercanas a un punto de interés, obtener valores mensuales y anuales por medio de interpolación para variables aleatorias, graficar curvas de duración general y obtener valores característicos de caudales.

## 13.2 RECOMENDACIONES

- El cambio que se está produciendo en las instituciones que generan información está permitiendo a estudiantes y profesionales tener un mejor acercamiento con la realidad del país en diversos ámbitos, sin embargo el proceso podría ser agilizado mediante el libre acceso a esta información a través de las páginas web, correo electrónico, entre otros medios más dinámicos.
- Para poder elaborar estudios climáticos e hidrológicos es importante contar con un mayor número de estaciones y una mejor distribución de estas en el territorio ecuatoriano, ya que como se puede ver en los mapas anexados hay lugares donde existe gran concentración de estaciones en zonas que poseen las mismas condiciones hidrológicas y meteorológicas, mientras que en otros sitios como en el oriente, hay grandes extensiones donde no se cuenta con una base generadora de datos de esta índole.
- De forma general, este instructivo puede ser complementado con la creación de software que automatice el procesamiento de información, como por ejemplo, se sugiere la realización de un software que permita por medio de introducción de coordenadas divisar cuales son las estaciones hidrométricas y meteorológicas disponibles en la zona, y cuáles son los años de registros con los que se cuenta.
- Los caudales ambientales son un tema de mucha importancia para la gestión adecuada de los recursos hídricos, por lo que se recomienda la normalización de un procedimiento holístico para que no existan afectaciones a los ecosistemas con el aprovechamiento del agua de los ríos; para lo cual debe levantarse información biótica requerida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, M. A. (2007). Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule. Recuperado el 21 de marzo de 2010, de Universidad de Talca: [http://eias.utralca.cl/3investigaciones/aguilera\\_a.pdf](http://eias.utralca.cl/3investigaciones/aguilera_a.pdf)

Andrade, L. (1992). El Proyecto Hidroeléctrico Paute y su problema hidrometeorológico. *Revista Politécnica*, 17.

Andrade, L., Gallegos, S., & Villacrés, C. (2010). Estudio de Evaluación de la Red hidrometeorológica en la Región Nor - Oriental del Ecuador y Propuesta de su optimización como parte de la Red Hidrometeorológica Básica del Ecuador. Quito: EPN.

Barros, J. G., & Troncoso, A. (2010). Atlas climatológico del Ecuador. Quito: EPN.

Barry, R., & Chorley, R. (1985). Atmósfera, tiempo y clima. Barcelona: Ediciones Omega S.A.

Casares, R. (S/f). Curso de Hidrología general y aplicada: Análisis y calidad del agua. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas. Instituto de Hidrología.

Castillo, F., & Sentis, F. (2001). Agrometeorología (2da. ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi - Prensa.

Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1987). Hidrología aplicada. Texas: McGraw Hill.

CNRH. (2002). Gestión de los Recursos Hídricos del Ecuador, Políticas y Estrategias. Quito: CNRH.

CONELEC . (2009). Estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano. Quito: CONELEC.

CONELEC. (2009). Plan Maestro de Electrificación 2009 - 2020. Quito: CONELEC.

Corbitt, R. (2003). Manual de referencia de la Ingeniería Ambiental. Madrid: McGraw-Hill.

Costa, J. (2009). Estudio de prefactibilidad del aprovechamiento múltiple del Río Huarhuallá, Provincia de Chimborazo. Quito: EPN.

EPN - MEER. (2008). Estudio Climatológico e Hidrológico de la Central Hidroeléctrica Nanegal. Quito, Ecuador.

INAMHI. (2005). Anuarios Hidrológicos. Quito.

INECEL. (1997). Catálogo de proyectos hidroeléctricos de mediana capacidad. Quito: INECEL.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (1999). Mediciones Hidrométricas. Bogotá.

Masters, G., & Ela, W. (2008). Introducción a la Ingeniería Medioambiental. Madrid: Pearson Educación S.A.

Metcalf, & Eddy. (1998). Ingeniería de Aguas Residuales. España: McGraw-Hill.



Monsalve, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá - Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Moreano, R. (2008). Sistema de información para la interpolación espacial y temporal de datos sobre el tiempo atmosférico y el clima del Ecuador. Quito: EPN.

Moreno, C. (2008). Metodología y determinación de caudales ambientales en la cuenca del río Pastaza. Quito: EPN.

OMM. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas OMM - No. 168*. OMM: Geneve.

Organización Mundial de la Salud. (1983). Guía operacional GEMS/Agua. (CEPIS, Trad.) Ginebra, Suiza: Centro Panamerica de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Pourrut, P. (1995). El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía. Quito, Ecuador: RR Editores Asociados.

Ríos, L. (2010). Incidencia de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador. Quito: EPN.

S/A. (s.f.). Análisis de caudales. Recuperado el 10 de marzo de 2010, de Ingeniero Ambiental: <http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales%282%29%282%29.pdf>

SENAGUA. (2009). *Secretaría Nacional del Agua*. Recuperado el 11 de febrero de 2010, de [www.senagua.gov.ec](http://www.senagua.gov.ec)

SENPLADES. (2009). Plan Nacional del Buen Vivir 2009 - 2013.

Silva, G. (29 de noviembre de 2004). Hidrología General. Recuperado el 18 de enero de 2010, de <http://www.oocities.com/gsilvam/hidrobases.htm>

Tapia, C. (2009). Establecimiento de una red de monitoreo participativo de caudales en los afluentes de la microcuenca alta del río Guargualla para conocer la oferta hídrica. Riobamba: ESPOCH.

Torres, P., Cruz, C., & Patiño, P. (2009). Índices de calidad de aguas superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8 (15), 79 - 94.

Ulloa, J. C. (1989). Cálculo de caudales máximos para diseño de obras de drenaje. Quito: PUCE.

Villacís, O., & Andrade, L. (1985). Guía de hidrología aplicada para minicentrales hidroeléctricas. Quito.

Villacís, Ó., & Andrade, L. (1986). Instructivos para procesamiento de datos y cálculo hidrológico. Quito: EPN.

**ANEXOS**