

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA (ALTA Y MEDIA) DEL RÍO PASTAZA APLICANDO EL MODELO DE SIMULACIÓN WEAP (Water Evaluation and Planning System)

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

MARÍA ALEXANDRA LEMA CHANGOLUISA

VERÓNICA CECILIA PLAZA QUEZADA

DIRECTOR: Ing. REMIGIO GALÁRRAGA; M.Sc., Ph.D.

Quito, Julio 2009.

DECLARACIÓN

Nosotras, María Alexandra Lema Changoluisa y Verónica Cecilia Plaza Quezada, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos 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 Alexandra Lema Changoluisa

Verónica Cecilia Plaza Quezada

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Alexandra Lema Changoluisa y Verónica Cecilia Plaza Quezada, bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Remigio Galárraga Sánchez
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Mi éxito y felicidad para culminar una meta más en mi vida, no hubiera sido posible sin la ayuda de Dios, gracias Diosito, por darme la paciencia e inteligencia necesaria, porque pusiste en mi camino personas de buen corazón para fortalecer mis debilidades.

En el transcurso de la vida uno puede escoger a los amigos y compañeros, pero no la familia, gracias a mi querida familia, Yoli, Wilson, Katy y Xavi, ustedes me guiaron por un buen camino, me ayudaron en todo lo que pudieron siempre y a pesar de todas las circunstancias, siempre estuvimos juntos.

Gracias mi Vida, por la comprensión y la espera, por los buenos y los malos momentos, por el amor que me brindas.

Al programa GLOWS por la ayuda económica parcial de nuestra tesis, además de la colaboración de otras instituciones: INAMHI, SIGAGRO, PACC, SENAGUA y a todas quienes supieron abrirnos sus puertas.

A mi Poli querida que me acogió y mediante la gente que trabaja en ella, supo educarme para ser una profesional. Un agradecimiento especial para nuestro tutor, Doc. Galárraga, quien supo estar pendiente y supo valorar nuestra dedicación, y a todos los Inges que me manifestaron su colaboración, Inge Luna, Inge Barahona, Doc Castro, Inge Ximena Hidalgo, Inge Márquez, Inge Valverde.

Agradezco a las personas que siempre estuvieron pendientes de mi, que me conocieron desde siempre, gracias a mis abuelitos, mis tíos, mis primos. También a las que me encontraron en el camino, a quienes jamás podré olvidar, mis suegros, Señor Ceci, Señor Li, Señor Soñita, Don Geova; mi grupito de amiguitos, los chicos (ustedes saben quienes son, gracias por todo); mis amigos locos, Cris y JuanK.

A mi compañera de tesis Verito, quien supo ser una verdadera amiga y acompañarme en estos años de estudio, pues estuvimos juntas en todos los problemas que se nos presentaron.

Alexita

AGRADECIMIENTO

Cuando he cumplido una de mis más grandes aspiraciones quiero elevarle mi agradecimiento principalmente a Dios por ser mi esperanza, mi camino y mi fortaleza en momentos difíciles.

A mis padres por su amor, apoyo, confianza y por enseñarme a luchar en la vida con honestidad y buenos valores, espero no haberlos defraudado. A mis hermanos Elizabeth, Ivonne y Galito por todo el cariño y el apoyo.

A mis amigas y amigos: Ale, Cris, Adriana, Juan y todos los demás por haber hecho que mi paso por la politécnica sea una experiencia muy buena y grata, porque estuvieron a mi lado en momentos en que solo los amigos suelen estar. A las señoras: Cecilia Dután, Ligia Carvajal y Sonia Almeida y a Don Giovanni por su amistad y el cariño incondicional que me dieron.

A todos los profesores de mi vida estudiantil, en mi sus conocimientos, en especial al Dr. Remigio Galárraga por la oportunidad de hacer esta tesis la cual me ha traído gratas experiencias, gracias por su ayuda a lo largo de este trabajo.

Un agradecimiento especial a Alexandra y su familia porque me supieron recibir en su hogar a lo largo de la elaboración de este proyecto, es bueno cumplir una meta con una gran amiga como tu.

A todos quienes he nombrado en esta larga lista y a quienes tal vez por alguna razón olvide quiero decirles que siempre estaré agradecida con Dios por haberlos puesto en mi camino, que él les envíe sus bendiciones y que me conceda siempre la dicha de conservar su cariño y amistad a pesar del tiempo y la distancia.

Verónica

DEDICATORIA



A mis dos grandes amores, mi esposo Eduardo y mi gordita Micaelita, porque ellos supieron tener paciencia y estar conmigo a cada instante.

A mis amados padres, Yoli y Wilson, porque sus muestras de cariño me hicieron ser lo que soy y cumplir mi meta.

A mi familia que me apoyó a cada instante, Katy, Xavi, Katita y mi moto moto Rafaelita.

A todas las personas que estuvieron siempre ahí conmigo.

Al comienzo de la nueva etapa de mi vida.

Para ti mamita.

Alexandra Lema

DEDICATORIA

Este es un sincero y humilde homenaje para las dos personas más importantes de mi vida mis padres Enrique Plaza y Alba Quezada, ya que con su ejemplo de trabajo arduo y honesto, de amor, de confianza, de verdaderos valores humanos han hecho posible que hoy llegue al lugar que estoy, por eso este trabajo va dedicado a ustedes por ser el ejemplo más noble que me dio la vida.

Verónica

CONTENIDO

RESUMEN

PRESENTACIÓN

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACION.....	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 OBJETIVOS.....	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
2.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RIO PASTAZA.....	5
2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA	6
2.2.1 RECURSOS HIDRICOS	7
2.2.2 FLORA Y FAUNA	9
2.2.3 RECURSOS MINEROS.....	11
2.3 SUELOS	11
2.3.1 USOS.....	11
2.4 CLIMA.....	12
2.5 SUBCUENCAS	12
2.5.1 CHAMBO	13
2.5.2 LLUSHIN.....	13
2.5.3 PALORA	13
2.5.4 PATATE.....	14
2.5.5 DRENAJES MENORES.....	14
2.6 ESTACIONES HIDROMETEREOLÓGICAS.....	14
2.7 INFORMACIÓN EXISTENTE.....	16
2.7.1 INFORMACIÓN HIDROMETEREOLOGICA.....	16
2.7.2 INFORMACIÓN DE SUELOS.....	17
2.7.3 INFORMACIÓN DE USO DEL AGUA.....	17

3	MODELACIÓN HIDROLÓGICA USANDO EL MODELO WEAP	18
3.1	MODELOS MATEMÁTICOS.....	18
3.1.1	SEGÚN LOS RESULTADOS.....	18
3.1.1.1	DETERMINÍSTICOS	18
3.1.1.2	ESTOCÁSTICOS	18
3.1.2	POR EL ORIGEN DE LA INFORMACIÓN.....	19
3.1.2.1	MODELOS HEURÍSTICOS	19
3.1.2.2	MODELOS EMPÍRICOS.....	19
3.1.3	POR EL CAMPO DE APLICACIÓN.....	19
3.1.3.1	MODELOS CONCEPTUALES	19
3.1.3.2	MODELOS DE OPTIMIZACIÓN.....	19
3.2	MODELO HIDROLÓGICO	20
3.3	CUENCA HIDROGRÁFICA	20
3.4	CICLO HIDROLÓGICO	20
3.5	MODELO WEAP (WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM)	22
3.5.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	22
3.5.2	APLICACIÓN DEL MODELO.....	24
3.5.3	ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	26
3.5.3.1	PRECIPITACIÓN.....	27
3.5.3.1.1	BASE DE DATOS.....	27
3.5.3.1.2	RELACIÓN ENTRE ELEVACIÓN Y PRECIPITACIÓN	30
3.5.3.1.3	RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN	31
3.5.3.2	TEMPERATURA	33
3.5.3.2.1	BASE DE DATOS.....	33
3.5.3.3	HUMEDAD RELATIVA	34
3.5.3.4	VELOCIDAD DEL VIENTO.....	35
3.5.3.5	INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA: CAUDALES MEDIOS DIARIOS.....	35
3.5.4	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA.....	36
3.5.4.1	INTRODUCCIÓN.....	36
3.5.4.2	ANÁLISIS VISUAL GRÁFICO	37
3.5.4.3	ANÁLISIS DE DOBLE MASA	38
3.5.4.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	41

3.5.4.5	ANÁLISIS DE SALTOS	41
3.5.4.5.1	CONSISTENCIA DE LA MEDIA	41
3.5.4.5.2	CONSISTENCIA DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR	43
3.5.4.5.3	CORRECCIÓN DE DATOS.....	44
3.5.4.6	ANÁLISIS DE TENDENCIAS	45
3.5.4.6.1	TENDENCIA EN LA MEDIA	45
3.5.4.6.2	TENDENCIA EN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR	48
3.5.4.7	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA PARA EL PRESENTE PROYECTO ...	50
3.5.5	MANEJO DE INFORMACIÓN METEREOLÓGICA	53
3.5.5.1	ZONAS HOMOGÉNEAS DE PRECIPITACIÓN	54
3.5.5.2	ZONAS HOMOGÉNEAS DE TEMPERATURA	55
3.5.6	MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE LAS SUBCUENCAS.....	58
3.5.7	DEMANDA.....	62
3.6	MODELO CLIMÁTICO REGIONAL “PRECIS”	66
3.6.1	¿QUÉ ES UN MODELO CLIMÁTICO REGIONAL (RCM)?	66
3.6.2	¿QUÉ ES PRECIS?.....	66
4	CALIBRACIÓN, VERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO	68
4.1	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP PARA LA APLICACIÓN EN LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO PASTAZA.....	68
4.1.1	LÍMITES DE ÁREA	69
4.1.1.1	SUBCUENCAS.....	69
4.1.1.2	DEFINICIÓN DE BANDAS DE ELEVACIÓN PARA EL MODELO WEAP.....	70
4.1.1.3	RÍOS.....	72
4.1.1.4	ESQUEMA DEL MODELO EN EL PROGRAMA WEAP	73
4.1.2	PARÁMETROS GENERALES DE ÁREA DE LA CUENCA.....	75
4.1.3	UNIDADES	76
4.1.4	TIPOS DE USO DE SUELO	76
4.1.5	SUPUESTOS CLAVES.....	79
4.1.5.1	LAI (ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR)	80
4.1.5.2	KS (ZONA RADICULAR DE CONDUCTIVIDAD)	81

4.1.5.3	KC (COEFICIENTE DE CULTIVO).....	82
4.1.5.4	SW (CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA DE RAÍCES).....	84
4.1.5.5	ALTURA	85
4.1.5.6	KD (CONDUCTIVIDAD PROFUNDA)	87
4.1.5.7	DW (CAPACIDAD DE AGUA PROFUNDA)	87
4.1.5.8	RRF (FACTOR DE RESISTENCIA A LA ESCORRENTÍA).....	88
4.1.5.9	PFD (DIRECCIÓN DE FLUJO PREFERENTE).....	88
4.1.5.10	Z1 (Z1 INICIAL)	88
4.1.5.11	Z2 (Z2 INICIAL)	90
4.1.5.12	ALTURA ESTACIÓN (ALTURA DE LAS ESTACIONES BASE)	90
4.1.5.13	FACTORTEMP (FACTOR DE TEMPERATURA).....	90
4.1.5.14	FORMTEMP (FÓRMULA DE LA TEMPERATURA).....	91
4.1.5.15	OTROS SUPUESTOS CLAVES.....	92
4.1.6	SITIOS DE DEMANDA Y CATCHMENTS	92
4.1.6.1	USO DE CUELO O COBERTURA VEGETAL.....	92
4.1.6.2	CLIMA	98
4.1.6.3	MEDIDORES DE CAUDAL	103
4.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO WEAP PARA LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	104
4.2.1	CALIBRACIÓN DE LAS SUBCUENCAS APORTANTES.....	105
4.2.1.1	CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE CUTUCHI.....	109
4.2.1.2	CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE AMBATO.....	113
4.3	VALIDACIÓN DEL MODELO WEAP PARA LAS SUBCUENCAS APORTANTES CUTUCHI Y AMBATO	117
4.3.1	VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE CUTUCHI	117
4.3.2	VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE AMBATO	120
4.4	SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS PARA LAS SUBCUENAS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO WEAP.....	121
4.4.1	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA DE RAICES (SW)	123
4.4.2	ZONA RADICULAR DE CONDUCTIVIDAD (KS)	124
4.4.3	FACTOR DE RESISTENCIA A LA ESCORRENTÍA (RRF).....	127

4.4.4	CONDUCTIVIDAD DE ZONA PROFUNDA (KD).....	129
4.4.5	DIRECCIÓN PREFERENCIAL DE FLUJO (PFD)	131
4.4.6	CAPACIDAD DE AGUA PROFUNDA (DW)	132
4.5	APLICACIÓN DEL MODELO WEAP SOBRE LA CUENCA DEL RIO PASTAZA (HASTA LA JUNTA CON EL RIO PALORA)	134
4.5.1	MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI.....	135
4.5.2	MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA AMBATO.....	136
4.5.3	CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA CON EL CIERRE DE LAS SUBCUENCAS APORTANTES	138
4.5.4	VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA CON EL CIERRE DE LAS SUBCUENCAS APORTANTES	141
4.6	GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE APLICACIÓN.....	142
4.6.1	ESCENARIO 1.....	143
4.6.2	ESCENARIO 2.....	143
5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	147
5.1	PROGRAMA WEAP, CALIBRACIÓN DE SUBCUENCAS APORTANTES	147
5.2	APLICACIÓN DEL MODELO WEAP	152
5.3	ESCENARIOS	153
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	160
6.1.	CONCLUSIONES	160
6.2.	RECOMENDACIONES.....	163
7	BIBLIOGRAFÍA	165
ANEXOS		169
ANEXO 1		170
ANEXO 2		174
ANEXO 3		179
ANEXO 4		180

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
2.1a	UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN AMÉRICA DEL SUR (INTERNET)	5
2.1b	UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA EN EL ECUADOR (INAMHI)	5
2.2	MUESTRA DE ORQUÍDEAS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA	10
2.3	FAUNA EXISTENTE EN LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	11
2.4	SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA SEGÚN LA SENAGUA	13
3.1	VARIACIÓN ALTITUDINAL DE LA CUENCA Y UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES	26
3.2	VARIACIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	31
3.3	VARIACIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIÓN EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	32
3.4	REPRESENTACIÓN DEL RÉGIMEN UNIMODAL PRESENTE EN LA ESTACIÓN M-380	33
3.5	CLASIFICACIÓN DE SUB-REGÍMENES BIMODALES	33
3.6	VARIACIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA EN LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	35
3.7	SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES Y DE PRECIPITACIÓN MENSUAL (PERIODO DE CALIBRACIÓN 1982-1995)	39
3.8	ANÁLISIS DE DOBLE MASA PARA DETERMINAR LA ESTACIÓN BASE DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	40
3.9	AMPLIACIÓN FIGURA ANTERIOR PARA DETERMINAR QUIEBRES EN LAS ESTACIONES CON MENORES CAUDALES	40
3.10	SUBDIVISIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS	55
3.11	SUBDIVISIÓN DE LA CUENCA PARA DETERMINAR LA	

	TEMPERATURA	57
3.12	DIAGRAMA CONCEPTUAL Y ECUACIONES INCORPORADAS AL MODELO DE LOS DOS BALDES	62
3.13	DEMANDA: SECTORES, SUBSECTORES, USOS DE AGUA FINALES Y DISPOSITIVOS O MEDIOS DE SUMINISTRO DE AGUA	64
3.14	ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA WEAP	66
4.1	REPRESENTACIÓN DE LOS CATCHMENTS POR SUBCUENCA EN EL MODELO WEAP	70
4.2	DIVISIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA EN SUBCUENCAS PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO WEAP	71
4.3	DIVISIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA EN BANDAS DE ELEVACIÓN	72
4.4	RED HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA TOMADA DE ARCVIEW GIS	74
4.4a	RÍOS IMPORTANTES DE LA BASE DE DATOS GEOREFERENCIAL (ESC. 1:250000)	74
4.4b	ALCANCE DE LOS RÍOS PARA EL MODELO DE WEAP (ESC. 1:250000)	74
4.5	ESQUEMA DEL MODELO DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA PARA EL PROGRAMA WEAP	75
4.6	PARÁMETROS GENERALES DE ÁREA PARA EL MODELO WEAP	76
4.7	VALORES DE LOS PARÁMETROS GENERALES DE ÁREA PARA EL MODELO WEAP	76
4.8	UNIDADES DE LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL MODELO WEAP	77
4.9	VARIACIONES MENSUALES DE ALGUNOS TIPOS DE COBERTURA VEGETAL	85
4.10	MÉTODO DE HUMEDAD DEL SUELO (MARTÍNEZ, 2005)	89
4.11	MÉTODO DE HUMEDAD DEL SUELO	91
4.12	EXTRACTO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN DE FORMATO CSV	98
4.13	LOCALIZACIÓN DE LOS ARCHIVOS CSV	99

4.14	MEDIDOR DE CAUDAL EN EL PROGRAMA WEAP	104
4.15	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 1, SUBCUENCA CUTUCHI	109
4.16	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 1, SUBCUENCA CUTUCHI	109
4.17	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 7, SUBCUENCA CUTUCHI	111
4.18	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 7, SUBCUENCA CUTUCHI	111
4.19	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 10, SUBCUENCA CUTUCHI	112
4.20	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 10, SUBCUENCA CUTUCHI	112
4.21	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 1, SUBCUENCA AMBATO	113
4.22	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 1, SUBCUENCA AMBATO	114
4.23	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 4, SUBCUENCA AMBATO	115
4.24	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 4, SUBCUENCA AMBATO	115
4.25	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 6, SUBCUENCA AMBATO	116
4.26	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 6, SUBCUENCA AMBATO	116
4.27	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN EN LA VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI (1996 – 2005)	117
4.28	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA VALIDACIÓN DE SUBCUENCA CUTUCHI (1996 – 2005)	118
4.29	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN EN LA VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI (1997 – 2005)	118
4.30	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA VALIDACIÓN DE SUBCUENCA CUTUCHI (1997 – 2005)	119
4.31	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN EN LA VALIDACIÓN DE	

	LA SUBCUENCA CUTUCHI (2002 – 2005)	119
4.32	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI (2002–2005)	120
4.33	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN EN LA VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA AMBATO (1987–1989)	120
4.34	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA AMBATO (1987–1989)	121
4.35	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PARÁMETRO SW SOBRE LA SERIE MULTIMENSUAL DEL PERIODO(1982–1995)	123
4.36	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PARÁMETRO KS SOBRE LA SERIE MULTIMENSUAL DEL PERIODO(1982–1995)	126
4.37	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PARÁMETRO RRF SOBRE LA SERIE MULTIMENSUAL DEL PERIODO(1982–1995)	128
4.38	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PARÁMETRO KD SOBRE LA SERIE MULTIMENSUAL DEL PERIODO(1982–1995)	130
4.39	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PARÁMETRO PFD SOBRE LA SERIE MULTIMENSUAL DEL PERIODO(1982–1995)	131
4.40	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PARÁMETRO DW SOBRE LA SERIE MULTIMENSUAL DEL PERIODO(1982–1995)	133
4.41	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN APLICACIÓN RÍO PASTAZA, PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN SUBCUENCA CUTUCHI	136
4.42	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA APLICACIÓN RÍO PASTAZA, PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN SUBCUENCA CUTUCHI	136
4.43	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN APLICACIÓN RÍO PASTAZA, PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN SUBCUENCA AMBATO	137
4.44	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA APLICACIÓN RÍO PASTAZA, PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN SUBCUENCA AMBATO	138
4.45	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 1, SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA	139
4.46	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 1, SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA	140

4.47	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PRUEBA 9, SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA	141
4.48	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 9, SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA	141
4.49	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN OBTENIDO EN LA VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA (1986–1989)	142
4.50	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA VALIDACIÓN DE SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA (1986–1989)	142
4.51	GENERACIÓN DE CAUDAL SEGÚN LOS ESCENARIOS PROPUESTOS, PARA EL PERÍODO 1991-2005	145
4.52	COMPARACIÓN DE LA ESTACIÓN H792 CON EL ESCENARIO DE REFERENCIA (DATOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO)	145
4.53	COMPARACIÓN DE LA ESTACIÓN H792 CON EL ESCENARIO 1 (SERIE PRECIS-ECHAM ESCENARIO A2)	146
4.54	COMPARACIÓN DE LA ESTACIÓN H792 CON EL ESCENARIO 2 (SERIE PRECIS-ESCENARIO B2)	146
5.1	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 1, SUBCUENCA CUTUCHI	148
5.2	HIDROGRAMA OBTENIDO EN LA PRUEBA 5, SUBCUENCA CUTUCHI	148

LISTA DE TABLAS

TABLA	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	LISTA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS UBICADAS EN LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO PASTAZA	15
3.1	REPRESENTACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN EXISTENTE	27
3.2	ÁREA DE INFLUENCIA POR ESTACIÓN EN LA CUENCA SEGÚN LA ALTURA	29
3.3	DATOS PARA EL GRÁFICO DE LA FIGURA 3.2	31
3.4	CARACTERÍSTICAS DE REGÍMENES BIMODALES PRESENTES EN LA CUENCA	34
3.5	DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN DE TEMPERATURA	34
3.6	DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA	35
3.7	DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN DE VELOCIDAD DEL VIENTO	36
3.8	DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN DE CAUDALES	36
3.9	VOLÚMENES ANUALES EN MILLONES DE M ³ DE LA ESTACIÓN H787	51
3.10	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA PARA TODAS LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS	53
3.11	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL PARA CADA ESTACIÓN DE LAS SUBCUENCAS	56
3.12	TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL PARA CADA ESTACIÓN DE LAS SUBCUENCAS	57
3.13	ESTACIONES BASE DE PRECIPITACIÓN PARA CADA SUBCUENCA	58
3.14	ESTACIONES BASE DE TEMPERATURA PARA CADA SUBCUENCA	58
3.15	PARÁMETROS DEL MÉTODO DE HUMEDAD DEL SUELO	61
4.1	RANGO DE INTERVALO DE LAS BANDAS DE ELEVACIÓN	72
4.2	CATCHMENTS DE INGRESO PARA EL MODELO EN EL PROGRAMA WEAP	73
4.3	CORRELACIÓN DE LOS TIPOS DE USO DE SUELO PARA UTILIZARLOS EN EL MODELO WEAP	79

4.4	PORCENTAJES DE USO DE SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA SEGÚN LOS DISTINTOS TIPOS DE USO	80
4.5	VALORES DE LAI SEGÚN SCURLOCK, 2001	81
4.6	VALORES DE LAI	82
4.7	VALORES DE LAI PARA LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA, TOMADOS DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE	82
4.8	VALORES DE KS	83
4.9	VALORES DE COEFICIENTE DE CULTIVO, BANCO MUNDIAL, 2006	84
4.10	VALORES DE COEFICIENTE DE CULTIVO, MODELO WEAP RÍO PAUTE	84
4.11	VARIACIONES MENSUALES DE ALGUNOS TIPOS DE COBERTURA VEGETAL	85
4.12	VALORES DE SW	86
4.13	RANGO DE CLASIFICACIÓN DE CATCHMENTS POR ALTURA	86
4.14	CLASIFICACIÓN DE CATCHMENTS POR ALTURA	87
4.15	VALORES DE KD	88
4.16	VALORES DE DW	89
4.17	VALORES DE RRF	90
4.18	VALORES DE PFD	90
4.19	VALORES DE UMBRAL INFERIOR Y SUPERIOR PARA LOS CULTIVOS DEL MODELO WEAP DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	91
4.20	ALTURA DE LAS ESTACIONES BASE DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA PARA WEAP	92
4.21	FACTORES DE TEMPERATURA Y ALTURA DE LAS ESTACIONES UTILIZADAS EN CADA CATCHMENT PARA EL CÁLCULO DE LA FÓRMULA TEMPERATURA	93
4.22	OTROS SUPUESTOS CLAVES CREADOS	94
4.23	TABLA DE ÁREAS DE CATCHMENTS	95
4.24	PARÁMETROS EN BASE AL TIPO DE COBERTURA VEGETAL	97
4.25	PARÁMETROS EN BASE A LA CLASIFICACIÓN POR ALTURA	97
4.26	PARÁMETROS EN BASE AL TIPO DE COBERTURA VEGETAL Y A LA CLASIFICACIÓN POR ALTURA	97

4.27	PARÁMETRO INICIAL Z1 DE ACUERDO AL TIPO DE CULTIVO	97
4.28	ESTACIONES BASE PARA TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y VIENTO	99
4.29	NÚMERO DE COLUMNA DE ESTACIONES BASE PARA CADA CATCHMENT	100
4.30	EXPRESIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS	101
4.31	ESTACIONES ESTIMADAS PARA EL CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LOS CATCHMENTS	102
4.32	VALORES DE LATITUD DE CADA CATCHMENT	103
4.33	ESTACIONES HIDROLÓGICAS USADAS PARA MEDIDORES DE CAUDAL	104
4.34	RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS SUBSECUENTES DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI	110
4.35	RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS SUBSECUENTES DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA AMBATO	114
4.36	RESULTADOS DE R2 Y R OBTENIDOS PARA EL PERIODO DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI	121
4.37	VALORES DE FACTORSW PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO SW	123
4.38	CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES CON RESPECTO AL CAUDAL CALIBRADO CON FACTORSW= 6	124
4.39	VALORES DE MULTIPLICADORKS PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO KS (FACTORKS ALTO)	125
4.40	VALORES DE MULTIPLICADORKS PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO KS (FACTORKS MEDIO Y BAJO)	125
4.41	CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES CON RESPECTO AL CAUDAL CALIBRADO MULTIPLICADORKS = 0.5	126
4.42	VALORES DE FACTORRRF PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO RRF (RRF ALTO)	127
4.43	VALORES DE FACTORRRF PARA DETERMINAR LA	

	SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO RRF (RRF MEDIO)	127
4.44	VALORES DE FACTORRRF PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO RRF (RRF BAJO)	128
4.45	CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES CON RESPECTO AL CAUDAL CALIBRADO FACTORRRF=1.8	129
4.46	VALORES DE FACTORKD PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO KD	127
4.47	CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES CON RESPECTO AL CAUDAL CALIBRADO FACTORKD=0.15	128
4.48	VALORES DE FACTORPFD PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO PFD	131
4.49	CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES CON RESPECTO AL CAUDAL CALIBRADO FACTORPFD=0.15	132
4.50	VALORES DE FACTORDW PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL PARÁMETRO DW	132
4.51	CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES CON RESPECTO AL CAUDAL CALIBRADO FACTORDW=1	134
4.52	DATOS DE INGRESO DEL EMBALSE DE AGOYÁN PARA LA MODELACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	135
4.53	ÍNDICES DE CORRELACIÓN PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO WEAP EN LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA, UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI	137
4.54	ÍNDICES DE CORRELACIÓN PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO WEAP EN LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA, UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA AMBATO	138
4.55	RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA	140
4.56	GENERACIÓN DE CAUDAL SEGÚN LOS ESCENARIOS PROPUESTOS (PROMEDIO MULTIMENSUAL 1991-2005)	144
5.1	RESULTADOS DE R^2 Y R OBTENIDOS PARA EL PERIODO DE VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI	149
5.2	RESUMEN DE DATOS DE RESPUESTA DE LA SUBCUENCA	

	CUTUCHI-WEAP	150
5.3	RESUMEN DE DATOS DE RESPUESTA DE LA SUBCUENCA AMBATO-WEAP	151
5.4	VALORES PARA CORREGIR LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DEL ESCENARIO 1	153
5.5	VALORES PARA CORREGIR LOS DATOS DE TEMPERATURA DEL ESCENARIO 1	154
5.6	VALORES PARA CORREGIR LOS DATOS DE HUMEDAD RELATIVA DEL ESCENARIO 1	154
5.7	VALORES PARA CORREGIR LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DEL ESCENARIO 2	155
5.8	VALORES PARA CORREGIR LOS DATOS DE TEMPERATURA DEL ESCENARIO 2	155
5.9	VALORES PARA CORREGIR LOS DATOS DE HUMEDAD RELATIVA DEL ESCENARIO 2	156
5.10	PORCENTAJE DE CAUDAL DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2, CON RESPECTO AL ESCENARIO DE REFERENCIA	157
5.11	PORCENTAJE DE CAUDAL DE LOS ESCENARIOS REFERENCIA, 1 Y 2, CON RESPECTO AL CAUDAL OBSERVADO (H792)	158
5.12	PORCENTAJE DE VOLUMEN DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2, CON RESPECTO AL CAUDAL OBSERVADO	159
5.13	PORCENTAJE DE VOLUMEN DEL ESCENARIO 2 CON RESPECTO A 1 Y VICEVERSA	160
6.1	COMPARACIÓN DE LOS REGISTROS DE CAUDAL OBTENIDOS	162

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
3.1	CÁLCULO DE LA MEDIA PARA SUBMUESTRA 1	42
3.2	CÁLCULO DE LA MEDIA PARA SUBMUESTRA 2	42
3.3	CÁLCULO DEL t_c (ESTADÍSTICO)	43
3.4	CÁLCULO DEL t_c CUANDO LAS MEDIAS SON IGUALES	43
3.5	CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN DE LA DIFERENCIA DE LOS PROMEDIOS	43
3.6	CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PONDERADA	43
3.7	COMPARACIÓN DEL t_c CON EL t_t CUANDO LAS MEDIAS SON IGUALES	43
3.8	COMPARACIÓN DEL t_c CON EL t_t CUANDO LAS MEDIAS NO SON IGUALES	43
3.9	CÁLCULO DE LA VARIANZA DEL PERIODO 1	44
3.10	CÁLCULO DE LA VARIANZA DEL PERIODO 2	44
3.11	CÁLCULO DEL F_c ; SI: S_1^2 MAYOR A S_2^2	44
3.12	CÁLCULO DEL F_c ; SI: S_2^2 MAYOR A S_1^2	44
3.13	CÁLCULO DEL NÚMERO DE GRADOS DE LIBERTAD SI S_1^2 MAYOR A S_2^2	44
3.14	CÁLCULO DEL NÚMERO DE GRADOS DE LIBERTAD SI S_2^2 MAYOR A S_1^2	44
3.15	COMPARACIÓN DEL F_c CON EL F_t ; SI: LAS VARIANZAS SON IGUALES	45
3.16	COMPARACIÓN DEL F_c CON EL F_t ; SI LAS VARIANZAS NO SON IGUALES	45
3.17	CÁLCULO DEL X CORREGIDO PARA EL PERIODO 1	45
3.18	CÁLCULO DEL X CORREGIDO PARA EL PERIODO 2	45
3.19	TENDENCIA EN LA MEDIA	46
3.20	ECUACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE DE LA TENDENCIA EN LA MEDIA	46
3.21	CÁLCULO DEL COEFICIENTE A_m DEL POLINOMIO DE REGRESIÓN	46
3.22	CÁLCULO DEL COEFICIENTE B_m DEL POLINOMIO DE REGRESIÓN	47

3.23	PARÁMETRO PARA CÁLCULO DE B_m	47
3.24	CÁLCULO DEL PROMEDIO DE LAS TENDENCIAS	47
3.25	CÁLCULO PARA EL PROMEDIO DEL TIEMPO	47
3.26	CÁLCULO DE LA DIFERENCIA DEL PROMEDIO DE LAS TENDENCIAS CON EL PROMEDIO DEL TIEMPO	47
3.27	CÁLCULO DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR DE LA TENDENCIA DE LA MEDIA	47
3.28	CÁLCULO DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR DEL TIEMPO	47
3.29	CÁLCULO DE t_c ESTADÍSTICO USANDO R	47
3.30	CÁLCULO DE LOS GRADOS DE LIBERTAD CON ALFA SOBRE DOS	48
3.31	CÁLCULO DE LAS SERIES SIN TENDENCIA EN LA MEDIA(1)	48
3.32	CÁLCULO DE LAS SERIES SIN TENDENCIA EN LA MEDIA(2)	48
3.33	CÁLCULO DE LAS SERIES SIN TENDENCIA EN LA MEDIA UTILIZANDO EL PROMEDIO DE LAS TENDENCIAS (1)	49
3.34	CÁLCULO DE LAS SERIES SIN TENDENCIA EN LA MEDIA UTILIZANDO EL PROMEDIO DE LAS TENDENCIAS (2)	49
3.35	CÁLCULO DE LA TENDENCIA DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (FORMA POLINOMIAL)	49
3.36	CÁLCULO DE LA TENDENCIA DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (FORMA LINEAL SIMPLE)	49
3.37	CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA EL AÑO P	50
3.38	CÁLCULO DE LA SERIE SIN TENDENCIA EN LA MEDIA NI EN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR	50
3.39	CÁLCULO DE LA SERIE SIN TENDENCIA UTILIZANDO LOS PROMEDIOS DE LAS TENDENCIAS	51
4.1	ECUACIÓN DEL BALANCE DE MASA DEL MODELO WEAP	106
4.2	CÁLCULO DE DEL FLUJO BASE DEL MODELO WEAP	107
4.3	CÁLCULO DEL RMSE	108
4.4	CÁLCULO DEL BIAS	108
4.5	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA	108

LISTA DE ANEXOS

ANEXO	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1	MAPAS	171
1.1	MAPA DE LAS BANDAS DE ELEVACIÓN DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA Y LA UBICACIÓN DE METEREOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS	172
1.2	MAPA DEL RÍO PASTAZA ANTES DE LA JUNTA CON EL RÍO PALORA Y SUS AFLUENTES	173
1.3	MAPA DE USOS DE SUELO UTILIZADOS POR EL MODELO WEAP EN LA MODELACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA	174
2	INFORMACIÓN DEL MODELO	175
2.1	DATOS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL PARA CATCHMENT DEL MODELO WEAP, CUENCA DEL RÍO PASTAZA	176
2.2	DATOS DE PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA PARA LA GENERACIÓN DEL ESCENARIO 1	177
2.3	DATOS DE PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA PARA LA GENERACIÓN DEL ESCENARIO 2	178
2.4	GRÁFICAS DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA PARA LOS ESCENARIOS 1 Y 2 (SERIES PRECIS-ECHAM, ESCENARIOS A2 Y B2)	179
3	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	180
3.1	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI	
3.2	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA AMBATO	
3.3	APLICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS SUBCUENCAS CUTUCHI Y AMBATO EN LA CUENCA TOTAL DEL RÍO PASTAZA	
3.4	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA CON EL CIERRE DE LAS SUBCUENCAS ALTAS: CUTUCHI Y	

	AMBATO	
4	ARCHIVO DIGITAL CON INFORMACIÓN HIDROMETEREOLÓGICA RECOLECTADA DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)	181

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo, es conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pastaza, así como saber si el modelo WEAP es aplicable a las cuencas de nuestro país. La zona de estudio está ubicada en la región Amazónica Andina, atravesando las provincias de: Chimborazo, Cotopaxi, Morona Santiago, Pastaza y Tungurahua.

Para la realización de este estudio se aplica WEAP, modelo que evalúa los procesos hidrológicos y planifica el uso del recurso hídrico, para lo cual es necesario obtener la información hidrometeorológica, información de tipos y usos de suelo y concesiones de agua, entre otras. La información hidrometeorológica fue tomada de las estaciones: Puyo (M008), Cusubamba (M369), Pilahuin (M376), Huambaló (M380) y Alao (M396), ubicadas dentro de la cuenca del río Pastaza. La información de tipos y usos de suelos fue adquirida del SIGAGRO.

Un modelo de simulación es empleado con propósito de generar caudales, para la cuenca del río Pastaza, se generó caudales mensuales, debido a la extensa área de la misma. Se realizaron los procesos de calibración y verificación, en subcuencas altas, Cutuchi y Ambato, con sus periodos de registro (1982-1995) y (1982-1986), respectivamente, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI); y verificados para los periodos (1996-2005) y (1987-1989), respectivamente.

Para la evaluación de la calibración del modelo se utilizó el coeficiente de correlación (r), que compara caudales observados con caudales simulados, en el cierre de las subcuencas, con estaciones o medidores de caudal, llamados por WEAP; Cutuchi A.J. Yanayacu (H792), Ambato en Ambato (H801) y Pastaza A.J. Encanto (H798). En la calibración y, verificación sobre la cuenca del río Pastaza alcanza un coeficiente de correlación en un intervalo de (0.6 a 0.8), indicando una buena correspondencia de lo observado y lo simulado. Si se quiere excelentes resultados, debería tomarse en cuenta el análisis realizado a la información recolectada y a los parámetros asumidos para su desarrollo.

PRESENTACIÓN

El estudio se realizó con el propósito de conocer el comportamiento del modelo WEAP en una cuenca amazónica andina, sabiendo que es una de las más importantes del Ecuador y que puede abarcar proyectos hidroeléctricos significativos para el desarrollo del país. Es por eso que a pesar de la poca información que contiene esta cuenca se trató de aplicar WEAP de la mejor manera posible y proceder a generar condiciones climáticas que influyen en la generación de caudales.

Para determinar las virtudes del modelo WEAP sobre la cuenca del río Pastaza, este se desarrollo en base a los siguientes capítulos:

Capítulo 1, presenta la justificación de aplicar la herramienta WEAP, el alcance del modelo en la cuenca y los objetivos propuestos.

Capítulo 2, describe la ubicación geográfica de la cuenca, las características de la zona de estudio, y la información existente en ella.

Capítulo 3, realiza una descripción del modelo WEAP, analiza la información recolectada, su consistencia y el manejo de la misma para aplicarla dentro del modelo matemático, y el modelo climático regional utilizado para la generación de escenarios.

Capítulo 4, desarrolla los procesos de calibración, verificación o validación y aplicación del modelo, con el respectivo análisis de los datos de entrada al modelo; el análisis de sensibilidad de algunos de los parámetros primordiales del modelo que afectan la generación de caudal; y la generación de escenarios mediante el uso de las series PRECIS-ECHAM.

Capítulo 5, analiza los resultados obtenidos del modelo, después de calibrarlo, verificarlo y aplicarlo en la cuenca.

Capítulo 6, propone las conclusiones y recomendaciones, de los procesos y resultados de la aplicación del modelo.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El Programa GLOWS (Global Water for Sustainability Program), liderado por la Universidad Internacional de la Florida (FIU, por sus siglas en Inglés), tiene como misión promover una visión integrada de los recursos hídricos y las cuencas hidrográficas en varios sitios del mundo. Con esto se procura simultáneamente maximizar las ventajas económicas y sociales que se obtienen de los recursos hídricos manteniendo los ecosistemas de agua dulce en buenas condiciones. Estos análisis se los hace a nivel de cuencas hidrográficas con la cooperación intergubernamental, de instituciones de educación superior, participación ciudadana e instituciones no gubernamentales.

En América del Sur el programa GLOWS trabaja con el proyecto del Río Pastaza, el cual debido a su ubicación (selvas tropicales) posee una gran biodiversidad acuática que se ve afectada por diversos factores entre los cuales se encuentran principalmente la sobre pesca, lo que genera una reducción de poblaciones de especies acuáticas, la contaminación, puesto que en ciudades como Baños y El Puyo se utiliza el río para descargar las aguas servidas de la población, y además la construcción de proyectos hidroeléctricos como por ejemplo Agoyán y San Francisco (GLOWS, 2007).

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) realizó en el año 2000 el estudio “Análisis del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos en el Ecuador” con el cual ha sido posible evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pastaza frente al cambio de parámetros climatológicos como la temperatura y la precipitación. Dicha investigación realiza una proyección solamente hasta el año 2010, razón por la cual se pretende realizar la modelación matemática del proceso precipitación - escurrimiento de dicha cuenca utilizando el modelo matemático WEAP (Water Evaluation And

Planning System), sabiendo que no ha sido utilizado antes en nuestro país y con el fin de conocer si es aplicable o no en esta zona.

Este proyecto ha sido desarrollado de manera conjunta entre la Escuela Politécnica Nacional (EPN), el Municipio de Pastaza y el programa GLOWS (Global Water for Sustainability Program) el cual ha proporcionado parte de los fondos para realizar este estudio.

1.2 JUSTIFICACION

Se estima que el cambio climático ha generado en nuestro planeta la variación de parámetros Climáticos, ambientales y sociales, los cuales se han acentuando con el paso del tiempo y el avance de la tecnología. Dichos cambios han producido una gran variación en el funcionamiento hidrometeorológico de las cuencas a nivel mundial, por lo que es necesario utilizar herramientas matemáticas para evaluar estos cambios, lo que ayudará a pronosticar a futuro el comportamiento físico e hidrológico de las cuencas en estudio bajo condiciones climáticas e hidrológicas diferentes a las actuales (INAMHI, 2000).

El presente trabajo analizará las diferentes variables hidrometeorológicas en la cuenca del río Pastaza hasta la junta con el río Palora y aplicará estos datos en el programa de modelación hidrológica **WEAP** (Water Evaluation And Planning System).

Este modelo será calibrado y verificado en cuencas ubicadas dentro de la cuenca del río Pastaza, las subcuencas aportantes Cutuchi y Ambato, para luego usarlo en toda la cuenca, con los datos globales existentes en ella.

El objetivo principal de esta simulación hidrológica es aplicar una herramienta que permita pronosticar a futuro los cambios en la disponibilidad de agua, en función de los escenarios de cambio climático planteados en esta tesis, para poder realizar un buen manejo y planificación del recurso hídrico en esta cuenca.

1.3 ALCANCE

El modelo hidrológico mencionado anteriormente será aplicado en la cuenca del río Pastaza hasta la junta con el río Palora, para lo cual se tomarán dos periodos de datos hidrometeorológicos para dejarlo operativo, con los procesos de calibración y verificación. Para la etapa de calibración, se cuenta con dos subcuencas Cutuchi y Ambato, y sus periodos de calibración son 1982–1995 y 1982–1986, respectivamente. Y para la etapa de validación, los periodos son 1996–2005 y 1987–1989, para las subcuencas Cutuchi y Ambato, respectivamente.

Como siguiente paso en el desarrollo del presente proyecto se generarán los escenarios futuros utilizando las series PRECIS-ECHAM proporcionadas por el Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC) del Ministerio del Ambiente. En el capítulo 3 se explicará en que consisten estas series y los modelos de las cuales se obtienen.

Es necesario indicar que el éxito de la aplicación del modelo dependerá mucho de la cantidad y calidad de información que se tenga del lugar de estudio, ya que en caso de no existir todos los parámetros requeridos se hará necesaria información similar de otras cuencas con características hidrometeorológicamente similares, lo que generará un cierto nivel de error el cual se tratará de que sea lo menor posible.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general es determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pastaza hasta la junta del río Palora, ubicada en la Región Amazónica Andina del Ecuador, mediante el manejo del modelo de simulación hidrológica WEAP, utilizando la información hidrometeorológica proporcionada por el INAMHI, y otras fuentes secundarias.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Determinar los procesos climáticos que influyen en las variaciones de los caudales de los diferentes sitios de la cuenca del río Pastaza en el transcurso del tiempo.
2. Calibrar y verificar el modelo WEAP para los periodos de información recolectada.
3. Generar escenarios futuros utilizando las series PRECIS-ECHAM, para poder determinar la variación de los caudales ante estos escenarios.
4. Analizar y comparar los resultados del modelo WEAP para determinar si es aplicable a la zona de estudio.
5. Realizar un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros que intervienen en el programa.

CAPITULO 2

2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RIO PASTAZA

La cuenca alta y media del río Pastaza está ubicada en el sector oriental de la Cordillera Central de los Andes, en la Región Amazónica del Ecuador, dentro de los territorios de las provincias de Tungurahua, Chimborazo, Pastaza Y Morona Santiago. Tiene un área aproximada de 12650,92 km² hasta la junta con el río Palora, la cual se encuentra a 77° 49'49" Longitud Oeste y 1°51'34" Latitud Sur (Figura 2.1a y Figura 2.1b).

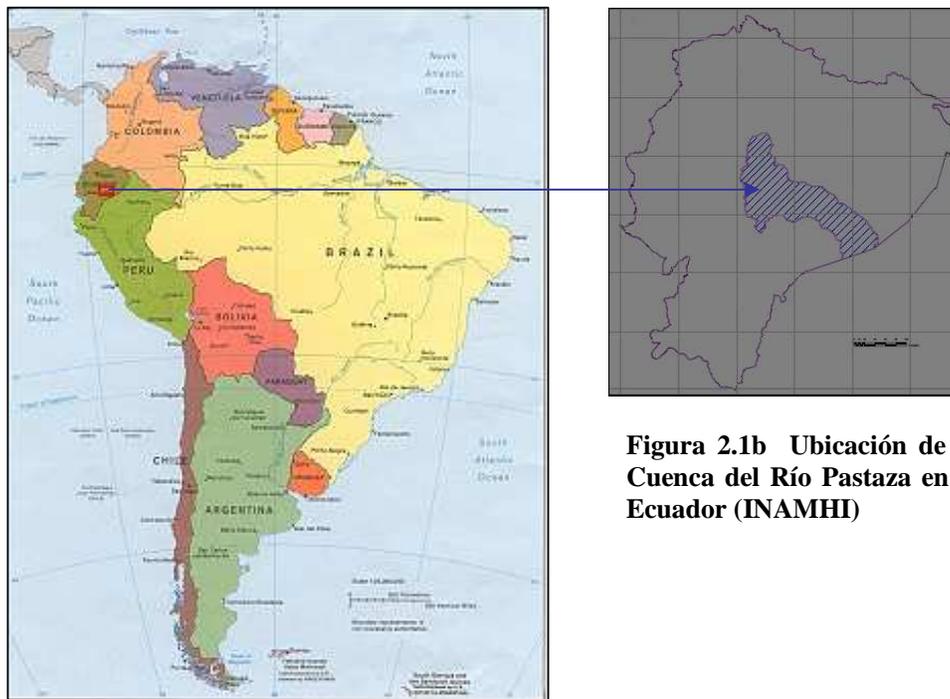


Figura 2.1b Ubicación de la Cuenca del Río Pastaza en el Ecuador (INAMHI)

Figura 2.1a Ubicación de la zona de estudio en América del Sur (INTERNET)

Figura 2.1 Ubicación geográfica de la zona de estudio

2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA

El río Pastaza constituye uno de los ríos más grandes del Oriente Ecuatoriano. Nace de la Cordillera Oriental de los Andes como el resultado de la unión de los ríos Chambo y Patate, su presencia realza la belleza de los paisajes localizados a lo largo de su recorrido por el sector, es afluente del río Marañón el cual es uno de los tributarios del Río Amazonas (GLOWS, 2007)

Recorre todo el Cantón Baños y ha sido empleado para realizar varias actividades que ayudan al desarrollo económico de la región como el rafting, el kayaking y sirve de atractivo central en el viaje a la Ruta de las Cascadas, a la vez que en sus cuencas se encuentra el Corredor Ecológico Llanganates – Sangay, y es una fuente importante de generación hidroeléctrica.

El río Patate, se forma de la unión de los ríos Culapachán y del río Ambato. En este último se depositan las aguas servidas de la ciudad del mismo nombre, la cual posee unos 160000 habitantes (SEGÚN EL CENSO DEL AÑO 2000). Esta cuenca recibe las aguas con residuos químicos producto de la elaboración y desteñido de jeans en Pelileo (Tungurahua). También de las aguas negras del alcantarillado de este cantón. Asimismo, el río Pastaza recibe las aguas servidas de Baños, Río Verde, Río Negro, Puyo y Palora. Muchas de estas poblaciones depositan además directamente la basura en el río (Edufuturo, 2008).

El río Topo también nace de la Cordillera de los Llanganates; a lo largo de su cuenca, se puede observar bosques primarios con una gran diversidad de flora y fauna únicas en el mundo, motivos por los que desde hace muchas décadas atrás ha sido punto para la visita e investigación de varios científicos. (ECUADORONLINE, 2008)

El río Pastaza atraviesa el territorio habitado por el pueblo Achuar de noroeste a suroeste, que se caracteriza por su amplia diversidad ecológica y cultural; por estar drenada por un inmenso sistema fluvial cuyo eje es el mismo

río, la gran biodiversidad acuática del río Pastaza ha generado en este sector una importante fuente de alimentos la que es aprovechada por dicha comunidad.

Se aprovechan las aguas del río Pastaza para la generación hidroeléctrica del país por medio del Sistema Nacional Interconectado, con los Proyectos Hidroeléctricos Agoyán y San Francisco, y en épocas de estiaje su cauce no tiene caudal, (aproximadamente 15 Km, desde la represa Agoyán hasta la descarga de San Francisco), por lo que se ha perdido la cascada Agoyán y con ello uno de los principales atractivos turísticos del lugar. Es por esta razón que la construcción de la represa Agoyán, ha generado cambios importantes en aspectos físicos, hidrológicos y ambientales del río Pastaza.

Debido a la presencia de muchas cascadas en la zona la mayoría de la población del lugar tiene su fuente de ingresos a través de la actividad turística por lo que es importante en un futuro planificar de forma correcta el manejo del recurso hídrico para evitar que se pierdan lugares turísticos importantes como la casada de Agoyán.

Otro de los aspectos importantes de la cuenca es la vulcanología, debido a la presencia del volcán Tungurahua ubicado en las cercanías de la ciudad de Baños con una altura de 5016 m.s.n.m, presenta en su cima un cráter grande y profundo que ha venido manifestando actividad volcánica desde el 18 de octubre de 1999 hasta la fecha actual, siendo la erupción de mayor intensidad la del 16 de agosto de 2006.

2.2.1 RECURSOS HIDRICOS

La cuenca del río Pastaza es considerada en la actualidad una de las más grandes fuentes de almacenamiento del agua dulce del planeta, ya que posee un gran potencial hídrico (ECUADORONLINE, 2008).

El río Pastaza nace de la confluencia del río Chambo y el Patate al pie del volcán Tungurahua. Aguas abajo tiene los siguientes ríos tributarios mas importantes: Topo, Puyo, Palora Pindoyacu; además algunas cascadas, tales

como: Manto de la Novia, río Verde, etc. Después de un recorrido de aproximadamente 640 Km. sus aguas drenan en el río Marañón el cual se encuentra en la República del Perú.

Es importante indicar que el Estado Ecuatoriano a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, antiguamente Ministerio de Energía y Minas, ha aprovechado al máximo la abundancia del recurso hídrico en nuestro país especialmente en la cuenca del río Pastaza a través de los proyectos hidroeléctricos ya construidos de Agoyán y San Francisco, e incluso existe la posibilidad de la construcción del proyecto Topo en el río del mismo nombre. Sin embargo, como se indico anteriormente, si estos proyectos no son planificados adecuadamente se podría generar un gran impacto ambiental en dicho cauce, por lo que se hace necesario realizar un estudio de vulnerabilidad de variación de caudales ante el cambio de parámetros climáticos que nos permita conocer la forma correcta de mantener la conservación de dichos recursos a corto y largo plazo. Otro de los entes que aprovecha el recurso hídrico en el lugar es la actividad turística como por ejemplo: el kayaking, el rafting y el paseo en bicicleta por la ruta de las cascadas, lo que genera uno de los mayores ingresos económicos en la zona, sin que esto altere de alguna manera el ecosistema del lugar.

Uno de los mayores problemas que se tiene en esta cuenca es el arrastre de sedimentos ya que en la zona de estudio se encuentra el volcán Tungurahua que entro en proceso eruptivo desde el 18 de octubre de 1999 y continua hasta el día de hoy, dichas erupciones generan flujos de lodo y escombros de origen volcánico (lahares), los cuales van hacia el cauce del río Chambo y Pastaza ayudados también por la precipitación. Además, otro de los problemas es la descarga de aguas servidas sin tratamiento previo hacia los cauces principalmente por parte de las poblaciones de Baños y El Puyo que son las más grandes de la zona de estudio.

Por esta razón el programa GLOWS conjuntamente con las administraciones seccionales de Baños y Puyo y algunas instituciones educativas han visto la

necesidad de realizar el estudio para crear una dirección integrada del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Pastaza y así maximizar las ventajas económicas y sociales que se obtienen de los recursos hídricos manteniendo los ecosistemas del lugar.

Es por eso que se decide abordar la temática de los caudales ambientales y su aplicación en zonas de interés de la cuenca del río Pastaza, enfatizando la preservación de ecosistemas fluviales y riparios; y ante la creciente demanda del recurso hídrico asegurar la provisión de bienes y servicios ambientales provistos por estos ecosistemas (Moreno, 2008).

Y un proyecto más específico fue el pre diseño de sistemas de aguas servidas para la ciudad del Puyo, realizada por estudiantes de la EPN, como apoyo al Municipio del Puyo (Bosques y Barbecho, 2008).

2.2.2 FLORA Y FAUNA

La cuenca del río Pastaza abarca un área muy amplia, desde la región interandina hasta la región amazónica. En este lugar se encuentran el volcán Tungurahua y parte de los Parques Nacionales Sangay y Llanganates, razón por la cual es una zona de abundante biodiversidad.

La presencia del volcán Tungurahua, en la cuenca del río Pastaza, ha generado a su alrededor una gran variedad de microclimas, factor que, combinados con otros más como la presencia de abundantes recursos hídricos ha dado lugar para que allí se desarrolle una gran variedad de flora y fauna silvestre.

La variación altitudinal de la cuenca del río Pastaza ha permitido que se formen tres pisos climáticos lo cual ha sido un factor favorable para que exista una gran diversidad de especies tanto en la flora como en la fauna. Estos pisos climáticos son (ECUADORONLINE, 2008):

- Piso Subtropical, que abarca las tierras mas bajas, desde los 1.100 hasta los 2.300 m.s.n.m.
- Piso Templado cuyo rango altitudinal se extiende desde los 2.300 hasta los 3.300 m.s.n.m.
- Piso Alto andino, que se extiende desde el límite anterior hasta los límites de los nevados: 4800 m.s.n.m.

En la zona de estudio se ha llegado a determinar la existencia de 165 especies de flora, entre las más sobresalientes se encuentran: Chuquiragua, Almohadilla, Achupalla, Pega pega, Aliso, Bromelias, Arrayán, Pumamaqui, Frailejones, Mortiños, Motilón, Árbol de papel, Chocho, Romero, Olivo, Cedro, Laurel, Guayacán, Lycopodios, Palma Ramos, Palma Real, Copales, Caoba, Gencianas, Chontaduro, Alcanfor, Tagua, Pajonal; y una gran variedad de Orquídeas como las que se muestra en la figura 2.2.

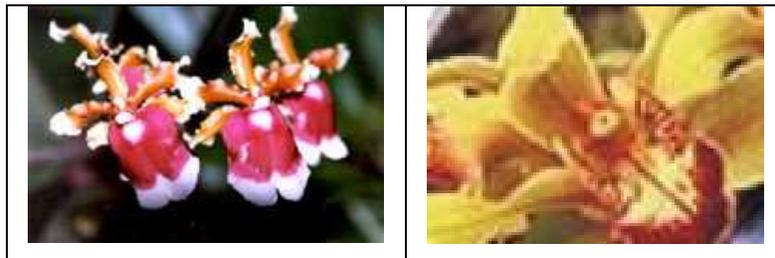


Figura 2.2 Muestra de orquídeas existentes en la provincia de Pastaza

En la fauna el número de especies de mamíferos existentes representa más del 50% de las especies de los bosques amazónicos tropicales del Ecuador. Las especies de aves registradas, aproximadamente constituyen un 43% de las especies y el 70% de las familias registradas en el Oriente del Ecuador, (Proyecto INEFAN-GEF Quito; 1998) como especies endémicas se encuentra:

El cuy silvestre (*Cavia aparea*) y la musaraña del Azuay (*Cryptotis montivaga*).

Las especies de animales más comunes en el área son: lobo de páramo, cervicabra, oso de anteojos, danta de montaña, danta de Oriente, oso

hormiguero, venados, mono aullador, machín, chichico, jaguar (Figura 2.3), puma, puerco espín, nutria gigante, guanta.

Entre las aves se destacan los patos de torrente y comunes, gaviota andina, curiquire, y el majestuoso cóndor.



Figura 2.3 Fauna existente en la cuenca del río Pastaza

2.2.3 RECURSOS MINEROS

La cuenca del río Pastaza es muy rica en recursos mineros especialmente en el metal oro el cual se encuentra en algunos de los ríos del lugar, tales como en el Topo, en el Pastaza, en el Puyo, etc.

El subsuelo y el suelo de la cuenca del Pastaza son ricos en minerales; los que más se encuentran en esta zona son: oro, plata, sílice, caolín éste último que sirve para la fabricación de objetos típicos de los indígenas como cerámica, además encontramos piedra pómez, arena, y campos de petróleo en exploración y explotación.

2.3 SUELOS

2.3.1 USOS

El uso del suelo esta claramente ligado al tipo de cobertura del mismo, la zona de estudio se caracteriza por la gran presencia de bosque tanto natural como cultivado (alrededor del 88%), debido al crecimiento desmedido de la

industria forestal se ha tenido que buscar un componente de conservación de las especies el cual está integrado por los parques nacionales y las áreas de recreación, en la cuenca del río Pastaza se tiene el Parque Nacional Sangay y el Parque Nacional Corredor De Los Llanganates.

Según los estudios realizados por el MAGAP a través del SIGAGRO se tiene el siguiente padrón de uso de suelos (Año 2000).

Bosques naturales y cultivados 87.48% de las cuales aproximadamente un 25% tienen capacidad agrícola, zonas agrícolas 6.84% y zonas no agrícolas (páramos, poblaciones, nieve, cuerpos de agua y afloramientos rocosos) el 5.69%.

2.4 CLIMA

Debido a la ubicación de la zona de estudio no se puede hablar de un clima uniforme en toda la cuenca. Este se encuentra condicionado principalmente por la variación altitudinal, así se puede notar que en la parte alta se tiene una temperatura media multianual que varía entre 7°C y 17°C y con precipitaciones que van desde 250 a 700 mm, por año; mientras que en la parte media y baja la temperatura media multianual varía entre los 18°C a 25°C con precipitaciones anuales que promedian entre los 3865 mm a 5215 mm. La humedad atmosférica varía del 80% en la zona andina y puede llegar al 88% en la parte amazónica (ECUADORONLINE, 2008).

2.5 SUBCUENCAS

De acuerdo a la división de cuencas de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), en la parte alta y media de la cuenca del río Pastaza se encuentran las siguientes subcuencas:



Figura 2.4 Subcuencas de la cuenca del río Pastaza según la SENAGUA

2.5.1 CHAMBO

Ubicada en la parte sur occidental de la cuenca, tiene un área de 3589,60 Km² y un perímetro de 339,33 Km. Riobamba, Chambo, Guamote y Guano son las ciudades más importantes que se encuentran dentro de esta subcuenca. Su río principal es el río Chambo.

2.5.2 LLUSHIN

Tiene un área de 854,57 Km² y un perímetro de 139,63 Km. El río Llushin le da el nombre a esta subcuenca. Este río tiene confluencia con el río Chuyallishin para formar el río Pastaza.

2.5.3 PALORA

Con un área de 1450,73 Km² y un perímetro de 239,15 Km. está ubicada en la parte sur oriental de la cuenca.

Sus poblaciones más importantes son: Palora, Sangay y Parapicos. Su afluente principal es el río del mismo nombre.

2.5.4 PATATE

Se encuentra ubicada en el sector nor-occidental de la cuenca, tiene una extensión aproximada de 4271,84 Km² y un perímetro de 323,375 Km. Entre las ciudades más importantes que se encuentran en esta subcuenca tenemos: Ambato, Latacunga, Pelileo, Patate, Quisapincha y Pillaro. El nombre de la subcuenca lo recibe de su río principal, el Patate.

2.5.5 DRENAJES MENORES

Dentro de esta subcuenca se encuentran varios ríos que aportan en menor cantidad que los anteriores pero que en su conjunto no se pueden despreciar.

Tiene como afluentes principales los siguientes ríos: Topo, Negro, Muyo, Verde, Chinchín, Ulba, Cristal, Zunac, Pindo Grande, Puyo. Posee un área de 2484,18 Km² y un perímetro de 797,55 Km. Dentro de esta subcuenca se encuentran las siguientes poblaciones importantes: Baños de Agua Santa, Mera, Shell, Puyo.

2.6 ESTACIONES HIDROMETEREOLÓGICAS

Gracias al apoyo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) se ha podido obtener la información hidrometeorológica necesaria para el desarrollo del proyecto, dicha información ha sido obtenida de las estaciones que se presentan a continuación:

Tabla 2.1: Lista de estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca alta y media del río Pastaza

# COD	NOMBRE	Prec.	Tem.	Vien.	Hum.	TIPO	LATITUD				LONGITUD				ELEVACION msnm	PROVINCIA
							GRA	MIN	SEG	HEM	GRA	MIN	SEG	HEM		
M004	RUMIPAMBA-SALCEDO	x	x		x	AP	1	1	20	S	78	35	30	W	2680	COTOPAXI
M008	PUYO	x	x	x		AP	1	30	30	S	77	57	20	W	960	PASTAZA
M041	SANGAY (P. SANTA ANA)	x	x			CP	1	45	24	S	77	57	17	W	880	MORONA SANTIAGO
M126	PATATE		x			CO	1	18	39	S	78	25	23	W	2270	TUNGURAHUA
M127	PILLARO	x	x			CO	1	10	28	S	78	33	7	W	2770	TUNGURAHUA
M128	PEDRO FERMIN CEVALLOS (COLEGIO)	x	x		x	CO	1	21	70	S	78	36	35	W	2910	TUNGURAHUA
M133	GUASLAN	x	x			CO	1	44	3	S	78	38	52	W	2745	CHIMBORAZO
M258	QUEROCHACA (UTA)		x			CP	1	24	0	S	78	35	0	W	2850	TUNGURAHUA
M369	CUSUBAMBA	x				PV	1	3	59	S	78	41	57	W	2990	COTOPAXI
M375	SAQUISILI	x				PV	0	50	16	S	78	39	52	W	2920	COTOPAXI
M376	PILAHUIN	x				PV	1	18	8	S	78	43	50	W	3360	TUNGURAHUA
M377	TISALEO	x				PV	1	20	53	S	78	40	7	W	3250	TUNGURAHUA
M378	RIO VERDE	x				PV	1	24	4	S	78	17	43	W	1529	TUNGURAHUA
M380	HUAMBALO	x				PV	1	23	14	S	78	31	39	W	2880	TUNGURAHUA
M390	URBINA	x				PV	1	29	18	S	78	42	45	W	3625	CHIMBORAZO
M393	SAN JUAN-CHIMBORAZO	x				PV	1	37	56	S	78	46	57	W	3258	CHIMBORAZO
M396	ALAO	x				PV	1	52	39	S	78	30	6	W	3188	CHIMBORAZO
M407	LICTO	x				PV	1	48	25	S	78	36	15	W	2863	CHIMBORAZO
M391	PALLATANGA	x				PV	2	0	38	S	78	58	0	W	1500	CHIMBORAZO

FUENTE: INAMHI

2.7 INFORMACIÓN EXISTENTE

Para realizar la aplicación del modelo de simulación hidrológica WEAP ha sido necesario recopilar información en diversos campos lo que significó una gran colaboración de instituciones gubernamentales para lograr dicho objetivo, entre estas se encuentran el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), el Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP), la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) ex Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) y el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC).

2.7.1 INFORMACIÓN HIDROMETEREOLÓGICA

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) ha aportado significativamente con la información necesaria para llevar a cabo este proyecto; sin embargo, la disponibilidad de información es escasa en la parte oriental del Ecuador no solamente por la ausencia de estaciones sino también porque, de las pocas que existen, la misma no tiene periodos continuos de datos, siendo los más comunes desde 1986 hasta 2005.

El registro de la información proporcionada es a nivel diario lo que ha significado un problema por la falta de continuidad de los datos tanto de temperatura, precipitación, evapotranspiración y caudales, razón por la cual se ha procedido al relleno de datos utilizando el método de la curva de doble masa tomando como referencia la estación Puyo (M 008) y la estación Rumipamba – Salcedo (M 004) para la precipitación ya que estas tenían los periodos de información más completos.

En el capítulo 3 se hará un análisis completo de los periodos de información que se posee para cada uno de los parámetros, y los criterios para que se hayan o no tomado en cuenta las diferentes estaciones.

2.7.2 INFORMACIÓN DE SUELOS

Debido a la falta de colaboración de las diferentes instituciones gubernamentales como el Ministerio de Agricultura Ganadería Acuicultura y Pesca (MAGAP) no ha sido posible tener una base de datos de la zona de estudio acerca de las características de cada tipo de cobertura y uso del suelo, datos necesarios para aplicación del modelo WEAP, fue entonces necesario recurrir a estudios ya realizados como el de la Modelación Hidrológica de la cuenca del río Paute para obtener la información faltante.

2.7.3 INFORMACIÓN DE USO DEL AGUA

El modelo WEAP además de ser un modelo hidrológico es también un modelo de planificación y administración de los Recursos Hídricos, razón por la cuál en caso de que se vaya a enfocar la modelación desde ambos puntos de vista, es necesario conocer los diferentes usos que se le da al recurso.

En el presente proyecto no se tomará en cuenta el aspecto administrativo del recurso hídrico, puesto que el interés está puesto principalmente en conocer el funcionamiento hidrológico de la cuenca.

CAPÍTULO 3

3 MODELACIÓN HIDROLÓGICA USANDO EL MODELO WEAP

3.1 MODELOS MATEMÁTICOS

Un modelo matemático es una de las clasificaciones de los modelos científicos y se define como una descripción desde el punto de vista matemático de un hecho o fenómeno real, tomando en cuenta parámetros como la población, fenómenos físicos, fenómenos sociológicos, etc. El objetivo del modelo es entender ampliamente el fenómeno en estudio y tal vez predecir con un nivel de precisión aceptable su comportamiento en el futuro.

El modelo matemático identifica variables (dependientes o independientes) y establece hipótesis lo más simples posibles para que sean tratadas de forma matemática.

Los modelos matemáticos se clasifican de la siguiente forma:

3.1.1 SEGÚN LOS RESULTADOS

Dependen del tipo de resultados que se espera, pueden subdividirse en:

3.1.1.1 Determinísticos

El resultado se conoce de manera puntual no existe incertidumbre, todos los parámetros utilizados en el modelo son completamente conocidos, determinados y exactos, al correr el programa se obtendrá siempre una misma respuesta.

3.1.1.2 Estocásticos

Son llamados también probabilísticos ya que el resultado depende de muchas variables aleatorias, el resultado no siempre es el esperado y por tanto existe cierto nivel de incertidumbre.

3.1.2 POR EL ORIGEN DE LA INFORMACIÓN

Dependiendo de la fuente de información utilizada para la construcción de un modelo podemos distinguir entre modelos heurísticos y modelos empíricos:

3.1.2.1 Modelos heurísticos

Del griego euriskein, que significa hallar, inventar. Son los que están basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado.

3.1.2.2 Modelos empíricos

Del griego empeiricos (experiencia, experimento). Son los que utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado.

3.1.3 POR EL CAMPO DE APLICACIÓN

Según sus diversas aplicaciones los modelos matemáticos pueden dividirse en:

3.1.3.1 Modelos conceptuales

Son los que reproducen mediante fórmulas y algoritmos matemáticos más o menos complejos los procesos físicos que se producen en la naturaleza

3.1.3.2 Modelos de optimización

Los modelos matemáticos de optimización son ampliamente utilizados en diversas ramas de la ingeniería para resolver problemas que por su naturaleza son indeterminados, es decir presentan más de una solución posible.

Es importante saber que los modelos de cualquier tipo, sin importar su exactitud, pueden presentar resultados poco servibles si no están respaldados por datos confiables, es decir que la disponibilidad de datos tiene un efecto directo en la precisión del modelo. La recopilación de datos es muchas veces la parte más difícil para la modelación.

3.2 MODELO HIDROLÓGICO

El modelo hidrológico es una aplicación de los modelos matemáticos estocásticos, se utilizan para estudiar situaciones extremas, difícilmente observables en la realidad, como por ejemplo los efectos de precipitaciones muy intensas y prolongadas en cuencas hidrográficas, en su estado natural, o en las que ha intervenido la mano del hombre con la construcción de obras como canales, represas, caminos, puentes, etc.

La cuenca hidrográfica es dividida en sub-cuencas consideradas homogéneas desde el punto de vista: del tipo de suelo, de la declividad, de su cobertura vegetal, etc. El número y tipo de las variables hidrológicas que intervienen en el modelo son función del objetivo específico para el cual se elabora el mismo

3.3 CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca hidrográfica se define como una unidad territorial en la cual el agua que cae por precipitación se reúne y escurre a un punto común o que fluye toda al mismo río, lago, o mar. En esta área viven seres humanos, animales y plantas, todos ellos relacionados. También se define como una unidad fisiográfica conformada por la reunión de un sistema de cursos de ríos de agua definidos por el relieve.

Los límites de la cuenca o divisoria de aguas se definen naturalmente y en forma práctica corresponden a las partes más altas del área que encierra un río.

3.4 CICLO HIDROLÓGICO

El agua en la tierra se mantiene en constante movimientos trasladándose de una reserva a otra mediante fenómenos tales como, la evaporación, precipitación, infiltración, escorrentía, entre otros.

La mayor reserva se encuentra en los océanos ya que contienen aproximadamente un 97% del agua del planeta el 3% restante son reservas de agua dulce.

La fuerza que mueve el ciclo hidrológico es el sol ya que provee la energía necesaria para la evaporación del agua, la cual puede variar espacial y temporalmente.

Una vez que el agua en forma de vapor se encuentra en el aire, comienza a subir y consecuentemente a enfriarse este proceso se denomina condensación. Cuando el agua condensada alcanza una masa crítica y se torna más pesada que el aire que la rodea esta empiezan a caer en forma de lluvia, granizo o nieve.

La precipitación es un fenómeno que varía espacial y temporalmente, pero es proporcional a la cantidad de evaporación existente en la zona.

Toda la precipitación que cae en sus diferentes formas no siempre llega a las corrientes ya que una parte se evaporará antes de llegar a la superficie lo que se denomina como re evaporación, otra se quedará en la superficie de las construcciones y de las plantas las cuales también la aprovecharán a través de sus raíces para que luego sea transpirada, este proceso se llama evapotranspiración y parte también pasará se acumulará en la cima de los nevados para luego deslizarse hacia los ríos.

Del agua que llega al suelo una parte se infiltrará, esta cantidad dependerá de diversos factores entre los cuales están: la cantidad e intensidad de la precipitación, la topografía del lugar, la de cobertura y el tipo del suelo. . El agua que se absorbe en el suelo también puede seguir absorbiéndose a través del el hasta llegar a las reservas subterráneas de agua desde las cuales viajarán hacia los océanos.

El agua que no penetra en el suelo se une y viaja a través de la superficie hasta desembocar en los arroyos y ríos que, a su vez, desembocan en el océano. (WIKIPEDIA, 2008)

3.5 MODELO WEAP (WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM)

3.5.1 DESCRIPCION DEL MODELO

WEAP es un instrumento computacional para la planificación integrada de recursos hídricos, cuyo objetivo es la asistencia para el planificador experimentado, proporcionando un marco comprensivo, flexible y fácil de usar para el análisis de políticas.

La localización de recursos limitados de agua, la calidad ambiental y la política para el empleo sostenible de agua son características de preocupación creciente. Modelos de simulación convencionales orientados son no siempre adecuados. Durante la década pasada, ha surgido un acercamiento integrado de desarrollo del agua que coloca proyectos de abastecimiento de agua en el contexto de características de lado de la demanda, así como características de calidad de agua y preservación del ecosistema.

WEAP apunta para incorporar estos valores en un instrumento práctico para la planificación de recursos de agua. Es distinguido por su acercamiento integrado al simular redes fluviales y por su orientación de política. WEAP es un laboratorio para examinar el desarrollo alternativo de agua y estrategias de dirección.

Como una base de datos, WEAP proporciona un sistema para mantener la demanda de agua y la información de suministro. Como un instrumento de pronóstico, WEAP simula la demanda de agua, el suministro, la precipitación, los flujos de corriente, almacenaje, la generación de contaminación, el tratamiento y la descarga, y la calidad del agua. Como un instrumento de análisis de política,

WEAP evalúa una gama completa de desarrollo de agua y opciones de dirección, y toma en cuenta los múltiples y competentes usos redes fluviales.

Las capacidades de WEAP son las siguientes:

- *Base de datos de balance de agua:* proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua.
- *Herramienta de generación de escenarios:* simula la demanda, oferta, escorrentía, caudal, almacenaje, generación, tratamiento y descarga de contaminantes y calidad del agua en los ríos.
- *Herramienta de análisis de políticas:* evalúa en gama completa de las opciones del desarrollo y manejo del agua, y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.

El principio básico de WEAP es el balance de masa enfocándose en sistemas municipales y agrícolas, una sola cuenca o complejos sistemas de cuencas trans-fronterizos, pudiendo simular una amplia gama de componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, que incluye, escorrentía por precipitación, flujos base y recarga de aguas subterráneas por precipitación, análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos de agua y prioridades de asignación, operaciones de los embalses; generación de hidroelectricidad; seguimiento de la contaminación y calidad de las agua; evaluaciones de vulnerabilidad; y requisitos de los ecosistemas. Un módulo de análisis financiero también permite que el usuario investigue comparaciones de costo-beneficio para los proyectos.

El analista representa el sistema en términos de sus varias fuentes de agua (ejemplo: ríos, arroyos, agua subterránea, embalses, y plantas de desalinización); instalaciones de descarga, transmisión y tratamiento de agua; demandas del agua; generación de contaminantes; y requisitos de los ecosistemas. La estructura de datos y el nivel de detalle se pueden modificar fácilmente para satisfacer los requisitos y la disponibilidad de datos para un sistema y un análisis particulares.

Los usos de WEAP incluyen generalmente varios pasos.

- *Definición del Estudio:* Se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema, y la configuración del problema.
- *Cuentas Actuales:* Se desarrolla una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema. Esto se puede ver como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.
- *Escenarios:* Se pueden explorar los impactos que tendría, un sistema de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y del clima, por ejemplo, en la demanda del agua, oferta de agua, hidrología, y contaminación. (Las oportunidades para la generación de escenarios se presentan en la siguiente sección.)
- *Evaluación:* Los escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, los costos y los beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables dominantes.

3.5.2 APLICACIÓN DEL MODELO

WEAP a través de su interfaz gráfico con SIG construye, ve y modifica la configuración. Los elementos pueden ser sobrepuestos en un mapa construido en Arcview y otros archivos estándares de SIG y gráficos.

Los datos para cualquier componente pueden ser corregidos directamente en el diagrama esquemático. El usuario puede consultar la característica de ayuda sensible al contexto en cualquier lugar dentro de WEAP. Con el sistema altamente flexible y comprensivo de información de resultados de WEAP, el usuario puede preparar informes tanto de salida gráfica o tabular y seleccionar de un número de posibles opciones de formato (ej., unidades métricas o inglesas, años, niveles absolutos, partes porcentuales, o tasas de crecimiento), también puede ver resultados sobre un mapa del esquema y usar barras de deslizamiento de animación para ver los cambios en los resultados a través del tiempo.

Las principales características de WEAP:

- Sistema de planificación integrado de los recursos hídricos
- Modelos incorporados para modelación de: escorrentía e infiltración por precipitación, evapotranspiración, requisitos y producciones de cosechas, interacciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas, y calidad del agua en ríos.
- Interfaz grafica “drag and drop” basada en SIG
- Capacidad para construir modelos con un numero de funciones predefinidas
- Ecuaciones y variables definidas por el usuario
- Conexión dinámica con planillas de cálculo y otros modelos
- Algoritmo de programación linear inserto que resuelve las ecuaciones de distribución de agua
- Estructuras de datos flexible y expandible
- Poderoso sistema de información de resultados incluyendo gráficos, tablas y mapas
- Integra sin quiebres los procesos hidrológicos en la cuenca con el sistema de manejo de recursos hídricos.
- Puede recibir directamente información climática
- Basado en una visión holística e integrada del manejo de los recursos de agua (integrated water resources management -IWRM) – oferta y demanda de agua

Durante los 15 últimos años, WEAP ha sido aplicado en muchos proyectos en el mundo entero para la planificación integrada de recurso hídricos, incluyendo:

- África: las publicaciones de dirección del agua y desarrollo (con IWMI)
- Oriente Medio: el establecimiento de la alternativa de desarrollo y argumentos de asignación en un proceso que implica tanto participantes israelíes como palestinos
- India y Nepal: la exploración del abastecimiento de agua y opciones de conservación en la región
- California: los efectos de evaluación de clima cambian sobre los servicios de ecosistema

- Mar de Aral: conducción de análisis comprensivo de cuentas de agua, y desarrollo de argumentos para explorar una gama completa de opciones y resultados

3.5.3 ANALISIS DE DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN METEREOLÓGICA

La base de datos con información hidrometeorológica fue proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), se posee un registro de datos desde 1970, siendo el periodo 1982 - 2005 el más continuo.

Si bien en la zona de estudio existe un gran número de estaciones tanto meteorológicas como hidrológicas no se ha tomado en cuenta la información de todas ellas ya que en la mayoría existe un gran porcentaje de datos faltantes, la ubicación de las estaciones que han sido tomadas en cuenta se encuentran figura 3.1 (Anexo 1.1).

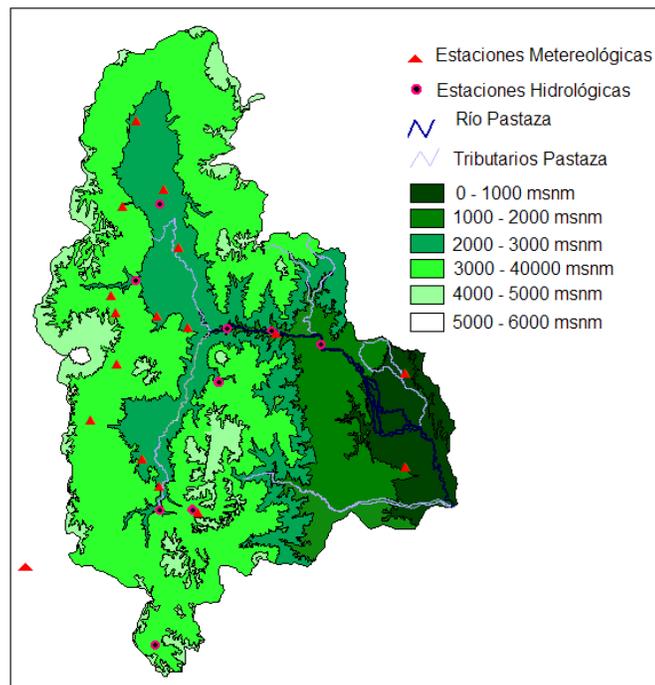


Figura 3.1 Variación altitudinal de la cuenca y ubicación de las estaciones.

A continuación se realizará un análisis de la disponibilidad de la información de cada uno de los parámetros.

3.5.3.1 Precipitación

3.5.3.1.1 Base de datos

La base de datos que ha sido otorgada para la realización del presente proyecto esta a nivel diario y va desde el año 1970, siendo las 17 estaciones de la tabla siguiente las que tiene un periodo de datos más continuo y completo.

16 de las estaciones que se han tomado en cuenta están dentro de los límites de la cuenca, mientras que la estación M391 (Pallatanga) está fuera, pero ha sido considerada debido a su similitud tanto en régimen de precipitación como en la altura a la que está ubicada con relación a la parte media de la zona de estudio (tabla 3.1).

Como se puede observar el periodo continuo que tiene mayor porcentaje de información va desde el año de 1980 hasta el año 2005, razón por la cual se realizará la calibración y verificación del modelo dentro de este rango tomando en cuenta también la información existente de los otros parámetros climáticos necesarios.

La distribución de las estaciones que miden precipitación en la cuenca esta dada de la siguiente manera.

Tabla 3.2 Área de influencia por estación en la cuenca según la altura

Rango altura	Área			N° de estaciones de precipitación	Área de influencia por estación
	Absoluta	Porcentaje de la cuenca	Porcentaje acumulado		
m.s.n.m.	km ²				km ²
0 - 1000	968.73	7.53	7.53	2	484.37
1000 - 2000	1548.44	12.04	19.58	2	774.22
2000 - 3000	2671.92	20.78	40.35	8	333.99
3000 - 4000	6364.41	49.50	89.85	5	1272.88
4000 - 5000	1282.63	9.97	99.83	0	
5000 - 6000	22.49	0.17	100.00	0	

Tabla 3.1 Representación de la disponibilidad de información existente

Año	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
M004																		
M008																		
M041																		
M127																		
M128																		
M133																		
M369																		
M375																		
M376																		
M377																		
M378																		
M380																		
M390																		
M391																		
M393																		
M396																		
M407																		

FUENTE: INAMHI

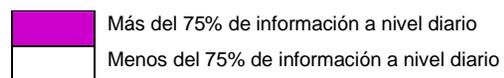
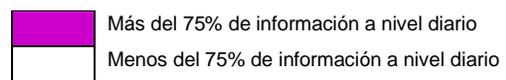


Tabla 3.1 Continuación

Año	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
M004																		
M008																		
M041																		
M127																		
M128																		
M133																		
M369																		
M375																		
M376																		
M377																		
M378																		
M380																		
M390																		
M391																		
M393																		
M396																		
M407																		

FUENTE: INAMHI



De la tabla 3.2, es posible ver que no existe una distribución homogénea de las estaciones que miden la precipitación y que un 81% de estas están ubicadas a partir de los 2000 m.s.n.m, si bien esta área representa un 87.96% del área total de la zona de estudio la presencia de solamente 2 estaciones en la parte media de la cuenca dificulta el proceso de calibración en esta parte.

3.5.3.1.2 Relación entre elevación y precipitación

Con el propósito de aplicar correctamente el método de las bandas de elevación en este modelo (Capítulo 4.1.1.2), es necesario hacer un análisis de la variación espacial de la precipitación en la cuenca (figura 3.2 y figura 3.3).

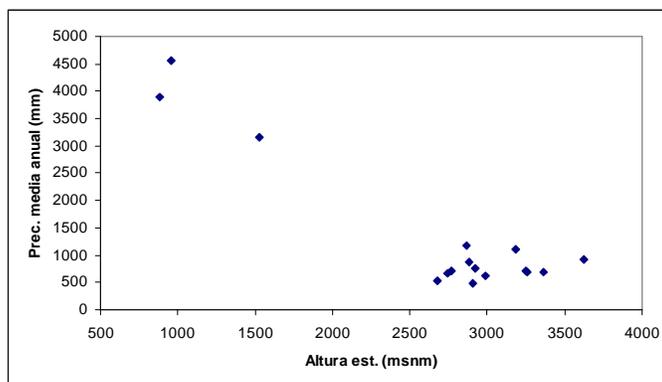


Figura. 3.2 Variación espacial de precipitación en la cuenca del río utilizando datos de la tabla 3.4

Tabla 3.3 Datos para el gráfico de la figura 3.2

ESTACIÓN	ALTURA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL
M041	880	3900.59
M008	960	4556.6
M391	1500	1079.48
M378	1529	3158.08
M004	2680	528.92
M133	2745	656.81
M127	2770	714.26
M407	2863	1181.16
M380	2880	868.58
M128	2910	487.25
M375	2920	767.33
M369	2990	617.23
M396	3188	1110.57
M377	3250	719.72
M393	3258	682.61
M376	3360	694.88
M390	3625	921.75

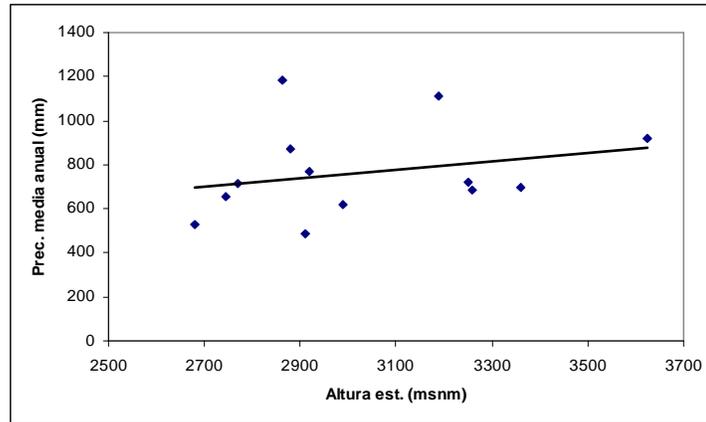


Figura. 3.3. Variación espacial de precipitación en la parte alta de la cuenca del río Pastaza utilizando datos de la tabla 3.3 desde M004 hasta M390.

En las graficas anteriores se representa la variación espacial de la precipitación en la cuenca del río Pastaza, se puede notar que en la parte baja (región amazónica) se tiene una precipitación anual en el orden de 3000 a 5000 mm. Mientras que en estaciones localizadas sobre los 2500 m.s.n.m se tiene valores entre 400 y 1200 mm por año.

Como no existe una distribución homogénea de las lluvias en la zona no fue posible definir una sola ecuación para toda la cuenca por lo que se ha especificado una ecuación diferente para cada banda de elevación (Sección 3.5.5).

3.5.3.1.3 Régimen de precipitación

El estudio de modalidad se realizó utilizando el promedio multimensual de la precipitación, los resultados han demostrado que la cuenca esta gobernada por un régimen bimodal, solamente se encontró una estación unimodal (M-380; Huambaló) en el centro de la cuenca con un área de influencia de menos del 2% del área total.

A pesar de que existe un solo tipo de régimen, se ha clasificado en cuatro sub-regímenes dependiendo de la forma de los pluviogramas, estos se encuentran a continuación:

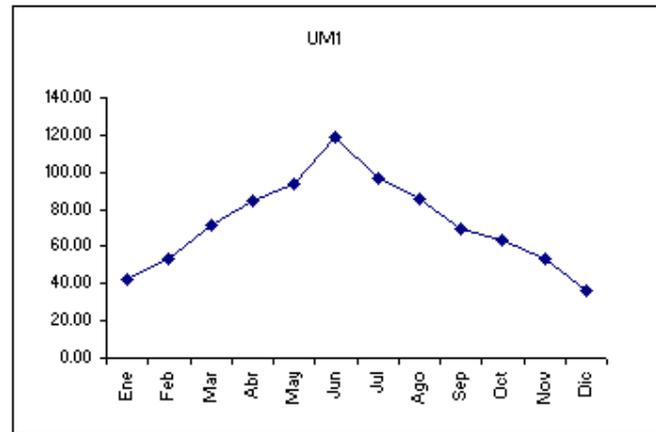


Figura 3.4 Representación del régimen unimodal presente en la estación M380

La gráfica representa la distribución de las lluvias en la estación M380 claramente se puede observar que existe un pico en el mes de junio, las precipitaciones van desde 40 hasta a 120 mm mensuales.

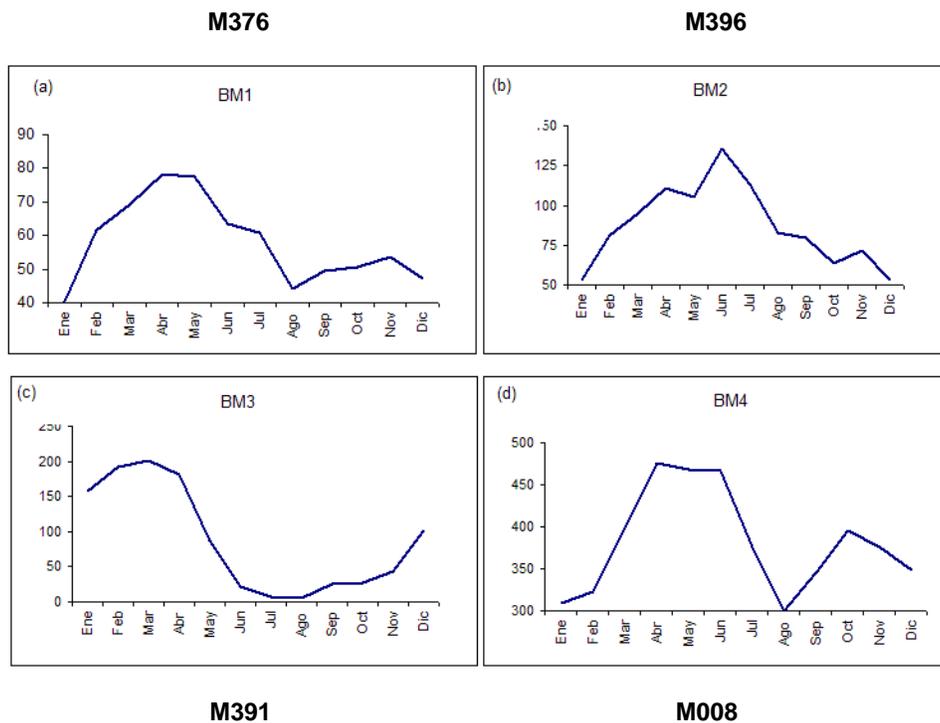


Figura 3.5 Clasificación de sub-regímenes bimodales

En la figura 3.5 se ilustra la clasificación de los diferentes regímenes bimodales según la distribución de lluvias a lo largo del año.

Tabla 3.4 Características de regímenes bimodales presentes en la cuenca

REGIMEN	PRECIPITACION MÁXIMA EN EL AÑO (mm)	PRECIPITACION MÍNIMA EN EL AÑO (mm)	MES DE PRECIPITACIÓN MÍNIMA	MES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA
BM1	80	40	Enero	Abril
BM2	140	50	Enero	Junio
BM3	200	0	Agosto	Marzo
BM4	500	300	Agosto	Abril

3.5.3.2 Temperatura

3.5.3.2.1 Base de datos

Los datos de temperatura están disponibles a nivel diario, en la cuenca existe solamente 8 estaciones con datos de este parámetro, el periodo con más continuidad va desde el año 1982 hasta 2005.

Tabla 3.5 Disponibilidad de información de temperatura

Año	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
M004												
M126												
M127												
M128												
M133												
M258												
M008												
M041												

Tabla 3.5 Continuación

Año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
M004												
M126												
M127												
M128												
M133												
M258												
M008												
M041												

FUENTE: INAMHI



Más del 75 % de datos a nivel diario

Menos del 75 % de datos a nivel diario

Es necesario realizar también un análisis espacial de la temperatura (figura 3.6) para aplicar en el método de las bandas de elevación.

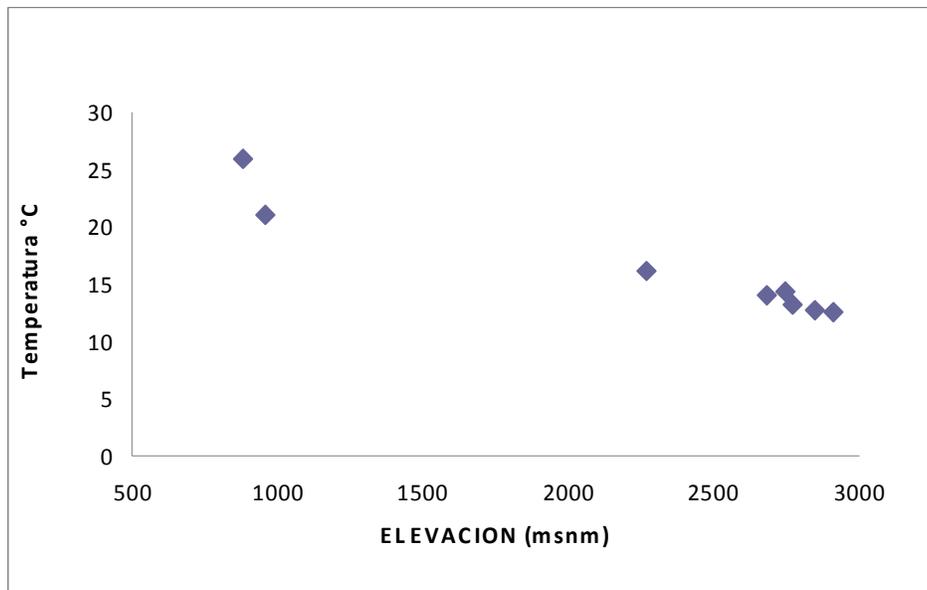


Figura 3.6 Variación espacial de la temperatura en la cuenca del río Pastaza

La gráfica ilustra como la temperatura va decreciendo conforme va aumentando la altura a la cual está ubicada la estación, la variación de este parámetro va desde los 12°C en los páramos sobre los 5000 m.s.n.m hasta los 26°C en la región oriental.

3.5.3.3 Humedad Relativa

La información de humedad relativa está dada solo por dos estaciones ubicadas sobre los 2500 m.s.n.m, el registro posee datos desde el año de 1986 hasta el 2005.

Tabla 3.6 Disponibilidad de información de humedad relativa

Año	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	
M004																					
M128																					

FUENTE: INAMHI



Más del 75 % de datos a nivel diario

Menos del 75 % de datos a nivel diario

3.5.3.4 Velocidad Del Viento

Los datos de velocidad del viento están solo disponibles en la estación M-008 (Puyo) que está ubicada a 960 m.s.n.m, al igual que los parámetros anteriores se encuentran a nivel diario, existe un registro de datos desde 1987 hasta el año 2005.

Tabla 3.7 Disponibilidad de información de velocidad del viento

Año	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	
M008																				

FUENTE: INAMHI



Más del 75 % de datos a nivel diario

Menos del 75 % de datos a nivel diario

3.5.3.5 Información Hidrometeorológica: Caudales Medios Diarios

La información de caudales para el presente proyecto esta proporcionada por 5 estaciones, que se encuentran ubicadas en la parte alta de la cuenca, lo que generará mayor nivel de incertidumbre en la modelación de la parte amazónica de la cuenca del río Pastaza, puesto que no existen datos para comparar los resultados en esa área.

Tabla 3.8 Disponibilidad de información de caudales

Año	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	
H787																										
H792																										
H798																										
H800																										
H801																										

FUENTE: INAMHI



Menos del 75 % de datos a nivel diario

Más del 75 % de datos a nivel diario

Como se puede observar la disponibilidad de información de caudales es muy pobre, razón por la cual se deberá limitar los periodos de tiempo para la modelación de la cuenca del río Pastaza tanto en la etapa de calibración como de verificación para los periodos más continuos y con mayor cantidad de información.

3.5.4 ANALISIS DE CONSISTENCIA

3.5.4.1 Introducción

El hidrólogo o especialista que desea desarrollar un estudio hidrológico, debe buscar la información de la cuenca en estudio, en las instituciones encargadas de su recopilación, pero una vez que esta ha sido obtenida, una de las interrogantes que se debe hacer es: ¿Es confiable la información disponible?

La respuesta a esa pregunta, se obtiene realizando un análisis de consistencia de la información disponible, mediante criterios físicos y métodos estadísticos que permitan identificar, evaluar y eliminar los posibles errores sistemáticos que han podido ocurrir, sea por causas naturales u ocasionados por la intervención de la mano del hombre.

La no homogeneidad e inconsistencia, son los causales del cambio a que están expuestas las informaciones hidrológicas, por lo cual su estudio, es de mucha importancia para determinar los errores sistemáticos que puedan afectarlas.

Inconsistencia es sinónimo de error sistemático y se presenta como saltos y tendencias, y no homogeneidad es definido como los cambios de datos vírgenes con el tiempo.

La no homogeneidad en una serie de tiempo hidrológica, se debe a factores humanos (tala indiscriminada de una cuenca, construcción de estructuras hidráulicas, etc.) ó a factores naturales de gran significancia, como los desastres naturales (inundaciones, derrumbes, etc.).

La inconsistencia de una serie de tiempo, está dada por la producción de errores sistemáticos (déficit en la toma de datos, cambio de estación de registro, etc.).

La inconsistencia y no homogeneidad se pone de manifiesto con la presencia de saltos y/o tendencias en las series hidrológicas, afectando las características de dichas series, tales como la media, desviación estándar y correlación lineal.

El análisis de consistencia de la información, es el proceso que consiste en la identificación o detección, descripción y remoción de la no homogeneidad e inconsistencia de una serie de tiempo hidrológica.

Antes de utilizar la serie histórica para la modelación, es necesario efectuar el análisis de consistencia respectivo, a fin de obtener una serie confiable, es decir, homogénea y consistente (Villón Máximo, 2005).

El análisis de consistencia se realiza mediante los siguientes procesos:

- ♦ Análisis visual gráfico
- ♦ Análisis doble masa
- ♦ Análisis estadístico

3.5.4.2 Análisis Visual Grafico

En coordenadas cartesianas se plotea la información hidrológica histórica, ubicándose en las ordenadas, los valores de la serie y en las abscisas el tiempo (años, meses, días, etc.).

Este gráfico sirve para ver la consistencia de la información hidrológica en forma visual, e indicar el periodo o los periodos en la cual la información es dudosa, lo cual se puede reflejar como “picos” muy altos ó valores muy “bajos”, saltos y/o tendencias, los mismos que deberán comprobarse, si son fenómenos naturales que efectivamente han ocurrido, ó si son producto de errores sistemáticos.

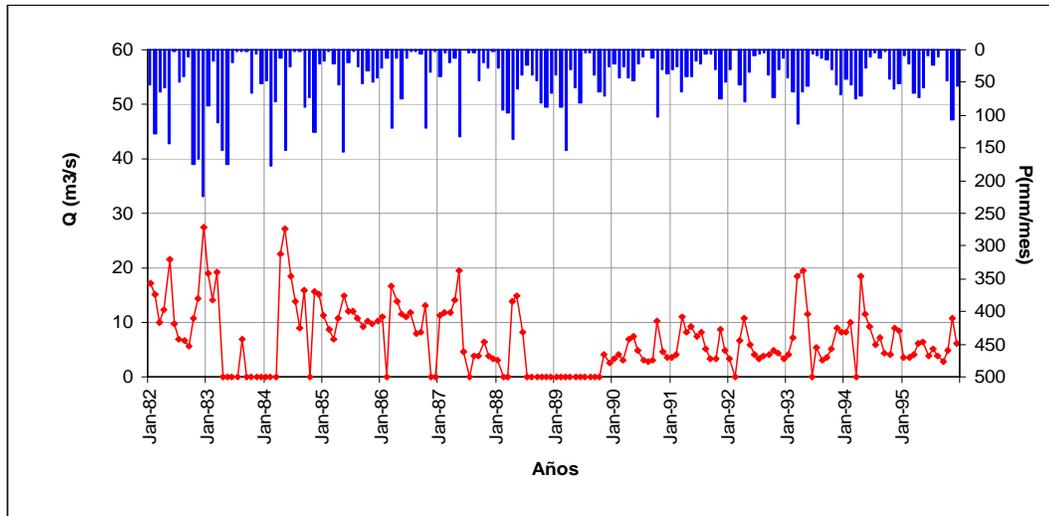


Figura 3.7 Serie histórica de caudales promedio mensuales y de precipitación mensual (Periodo de calibración 1982-1995)

La figura 3.7 representa la serie histórica de datos recopilados en la estación Cutuchi A.J. Yanayacu (H792), en la cual se puede observar los siguientes aspectos:

- ◆ No existe una tendencia general para el comportamiento del río.
- ◆ Existen muchos valores donde el caudal es igual a cero, que puede ser porque se está utilizando todo el recurso hídrico del río ó porque simplemente no se realizó la lectura correspondiente.
- ◆ Comparando los diagramas de precipitación de la estación base (M369 Cusubamba) con el de caudal se puede determinar que si bien existe periodos en los cuales no existe precipitación estos no coinciden con los periodos en los que no existe caudal.

3.5.4.3 Análisis De Doble Masa

Este análisis se realiza para tener una cierta confiabilidad en la información, así como también, para analizar la consistencia en lo relacionado a errores, que pueden producirse durante la obtención de los mismos, y no para una corrección a partir de la recta de doble masa.

El diagrama doble masa se obtiene graficando en el eje de las abscisas los acumulados, por ejemplo, de los promedios de los volúmenes anuales en millones m^3 , de todas las estaciones de la cuenca y, en el eje de las ordenadas los acumulados los volúmenes anuales, en millones de m^3 , de cada una de las estaciones en estudio (Figura 3.8 y Figura 3.9).

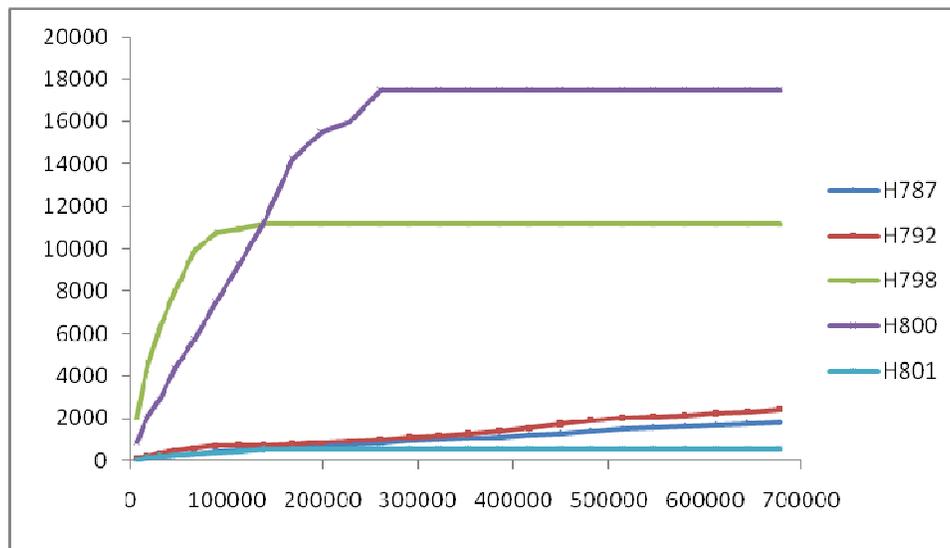


Figura 3.8 Análisis de doble masa para determinar la estación base de la cuenca del río Pastaza

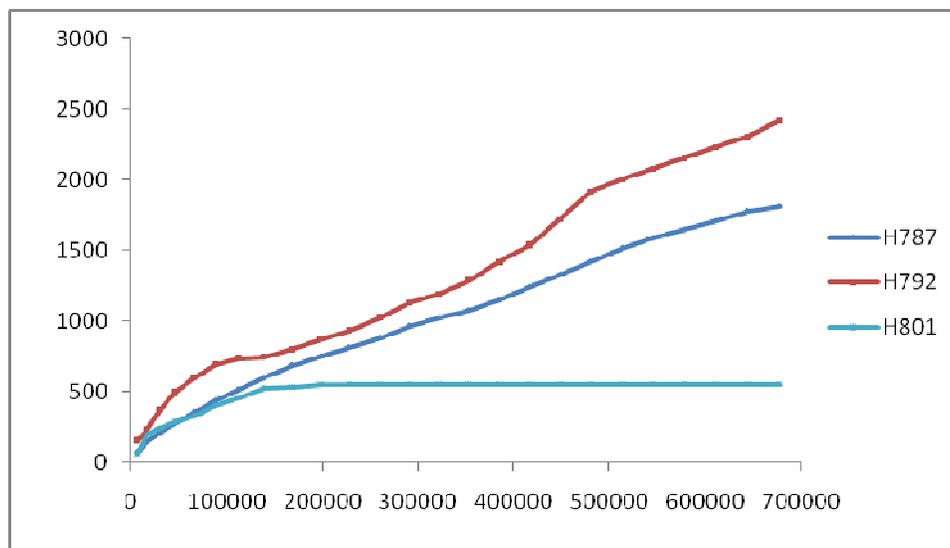


Figura 3.9 Ampliación figura anterior para determinar quiebres en las estaciones con menores caudales.

En las figuras anteriores se puede notar que la estación (H787) tiene 7 quiebres pero su forma es casi recta.

La estación (H792) tiene una forma más sinuosa, tiene en total 13 quiebres.

La estación (H798) tiene 5 quiebres, sin embargo tiene un periodo donde la línea es completamente recta horizontal.

Existen 5 quiebres en la curva de la estación (H800), pero están claramente definidos dos periodos.

En la estación (H801) se pueden notar 3 quiebres, siendo ésta la estación más confiable.

Aunque la estación (H801) tiene el menor número de quiebres, en el análisis de disponibilidad de información se puede notar que esta estación solamente tiene 7 años de datos confiables.

Debido a que no se conoce si los valores de cero "0" son porque no se levanto la información ó porque no existe caudal, no se puede determinar las causa de estos quiebres.

Para efecto de este análisis se tomará a la estación (H787) como estación base, por ser una estación bastante completa y además porque la tendencia es mejor.

El análisis de doble masa propiamente dicho consiste en analizar el número de quiebres que se presentan en los diagramas, las causas de los fenómenos naturales, o si estos han sido ocasionados por errores sistemáticos. En este último caso, permite determinar el rango de los periodos dudosos y confiables para cada estación en estudio, la cual se deberá corregir utilizando ciertos criterios estadísticos.

3.5.4.4 Análisis estadístico

Después de obtener los gráficos contruidos para el análisis visual y de los de doble masa, los periodos de posible corrección y los periodos de datos que se mantendrán con sus valores originales se procede al análisis estadístico de saltos, tanto de la media como de la desviación estándar.

3.5.4.5 Análisis de saltos

3.5.4.5.1 Consistencia de la media

El análisis estadístico consiste en probar, mediante la prueba "t" (prueba de hipótesis), si los valores medios (\bar{x}_1 , \bar{x}_2) de las submuestras, son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o con un 5% de nivel de significación, de la siguiente manera:

- a) Cálculo de la media y de la desviación estándar para las submuestras según:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i ; \quad S_1(x) = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} x_j ; \quad S_2(x) = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

x_i = valores de la serie del periodo 1

x_j = valores de la serie del periodo 2

\bar{x}_1 , \bar{x}_2 = media de los periodos 1 y 2 respectivamente

$S_1(x)$; $S_2(x)$ = desviación estándar de los periodos 1 y 2 respectivamente

n = tamaño de la muestra

n_1 ; n_2 = tamaño de las submuestras

$n = n_1 + n_2$

b) Cálculo del “t” calculado (t_c) según:

$$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_{\bar{d}}} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

$\mu_1 - \mu_2 = 0$ (por hipótesis es que las medias son iguales)

Quedando:

$$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{S_{\bar{d}}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Además:

$$S_{\bar{d}} = S_p \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$S_p = \left[\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Siendo:

$S_{\bar{d}}$: Desviación de las diferencias de los promedios

S_p : Desviación estándar ponderada

c) Cálculo del “t” tabular “ t_t ”:

El valor crítico de “t” se obtiene de la tabla t de Student, con una probabilidad del 95%, ó con un nivel de significación del 5%, es decir con $\alpha/2 = 0.025$ y con grados de libertad $v = n_1 + n_2 - 2$.

d) Comparación del “ t_c ” con el “ t_t ”:

$$\text{Si } |t_c| \leq t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 = \bar{x}_2 \quad (\text{Estadísticamente}) \quad \text{Ec. 3.7}$$

En este caso, siendo las medias $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$ estadísticamente, no se debe realizar proceso de corrección.

$$\text{Si } |t_c| > t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2 \quad (\text{Estadísticamente}) \quad \text{Ec. 3.8}$$

En este caso, siendo las medias $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ estadísticamente, se debe corregir la información.

3.5.4.5.2 Consistencia de la desviación estándar

El análisis estadístico consiste en probar, mediante la prueba F, si los valores de las desviaciones estándar de las submuestras son estadísticamente iguales ó diferentes, con un 95% de probabilidad ó con un 5% de nivel de significación, de la siguiente forma:

a) Cálculo de las varianzas de ambos periodos:

$$S_1(x) = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.9}$$

$$S_2(x) = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.10}$$

b) Cálculo del F calculado (Fc), según:

$$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)}, \text{ si } S_1^2(x) > S_2^2(x) \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)}, \text{ si } S_2^2(x) > S_1^2(x) \quad \text{Ec. 3.12}$$

c) Cálculo del F tabular (valor crítico de F ó Ft), se obtiene de las tablas F² (Villón, 2005) para una probabilidad del 95%, es decir, con un nivel de significación $\alpha = 0.05$ y grados de libertad:

$$\left. \begin{array}{l} G.L.N = n_1 - 1 \\ G.L.N = n_2 - 1 \end{array} \right\}, \text{ si } S_1^2(x) > S_2^2(x) \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$\left. \begin{array}{l} G.L.N = n_2 - 1 \\ G.L.N = n_1 - 1 \end{array} \right\}, \text{ si } S_2^2(x) > S_1^2(x) \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde:

G.L.N.= Grados de libertad del numerador

G.L.D.= Grados de libertad del denominador

Comparación del F_c con el F_t :

$$\text{Si } F_c \leq F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) = S_2(x) \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$\text{Si } F_c > F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) \neq S_2(x) \quad \text{Ec. 3.16}$$

(estadísticamente), por lo que se debe corregir.

3.5.4.5.3 Corrección de datos

En los casos en que los parámetros media y desviación estándar de las submuestras de las series de tiempo, resultan estadísticamente iguales, la información original no se corrige, por ser consistente con 95% de probabilidad, aún cuando en el análisis de doble masa se observe quiebres. En caso contrario, se corrigen los valores de las submuestras mediante las siguientes ecuaciones

$$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_1}{S_1(t)} \cdot S_2(t) + \bar{x}_2 \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$X'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_2}{S_2(t)} \cdot S_1(t) + \bar{x}_1 \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde:

$X'_{(t)}$ = valor corregido de saltos

X_t = valor a ser corregido

La ecuación 3.17, se utiliza cuando se deben corregir los valores de la submuestra de tamaño n_1 y la ecuación 3.18, si se debe corregir la submuestra de tamaño n_2

3.5.4.6 Análisis de tendencias

Antes de realizar el análisis de tendencias, se realiza el análisis de saltos y con la serie libre de saltos, se procede a analizar las tendencias en la media y en la desviación estándar.

3.5.4.6.1 Tendencia en la media

La tendencia de la media T_m , puede ser expresada en forma general por la ecuación polinomial:

$$T_m = A_m + B_m t + C_m t^2 + D_m t^3 + \dots \quad \text{Ec. 3.19}$$

Y en forma general por la ecuación de regresión lineal simple:

$$T_m = A_m + B_m t \quad \text{Ec. 3.20}$$

Donde:

t = tiempo en años, tomado como variable independiente de la tendencia (1,2,3,...n)

T_m = tendencia en la media, para este caso:

$T_m = X'(t)$ valor corregido de saltos, es decir, datos a usarse para el cálculo de los parámetros.

$A_m, B_m, C_m, D_m, \dots$ = coeficientes de los polinomios de regresión, que deben ser estimados con los datos.

Los parámetros de regresión de estas ecuaciones, pueden ser estimados por el método de mínimos cuadrados, o por el método de regresión lineal múltiple.

El cálculo de la tendencia en la media, haciendo uso de la ecuación 3.20, se realiza mediante el siguiente proceso:

a) Cálculo de los parámetros de la ecuación de regresión lineal simple:

$$A_m = T_m - \bar{t} * B_m \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$B_m = R \frac{S_{T_m}}{S_t} \quad \text{Ec. 3.22}$$

$$R = \frac{\bar{t} \cdot \overline{T_m} - \bar{t} \cdot \overline{T_m}}{S_t \cdot S_{T_m}} \quad \text{Ec. 3.23}$$

Donde:

$$\overline{T_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{m_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X'_{(t)_i} \quad \text{Ec. 3.24}$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad \text{Ec. 3.25}$$

$$\overline{t \cdot T_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \cdot T_{m_i} \quad \text{Ec. 3.26}$$

$$S_{T_m} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m_i} - \overline{T_m})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 3.27}$$

$$S_t = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 3.28}$$

Además:

$\overline{T_m}$ = promedio de las tendencias T_m , o promedio de los datos corregidos de saltos $X'_{(t)}$

\bar{t} = promedio del tiempo t

S_{T_m} = desviación estándar de la tendencia de la media T_m

S_t = desviación estándar del tiempo t

b) Evaluación de la tendencia T_m

Para averiguar si la tendencia es significativa, se analiza el coeficiente de regresión B_m ó también el coeficiente de correlación R .

El análisis de R según el estadístico t , es como sigue:

1. Cálculo del estadístico t_c según:

$$t_c = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad \text{Ec. 3.29}$$

Donde:

T_c = valor del estadístico t calculado

n = número total de datos

R = coeficiente de correlación

2. Cálculo de t_t :

El valor crítico de t, se obtiene de la tabla de t de Student, con 95% de probabilidad o con un nivel de significación del 5%, es decir:

$$\frac{\alpha}{2} = 0.025 \quad \text{Ec. 3.30}$$

$$G.L = n - 2$$

Comparación del t_c con el t_t :

- Si $|t_c| \leq t_c(95\%) \rightarrow R$ no es significativo

En este caso, la tendencia no es significativa y no hay que corregir.

- Si $|t_c| > t_c(95\%) \rightarrow R$ si es significativo

En este caso, la tendencia es significativa y hay necesidad de corregir la información de tendencia en la media.

c) Corrección de la información:

La tendencia en la media se elimina haciendo uso de la ecuación:

$$Y_t = X'_t - T_m \quad \text{Ec. 3.31}$$

ó

$$Y_t = X'_t - (A_m + B_m \cdot t) \quad \text{Ec. 3.32}$$

Donde:

X'_t = serie corregida de saltos

T_m = tendencias en la media, obtenida de la ecuación

Y_t = serie sin tendencia en la media

Para que el proceso X_t preserve la media constante, se devuelve el promedio de las X'_t ó $\overline{T_m}$, luego las ecuaciones 3.31 y 3.32 toman la forma:

$$Y_t = X'_t - T_m + \overline{T_m} \quad \text{Ec. 3.33}$$

$$Y_t = X'_t - (A_m + B_m \cdot t) + \overline{T_m} \quad \text{Ec. 3.34}$$

Donde $\overline{T_m}$ es el promedio de la tendencia en la media o promedio de los valores corregidos de saltos.

3.5.4.6.2 Tendencia en la desviación estándar

Según Salas “la tendencia en la desviación estándar, generalmente se presenta en los datos semanales ó mensuales, no así en datos anuales”. Por lo que, cuando se trabajan con datos anuales, no hay necesidad de realizar el análisis de la tendencia en la desviación estándar.

La tendencia en la desviación estándar T_s , se expresa en forma general por la ecuación polinomial:

$$T_s = A_s + B_s t + C_s t^2 + D_s t^3 + \dots \quad \text{Ec. 3.35}$$

Y en forma particular, por la ecuación de regresión lineal simple:

$$T_s = A_s + B_s t \quad \text{Ec. 3.36}$$

Donde:

T_s = tendencia en la desviación estándar

$T_s=Y_t$ valor corregido de tendencia en la media, es decir, datos a usarse para el cálculo de los parámetros.

t = tiempo en años (1,2,3,...,n)

$A_s, B_s, C_s, D_s, \dots$ = coeficientes de los polinomios de regresión que deben ser estimados con los datos.

Para calcular y probar si la tendencia en la desviación estándar es significativa, se sigue el siguiente proceso:

- a) La información ya sin tendencia en la media Y_t , se divide en períodos de datos anuales.
- b) Se calcula las desviaciones estándar para cada período de toda la información:

$$S_p = \left[\frac{1}{11} \sum_{p=1}^{12} (Y_p - \bar{Y}_p)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.37}$$

Donde:

S_p = desviación estándar del año p , es decir de los datos mensuales del año p .

Y_p = serie sin tendencia en la media

\bar{Y}_p = promedio de datos mensuales del año p

$p = 1, 2, 3, \dots, 12$

- c) Se calculan los parámetros de la ecuación 3.36 a partir de las desviaciones estándar anuales y el tiempo t (en años), utilizando las ecuaciones de la 3.24 a la 3.26, dadas para la tendencia en la media.
- d) Se realiza la evaluación de T_s siguiendo el mismo proceso descrito para T_m .

Si en la prueba R resulta significativo, la tendencia en la desviación estándar es significativa, por lo que se debe eliminar de la serie, aplicando la siguiente ecuación:

$$Z_t = \frac{X'(t) - T_m}{T_s} \quad \text{Ec. 3.38}$$

Donde:

Z_t = serie sin tendencia en la media ni en la desviación estándar. Las demás variables han sido definidas en párrafos anteriores.

Para que el proceso preserve la media y la desviación estándar constante, la ecuación toma la forma:

$$Z_t = \frac{X'(t) - T_m}{T_s} - \overline{T_s} - \overline{T_m} \quad \text{Ec. 3.39}$$

Donde $\overline{T_s}$, $\overline{T_m}$ son los promedios de la tendencia en la desviación estándar y media respectivamente.

La serie Z_t es una serie homogénea y consistente al 95% de probabilidad.

3.5.4.7 Análisis de consistencia para el presente proyecto

En el análisis de doble masa que se realizó anteriormente se decidió tomar como estación base a la estación H787, separando la información en dos periodos 1982 – 1996, 1997 – 2005.

Se realizará el análisis estadístico de saltos en la media y desviación estándar para ambos periodos.

Tabla 3.9 Volúmenes anuales en millones de m3 de la estación H787

Año	MM ³	Año	MM ³
1982	67,82	1994	82,14
1983	78,90	1995	56,66
1984	67,58	1996	53,65
1985	66,75	1997	75,66
1986	75,98	1998	89,85
1987	81,64	1999	87,72
1988	76,09	2000	90,56
1989	85,05	2001	98,21
1990	90,24	2002	69,54
1991	60,55	2003	60,73
1992	64,13	2004	60,03
1993	68,87	2005	72,87

- Periodos:

Periodo 1: 1982 – 1996; $n_1 = 15$

Periodo 2: 1997 – 2005; $n_2 = 9$

Cálculo de los parámetros de cada período

$$n_1 = 15$$

$$n_2 = 9$$

$$X_1 (\text{prom}) = 71,7$$

$$X_2 (\text{prom}) = 78,4$$

$$S_1^2 = 115,5$$

$$S_2^2 = 190,6$$

$$S_1 = 10,7$$

$$S_2 = 13,8$$

- Evaluación de la consistencia en la media

Cálculo del t_c :

$$S_p = 11,95$$

$$S_d = 5,04$$

$$t_c = -1,31$$

Cálculo del t tabular t_t :

$$n = 22,0$$

$$t_t = 2,074^1$$

Criterio de decisión:

$|t_c| \leq t_t (95\%)$; $1.31 < 2.074$; Entonces no es necesario hacer corrección.

- Evaluación de la consistencia en la desviación estándar

Cálculo de F_c :

$$F_c = 1,65$$

Cálculo del F_t :

$$G.L.N = 8,0$$

$$G.L.D = 14,0$$

$$F_t = 2,70^2$$

¹ Valor para $\alpha = 0.025$ tomado de la tabla A5 “Hidrología Estadística” VILLON M., 2005

² Valor para G.L.N=8 y G.L.D=14 tomado de la tabla A4 “Hidrología Estadística” VILLON M., 2005

Como $F_c < F_t$, entonces no es necesario corregir la información.

Se puede concluir entonces que se realizó una buena decisión al tomar la estación (H787) como estación base, ya que no es necesario corregir la información proporcionada.

Tabla 3.10 Análisis de consistencia para todas las estaciones hidrológicas

Parámetro	H787	H792	H798	H800	H801
$n_1 =$	15	13	5	8	5
$n_2 =$	9	11	3	4	5
$X_1 =$	71,74	98,89	1988,37	1411,48	66,22
$X_2 =$	78,35	92,59	413,18	1062,99	5,26
$S_1^2 =$	115,53	1940,34	33080,23	171682,22	1611,98
$S_2^2 =$	190,55	2270,83	136844,83	1454745,23	32,35
$S_1 =$	10,75	44,05	181,88	414,35	40,15
$S_2 =$	13,80	47,65	369,93	1206,13	5,69
$S_p =$	11,95	45,72	260,13	746,06	28,67
$S_d =$	5,04	18,73	189,97	456,86	18,13
$t_c =$	-1,31	0,34	8,29	0,76	3,36
valor abs. $t_c =$	1,31	0,34	8,29	0,76	3,36
$v =$	22	22	6	10	8
$t_t =$	2,07	2,07	2,45	2,23	2,31
	<i>no corregir</i>	no corregir	corregir	no corregir	corregir
$F_c =$	1,65	1,17	4,14	8,47	0,02
G.L.N =	8	10	2	3	4
G.L.D =	14	12	4	7	4
$F_t =$	2,7	2,75	6,94	4,35	6,39
	<i>no corregir</i>	no corregir	no corregir	corregir	no corregir

Al realizar el análisis de consistencia de todas las estaciones hidrológicas se puede concluir que a nivel general el levantamiento de la información es bastante bueno en calidad, pero no en cantidad ya que no existen periodos continuos extensos para poder aplicar en el presente estudio.

3.5.5 MANEJO DE INFORMACIÓN METEREOLÓGICA

El modelo WEAP requiere información meteorológica como precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, pero calculada de una manera diferente, homogenizando zonas para determinar precipitación y temperatura en toda la subcuenca.

La cuenca en estudio, Cuenca del Río Pastaza hasta la junta con el Río Palora, se ha subdividido en cinco subcuencas, dos de ellas destinadas para la calibración del modelo, Ambato y Cutuchi.

Se debe tomar en cuenta que las subcuencas de calibración deben estar lo más alto posible, es por eso la razón de escoger Ambato y Cutuchi, ya que están ubicadas aguas arriba donde nacen los primeros afluentes de los ríos que conformará el río Pastaza.

Además en la calibración del modelo es preferible tener mejores series de datos posibles, encontrando así un período en común para las estaciones, del año 1970 al año 2005, del cual se puede escoger un período oportuno de calibración y validación.

A continuación se muestra la configuración de las subcuencas y las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de cada una de ellas.

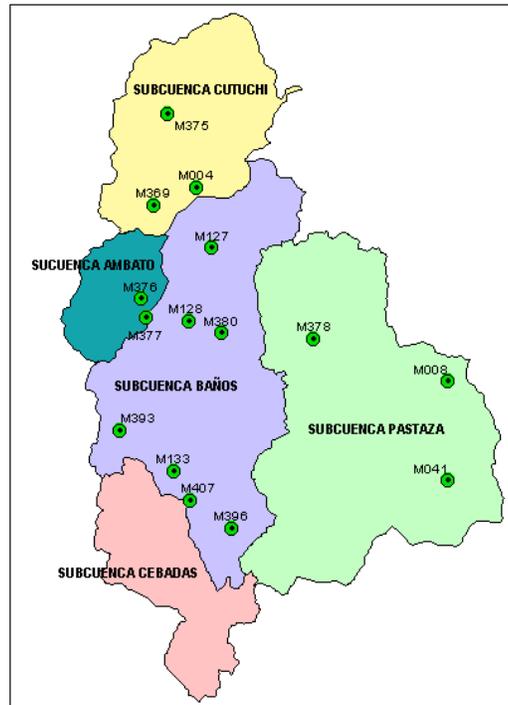


Figura 3.10 Subdivisión de la cuenca en estudio para la homogenización de precipitación y estaciones meteorológicas

3.5.5.1 Zonas homogéneas de precipitación

Para la determinación de las zonas homogéneas de precipitación se realizó bandas de elevación (Escobar, 2008) en cada subcuenca con sus respectivas estaciones meteorológicas, cada una de ellas con series de tiempos mensuales, obteniendo ecuaciones lineales de elevación-precipitación donde $L1Z =$ precipitación promedio anual y $Z =$ elevación de la estación.

Si la subcuenca no contiene ninguna estación es posible obtener la ecuación de estaciones cercanas localizadas dentro de la cuenca o fuera de ella.

Con las ecuaciones de cada subcuenca se determina una precipitación promedio anual homogénea a una altura ubicada en el punto medio de la misma.

Tabla 3.11: Precipitación promedio anual para cada estación de las subcuencas

SUCUENCA	ESTACIÓN	ELEVACIÓN (m)	PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm/año)	ECUACIÓN	ELEVACIÓN DEL PUNTO MEDIO DE LA SUBCUENCA (m)	PRECIPITACION PROMEDIO ANUAL DE LA SUBCUENCA (mm/año)
AMBATO	M369	2990	567.36	$P1Z=0.576*Z-1160$	3700	971.2
	M376	3360	696.2			
	M377	3250	761.59			
	M390	3625	955.45			
BAÑOS	M127	2770	629.91	$P1Z=0.406*Z-472.4$	4000	1151.6
	M128	2910	507.08			
	M133	2745	642.23			
	M380	2880	874.55			
	M393	3258	680.8			
	M396	3188	1043.43			
	M407	2863	1357.29			
CEBADAS	M133	2745	642.23	$P1Z=0.007*Z+1005$	3600	1030.2
	M391	1500	1053.21			
	M396	3188	1043.43			
	M407	2863	1357.29			
CUTUCHI	M004	2680	533.37	$P1Z=0.403*Z-511$	2800	617.4
	M369	2990	567.36			
	M375	2920	834.03			
PASTAZA	M008	960	4574.2	$P1Z=-1.978*Z+6061$	1800	2500.6
	M041	880	3957.71			
	M378	1529	2984.5			

Fuente: Cálculo realizado con datos proporcionados por el INAMHI

3.5.5.2 Zonas homogéneas de temperatura

Para determinar estas zonas se realizó el mismo procedimiento anterior, pero se debe tomar en cuenta que las estaciones con datos de temperatura son únicamente ocho, por lo que se dividió en dos subcuencas.

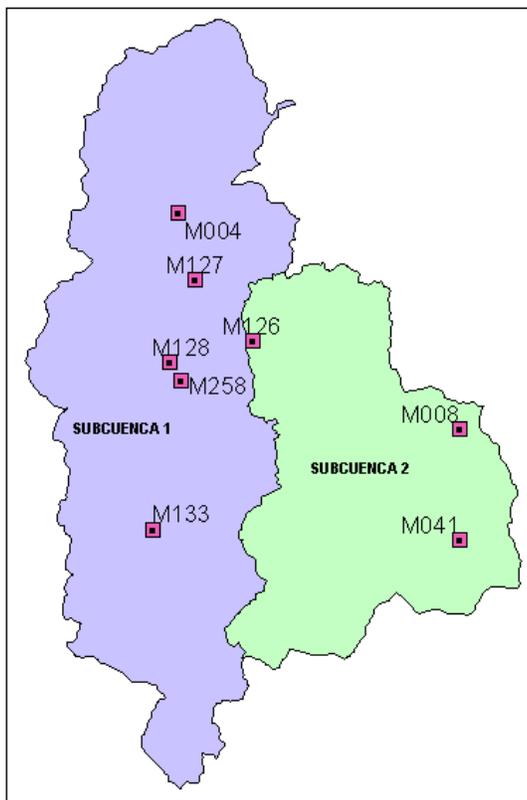


Figura 3.11 Subdivisión de la cuenca para determinar la homogenización de la temperatura

Tabla 3.12 Temperatura promedio anual para cada estación de las subcuencas

SUCUENCA	ESTACIÓN	ELEVACIÓN (m)	TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL (°C)	ECUACIÓN	ELEVACIÓN DEL PUNTO MEDIO DE LA SUBCUENCA (m)	TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL DE LA SUBCUENCA (°C)
1	TM004	2680	14.03	$T1Z=-0.005*Z+28.61$	3200	12.61
	TM126	2270	16.06			
	TM127	2770	13.19			
	TM128	2910	12.58			
	TM133	2745	14.39			
	TM258	2850	12.70			
2	TM008	960	21.05	$T1Z=-0.008*Z+29.49$	1800	15.09
	TM041	880	21.76			

Fuente: Cálculo realizado con datos proporcionados por el INAMHI

Para WEAP un catchment no es sino la representación de la subcuenca que se desea calibrar o modelar mediante un punto, es por eso que se ubica en el

punto medio o centroide y los datos son referentes a toda la subcuenca. Es decir que se estima la precipitación o temperatura promedio anual para cada catchment.

Para cada subcuenca se identifico una estación base siguiendo el criterio de la estación más cercana al centroide o con mayor información de series de datos. Por otro lado, para cada estación base, en meses donde no se contaba con el dato mensual de precipitación, se substituyo con el dato el promedio mensual de dicha estación.

Tabla 3.13 Estaciones base de Precipitación para cada subcuenca

SUBCUENCA	ESTACIÓN BASE	ELEVACIÓN (m)
AMBATO	M376	3360
CEBADAS	M396	3188
CUTUCHI	M369	2990
BAÑOS	M380	2880
PASTAZA	M008	960

Fuente: INAMHI

Tabla 3.14 Estaciones base de Temperatura para cada subcuenca

SUBCUENCA	ESTACIÓN BASE	ELEVACIÓN (m)
1	TM128	2910
2	TM008	960

Fuente: INAMHI

Conociendo la precipitación promedio anual de la estación base y del catchment con las bandas de elevación se desarrollo una proporción para ajustar los datos de precipitación mensual de la estación base a los datos del catchment.

$$P_c = P_e * \frac{PIZ_c}{PIZ_e}$$

Donde:

P_c → precipitación mensual del catchment

P_e → precipitación mensual de la estación

P1Zc → precipitación promedio anual del catchment estimada con las ecuaciones

P1Ze → precipitación promedio anual de la estación estimada con datos de la estación

El mismo procedimiento se realizo en el caso de la temperatura.

3.5.6 MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE LAS SUBCUENCAS

Al momento de determinar los catchments, explicados anteriormente, hay tres opciones de métodos para la simulación de los procesos de cada catchment, como son la evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y demandas de riego. Los tres métodos para WEAP son (User Guide for WEAP 21):

1. Precipitación – Escurrimiento
2. Solo demandas de riego, versiones de la Propuesta de Requerimientos de cultivo de la FAO
3. Modelo de la humedad del suelo

La elección del método depende del grado de complejidad deseado para representar los procesos del catchment y la disponibilidad de información.

Método de solo demandas de riego (FAO)

Es el método más simple, usa los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en el catchment, luego determina alguna demanda de riego que puede ser requerida para rellenar la porción de evapotranspiración necesario que la precipitación no conoce. No simula procesos de escurrimiento o infiltración.

Método de precipitación – escurrimiento (FAO)

También determina evapotranspiración para cultivos irrigados y precipitados usando los coeficientes de cultivo. El resto de la precipitación no consumida por la evapotranspiración es simulada como escurrimiento hacia el río, o puede ser repartida en escurrimiento hacia el río y caudal hacia agua superficial usando vínculos de catchments.

Método precipitación – escurrimiento (Modelo de Humedad del Suelo)

Es el más complejo de los tres métodos, representando cada catchment con dos capas de suelo, como puede ser la acumulación de nieve. En la primera capa de suelo, se simula la evapotranspiración, considerando precipitación y riego en tierras cultivadas y no cultivadas, escurrimiento caudales poco profundos (shallow interflow), y cambios en la humedad del suelo. El caudal base hacia el río y los cambios de humedad del suelo son simulados en la capa de suelo más profunda. Correspondientemente, el método de humedad del suelo requiere parámetros más extensos de suelo y clima para simular los procesos.

Se debe notar que la percolación más profunda dentro del catchment puede ser transmitida directamente al nudo de agua superficial creando un vínculo de escurrimiento/infiltración caudal desde el catchment al nudo de agua superficial. El método se vuelve esencialmente una combinación de una capa de humedad del suelo si se realiza este vínculo.

Para la modelación de la Cuenca del río Pastaza se escogió el tercer método, modelo de humedad del suelo, a continuación algunos de los parámetros requeridos:

Tabla 3.15 Parámetros del método de humedad del suelo

USO DE SUELO	
Área	Área de tierra para el tipo de cobertura vegetal dentro del catchment.
Kc	Coefficiente de cultivo, relativo al cultivo referencial, para un tipo de tierra.
Capacidad de agua en la zona de la raíz (Sw)	El agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa superficial de suelo. (mm)
Capacidad de agua profunda (Dw)	Agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa profunda del suelo. Es un valor singular para el catchment y no varía según el tipo de uso. Es ignorado si el sitio de demanda tiene un vínculo de caudal de retorno hacia un nudo de agua subterránea. (mm)
Conductividad profunda (Kd)	La tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la capa profunda saturada (cuando hay un almacenaje relativo, $z_2=1$) que controla la transmisión del caudal base. Es un valor singular para el catchment y no varía según el tipo uso. El caudal base se incrementará si este parámetro incrementa.
Leaf area index (LAI)	Usado para controlar la respuesta del escurrimiento superficial. El escurrimiento tenderá a decrecer con altos valores de este índice. Este parámetro puede variar según el tipo de uso. (rango de 0.1 a 10)
Conductividad en la zona de la raíz (Ks)	Tasa de conductividad en la zona de la raíz a la saturación (cuando hay un almacenaje relativo $z_1=1$), que será repartida, acordando con la dirección de flujo preferente, entre caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo. Esta tasa puede variar entre los tipos de uso.
Dirección de flujo preferente (RRF)	1=100% horizontal, y 0=100% vertical; Usado para repartir el caudal fuera de la capa de la zona de la raíz entre caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo o agua subterránea. Este valor puede variar entre los tipos de uso.
Z1 inicial	El valor de Z1 inicial al comienzo de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenaje total efectivo de la capacidad de agua en la zona de la raíz.
Z2 inicial	El valor de Z2 inicial al comienzo de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenaje total efectivo de la capacidad de agua profunda. Este parámetro es ignorado si el sitio de la demanda tiene un vínculo de escurrimiento/infiltración al nudo de agua subterránea. Esta tasa no puede variar entre los tipos de uso.

Para un mejor entendimiento se muestra el modelo de los dos cubos usado por WEAP.

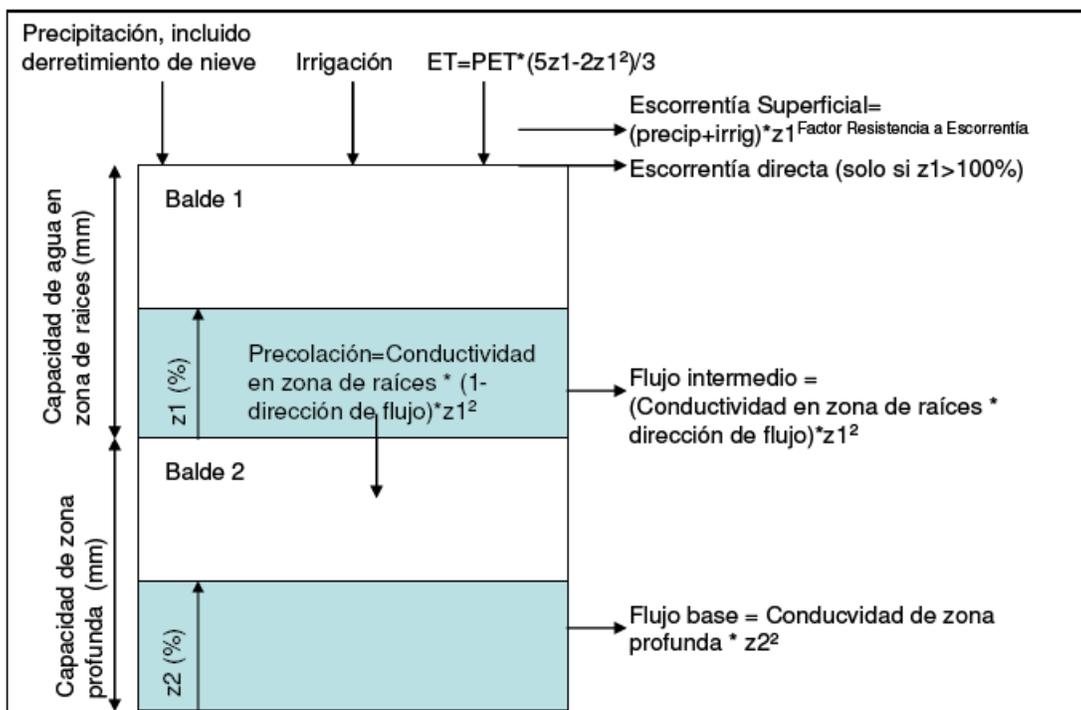


Figura 3.12 Diagrama conceptual y ecuaciones incorporadas al modelo de los dos baldes

Tabla 3.16 Parámetros del método de humedad del suelo (continuación)

CLIMA	
Precipitación	Series de precipitación mensual, que pueden ser leídas de un archivo o ingresadas manualmente.
Temperatura	La media temperatura de los valores máximos y mínimos a nivel mensual
Humedad	Promedio mensual de la humedad relativa.
Viento	Promedio mensual de la velocidad del viento
Punto de fusión	Agua líquida al comienzo del punto de fusión de la nieve
Punto de congelación	Agua sólida al comienzo de la acumulación de nieve
Latitud	Latitud en grados
Nieve inicial	Valor inicial para acumulación de nieve en el comienzo del primer mes de simulación

Tabla 3.16 Continuación

IRRIGACIÓN	
Si se indica que la irrigación ocurre en el catchment al momento de crearlo esquemáticamente, la etiqueta de irrigación aparecerá debajo del catchment en la vista de datos. Las demás variables relacionadas con irrigación se requerirán si el método de humedad del suelo es escogido.	
Área irrigada	El porcentaje de área irrigada
Límite inferior	Regar cuando la humedad del suelo desciende por debajo del nivel necesario
Límite superior	Dejar de regar cuando la humedad del suelo alcanza este nivel por ciento

Fuente: Guía de Usuario para WEAP21, 2005.

3.5.7 DEMANDA

Para WEAP el análisis de la demanda es un enfoque basado en el uso final desagregado para modelar los requerimientos del consumo de agua en un área. Usando WEAP se puede aplicar información económica, demográfica y uso de agua para construir escenarios alternativos que examinen como el consumo de agua total o desagregado se desarrolla en los sectores de la economía. Además el análisis de la demanda es también el punto de inicio para conducir análisis integrados de planes de agua, desde que todos los cálculos de suministro y recurso son manejados por los niveles de demanda final calculada en el análisis de demanda.

WEAP provee flexibilidad para estructurar los datos, típicamente una estructura consistirá de sectores incluyendo casas, industria y agricultura, cada de las cuales podría ser subsectores, usos finales y dispositivos de suministro de agua.

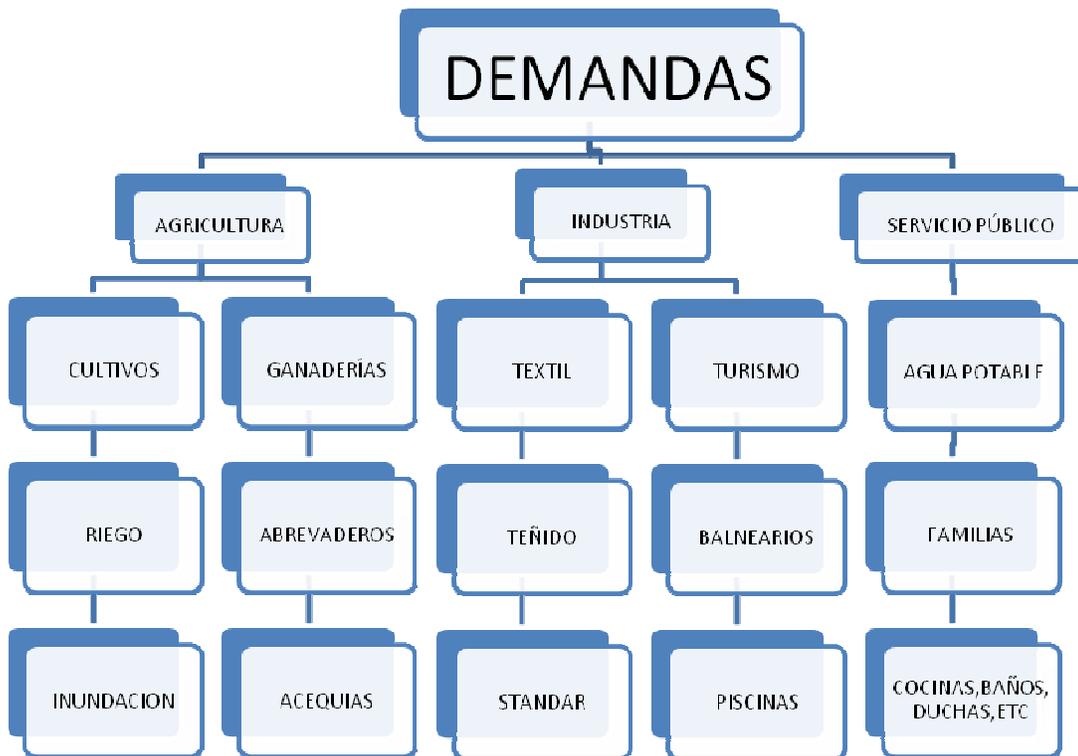


Figura 3.13 Demanda: Sectores, Subsectores, Usos de agua finales y Dispositivos o medios de suministro de agua

Se puede adaptar la estructura de los datos a los propósitos requeridos, basado en la disponibilidad de información, el tipo de análisis que se desea realizar, y las preferencias del usuario.

En cada caso, los cálculos de demanda están basados en una contabilidad desagregada para varias medidas de actividad social y económica (el número de casas, hectáreas de agricultura irrigada, el valor añadido industrial y comercial, etc.). En los casos más simples, estos niveles de actividad son multiplicados por las tarifas de empleo de agua de cada actividad (el empleo de agua por unidad de actividad). Cada nivel de actividad y la tarifa de empleo de agua individualmente pueden ser proyectados en el futuro usando una variedad de técnicas, en los límites de la aplicación de índices de crecimiento simples exponenciales y

funciones de interpolación, a la utilización de las técnicas de modelación sofisticadas que aprovechan las capacidades diseñadas en WEAP.

Mayores enfoques avanzados pueden incorporar procesos hidrológicos para determinar la demanda (p.ej. cálculos de evapotranspiración de cultivos para determinar requerimientos de irrigación).

Existen tres métodos para el cálculo de la demanda:

1. Método estándar de uso de agua
2. Propuesta de requerimientos de cosecha de la FAO
3. Método directo

Método Estándar de Uso de Agua

En el caso más simple, el usuario determina un nivel apropiado para cada nivel desagregado y lo multiplica por una tasa de crecimiento anual apropiada de cada actividad. Para el crecimiento se aplica una variación mensual.

Propuesta de Requerimientos de Cosecha de la FAO

Es típicamente usado para representar los nudos de demanda de agricultura, la propuesta asume para cada sitio de demanda un set de procesos agro-hidrológicos e hidrológicos simplificados como precipitación, evapotranspiración y crecimiento del cultivo, enfatizando la irrigación y la agricultura precipitada. Obviamente cultivos no agrícolas no pueden ser tan bien incluidos. Estos procesos son usados para determinar los requerimientos de irrigación para cada sitio de demanda, algunas de las suposiciones básicas son:

- El balance hídrico es calculado en una base mensual
- La escasez de agua es dividida igualmente sobre las clases de tierra irrigadas
- Factores de cosecha especificados por mes

- Factor de respuesta de producción constante para el período de cultivo entero

Este método se puede usar para determinar directamente las contribuciones de escurrimiento hacia ríos y provisiones de agua subterránea.

Método Directo

Las demandas pueden ser leídas directamente en WEAP de un archivo o ingresadas las tasas mensuales de uso de agua.

El esquema de la información de WEAP es el siguiente:

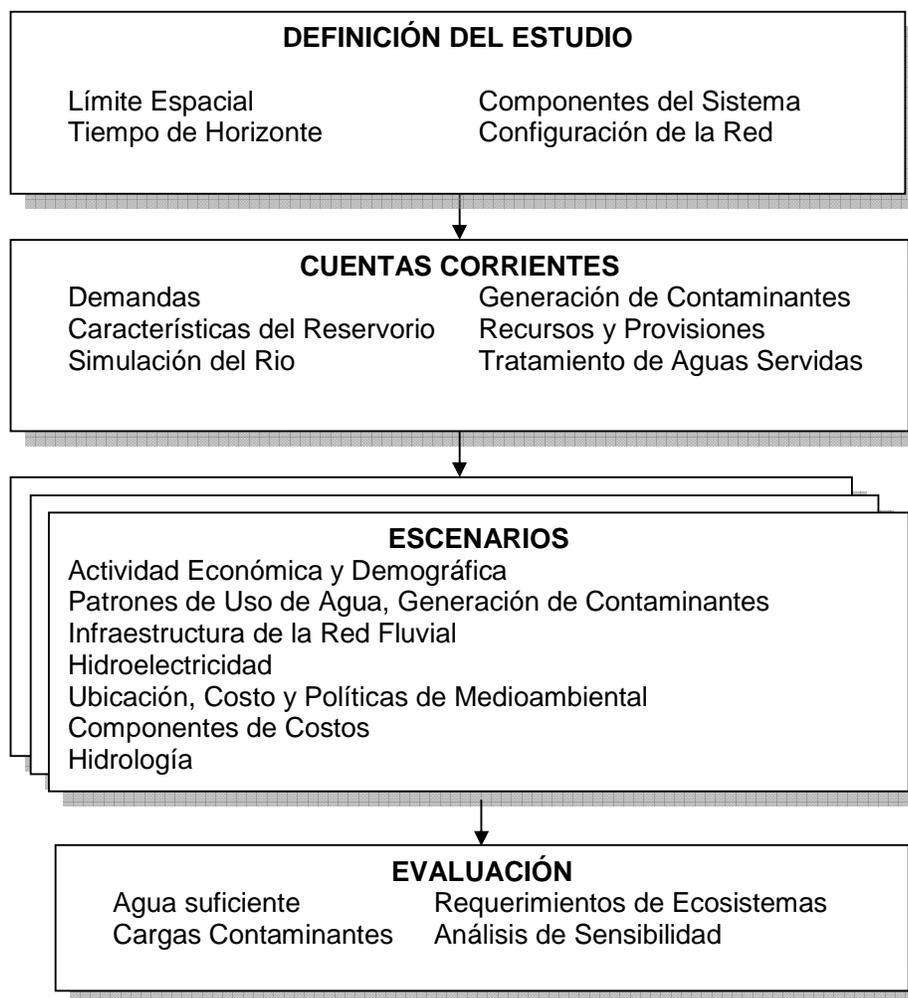


Figura 3.14 Esquema de funcionamiento del programa WEAP

3.6 MODELO CLIMÁTICO REGIONAL “PRECIS”

3.6.1 ¿QUÉ ES UN MODELO CLIMÁTICO REGIONAL (RCM)?

Un RCM (por sus siglas en inglés) es un modelo climático de alta resolución que cubre un área determinada del globo terrestre, generalmente de 5000 Km. x 5000 Km. de superficie por una altitud típica de 50 Km. Los RCMs son basados en leyes físicas representadas por ecuaciones matemáticas que son resueltas usando mallas en tercera dimensión. De ahí que son modelos físicos que usualmente incluyen componentes de la atmósfera y superficie terrestre, contienen representaciones de importantes procesos meteorológicos (por ejemplo: nubosidad, radiación, precipitación) Muchos de estos procesos físicos presentan variaciones en una menor escala que la de la malla del modelo y no pueden ser resueltos. Cuando esto sucede es necesario realizar una interpolación de los efectos y crear una sub-malla con una escala menor.

3.6.2 ¿QUÉ ES PRECIS?

PRECIS es un modelo climático regional, sistema que puede ser usado sobre un área de la superficie terrestre no muy extensa. Puede representar algunos procesos físicos y químicos como por ejemplo: caudales, ciclo atmosférico del azufre, nubosidad, precipitación, temperatura, procesos radiactivos, etc.

Es una herramienta computacional que permite realizar estudios de cómo afectarían las acciones antrópicas en el cambio climático global en un período determinado muy rápidamente.

La idea de construir un modelo regional flexible se da por el incremento de la demanda en muchos países para realizar proyectos a menor escala. Solamente pocos centros de modelación en el mundo han desarrollado RCMs pero estos requieren un gran conocimiento sobre modelación y una gran capacidad computacional. Ambos factores han excluido el desarrollo de estudios en países donde no existe un gran adelanto de la tecnología.

PRECIS es una herramienta fácil de usar y además sin costo por el Software, quienes lo vayan a usar deben tener conocimientos básicos de modelación hidrológica y climática. Existen ciertos puntos a ser considerados antes de empezar a usar PRECIS:

- ◆ No puede ser aplicado en áreas menores a 500 Km² (por ejemplo islas)
- ◆ Para el periodo de control es necesario trabajar en lugares donde se tenga una buena base de datos sobre información hidrometeorológica.
- ◆ El análisis de resultados proporcionados por PRECIS debe llevarse a cabo con personal experimentado. El centro Handley provee material didáctico necesario y capacitación para quienes así lo deseen.
- ◆ PRECIS trabaja con periodos mensuales extensos, no puede trabajar a nivel instantáneo ó diario.

Esta aplicación es muy versátil pues permite al usuario escoger el modelo que quiere visualizar (ECHAM, HadCM3, TL959), los tipos de datos (mensuales, estacionales, anuales), el horizonte temporal (1990.... 2100 según sea el caso), la variable (T min, Tmax, Precipitación, Evaporación, Velocidad viento, etc.), el nivel (superficie, 50m, 250m., etc.), el escenario de emisiones (A2, B2, A1b según se necesite) y además permite escoger la manera de representar la información requerida (mallas ó tablas electrónicas)

Adicionalmente ésta aplicación permite escoger al usuario la región geográfica donde requiere los resultados de los escenarios dentro de los límites de los modelos, (latitud y longitud de los puntos más extremos de la zona de estudio).

CAPÍTULO 4

4 CALIBRACIÓN, VERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

Se entiende por calibración al ajuste de los parámetros de un modelo matemático, ya sea en base a consideraciones de orden físicas o mediante optimización matemática, de forma que la concordancia entre los datos observados y los resultados del modelo sea la mejor posible (Aguamarket, 2005).

4.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP PARA LA APLICACIÓN EN LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO PASTAZA

El modelo WEAP requiere de información tanto meteorológica así como de parámetros definidos para cada cuenca que se desee modelar. Entre la información que se requiere se incluye: los parámetros generales del tiempo de horizonte (periodo de modelación) y el área de la cuenca, precipitación y temperatura espacial de la cuenca, latitud, humedad, velocidad del viento y los parámetros de uso de suelo para el método de humedad de suelo.

A continuación se describirán los parámetros de ingreso al modelo WEAP, y si se requiere en algunos casos se detallarán los procesos utilizados para la determinación de dichos valores, con los cuales posteriormente, se definirán los valores usados en la calibración, verificación y aplicación del modelo.

El modelo utiliza supuestos claves, si así lo desea el usuario para optimizar el ingreso de datos y sobre todo el proceso de calibración. Un supuesto clave no es más que una ayuda que brinda el modelo y pueden ser usados con diferentes propósitos en la creación del mismo, como se explicará en la sección 4.1.5. Por

ejemplo, en los supuestos clave se pueden incorporar los parámetros de uso de suelo usados en la calibración del modelo, también pueden ser usadas para la creación de funciones para obtener series de tiempo de precipitación y temperatura en todos los catchments del modelo a partir de las estaciones base; siendo un catchment la unidad utilizada por el modelo WEAP, representada por un punto, pero abarca el área dentro de cada banda de elevación de una subcuenca, y es en cada catchment donde se presentan todos los parámetros de uso de suelo y procesos climatológicos como se presenta en la figura 4.1.

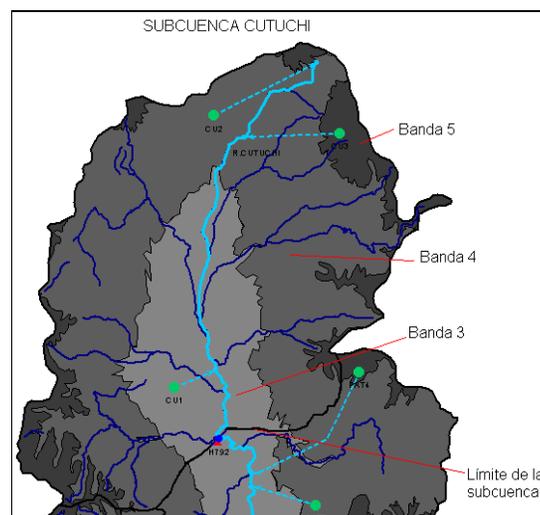


Figura 4.1 Representación de los catchments por subcuenca en el modelo WEAP

4.1.1 LÍMITES DE ÁREA

Los límites de área, no son más que los límites naturales de la cuenca en su totalidad, es decir, la cuenca del río Pastaza hasta la junta con el río Palora.

4.1.1.1 Subcuencas

Para la calibración de la cuenca del río Pastaza, se definen subcuencas en la parte alta, donde se cuenta con mayor información y termina en la parte media donde la información es casi inexistente. Al final de cada subcuenca se tiene una estación hidrológica que sirve para comparar los resultados de la calibración y

validación, y encontrar un coeficiente de correlación que asegure si el trabajo está bien realizado.

De la figura 4.2 se escogen las subcuencas ubicadas en la parte alta de la cuenca que cuentan con mayor información, Ambato y Cutuchi, para la calibración y validación del modelo.

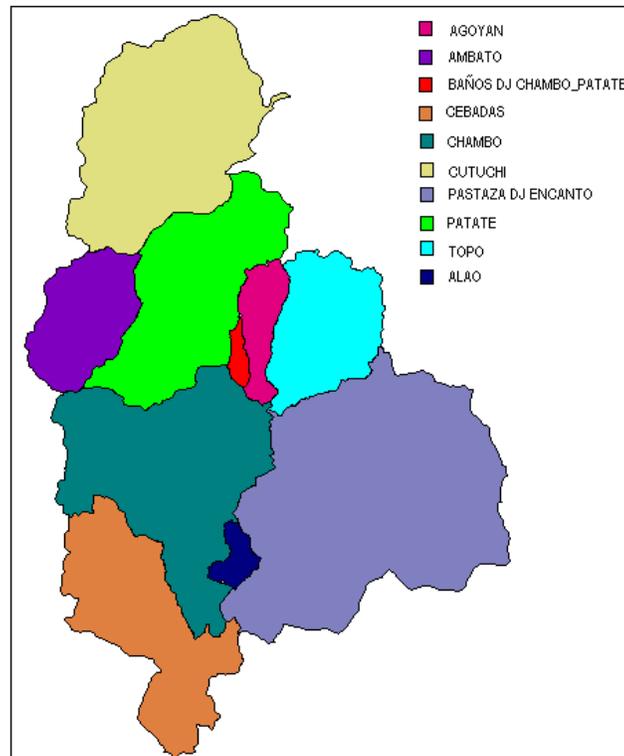


Figura 4.2 División de la cuenca del río Pastaza en subcuencas para la aplicación del modelo WEAP

4.1.1.2 Definición de bandas de elevación para el modelo WEAP

Definir las bandas de nivel, es dividir la cuenca en intervalos de distancia entre las curvas de nivel (figura 4.3).

Para la modelación de la cuenca del río Pastaza el intervalo fue de 1000m, por lo que se tiene 6 bandas de nivel en toda la cuenca y al intersecarse con cada una de las subcuencas, se tiene el número de catchments (unidad del modelo WEAP) de cada una de estas.

Tabla 4.1 Rango de intervalo de las bandas de elevación

BANDAS DE ELEVACION	INTERVALO
Banda 1	0 – 1000 m
Banda 2	1000 m – 2000 m
Banda 3	2000 m – 3000 m
Banda 4	3000 m – 4000 m
Banda 5	4000 m – 5000 m
Banda 6	5000 m – 6000 m

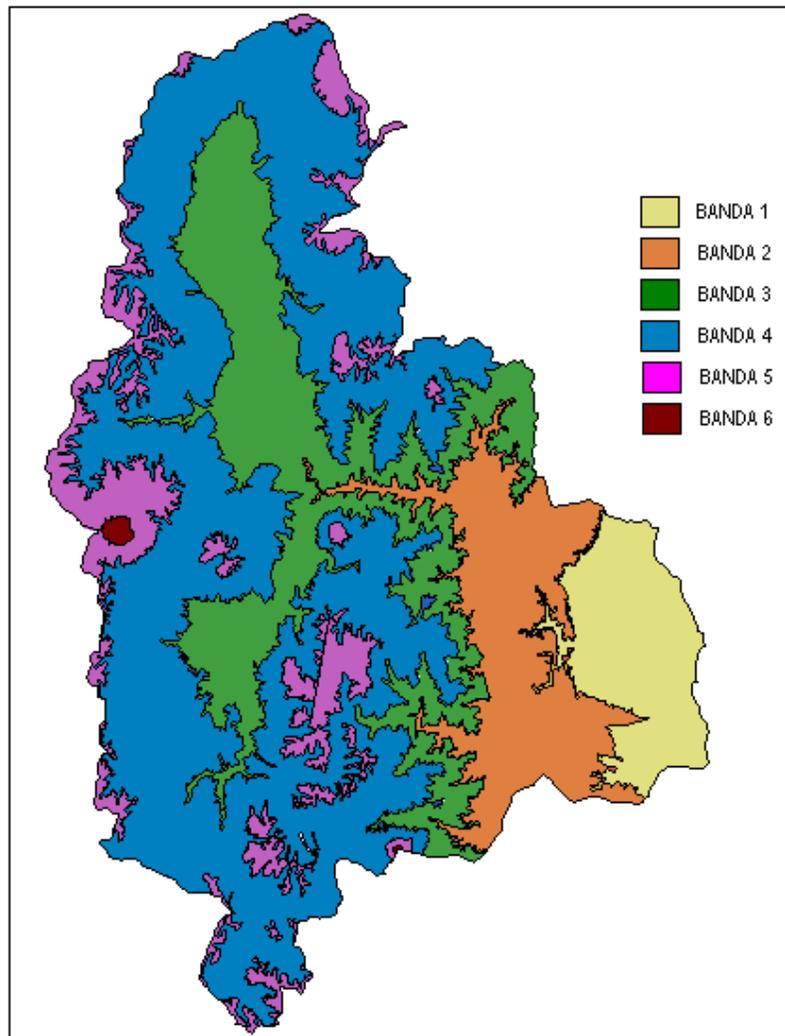


Figura 4.3 División de la cuenca del río Pastaza en bandas de elevación

Una vez definidas las subcuencas y las bandas de nivel se tiene los siguientes catchments:

Tabla 4.2 Catchments de ingreso para el modelo en el programa WEAP

SUBCUENCA	BANDA DE ELEVACION	NOMBRE DEL CATCHMENT	ETIQUETA	REPRESENTA CAUDAL DE CABECERA?
AGOYAN	BANDA2	AGOYAN1	AG1	NO
	BANDA3	AGOYAN2	AG2	NO
	BANDA4	AGOYAN3	AG3	NO
	BANDA5	AGOYAN4	AG4	SI
AMBATO	BANDA3	AMBATO1	AM1	NO
	BANDA4	AMBATO2	AM2	NO
	BANDA5	AMBATO3	AM3	NO
	BANDA6	AMBATO4	AM4	SI
BAÑOSDJCHAMBOPATATE	BANDA2	BAÑOSDJCHAMBOPATATE1	BA1	NO
	BANDA3	BAÑOSDJCHAMBOPATATE2	BA2	NO
	BANDA4	BAÑOSDJCHAMBOPATATE3	BA3	SI
CEBADAS	BANDA3	CEBADAS1	CE1	NO
	BANDA4	CEBADAS2	CE2	NO
	BANDA5	CEBADAS3	CE3	SI
CHAMBO	BANDA2	CHAMBO1	CH1	NO
	BANDA3	CHAMBO2	CH2	NO
	BANDA4	CHAMBO3	CH3	NO
	BANDA5	CHAMBO4	CH4	NO
	BANDA6	CHAMBO5	CH5	SI
CUTUCHI	BANDA3	CUTUCHI1	CU1	NO
	BANDA4	CUTUCHI2	CU2	NO
	BANDA5	CUTUCHI3	CU3	SI
PASTAZADJENCANTO	BANDA1	PASTAZADJENCANTO1	PAS1	NO
	BANDA2	PASTAZADJENCANTO2	PAS2	NO
	BANDA3	PASTAZADJENCANTO3	PAS3	NO
	BANDA4	PASTAZADJENCANTO4	PAS4	NO
	BANDA5	PASTAZADJENCANTO5	PAS5	SI
PATATE	BANDA2	PATATE1	PAT1	NO
	BANDA3	PATATE2	PAT2	NO
	BANDA4	PATATE3	PAT3	NO
	BANDA5	PATATE4	PAT4	SI
TOPO	BANDA2	TOPO1	TO1	NO
	BANDA3	TOPO2	TO2	NO
	BANDA4	TOPO3	TO3	NO
	BANDA5	TOPO4	TO4	SI
ALAO	BANDA4	ALAO1	AL1	NO
	BANDA5	ALAO2	AL2	SI

4.1.1.3 Ríos

El alcance o longitud de los ríos no puede ser ingresado directamente a WEAP desde una base de datos georeferencial porque en el programa los mapas sirven únicamente como un esquema conceptual. Los ríos más importantes son

añadidos a la vista esquemática de WEAP, exportando y proyectando los ríos desde ArcView GIS (Anexo 1.2) o cualquier paquete de georeferenciación GIS como una capa vectorial. Después son dibujados los ríos en WEAP por encima de la capa vectorial (figura 4.4a).

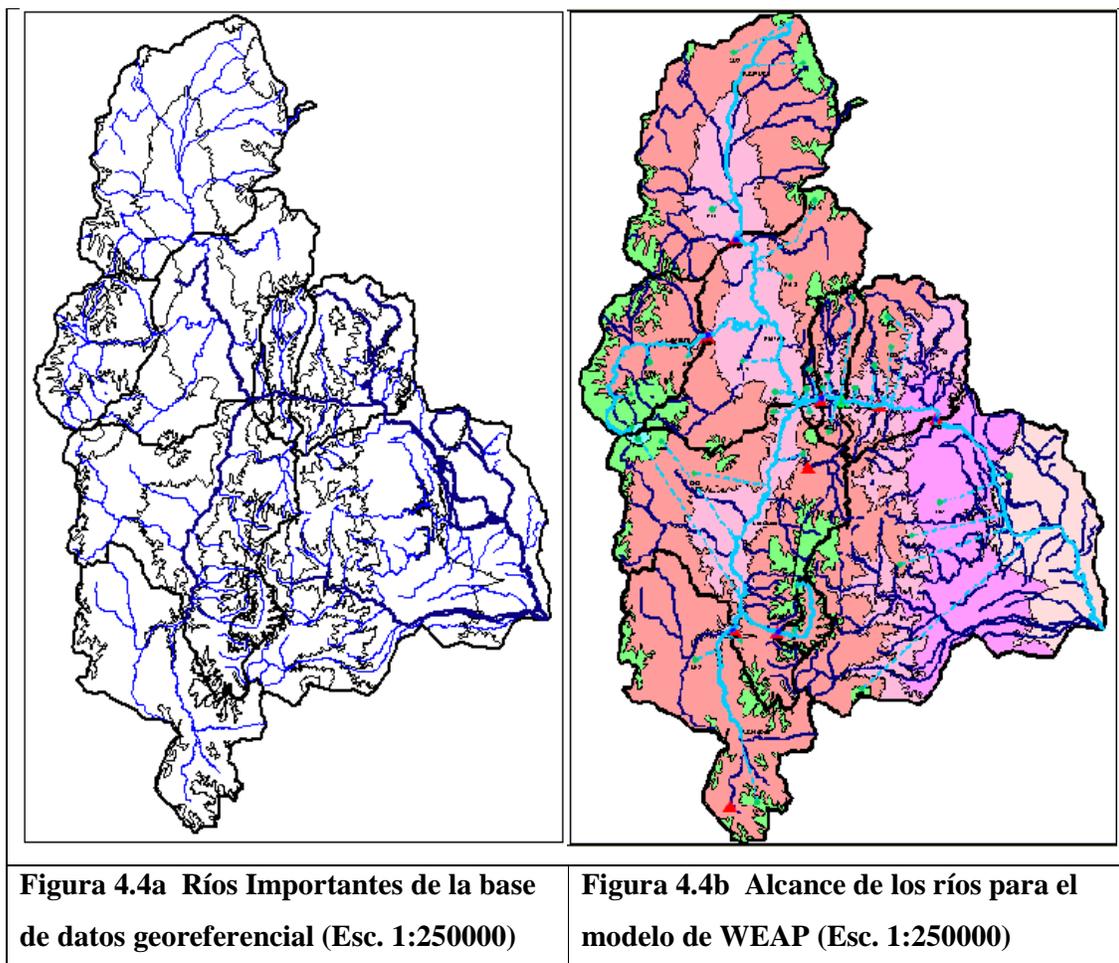


Figura 4.4 Red hidrográfica de la cuenca del río Pastaza tomada de ArcView GIS

4.1.1.4 Esquema del modelo en el programa WEAP

Determinados los catchments y la localización de embalses, en este caso, el embalse de Agoyán y la ubicación de las estaciones hidrológicas mediante el medidor de corriente; se tiene el siguiente esquema:

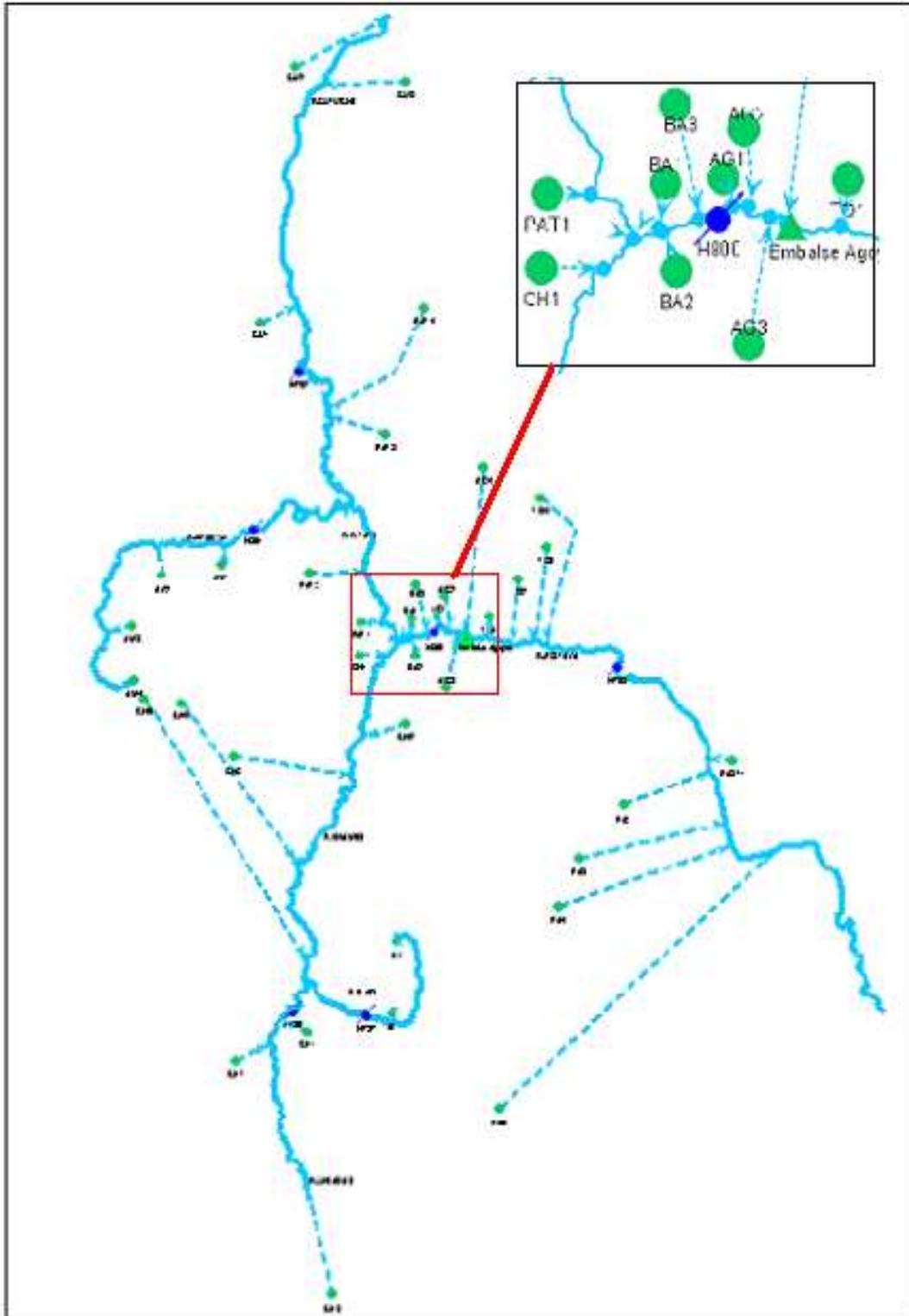


Figura 4.5 Esquema del modelo de la Cuenca del río Pastaza para el programa WEAP

4.1.2 PARÁMETROS GENERALES DE ÁREA DE LA CUENCA

Los parámetros generales de área (figura 4.6), son definidos para toda la cuenca en estudio, indicados en la figura 4.7:

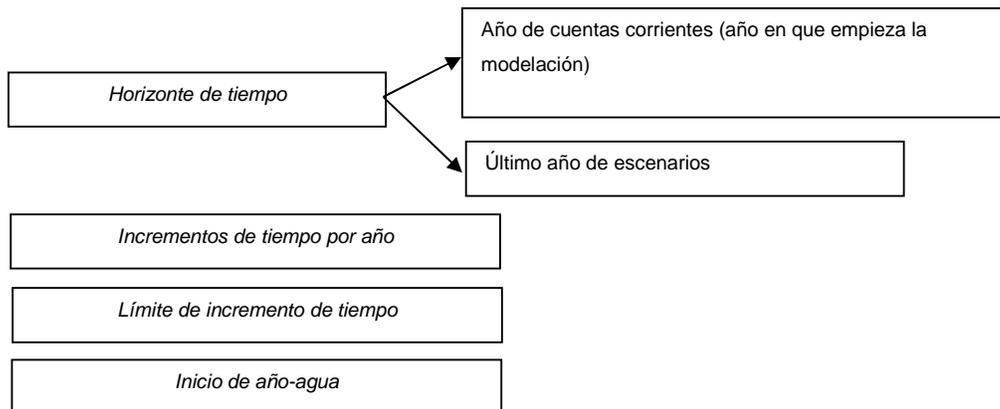


Figura 4.6 Parámetros generales de área para el modelo WEAP

Incrementos de años y tiempos

Horizonte de tiempo
 Año de Cuentas corrientes: 1982
 Último año de escenarios: 2005

Incrementos de tiempo por año
 12
 Add Leap Days?

Límite del incremento de tiempo
 Basado en un calendario mensual
 Todos los incrementos de tiempo son iguales
 Establezca la longitud del incremento de tiempo

Inicio de Año-agua
 Enero

#	Title	Abbrev.	Length	Begins	Ends
1	Enero	Ene	31	Ene 1	Ene 31
2	Febrero	Feb	28	Feb 1	Feb 28
3	Marzo	Mar	31	Mar 1	Mar 31
4	Abril	Abr	30	Abr 1	Abr 30
5	May	May	31	May 1	May 31
6	Junio	Jun	30	Jun 1	Jun 30
7	Julio	Jul	31	Jul 1	Jul 31
8	Agosto	Ago	31	Ago 1	Ago 31
9	Septiembre	Sep	30	Sep 1	Sep 30
10	Octubre	Oct	31	Oct 1	Oct 31
11	Noviembre	Nov	30	Nov 1	Nov 30
12	Diciembre	Dic	31	Dic 1	Dic 31

El periodo de estudio será de Enero, 1982 a Diciembre, 2005.

[Ayuda](#) Cerrar

Figura 4.7 Valores de los parámetros generales de área para el modelo WEAP

4.1.3 UNIDADES

Las unidades pueden ser escogidas dentro de una lista que posee el mismo programa para los siguientes componentes: ríos, embalses, agua subterránea, otros suministros, uso de suelo, plantas de tratamiento de aguas servidas y costos de operación. La única excepción es la tasa de uso del agua, predeterminada en la demanda solo por la unidad de entrada (m^3).

Independientemente de la unidad utilizada para la entrada de datos, se puede ver los resultados en cualquier unidad. Unidades definidas por el usuario se pueden añadir haciendo clic en el botón *Definición Unidades* (figura 4.8).

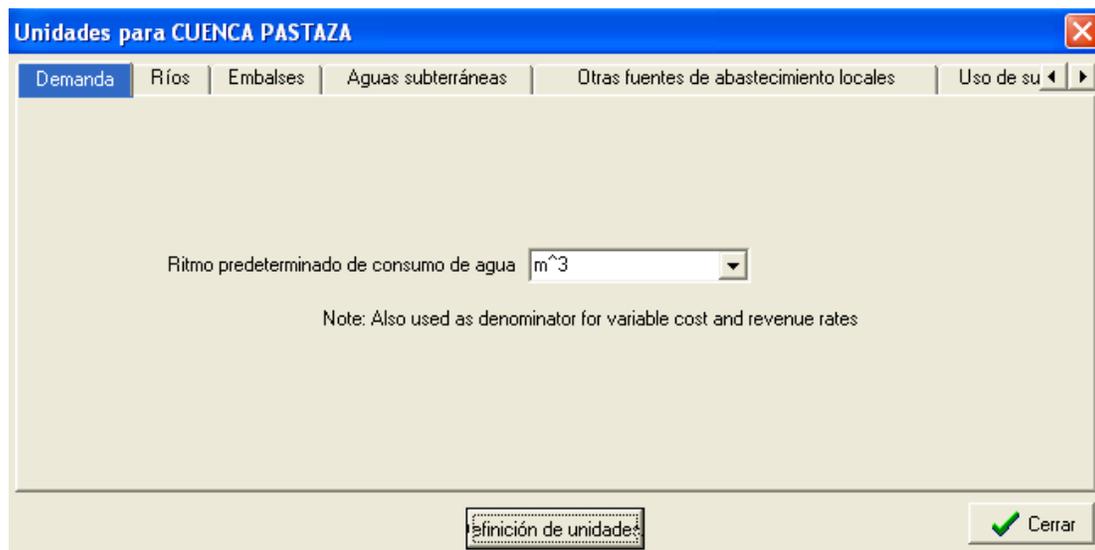


Figura 4.8 Unidades de los distintos componentes del modelo WEAP

4.1.4 TIPOS DE USO DE SUELO

Según el SIGAGRO (2005), la cuenca del río Pastaza posee distintos tipos de uso de suelo, a los cuales se los clasificó dentro de 11 significativos tipos para WEAP (Anexo 1.3), según los tipos utilizados para la modelación del río Paute (Vicuña, comunicación personal, 2009); así como se indica en la tabla 4.3:

Tabla 4.3 Correlación de los tipos de usos de suelo para utilizarlos en el modelo WEAP.

DESCRIPCION SIGAGRO	TIPO_WEAP	HECTAREAS
100% AREA EROSIONADA	TIERRAS INFERTILES	12910.015
50% BOSQUE INTERVENIDO CON 50% PALMA AFRICANA	BOSQUES	1231.293
50% BOSQUE NATURAL CON 50% FRUTALES	BOSQUES	796.020
50% BOSQUE NATURAL CON 50% PASTOS CULTIVADOS	BOSQUES	7123.744
50% BOSQUE NATURAL CON 50% PARAMO	BOSQUES	1455.429
70% BOSQUE NATURAL CON 30% CULTIVOS CICLO CORTO	BOSQUES	9789.840
70% BOSQUE NATURAL CON 30% FRUTALES	BOSQUES	245.991
70% BOSQUE NATURAL CON 30% PASTO CULTIVADO	BOSQUES	20690.784
70% BOSQUE NATURAL CON 30% PASTO NATURAL	BOSQUES	661.565
70% BOSQUE INTERVENIDO CON 30% VEGETACION ARBUSTIVA	BOSQUES	126598.498
100% BOSQUE NATURAL	BOSQUES	137668.150
100% BOSQUE PLANTADO	BOSQUES	5322.705
50% BOSQUE PLANTADO CON 50% MAIZ	BOSQUES	435.775
70% BOSQUE PLANTADO CON 30% PASTOS NATURALES	BOSQUES	594.116
100% CABUYA	CULTIVOS_PLANTACION	7765.998
70% CABUYA CON 30% PASTOS CULTIVADOS	CULTIVOS_PLANTACION	2064.403
100% CULTIVOS CICLO CORTO	CULTIVOS_PLANTACION	35388.881
50% CULTIVOS CICLO CORTO CON 50% FRUTALES	CULTIVOS_FRUTALES	8069.372
50% CULTIVOS CICLO CORTO CON 50% PASTOS CULTIVADOS	CULTIVOS_PASTO	13631.088
50% CULTIVOS CICLO CORTO CON 50% PASTOS NATURALES	PASTO	2702.659
50% CULTIVOS CICLO CORTO CON 50% PARAMO	PARAMO	9084.854
70% CULTIVOS CICLO CORTO CON 30% AREAS EROSIONADAS	CULTIVOS_PLANTACION	17924.351
70% CULTIVOS CICLO CORTO CON 30% AREAS EN PROCESO DE EROSION	CULTIVOS_PLANTACION	32220.683
70% CULTIVOS CICLO CORTO CON 30% CULTIVOS DE INVERNADERO	CULTIVOS_PLANTACION	3181.107
70% CULTIVOS CICLO CORTO CON 30% FRUTALES	CULTIVOS_PLANTACION	11242.438
70% CULTIVOS CICLO CORTO CON 30% ARBORICULTURA TROPICAL	CULTIVOS_PLANTACION	413.647
70% CULTIVOS CICLO CORTO CON 30% PASTO NATURAL	CULTIVOS_PLANTACION	32609.456
70% CULTIVOS CICLO CORTO CON 30% PARAMO	CULTIVOS_PLANTACION	4620.064
100% CULTIVOS DE INVERNADERO	CULTIVOS_PLANTACION	278.648
70% CULTIVOS DE INVERNADERO CON 30% CULTIVOS CICLO CORTO	CULTIVOS_PLANTACION	571.986
100% MAIZ	CULTIVOS_MAIZ	8701.865
50% MAIZ CON 50% PASTOS CULTIVADOS	CULTIVOS_MAIZ	7029.271
50% MAIZ CON 50% PASTOS NATURALES	CULTIVOS_MAIZ	2716.539
70% MAIZ CON 30% AREA EROSIONADA	CULTIVOS_MAIZ	2841.157
70% MAIZ CON 30% AREAS EN PROCESO DE EROSION	CULTIVOS_MAIZ	9489.745
70% MAIZ CON 30% BOSQUE PLANTADO	CULTIVOS_MAIZ	1607.118
70% MAIZ CON 30% CULTIVOS CICLO CORTO	CULTIVOS_MAIZ	20389.915
70% MAIZ CON 30% CULTIVOS DE INVERNADERO	CULTIVOS_MAIZ	722.824
70% MAIZ CON 30% FRUTALES	CULTIVOS_MAIZ	1107.294
70% MAIZ CON 30% PASTO CULTIVADO	CULTIVOS_MAIZ	9659.849
70% MAIZ CON 30% PASTO NATURAL	CULTIVOS_MAIZ	2021.649
50% CULTIVOS DE PAPA CON 50% PASTOS CULTIVADOS	CULTIVOS_PASTO	4067.759
100% FRUTALES	CULTIVOS_FRUTALES	7639.044

Tabla 4.3 Continuación

DESCRIPCION SIGAGRO	TIPO_WEAP	HECTAREAS
50% FRUTALES CON 50% PASTOS CULTIVADOS	CULTIVOS_FRUTALES	7900.485
70% FRUTALES CON 30% CULTIVOS CICLO CORTO	CULTIVOS_FRUTALES	24059.673
70% FRUTALES CON 30% ARBORICULTURA TROPICAL	CULTIVOS_FRUTALES	9189.131
100% TE	CULTIVOS_PLANTACION	671.768
100% ARBORICULTURA TROPICAL	CULTIVOS_PLANTACION	326.199
100% AFLORAMIENTO ROCOSO	ROCAS	9892.544
100% BANCOS DE ARENA	TIERRAS INFERTILES	522.475
100% NIEVE O HIELO	CUERPO DE AGUA	43356.859
100% PASTO CULTIVADO	CULTIVOS_PASTO	35393.335
50% PASTOS CULTIVADOS CON 50% PARAMO	CULTIVOS_PASTO	8239.603
70% PASTO CULTIVADO CON 30% AREAS EN PROCESO DE EROSION	CULTIVOS_PASTO	2036.708
70% PASTO CULTIVADO CON 30% BOSQUE INTERVENIDO	CULTIVOS_PASTO	6888.099
70% PASTO CULTIVADO CON 30% CULTIVOS CICLO CORTO	CULTIVOS_PASTO	23560.753
70% PASTO CULTIVADO CON 30% CULTIVO DE INVERNADERO	CULTIVOS_PASTO	11214.001
70% PASTO CULTIVADO CON 30% FRUTALES	CULTIVOS_PASTO	1084.314
70% PASTO CULTIVADO CON 30% ARBORICULTURA TROPICAL	CULTIVOS_PASTO	18375.725
70% PASTO CULTIVADO CON 30% PASTO NATURAL	CULTIVOS_PASTO	7032.084
70% PASTO CULTIVADO CON 30% PARAMO	CULTIVOS_PASTO	992.700
70% PASTO CULTIVADO CON 30% VEGETACION ARBUSTIVA	CULTIVOS_PASTO	8804.626
100% PASTO NATURAL	PASTO	5994.104
50% PASTO NATURAL CON 50% PARAMO	PASTO	177.744
70% PASTO NATURAL CON 30% AREAS EROSIONADAS	PASTO	2293.017
70% PASTO NATURAL CON 30% AREAS EN PROCESO DE EROSION	PASTO	3572.695
70% PASTO NATURAL CON 30% CULTIVO CICLO CORTO	PASTO	367.160
70% PASTO NATURAL CON 30% PASTO CULTIVADO	PASTO	1184.131
100% PARAMO	PARAMO	306744.853
50% PARAMO CON 50% VEGETACION ARBUSTIVA	PARAMO	9357.312
70% PARAMO CON 30% AREAS EROSIONADAS	PARAMO	9979.102
70% PARAMO CON 30% AREAS EN PROCESO DE EROSION	PARAMO	3291.783
70% PARAMO CON 30% BOSQUE PLANTADO	PARAMO	1460.576
70% PARAMO CON 30% CULTIVOS CICLO CORTO	PARAMO	21772.766
50% PARAMO CON 50% MAIZ	PARAMO	13393.575
70% PARAMO CON 30% AFLORAMIENTO ROCOSO	PARAMO	2165.960
70% PARAMO CON 30% PASTO CULTIVADO	PARAMO	12456.419
70% PARAMO CON 30% PASTO NATURAL	PARAMO	3410.728
70% PARAMO CON 30% VEGETACION ARBUSTIVA	PARAMO	11806.153
100% ZONA URBANA	AREA URBANA DEGRADADA	6201.298
100% VEGETACION ARBUSTIVA	PASTO	6212.275
50% PASTOS CULTIVADOS CON 50% VEGETACION ARBUSTIVA	CULTIVOS_PASTO	2611.269
70% VEGETACION ARBUSTIVA CON 30% AREAS EN PROCESO DE EROSION	PASTO	1110.098
70% VEGETACION ARBUSTIVA CON 30% CULTIVO CICLO CORTO	PASTO	2380.550
70% VEGETACION ARBUSTIVA CON 30% MAIZ	PASTO	598.435
70% VEGETACION ARBUSTIVA CON 30% PASTO CULTIVADO	PASTO	11469.516
70% VEGETACION ARBUSTIVA CON 30% PARAMO	PASTO	7648.103
100% CUERPO DE AGUA NATURAL	CUERPO DE AGUA	8378.934
TOTAL		1260867.227

Fuente: SIGAGRO, 2005.

Una vez clasificados los distintos usos de suelo según el modelo WEAP, es importante determinar los porcentajes de cada uno de ellos dentro de la cuenca (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Porcentajes de uso de suelo en la cuenca del río Pastaza según los distintos tipos de uso.

TIPO_WEAP	HECTAREAS	PORCENTAJE
AREA URBANA DEGRADADA	6201.298	0.492
BOSQUES	312613.910	24.794
CUERPO DE AGUA	51735.793	4.103
CULTIVOS_FRUTALES	56857.705	4.509
CULTIVOS_MAIZ	66287.226	5.257
CULTIVOS_PASTO	143932.064	11.415
CULTIVOS_PLANTACION	149279.629	11.839
PARAMO	404924.081	32.115
PASTO	45710.487	3.625
ROCAS	9892.544	0.785
TIERRAS INFERTILES	13432.490	1.065
TOTAL	1260867.23	100.000

Los distintos tipos de uso de suelo fueron adaptados a la clasificación realizada para el modelo WEAP del río Paute, estudio realizado por Sebastián Vicuña para el Proyecto de Adaptación al Cambio Climático PACC y sus colaboradores, quien proporcionó los datos recolectados para su zona de estudio, la cual se encuentra ubicada en el altiplano del Ecuador al igual que la parte alta de la cuenca del río Pastaza, donde se encuentran las subcuencas de calibración.

4.1.5 SUPUESTOS CLAVES

Mediante los supuestos claves se crea y se organiza variables independientes usadas para el manejo de cálculos en el análisis. Las variables conductoras no son calculadas directamente en WEAP, pero son útiles como variables intermedias que pueden ser referenciadas en los cálculos del modelo. Es muy útil la creación de supuestos claves en este punto para las principales hipótesis de la modelación, especialmente aquellas que varían de un escenario a otro.

Para la realización de este proyecto se tomaron en cuenta los siguientes supuestos claves:

4.1.5.1 LAI (Índice de área foliar)

El índice de área foliar es un parámetro que varía por el uso de suelo y es usado para controlar la respuesta de escurrimiento en la superficie, sabiendo que el escurrimiento tiende a reducir con valores altos de LAI. La determinación de este parámetro no es fácil por lo que se generan muchas discrepancias en las definiciones y valores, que se aplican para el mismo uso de suelo. Scurlock (2001) compiló estimados de LAI publicados entre 1932 y 2000 y produjo una tabla para quince categorías de uso de suelo vegetativo, que se muestran en la tabla 4.5:

Tabla 4.5 Valores de LAI según Scurlock, 2001.

Table: Statistical distribution of leaf area index by biome, for the data set "Global Leaf Area Index Data from Field Measurements, 1932-2000", and after removal of outliers following Inter-Quartile Range (IQR) statistical analysis. Of the original total of 1008 records, 77 were excluded from this analysis (e.g., because biome was not available). See the accompanying Technical Memorandum (Scurlock et al., 2001) for biome acronyms.

Biome	Original data					Number of outliers removed	Data after IQR analysis			
	Number of observations	Mean	Standard deviation	Min	Max		Mean	Standard deviation	Min	Max
All	931	5.23	4.08	0.002	47.0	53	4.51	2.52	0.002	12.1
Forest / BoDBL	58	2.64	1.03	0.28	6.0	5	2.58	0.73	0.6	4.0
Forest / BoENL	94	3.50	3.34	0.48	21.6	8	2.65	1.31	0.48	6.21
Crops	88	4.22	3.29	0.2	20.3	5	3.62	2.06	0.2	8.7
Desert	6	1.31	0.85	0.59	2.84	0	1.31	0.85	0.59	2.84
Grassland	28	2.50	2.98	0.29	15.4	3	1.71	1.19	0.29	5.0
Plantation	77	8.72	4.32	1.55	18.0	0	8.72	4.32	1.55	18.0
Shrub	5	2.08	1.58	0.4	4.5	0	2.08	1.58	0.4	4.5
Forest / BoTeDNL	17	4.63	2.37	0.5	8.5	0	4.63	2.37	0.5	8.5
Forest / TeDBL	187	5.12	1.84	0.4	16.0	3	5.06	1.60	1.1	8.8
Forest / TeEBL	58	5.82	2.57	0.8	12.5	1	5.70	2.43	0.8	11.6
Forest / TeENL	215	6.70	5.95	0.002	47.0	16	5.47	3.37	0.002	15.0
Forest / TyDBL	18	3.92	2.53	0.6	8.9	0	3.92	2.53	0.6	8.9
Forest / TeEBL	61	4.90	1.95	1.48	12.3	1	4.78	1.70	1.48	8.0
Tundra	13	2.69	2.39	0.18	7.2	2	1.88	1.47	0.18	5.3
Wetlands	6	6.34	2.29	2.50	8.4	0	6.34	2.29	2.5	8.4

Fuente: WEAP Modelo Hidrológico Aplicado: Cuenca del Río Conchos, Chiguagua-México.

Los valores anteriores son aplicables para el modelo de WEAP, listado en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Valores de LAI.

Scurlock et al., 2001 Land Use Category	IMTA Land Use Code	IMTA Land Use Category	LAI Used in Weap
Forest Average	10	Forrest	5.18
Forest Average (BoDBL and BOENL)	20	Forrest Grasses	3.07
	30	Water Bodies	0.10
Crops	40	Irrigated Areas	4.22
Crops	50	Naturally Irrigated Areas	4.22
Grassland	60	Small Pasture Grasses	2.50
Shrub	70	High Grasses and Small Brush	2.08
Shrub	75	Other Vegetation	2.08
Grassland	80	Grazing Pastures	2.50
	85	Urban Areas	8.00
Wetlands	90	Wetland Vegetation	6.34
Desert	95	Without Apparent Vegetation	1.31

Fuente: WEAP Modelo Hidrológico Aplicado: Cuenca del Río Conchos, Chiguagua-México, 2006.

Para la Cuenca del río Pastaza se utilizaron los siguientes valores de LAI (tabla 4.7):

Tabla 4.7 Valores de LAI para la cuenca del río Pastaza, tomados de la cuenca del río Paute.

TIPO DE USO DE SUELO		LAI
AreaUrbana_Degradada		2
Bosque		5
Cultivos		
Cultivos	Frutales	5
Cultivos	Maiz	4
Cultivos	Pasto	3
Cultivos	Plantacion	4
Paramo		3.5
Pasto		3
Rocas		1
Tierras_Infertiles		1.6

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.2 Ks (Zona radicular de conductividad)

La zona radicular de conductividad o conductividad del suelo es aquella en el primer balde como se explicó en el Capítulo III. La tasa de conductividad típicamente varía entre las clasificaciones de suelo y cobertura vegetal.

Los valores de Ks para la cuenca del río Pastaza son (tabla 4.8):

Tabla 4.8 Valores de Ks

TIPO DE USO DE SUELO	Ks
AreaUrbana_Degradada	150
Bosque	150
Cultivos	
Cultivos Frutales	150
Cultivos Maiz	150
Cultivos Pasto	150
Cultivos Plantacion	150
Paramo	300
Pasto	150
Rocas	150
Tierras_Infertiles	150

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.3 Kc (Coeficiente de cultivo)

El coeficiente de cultivo, es un parámetro que representa los efectos de la evapotranspiración vegetal y la evaporación del suelo, por esta razón varía según el tipo de cobertura vegetal. Este parámetro fue creado para estudiar la humedad del suelo requerida para maximizar la producción de biomasa de cultivos; por lo tanto, Kc es típicamente usado para calcular la evapotranspiración requerida utilizando la ecuación:

$$(Evapotranspiración)_{requerida} = Kc * (Evapotranspiración)_{referencial}$$

El estudio del río Bravo (cuenca bilateral entre Estados Unidos y México, Banco Mundial, 2006) determinó evapotranspiración actual y potencial, que se relaciona con la evapotranspiración requerida y potencial, respectivamente. Estos valores fueron determinados por quince categorías de cobertura vegetal que difieren de las categorías usadas en el modelo WEAP (tabla 4.9).

Tabla 4.9 Valores de coeficiente de cultivo, Banco Mundial, 2006.

Land Use	ET _{act} (mm)	ET _{pot} (mm)	Kc	IMTA Land Use Code	IMTA Land Use Category	Kc Used in Weap
Urban Area	803	1048	0.77	85	Urban Areas	0.77
Water Bodies	1578	1578	1.00	30	Water Bodies	1.00
Irrigated Agriculture (delta)	1202	1346	0.89	40	Irrigated Areas	0.88
Irrigated Agriculture (valley)	898	1040	0.86			
Supplemental Irrigation	1242	1298	0.96	50	Naturally Irrigated Areas	0.96
Low Open Forrest	483	1272	0.38	20	Forrest Grasses	0.38
Oak Forrest	538	1747	0.31	10	Forrest	0.35
Pine Forrest	487	1272	0.38			
Chapparral	481	1424	0.34	70	High Grasses and Small Brush	0.34
Microphyllous Scrublands	237	501	0.47			
Scrubland with Rosetted Vegetation	263	616	0.43	75	Other Vegetation	0.45
Thornscrubland Tamaulipan	583	1254	0.46			
Submontane Scrubland	711	1605	0.44			
Cultivated Grassland	516	1129	0.46	80	Grazing Pastures	0.46
Natural Grassland	342	642	0.53	60	Small Pasture Grasses	0.53
-	-	-	-	90	Wetland Vegetation	0.9
-	-	-	-	95	Without Apparent Vegetation	0.3

Fuente: WEAP Modelo Hidrológico Aplicado: Cuenca del Río Conchos, Chiguagua-México, 2006.

Es importante mencionar que las categorías de cobertura vegetal utilizadas en el estudio del río Conchos en México, son muy diferentes de los tipos de cobertura existentes en el Ecuador, es por eso que los valores de coeficiente de cultivo fueron tomados del modelo WEAP del río Paute, los mismos que en algunos casos son valores anuales y en otros casos variaciones mensuales (figura 4.9), dependiendo del tipo de cobertura vegetal (tabla 4.10 y 4.11).

Tabla 4.10 Valores de coeficiente de cultivo, modelo WEAP río Paute.

TIPO DE USO DE SUELO	Kc
AreaUrbana_Degradada	1
Bosque	Variación mensual
Cultivos	
Cultivos Frutales	Variación mensual
Cultivos Maiz	Variación mensual
Cultivos Pasto	1
Cultivos Plantacion	Variación mensual
Paramo	1
Pasto	1
Rocas	0.1
Tierras_Infertiles	1

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

Tabla 4.11 Variaciones mensuales de algunos tipos de cobertura vegetal.

VARIACIÓN MENSUAL	BOSQUE	CULTIVOS		
		FRUTALES	MAIZ	PLANTACION
ENERO	0.7	0.7	0.36	1.3
FEBRERO	0.8	0.8	0.53	1.3
MARZO	0.9	0.9	0.7	1.3
ABRIL	1	1	0.86	1
MAYO	1.1	1.1	1	0.8
JUNIO	1.1	1.1	1.05	0.8
JULIO	1.1	1.1	1.04	0.8
AGOSTO	1	1.1	0.92	0.8
SEPTIEMBRE	1	1	0.77	0.8
OCTUBRE	0.9	0.9	0.6	0.8
NOVIEMBRE	0.8	0.8	0.46	0.8
DICIEMBRE	0.7	0.7	0.26	1.3

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

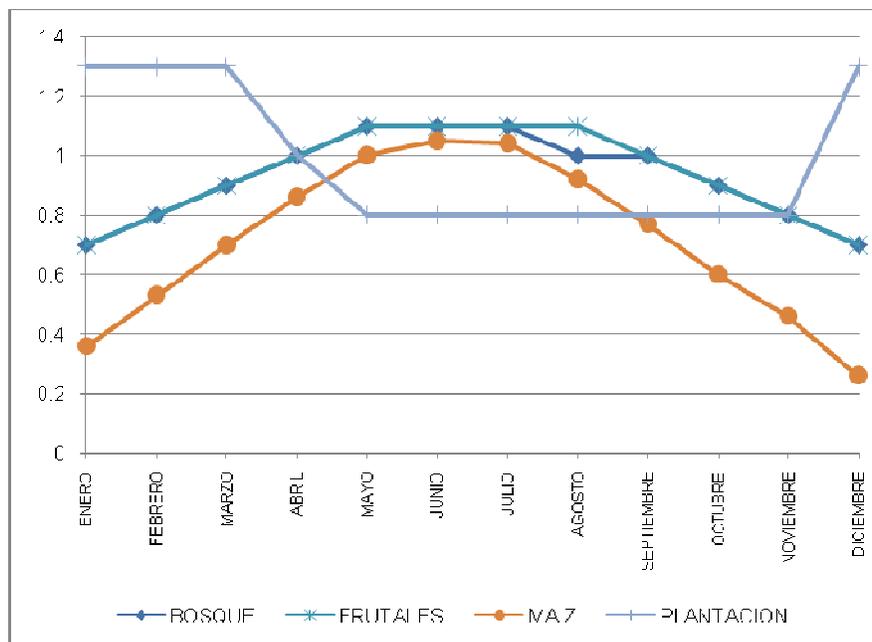


Figura 4.9 Variaciones mensuales de algunos tipos de cobertura vegetal

4.1.5.4 Sw (Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces)

La capacidad de agua del suelo o la capacidad en la zona radicular es la capacidad de retención de agua efectiva, en milímetros, del primer cubo del método de humedad del suelo. La estructura del modelo WEAP permite que este

parámetro caracterice los grupos de suelos dentro de una subcuenca. Típicamente en WEAP, valores de Sw son aplicados a los grupos de cobertura vegetal delineados dentro de cada subcuenca.

Los valores para la cuenca del río Pastaza son (tabla 4.12):

Tabla 4.12 Valores de Sw

TIPO DE USO DE SUELO		Sw
AreaUrbana_Degradada		600
Bosque		750
Cultivos		
Cultivos	Frutales	500
Cultivos	Maiz	1000
Cultivos	Pasto	950
Cultivos	Plantacion	700
Paramo		300
Pasto		950
Rocas		100
Tierras_Infertiles		250

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.5 Altura

La altura de cada catchment es el punto medio de la banda de elevación donde se encuentra localizado, se lo clasifica en alto, medio o bajo, según los siguientes valores (tabla 4.13):

Tabla 4.13 Rango de clasificación de catchments por altura

Clasificación por altura

Alto	> 3.000 metros
Medio	entre 3.000 y 2000 metros
Bajo	menor a 2.000 metros

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

Según este criterio entonces, la cuenca del río Pastaza se clasifica en sus catchments zonas de altura como (tabla 4.14):

Tabla 4.14 Clasificación de catchments por altura

CATCHMENTS	ALTURA	CLASIFICACIÓN POR ALTURA
AGOYAN1	1500	Bajo
AGOYAN2	2500	Medio
AGOYAN3	3500	Alto
AGOYAN4	4500	Alto
AMBATO1	2500	Medio
AMBATO2	3500	Alto
AMBATO3	4500	Alto
AMBATO4	5500	Alto
BAÑOSDJCHAMBOPATATE1	1500	Bajo
BAÑOSDJCHAMBOPATATE2	2500	Medio
BAÑOSDJCHAMBOPATATE3	3500	Alto
CEBADAS1	2500	Medio
CEBADAS2	3500	Alto
CEBADAS3	4500	Alto
CHAMBO1	1500	Bajo
CHAMBO2	2500	Medio
CHAMBO3	3500	Alto
CHAMBO4	4500	Alto
CHAMBO5	5500	Alto
CUTUCHI1	2500	Medio
CUTUCHI2	3500	Alto
CUTUCHI3	4500	Alto
PASTAZADJENCANTO1	500	Bajo
PASTAZADJENCANTO2	1500	Bajo
PASTAZADJENCANTO3	2500	Medio
PASTAZADJENCANTO4	3500	Alto
PASTAZADJENCANTO5	4500	Alto
PATATE1	1500	Bajo
PATATE2	2500	Medio
PATATE3	3500	Alto
PATATE4	4500	Alto
TOPO1	1500	Bajo
TOPO2	2500	Medio
TOPO3	3500	Alto
TOPO4	4500	Alto
ALAO1	3500	Alto
ALAO2	4500	Alto

4.1.5.6 Kd (Conductividad profunda)

El parámetro de conductividad profunda representa la tasa de conductividad para el segundo cubo, en milímetros por día. Controla la transmisión de caudal base y WEAP aplica un solo valor de Kd para todo el catchment.

Los valores aplicados para los catchments son de acuerdo a la clasificación por altura (tabla 4.15).

Tabla 4.15 Valores de Kd

	Kd
Alto	100
Medio	50
Bajo	30

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.7 Dw (Capacidad de agua profunda)

La capacidad de agua profunda es la capacidad de almacenamiento efectivo de agua, en milímetros, del estrato más profundo de la capa de suelo, o del segundo cubo del método de humedad del suelo. El modelo WEAP aplica este parámetro a todo el catchment por lo que no puede ser caracterizado por el área de suelo o cobertura vegetal.

Para la cuenca del río Pastaza se utilizaron los siguientes valores (tabla 4.16), según la clasificación por altura de los catchments.

Tabla 4.16 Valores de Dw

	Dw
Alto	2000
Medio	8000
Bajo	15000

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.8 RRF (Factor de resistencia a la escorrentía)

El factor de resistencia a la escorrentía se usa para controlar la respuesta del escurrimiento superficial. Está relacionado a factores tales como índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tiende a disminuir con valores más altos (rango 0,1 a 10). Este parámetro varía entre las clasificaciones de suelo y cobertura vegetal (tabla 4.17).

Tabla 4.17 Valores de RRF

	RRF
Alto	0.4
Medio	0.2
Bajo	1

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.9 pfd (Dirección de flujo preferente)

El parámetro de dirección de flujo preferente se utiliza para la partición de flujo de la zona de raíz al estrato inferior de la capa de suelo o aguas subterráneas. Puede variar según la clasificación de cobertura vegetal y su rango es de 0 a 1, donde 1 indica que la dirección de flujo horizontal es el 100% y 0 indica que la dirección de flujo vertical es 100%. Los valores son (tabla 4.18):

Tabla 4.18 Valores de pfd

	pfd
Alto	0.6
Medio	0.4
Bajo	0.15

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.10 Z1 (Z1 inicial)

El parámetro Z1 inicial, es el almacenamiento relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de capacidad de agua en la zona radicular (S_w),

al comienzo de la simulación. El valor del supuesto clave Z1 para cada subcuenca fue creado con un valor igual a 35 por ciento, excepto para los cultivos, donde su cálculo es diferente.

Para los cultivos, de acuerdo al método de humedad del suelo de la figura 4.10, se necesita de riego para que Z1 llegue hasta el umbral superior, es por eso que su cálculo es:

$$Z1_{CADA\ CULTIVO} = \frac{(Umbral\ Inferior + Umbral\ Superior)_{CADA\ CULTIVO}}{2}$$

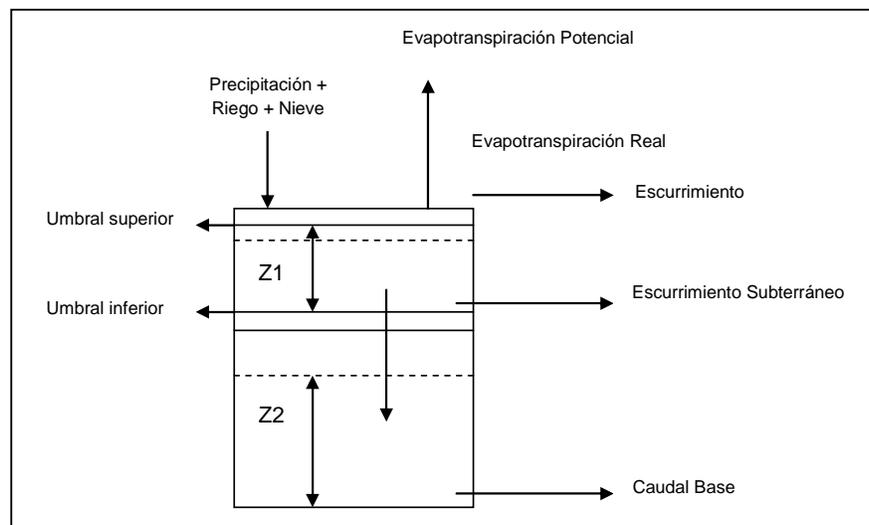


Figura 4.10 Método de humedad del suelo

La tabla 4.19 muestra los valores de umbral inferior y superior utilizadas para el cálculo de Z1 en los tipos de cultivos de la cuenca del río Pastaza.

Tabla 4.19 Valores de Z2 (Umbral inferior) y Z1 (Umbral superior) para los cultivos del modelo WEAP de la cuenca del río Pastaza

CULTIVOS	Z2	Z1
Frutales	50	65
Maiz	50	75
Pasto	50	60
Plantacion	40	70

Fuente: Vicuña, comunicación personal, 2009.

4.1.5.11 Z2 (Z2 inicial)

El parámetro Z2 inicial es el almacenamiento relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua profunda Dw al comienzo de la simulación. WEAP, como Dw, lleva a Z2 a ser constante para cada cuenca, es por eso que el valor tomado para la cuenca del río Pastaza es 35 por ciento, al igual que el modelo WEAP del río Santa en Perú.

4.1.5.12 Altura Estación (Altura de las estaciones base)

La altura de la estación base (tabla 4.20), es la elevación en metros de las estaciones utilizadas en cálculos posteriores como son la precipitación y temperatura de cada catchment; y se la utiliza para el cálculo de otro supuesto clave denominado FormTemp.

Tabla 4.20 Altura de las estaciones base de la cuenca del río Pastaza para WEAP

ESTACIÓN BASE	ALTURA (m)
M376Pilahuin	3360
M396Alao	3188
M004Rumipamba	2680
M380Huambalo	2880
M008Puyo	960
M128PedroFermin	2910

Fuente: INAMHI, 2008.

4.1.5.13 FactorTemp (Factor de temperatura)

El factor de temperatura depende de las zonas homogéneas de temperatura, de donde se determinan dos zonas importantes la sierra y la Amazonía. Los valores de este supuesto clave son los factores de Z de las ecuaciones analizadas en el capítulo anterior, es decir para la sierra igual a -0.005 y para la Amazonía -0.008. Estos factores influyen en cálculo de un supuesto clave posterior.

4.1.5.15 Otros supuestos claves

Para el cálculo de algunos supuestos claves y de los parámetros de los sitios de demanda y catchments, se crea:

Tabla 4.22 Otros supuestos claves creados

SUPUESTOS CLAVES	VALORES		UTILIDAD
FactorKs	Alto	0.4	Disminuir o aumentar la respuesta de los caudales pico
	Medio	1	
	Bajo	1	
FactorSw	Alto	-	Disminuir o aumentar la respuesta de los caudales pico
	Medio	-	
	Bajo	-	
FactorRRF	Alto	-	Disminuir o aumentar la respuesta de los caudales pico
	Medio	-	
	Bajo	-	
MultiplicadorKs	Alto	-	Disminuir o aumentar la respuesta de los caudales pico
	Medio	-	
	Bajo	-	
FactorKd	Alto	-	Disminuir o aumentar la respuesta de los caudales base
	Medio	-	
	Bajo	-	
Factorpfd	Alto	-	Disminuir o aumentar la respuesta de los caudales base
	Medio	-	
	Bajo	-	

4.1.6 SITIOS DE DEMANDA Y CATCHMENTS

Los sitios de demanda y catchments contienen parámetros del suelo y datos de clima necesarios para la modelación con WEAP.

Una vez analizados los supuestos claves es fácil determinar como se disponen cada uno de los parámetros requeridos en esta sección, con la ayuda de Excel y sus herramientas.

4.1.6.1 Uso de suelo o cobertura vegetal

Los valores de estos parámetros dependen del tipo de cultivo, de la clasificación por altura, o ambas. Solo el área, es un parámetro definido con la ayuda de un paquete georeferencial ArcView GIS 3.2 (tabla 4.23).

Tabla 4.23 Tabla de áreas de los catchments

CATCHMENT	ETIQUETA	AREA (ha)	AREAURBANA DEGRADADA (share)	BOSQUES (share)	CULTIVOS (share)	CULTIVOS				PARAMO (share)	PASTO (share)	ROCAS (share)	TIERRAS INFERTILES (share)
						FRUTALES (share)	MAIZ (share)	PASTO (share)	PLANTACION (share)				
AGOYAN1	AG1	1293.25	7.53	2.38	86.97	0.00	0.00	73.91	26.09	0.00	0.00	0.00	0.00
AGOYAN2	AG2	9019.19	0.00	39.88	60.12	0.00	0.00	99.38	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00
AGOYAN3	AG3	17651.53	0.00	55.71	1.66	0.00	0.00	100.00	0.00	42.43	0.00	0.00	0.00
AGOYAN4	AG4	1577.57	0.00	1.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.83	0.00	0.00	0.00
AMBATO1	AM1	2218.28	0.00	0.00	69.54	19.80	0.00	0.51	79.68	3.03	27.43	0.00	0.00
AMBATO2	AM2	42378.65	0.22	0.00	19.46	21.40	0.00	27.36	51.24	73.59	5.61	0.35	0.00
AMBATO3	AM3	27645.58	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	100.00	0.00	66.06	0.67	17.29	0.00
AMBATO4	AM4	730.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.17	0.00
BAÑOSDJCHAMBOPATATE1	BA1	666.78	6.16	0.00	87.78	0.00	0.00	100.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.00
BAÑOSDJCHAMBOPATATE2	BA2	3498.95	0.00	7.21	89.97	0.00	0.00	100.00	0.00	2.82	0.00	0.00	0.00
BAÑOSDJCHAMBOPATATE3	BA3	1496.31	0.00	55.71	22.23	0.00	0.00	100.00	0.00	22.06	0.00	0.00	0.00
CEBADAS1	CE1	2726.81	0.00	0.00	25.53	0.00	0.00	0.00	100.00	73.82	0.65	0.00	0.00
CEBADAS2	CE2	118193.28	0.03	0.00	24.79	0.00	0.00	37.70	62.30	68.36	5.14	0.00	0.00
CEBADAS3	CE3	17980.1	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	100.00	0.00	69.38	0.67	0.00	0.00
CHAMBO1	CH1	138.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00
CHAMBO2	CH2	52093.89	4.03	2.30	87.60	4.17	16.62	26.16	53.06	1.05	5.02	0.00	0.00
CHAMBO3	CH3	122606.46	0.12	6.62	47.22	0.02	2.91	36.93	60.14	40.64	4.95	0.00	0.00
CHAMBO4	CH4	32788.17	0.00	0.19	0.77	0.00	0.00	86.89	13.11	52.66	0.67	7.52	0.00
CHAMBO5	CH5	1424.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.25	0.00
CUTUCHI1	CU1	48139.92	1.29	0.00	80.50	0.00	66.30	25.66	8.04	0.00	7.87	0.00	10.33
CUTUCHI2	CU2	132773.01	0.03	4.44	43.11	0.00	53.37	25.65	20.98	46.44	3.56	0.41	1.98
CUTUCHI3	CU3	25346.98	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	9.85	90.15	73.55	0.03	6.44	0.00

Tabla 4.23 Continuación

CATCHMENT	ETIQUETA	AREA (ha)	AREAURBANA DEGRADADA (share)	BOSQUES (share)	CULTIVOS (share)	CULTIVOS				PARAMO (share)	PASTO (share)	ROCAS (share)	TIERRAS INFERTILES (share)
						FRUTALES (share)	MAIZ (share)	PASTO (share)	PLANTACION (share)				
PASTAZADJENCANTO1	PAS1	96873.66	0.22	43.89	49.08	23.29	0.00	62.23	14.48	0.00	2.51	0.00	0.44
PASTAZADJENCANTO2	PAS2	131099.2	0.16	77.05	13.90	63.08	0.00	32.68	4.24	0.00	7.76	0.00	0.07
PASTAZADJENCANTO3	PAS3	52366.47	0.00	95.21	1.50	0.00	0.00	100.00	0.00	2.73	0.55	0.00	0.00
PASTAZADJENCANTO4	PAS4	63653.63	0.00	35.81	0.20	0.00	0.00	100.00	0.00	56.25	3.69	0.00	0.00
PASTAZADJENCANTO5	PAS5	6626.78	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.73	0.00	0.00	0.00
PATATE1	PAT1	441.56	0.00	0.00	71.79	34.60	0.00	0.00	65.40	28.21	0.00	0.00	0.00
PATATE2	PAT2	60140.45	4.08	2.34	80.46	28.68	1.65	14.62	55.05	3.26	1.93	0.00	7.88
PATATE3	PAT3	77064.76	0.20	4.19	49.33	18.03	0.00	41.23	40.74	43.83	1.10	0.00	0.74
PATATE4	PAT4	11864.88	0.00	0.00	4.67	0.00	0.00	99.69	0.31	79.73	4.65	0.00	0.00
TOPO1	TO1	21205.24	0.00	57.33	41.73	93.64	0.00	6.36	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
TOPO2	TO2	36987.57	0.00	94.62	5.25	78.68	0.00	21.32	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
TOPO3	TO3	29313.73	0.00	50.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.77	0.00	0.00	0.00
TOPO4	TO4	1282.3	0.00	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	98.69	0.00	0.00	0.00
ALAO1	AL1	7806.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.60	24.68	0.00	0.00
ALAO2	AL2	3574.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.12	1.04	0.00	0.00

Mediante el uso del *Constructor de Expresiones* se puede dar valores a los parámetros de cobertura vegetal de los catchments en base a los supuestos claves definidos, que pueden ser funciones o las ramas de una lista de un árbol esquemático de WEAP (tabla 4.24, tabla 4.25, tabla 4.26 y tabla 4.27).

Tabla 4.24 Parámetros en base al tipo de cobertura vegetal

PARÁMETRO	SUPUESTO CLAVE	EXPRESIÓN
Coeficiente de cultivo (Kc)	Kc	Key\Kc\ (Tipo de Cobertura)

Tabla 4.25 Parámetros en base a la clasificación por altura

PARÁMETRO	SUPUESTO CLAVE	EXPRESIÓN
Capacidad de agua profunda (Dw)	Dw	Key\Dw\ (Clasificación por altura)
Conductividad profunda (Kd)	Kd FactorKd	Key\Kd\ (Clasificación por altura)* Key\FactorKd\ (Clasificación por altura)
Dirección de flujo preferente (pfd)	pfd Factorpfd	Key\pfd\ (Clasificación por altura)* Key\Factorpfd\ (Clasificación por altura)

Tabla 4.26 Parámetros en base al tipo de cobertura vegetal y a la clasificación por altura

PARÁMETRO	SUPUESTO CLAVE	EXPRESIÓN
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw)	Sw FactorSw	Key\Sw\ (Tipo de Cobertura) *Key\FactorSw\ (Clasificación por altura)
Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)	LAI RRF FactorRRF	Key\LAI\ (Tipo de Cobertura) *Key\RRF\ (Clasificación por altura) *Key\FactorRRF\ (Clasificación por altura)
Zona radicular de conductividad (Ks)	Ks FactorKs MultiplicadorKs	Key\Ks\ (Tipo de Cobertura) *Key\FactorKs\ (Clasificación por altura) *Key\MultiplicadorKs\ (Clasificación por altura)

Tabla 4.27 Parámetro Inicial Z1 de acuerdo al tipo de cultivo

TIPO DE CULTIVO	SUPUESTO CLAVE	EXPRESIÓN
Frutales Maiz Pasto Plantacion	Z1	Key\Z1\Frutales Key\Z1\Maiz Key\Z1\Pasto Key\Z1\Plantacion

4.1.6.2 Clima

Los datos de ingreso del clima, es decir, precipitación, temperatura, humedad, y viento; son los recolectados del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), transformados a formato CSV reconocido por el modelo WEAP, dispuesto como se indica en la figura 4.12.

GUARDAR COMO TIPO: CSV (delimitado por comas)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	1982	1	19.98	26.33	32.69	39.04	27.26	41.12	45.9	45.9	19.98	26.33	32.69	19.94	24.75
2	1982	2	8.46	11.15	13.84	16.54	27.16	40.98	45.74	45.74	8.46	11.15	13.84	9.9	12.29
3	1982	3	17.15	22.6	28.05	33.51	16.87	25.46	28.42	28.42	17.15	22.6	28.05	29.2	36.25
4	1982	4	33.77	44.51	55.25	65.99	53.56	80.81	90.2	90.2	33.77	44.51	55.25	63.67	79.04
5	1982	5	33.88	44.66	55.44	66.21	38.92	58.71	65.53	65.53	33.88	44.66	55.44	37.5	46.55
6	1982	6	26.13	34.44	42.75	51.06	14.27	21.53	24.03	24.03	26.13	34.44	42.75	23.25	28.86
7	1982	7	45.88	60.48	75.07	89.67	28.49	42.98	47.97	47.97	45.88	60.48	75.07	37.65	46.74
8	1982	8	23.37	30.8	38.24	45.67	15.97	24.1	26.9	26.9	23.37	30.8	38.24	50.96	63.25
9	1982	9	10.88	14.35	17.81	21.27	13.04	19.67	21.95	21.95	10.88	14.35	17.81	20.35	25.26
10	1982	10	14.91	19.65	24.39	29.14	36.26	54.71	61.06	61.06	14.91	19.65	24.39	43.67	54.46
11	1982	11	27.21	35.86	44.52	53.17	20.86	31.47	35.12	35.12	27.21	35.86	44.52	19.67	24.41
12	1982	12	26.35	34.73	43.12	51.5	45.88	69.23	77.27	77.27	26.35	34.73	43.12	51.32	63.71
13	1983		8.01	10.56	13.11	15.66	23.51	35.47	39.59	39.59	8.01	10.56	13.11	21.35	26.5

AÑO

MESES DEL AÑO

PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA, HUMEDAD, VIENTO

Figura 4.12 Extracto de datos de precipitación de formato CSV

Todos los archivos CSV utilizados por el modelo se guardan en el directorio respectivo (figura 4.13).

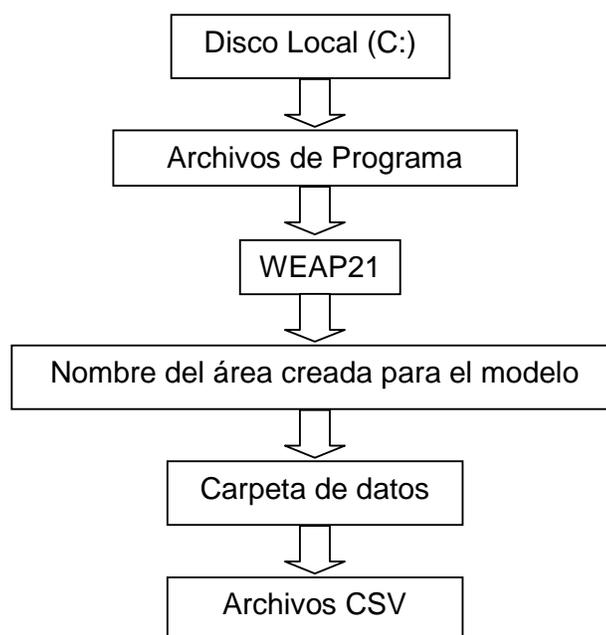


Figura 4.13 Localización de los archivos CSV

Para temperatura, humedad y viento se utilizan datos de estaciones base (archivos CSV, tabla 4.28), multiplicadas o sumadas por un índice ya calculado en los supuestos claves.

Tabla 4.28 Estaciones Base para temperatura, humedad relativa y viento

AÑO	MES	# DE COLUMNA						
		1	2	3	4	5	6	7
ESTACIONES BASE DE TEMPERATURA (°C)		TM128	TM008					
HUMEDAD RELATIVA (%)		M004	M008					
VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)								
1982	1	VALORES PROPORCIONADOS POR EL INAMHI						
1982	2							
1982	3							
1982	4							
1982	5							
1982	6							
1982	7							
1982	8							
1982	9							
1982	10							
1982	11							
1982	12							
...	...							
...	...							
...	...							
n	n							

A cada catchment le corresponde una estación para el cálculo, la tabla 4.29, muestra el número de columna que le pertenece, y la tabla 4.30 la construcción de la expresión para su cálculo.

Tabla 4.29 Número de columna de estaciones base para cada catchment

CATCHMENT	# DE COLUMNA DE ESTACION BASE		
	TEMPERATURA	HUMEDAD	VIENTO
AGOYAN1	1	1	1
AGOYAN2	1	1	1
AGOYAN3	1	1	1
AGOYAN4	1	1	1
AMBATO1	1	1	1
AMBATO2	1	1	1
AMBATO3	1	1	1
AMBATO4	1	1	1
BAÑOSDJCHAMBOPATATE1	1	1	1
BAÑOSDJCHAMBOPATATE2	1	1	1
BAÑOSDJCHAMBOPATATE3	1	1	1
CEBDAS1	1	1	1
CEBADAS2	1	1	1
CEBADAS3	1	1	1
CHAMBO1	1	1	1
CHAMBO2	1	1	1
CHAMBO3	1	1	1
CHAMBO4	1	1	1
CHAMBO5	1	1	1
CUTUCHI1	1	1	1
CUTUCHI2	1	1	1
CUTUCHI3	1	1	1
PASTAZADJENCANTO1	2	2	1
PASTAZADJENCANTO2	2	2	1
PASTAZADJENCANTO3	2	2	1
PASTAZADJENCANTO4	2	2	1
PASTAZADJENCANTO5	2	2	1
PATATE1	1	1	1
PATATE2	1	1	1
PATATE3	1	1	1
PATATE4	1	2	1
TOPO1	2	2	1
TOPO2	2	2	1
TOPO3	2	2	1
TOPO4	2	2	1
ALAO1	1	1	1
ALAO2	1	1	1

Tabla 4.30 Expresiones para el cálculo de los parámetros meteorológicos

PARÁMETRO METEREOLÓGICO	EXPRESIÓN
Temperatura	ReadFromFile(((Carpeta de datos)\(Archivo CSV de la estación base).CSV, (#de columna)) +Key\FormTemp\(\Nombre del catchment))
Humedad	ReadFromFile(((Carpeta de datos)\(Archivo CSV de la estación base).CSV, (#de columna))
Viento	ReadFromFile(((Carpeta de datos)\(Archivo CSV de la estación base).CSV, (#de columna))

El caso de la precipitación es diferente ya que se calcula la precipitación mensual de cada catchment en base a la precipitación anual del mismo y la precipitación mensual de la estación base o índice.

De la información obtenida para la precipitación anual de cada catchment, se deduce las precipitaciones mensuales de cada catchment con la siguiente fórmula.

$$P_c = P_e * \frac{Ll_z c}{Ll_z e}$$

Donde:

P_c → precipitación mensual del catchment

P_e → precipitación mensual de la estación

$Ll_z c$ → precipitación promedio anual del catchment estimada con las ecuaciones

$Ll_z e$ → precipitación promedio anual de la estación estimada con datos de la estación

Las estaciones estimadas para los distintos catchments están registradas en la tabla 4.31:

Tabla 4.31 Estaciones estimadas para el cálculo de la precipitación mensual de los catchments

SUBCUENCA	NOMBRE DEL CATCHMENT	ETIQUETA	ESTACION ESTIMADA
AGOYAN	AGOYAN1	AG1	M380
	AGOYAN2	AG2	M380
	AGOYAN3	AG3	M380
	AGOYAN4	AG4	M380
AMBATO	AMBATO1	AM1	M376
	AMBATO2	AM2	M376
	AMBATO3	AM3	M376
	AMBATO4	AM4	M376
BAÑOSDJCHAMBOPATATE	BAÑOSDJCHAMBOPATATE1	BA1	M380
	BAÑOSDJCHAMBOPATATE2	BA2	M380
	BAÑOSDJCHAMBOPATATE3	BA3	M380
CEBADAS	CEBADAS1	CE1	M396
	CEBADAS2	CE2	M396
	CEBADAS3	CE3	M396
CHAMBO	CHAMBO1	CH1	M380
	CHAMBO2	CH2	M380
	CHAMBO3	CH3	M380
	CHAMBO4	CH4	M380
	CHAMBO5	CH5	M380
CUTUCHI	CUTUCHI1	CU1	M369
	CUTUCHI2	CU2	M369
	CUTUCHI3	CU3	M369
PASTAZADJENCANTO	PASTAZADJENCANTO1	PAS1	M008
	PASTAZADJENCANTO2	PAS2	M008
	PASTAZADJENCANTO3	PAS3	M008
	PASTAZADJENCANTO4	PAS4	M008
	PASTAZADJENCANTO5	PAS5	M008
PATATE	PATATE1	PAT1	M380
	PATATE2	PAT2	M380
	PATATE3	PAT3	M380
	PATATE4	PAT4	M380
TOPO	TOPO1	TO1	M008
	TOPO2	TO2	M008
	TOPO3	TO3	M008
	TOPO4	TO4	M008
ALAO	ALAO1	AL1	M396
	ALAO2	AL2	M396

Los datos de la precipitación mensual para cada catchment se presentan en el Anexo 2.1.

La latitud es una interpolación entre los puntos que se conoce su georeferenciación, de los que se obtienen los siguientes valores de la tabla 4.32.

Tabla 4.32 Valores de latitud de cada catchment

CATCHMENT	LATITUD
AGOYAN1	-1.387452701
AGOYAN2	-1.347717164
AGOYAN3	-1.235133144
AGOYAN4	-1.188775018
AMBATO1	-1.278756657
AMBATO2	-1.298624425
AMBATO3	-1.391340678
AMBATO4	-1.447056006
BAÑOSDJCHAMBOPATATE1	-1.387452701
BAÑOSDJCHAMBOPATATE2	-1.354339753
BAÑOSDJCHAMBOPATATE3	-1.327849396
CEBDAS1	-1.877524319
CEBADAS2	-1.996730928
CEBADAS3	-2.149050485
CHAMBO1	-1.413943058
CHAMBO2	-1.632222222
CHAMBO3	-1.764940298
CHAMBO4	-1.734166667
CHAMBO5	-1.466923774
CUTUCHI1	-0.942751149
CUTUCHI2	-0.705325989
CUTUCHI3	-0.718571168
PASTAZADJENCANTO1	-1.698714404
PASTAZADJENCANTO2	-1.734166667
PASTAZADJENCANTO3	-1.784808067
PASTAZADJENCANTO4	-1.844411371
PASTAZADJENCANTO5	-1.698714404
PATATE1	-1.380830111
PATATE2	-1.301359038
PATATE3	-1.129171713
PATATE4	-1.413943058
TOPO1	-1.387452701
TOPO2	-1.321226806
TOPO3	-1.301359038
TOPO4	-1.228510554
ALAO1	-1.806944
ALAO2	-1.869722

Los valores son negativos porque la cuenca del río Pastaza se encuentra en el hemisferio sur.

4.1.6.3 Medidores de caudal

Un medidor de caudal (figura 4.14) se compara con una estación hidrológica, facilita la comparación del caudal observado (medido en sitio) y el caudal simulado, ambos en términos de cantidad y cualidad. Su lectura es a través de un archivo CSV usado por el modelo WEAP.



Figura 4.14 Medidor de caudal en el programa WEAP

Las estaciones hidrológicas utilizadas en la calibración, validación y aplicación de modelo WEAP para la cuenca del río Pastaza, son las establecidas en la tabla 4.33.

Tabla 4.33 Estaciones hidrológicas usadas para medidores de caudal

AÑO	MES	# DE COLUMNA		
		1	2	3
ESTACION HIDROLÓGICA		H801	H792	H798
1982	1	VALORES DE CAUDAL MEDIDO INAMHI	VALORES DE CAUDAL MEDIDO INAMHI	VALORES DE CAUDAL MEDIDO INAMHI
...	2			
...	...			
...	...			
...	...			
...	11			
n	12			

4.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO WEAP PARA LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA

La calibración del modelo se evalúa por el *coeficiente de determinación* (R^2), que puede ser interpretado como la proporción de la varianza representada por los valores calculados respecto a los valores observados. El coeficiente varía entre 0 y 1, correspondiéndole al valor 1 la mejor correlación de las observaciones.

La calibración se realiza manualmente con el objetivo de que los caudales producidos por el modelo sigan el comportamiento de los caudales medidos en las subcuencas de calibración.

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un conjunto de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas, así como comparar los datos de niveles de reservorios observados versus simulados así como otras variables que representen la operación de los recursos hídricos en una cuenca. Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas.

El proceso de calibración del modelo desarrollado de acuerdo al análisis de oferta y demanda de agua se realiza en tres etapas consecutivas. Estas etapas permiten revisar el comportamiento del modelo primero en las subcuencas aportantes que corresponden a zonas de régimen natural, luego en las subcuencas intermedias y finalmente en las subcuencas bajas.

La calibración del modelo es a nivel mensual, debido al tiempo de concentración.

Se definen las subcuencas aportantes de calibración en la parte alta de la cuenca: Ambato y Cutuchi.

4.2.1 CALIBRACIÓN DE LAS SUBCUENCAS APORTANTES

La primera etapa consiste en una calibración hidrológica de las subcuencas aportantes. Se espera que la influencia humana en estas subcuencas sea baja y

por lo tanto los caudales no son afectados por el uso o manejo del recurso. De suma importancia en esta etapa del proceso de calibración es el análisis de las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca en estudio. Igualmente importante es la revisión de la literatura existente.

En una primera aproximación es una buena práctica establecer factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales modifican los parámetros de uso de suelo incluyendo, principalmente:

- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, Sw
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF
- Conductividad de zona de raíces, Ks
- Conductividad de zona profunda, Kd
- Dirección preferencial de flujo, f

En la ecuación del balance de masa del modelo WEAP para el balde superior y en el balde inferior del modulo hidrológico, se observa como cada término de la ecuación que corresponde a un elemento del balance hidrológico es afectado de forma diferente por los parámetros indicados:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{dz_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_s z_{1,j}^2$$

Ec. 4.1

Donde:

- | | | |
|-------------|---|--|
| 1er término | → | Cambio en humedad del suelo |
| 2do factor | → | Precipitación efectiva (incluye riego) |
| 3er término | → | Evapotranspiración |
| 4to factor | → | Escorrentía superficial |
| 5to término | → | Flujo intermedio |
| 6to factor | → | Percolación |

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1-f_j)k_s z_{2,j}^2 \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

- 1er término → Flujo base
 2do término → Percolación

Generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base. Por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el *RRF* y *Ks*, los cuales afectan la reactividad de los catchments. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar *f* y *Kd*. Nótese que la relación entre los diferentes términos de la ecuación es no-lineal y por lo tanto al afectar un término, se afectan los otros de forma indirecta. Por ejemplo, otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda, *Kd*, puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base. Por otro lado, si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, *Sw*, se logra un mayor flujo sub-superficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (*Dw*), regula la transmisión de los flujos a los caudales base (Vicuña, Comunicación personal, 2009).

De esta forma, dependiendo del elemento del caudal que se requiera mejorar, se debe ajustar el o los parámetros correspondientes. Una vez ajustados los factores de calibración necesarios, se realiza la comparación de los caudales modelados con los registros históricos de estaciones de aforo de caudales de la zona. Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores simulados se pueden utilizar dos índices/métricas utilizadas normalmente en la calibración de modelos hidrológicos: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (o Bias o desviación relativa de los caudales) (Weglarczyk, 1988). Además para una mejor correlación de los datos obtenidos se obtiene el coeficiente de determinación de R^2 y el error medio cuadrático (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{n-1}}$$
 Ec. 4.3

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})}{n}$$
 Ec. 4.4

$$Ef = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$
 Ec. 4.5

Donde $Q_{s,i}$ y $Q_{o,i}$ son caudales simulados y observados para cada paso de tiempo i , y n es el número de datos existentes para la correlación.

Luego de obtener un buen ajuste entre los caudales simulados y los observados de forma visual, se procede a estimar las estadísticas mencionadas las cuales sirven para determinar en que sentido se debe ajustar la calibración en pasos subsiguientes.

En general, el criterio para interpretar las estadísticas es el siguiente:

- Nash-Sutcliffe (Ef): entre más cerca de 1 mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados.
- Bias: entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un Bias positivo indica sobre-estimación y un Bias negativo indica sub-estimación de caudales.
- Coeficiente de determinación (R^2): mientras más tienda a uno hay una mejor correlación de la observación con la simulación.
- Error medio cuadrático (RMSE): mide el promedio de magnitud del error, la diferencia entre los valores simulados y los correspondientes observados son cada cuadrado y luego promediados sobre la muestra. Valores cercanos a cero indican mejores resultados.

4.2.1.1 Calibración de la subcuenca aportante Cutuchi

La primera subcuenca aportante de calibración es la del río Cutuchi. El periodo de calibración de esta subcuenca es de 1982 a 1995, ya que se puede comparar con la estación Cutuchi A.J. Yanayacu (H792) que registra datos observados del periodo 1982 a 2005.

En la primera corrida se considera todos los datos de ingreso del modelo, descritos en la sección anterior, y se procede a evaluar los índices de correlación (figura 4.15).

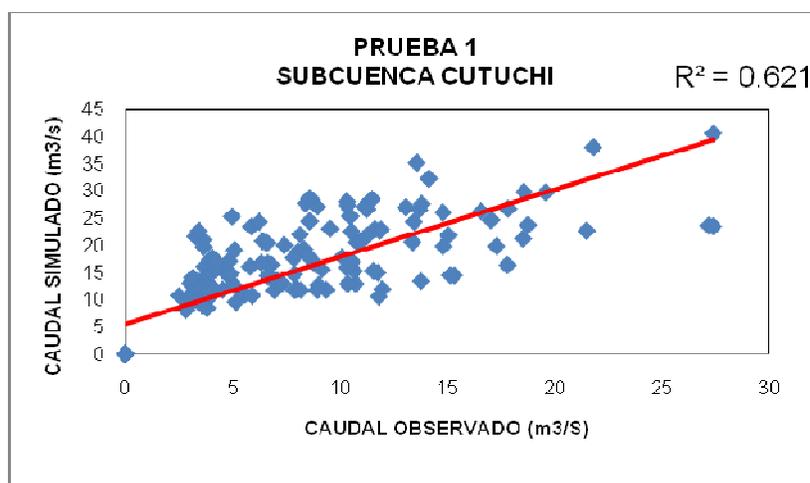


Figura 4.15 Coeficiente de determinación PRUEBA 1, subcuenca Cutuchi

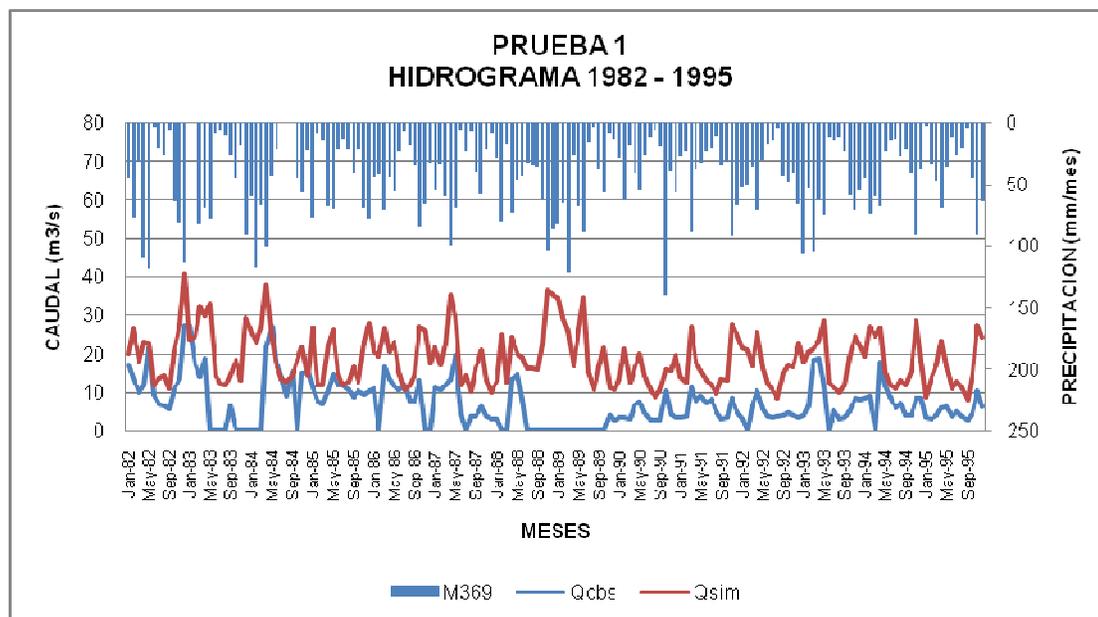


Figura 4.16 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 1, subcuenca Cutuchi

En la figura 4.16, se observa el caudal simulado y el caudal observado, así como la precipitación que le corresponde.

A continuación, en la tabla 4.34, se muestra los valores de los índices de correlación y los resultados obtenidos de variar los parámetros indicados en las pruebas subsecuentes de calibración para la subcuenca Cutuchi.

Tabla 4.34 Resultados obtenidos en las pruebas subsecuentes de calibración de la subcuenca Cutuchi

SUPUESTO CLAVE		PRUEBAS DE CALIBRACION (1982-1995)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FactorSw	ALTO	1	1	1	1	1	1.1	2	2	4	6
	MEDIO	1	1	1	1	1	1.1	2	2	4	6
	BAJO	1	1	1	1	1	1.1	2	2	4	6
FactorRRF	ALTO	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.2	1.8
	MEDIO	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.2	1.8
	BAJO	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.2	1.8
MultiplicadorKs	ALTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
	MEDIO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
	BAJO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
FactorKd	ALTO	1	0.5	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	MEDIO	1	0.5	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	BAJO	1	0.5	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Factorpfd	ALTO	1	0.5	0.25	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	MEDIO	1	0.5	0.25	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	BAJO	1	0.5	0.25	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
R ²		0.621	0.55	0.501	0.499	0.486	0.487	0.481	0.471	0.462	0.392
r		0.788	0.742	0.708	0.706	0.697	0.698	0.694	0.686	0.680	0.626
Ef		-2.8	-2.0	-1.4	-1.1	-1.1	-1.0	-1.0	-0.8	-0.7	-0.4
BIAS		111.2	88.6	71.2	61.3	60.2	59.8	58.7	53.6	49.8	41.2
RMSE		10.6	9.4	8.5	7.9	7.8	7.8	7.7	7.4	7.1	6.4

En una prueba intermedia, la prueba 7 por ejemplo se puede observar la mejora de los resultados al variar tres de los parámetros (Figura 4.17 y figura 4.18).

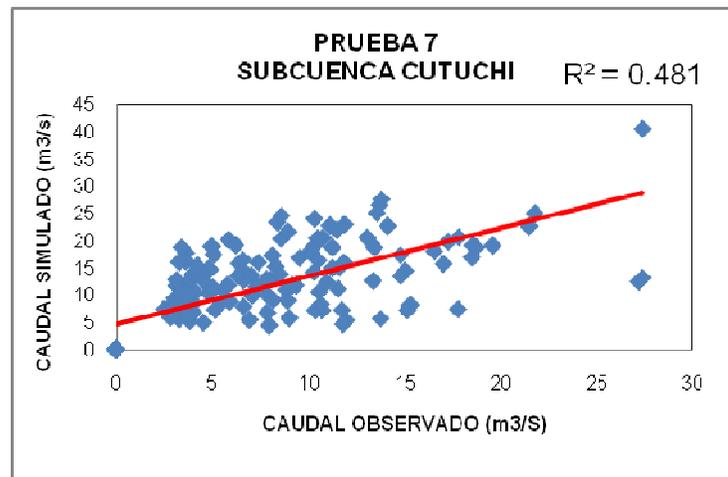


Figura 4.17 Coeficiente de determinación PRUEBA 7, subcuena Cutuchi

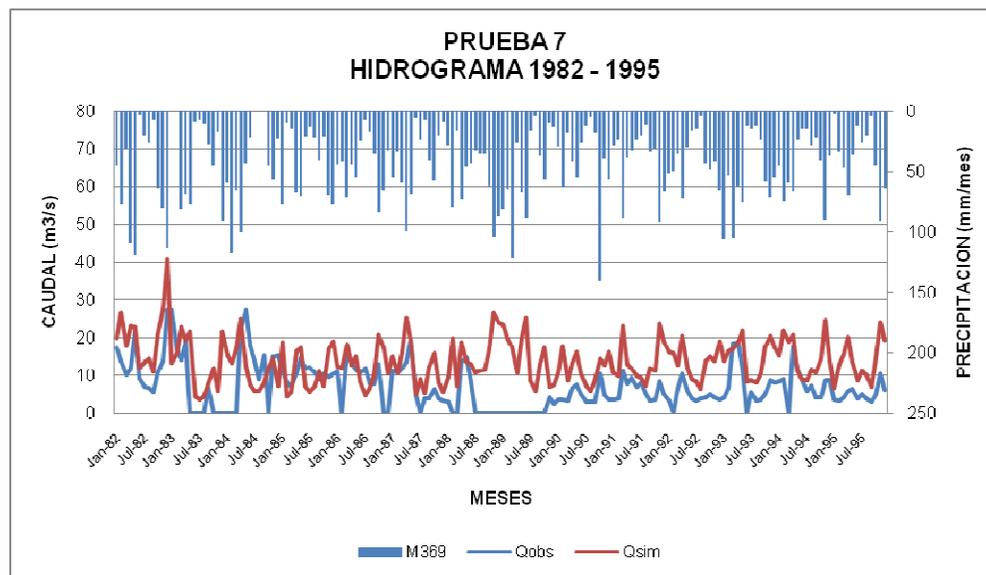


Figura 4.18 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 7, subcuena Cutuchi

Como se ve en los resultados, el mejor valor de coeficiente de determinación es para la prueba 1, pero comparando la sobreestimación o subestimación (BIAS), se observa claramente el 100% de sobreestimación de caudal, es por esos que se escogen los parámetros de la prueba 10 donde la sobreestimación es del 40% no pudiendo controlar más el mismo.

En las figuras 4.17 y 4.18, se observa un coeficiente ($R^2=0.392$) y la relación de los caudales simulados con los caudales observados, para la prueba 10 (tabla 4.34).

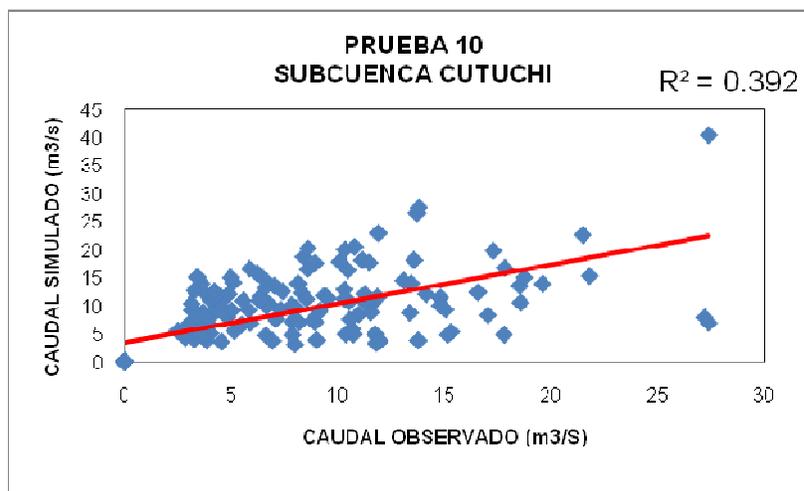


Figura 4.19 Coeficiente de determinación PRUEBA 10, subcuena Cutuchi

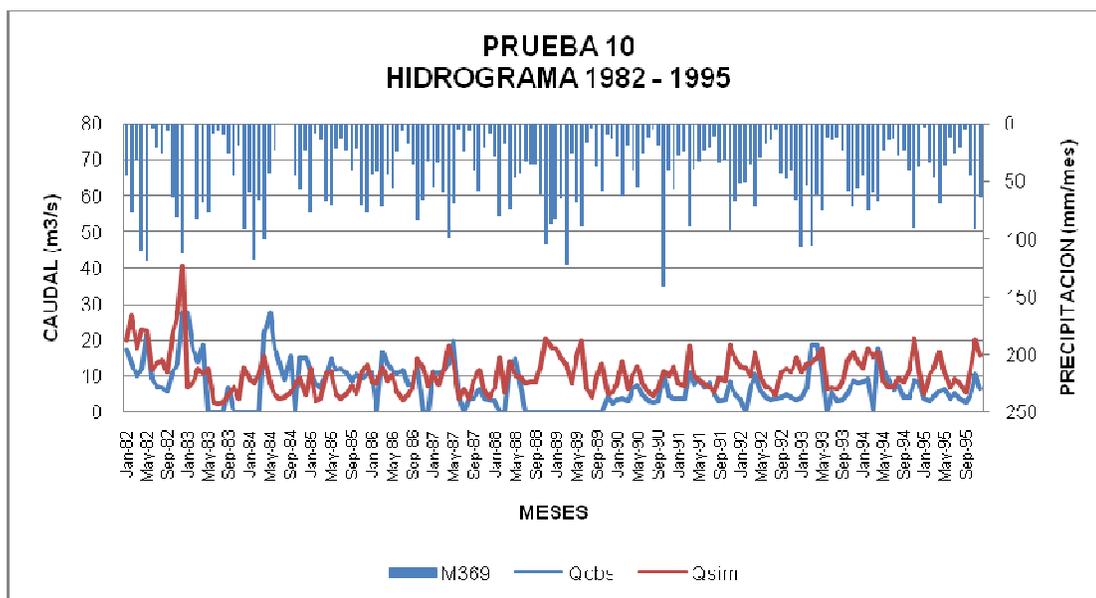


Figura 4.20 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 10, subcuena Cutuchi

Con los parámetros de la prueba 10 se considera a la subcuena Cutuchi calibrada y lista para ser verificada en la etapa de validación, no se obtuvo un buen coeficiente de determinación (0.392), pero es aceptable.

4.2.1.2 Calibración de la subcuenca aportante Ambato

La siguiente subcuenca aportante es la del río Ambato, y se calibra de igual manera que la anterior, la primera corrida considera los datos de ingreso del modelo sin ninguna variación de los parámetros. La única diferencia es que debido a la disponibilidad de información la estación de caudales observados Ambato en Ambato (H801) solo tiene registros del periodo 1982 – 1989, es por eso que su calibración se hará sobre el periodo de 1982 – 1986.

En las figuras 4.19 y 4.20 se observa los resultados obtenidos con la prueba 1 para la calibración de la subcuenca Ambato.

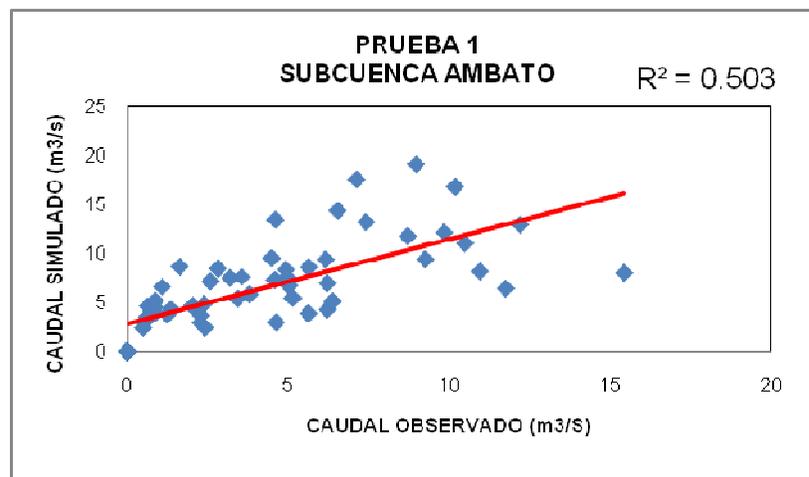


Figura 4.21 Coeficiente de determinación PRUEBA 1, subcuenca Ambato

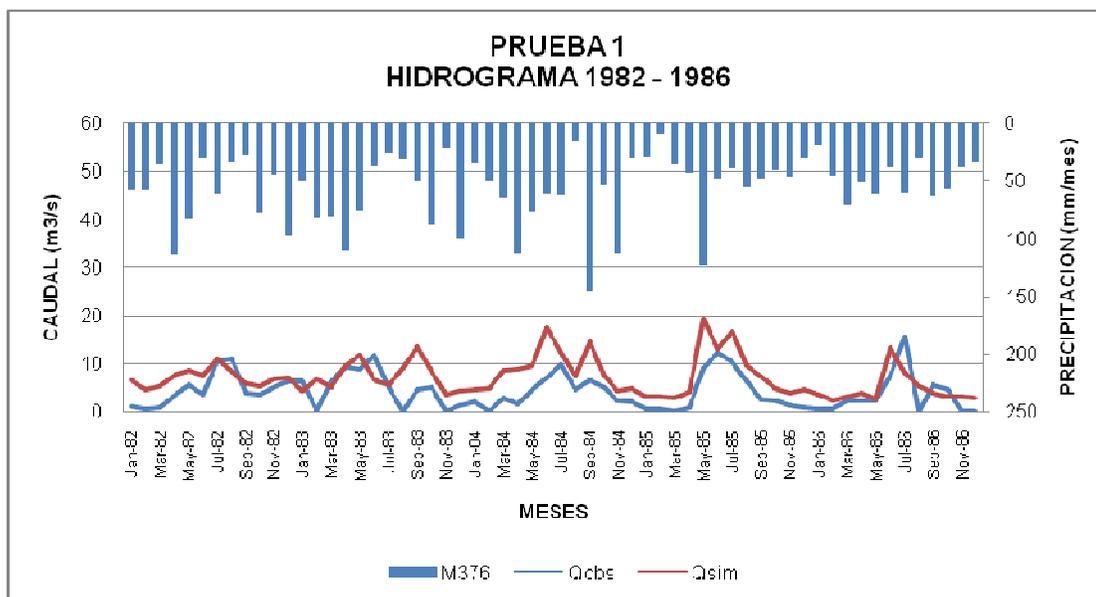


Figura 4.22 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 1, subcuenca Ambato

La tabla 4.48 contiene los resultados de las pruebas de calibración realizadas para la subcuenca Ambato.

Tabla 4.35 Resultados obtenidos en las pruebas subsecuentes de calibración de la subcuenca Ambato

SUPUESTO CLAVE		PRUEBAS DE CALIBRACION (1982-1986)					
		1	2	3	4	5	6
FactorSw	ALTO	1	1	1	1.5	1.5	1.5
	MEDIO	1	1	1	1.5	1.5	1.5
	BAJO	1	1	1	1.5	1.5	1.5
FactorRRF	ALTO	1	1	1	1	0.9	1.1
	MEDIO	1	1	1	1	0.9	1.1
	BAJO	1	1	1	1	0.9	1.1
MultiplicadorKs	ALTO	1	1	1	1	1	1
	MEDIO	1	1	1	1	1	1
	BAJO	1	1	1	1	1	1
FactorKd	ALTO	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
	MEDIO	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
	BAJO	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
Factorpfd	ALTO	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
	MEDIO	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
	BAJO	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
R ²		0.503	0.472	0.419	0.413	0.419	0.406
r		0.709	0.687	0.647	0.643	0.647	0.637
Ef		-0.34	-0.025	0.120	0.168	0.126	0.190
BIAS		17.4	13.3	11.4	10.8	11.4	10.5
RMSE		4.2	3.7	3.4	3.3	3.4	3.3

En una prueba intermedia variando tres parámetros se obtiene mejores resultados (Figura 4.23 y figura 4.24).

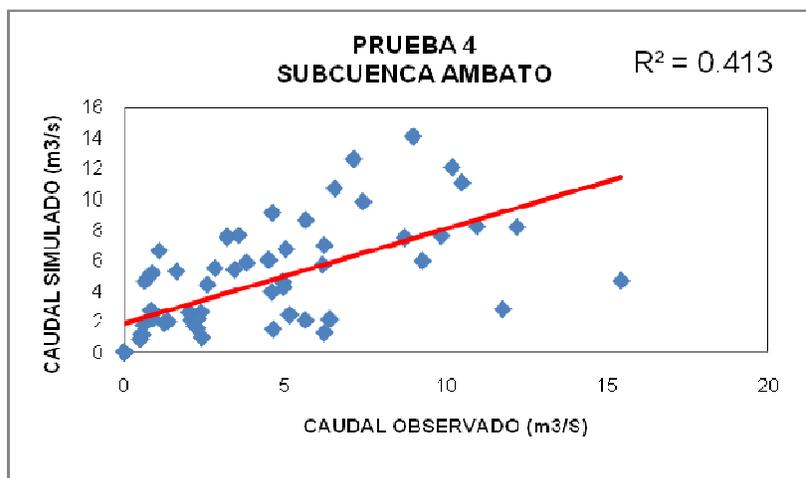


Figura 4.23 Coeficiente de determinación PRUEBA 4, subcuena Ambato

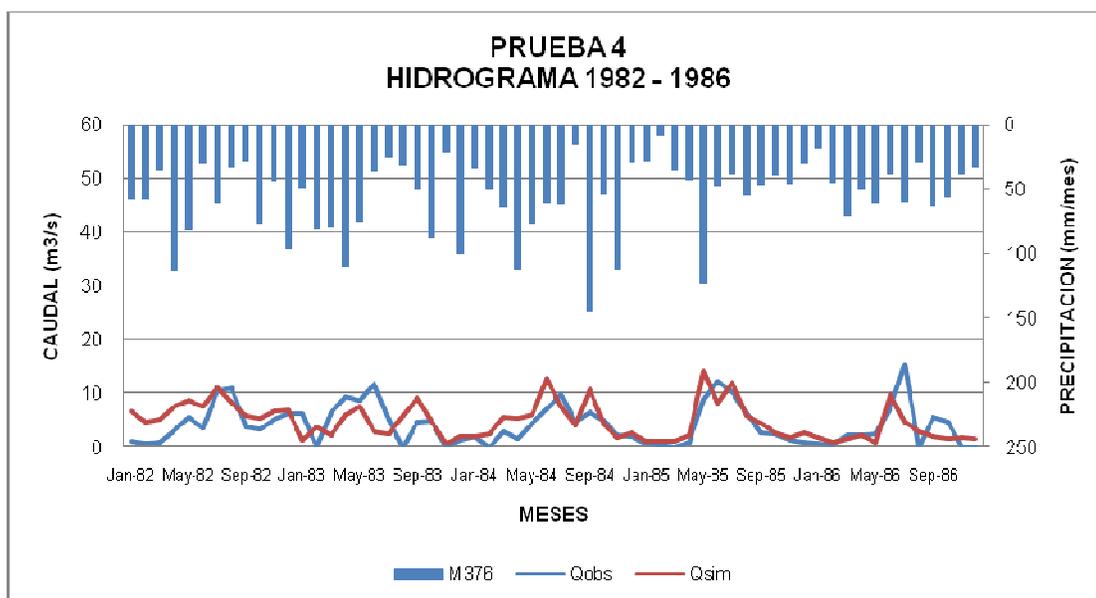


Figura 4.24 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 4, subcuena Ambato

Con la prueba 6 de calibración de la subcuena Ambato y los resultados obtenidos con ésta (figura 4.21 y figura 4.22), se puede decir que la subcuena está calibrada, lista para su validación.

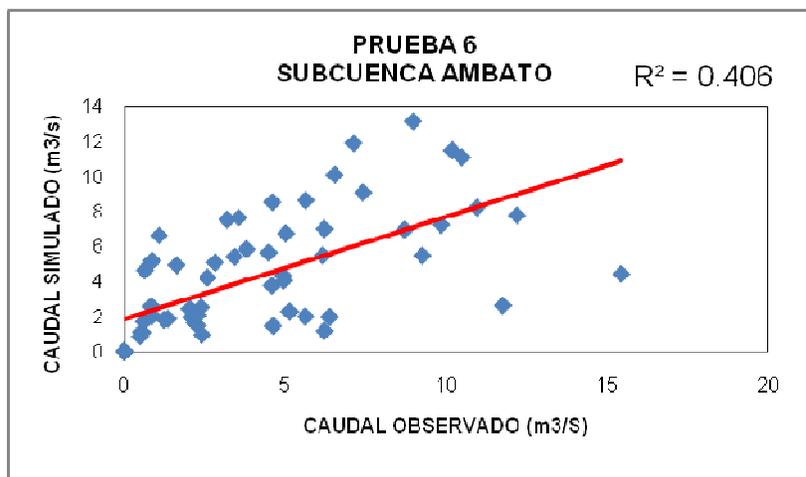


Figura 4.25 Coeficiente de determinación PRUEBA 6, subcuena Ambato

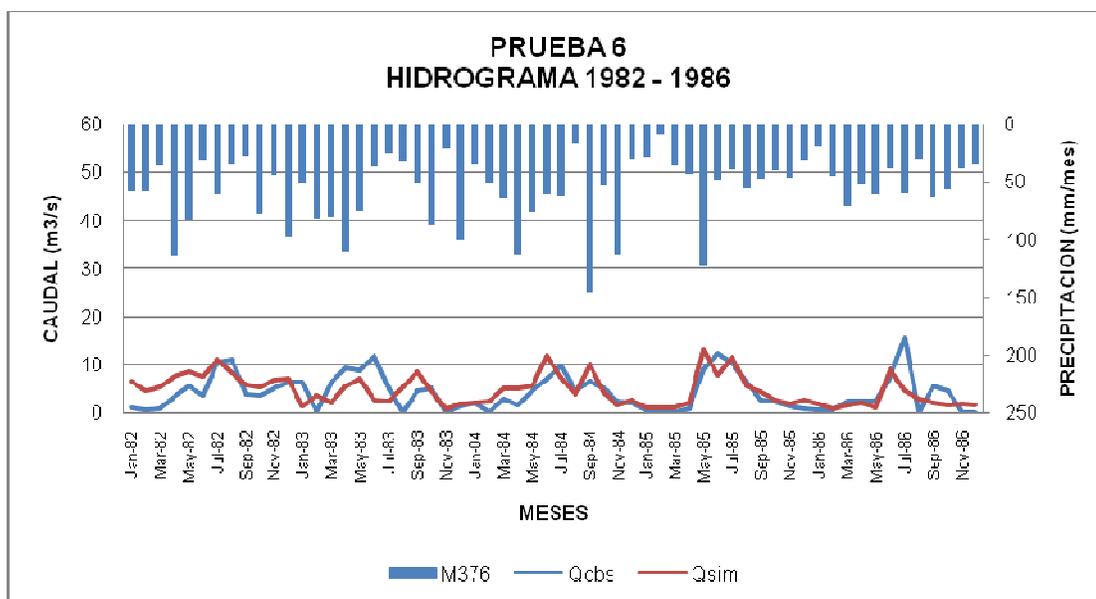


Figura 4.26 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 6, subcuena Ambato

4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO WEAP PARA LAS SUBCUENCAS APORTANTES CUTUCHI Y AMBATO

El objetivo de la validación es demostrar que el método es apto para el propósito previsto y que los resultados tienen una incertidumbre aceptable. La verificación debe entregar información sobre la representatividad, repetibilidad y reproducibilidad del método (Aguamarket, 2005).

4.3.1 VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE CUTUCHI

A continuación se muestra los resultados de validación obtenidos en la subcuenca aportante Cutuchi.

En una primera validación del periodo 1996 – 2005 (figura 4.23 y figura 4.24).

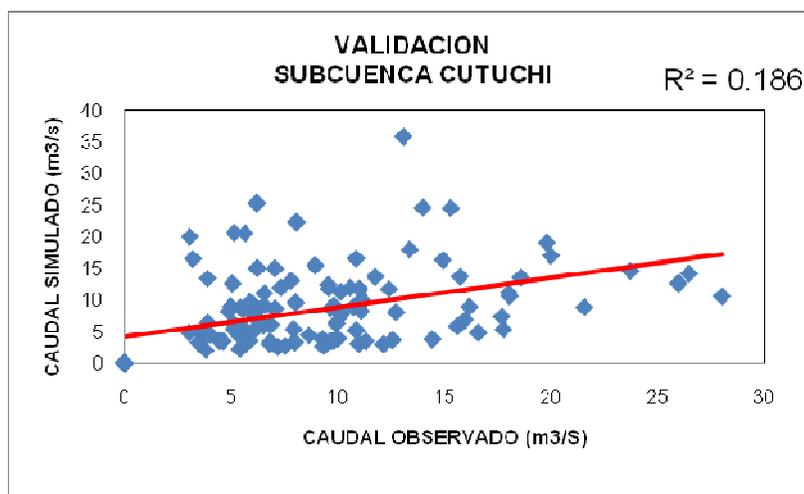


Figura 4.27 Coeficiente de determinación en la validación de la subcuenca Cutuchi (1996 – 2005)

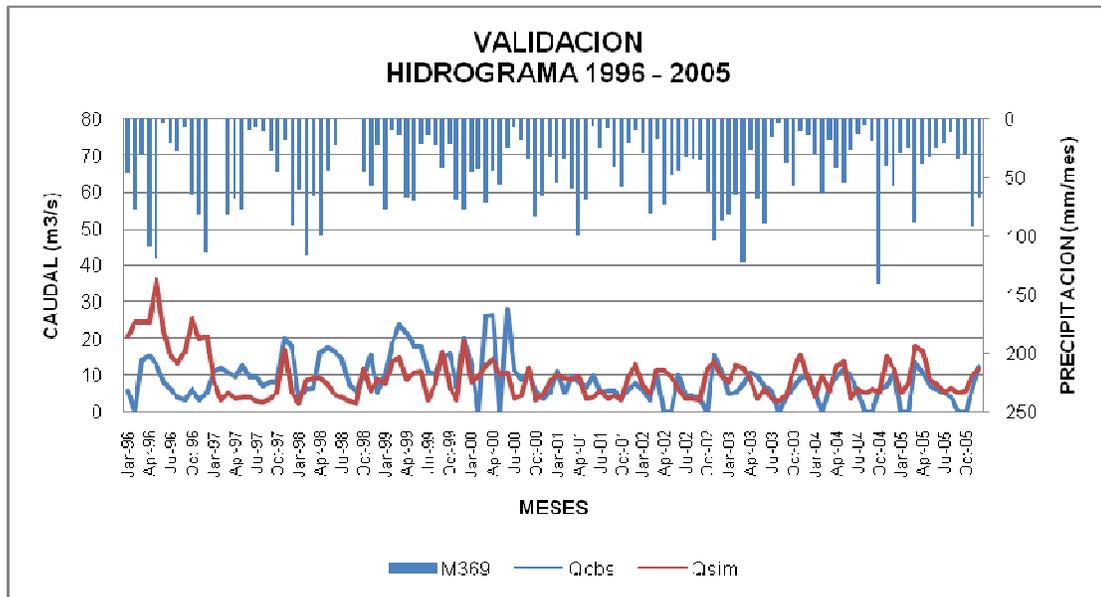


Figura 4.28 Hidrograma obtenido en la validación de subcuenca Cutuchi
(1996 – 2005)

La misma validación sin tomar en cuenta el año 1996 (figura 4.25 y figura 4.26).

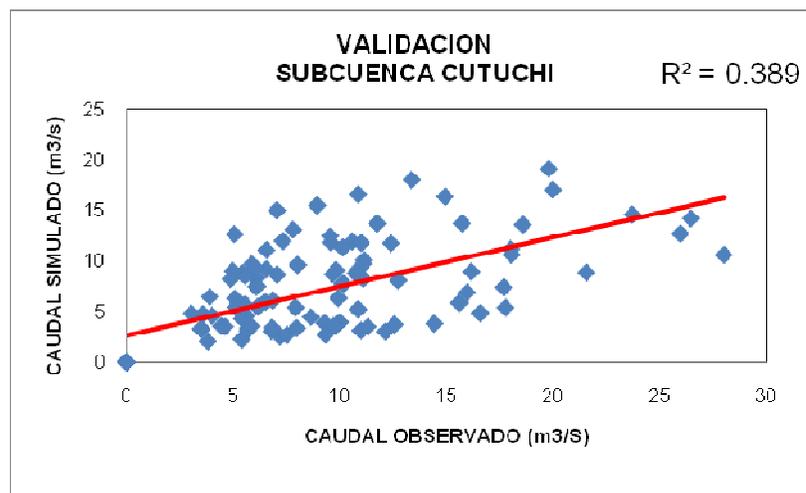


Figura 4.29 Coeficiente de determinación en la validación de la subcuenca Cutuchi
(1997 – 2005)

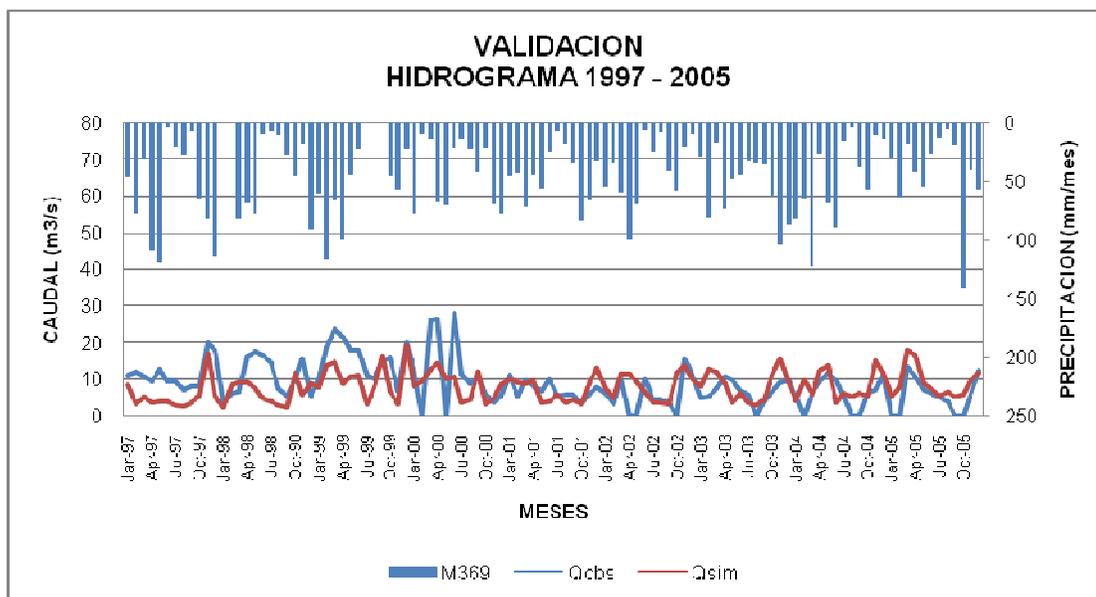


Figura 4.30 Hidrograma obtenido en la validación de subcuenca Cutuchi (1997 – 2005)

La diferencia del coeficiente de determinación de (0.186) en el primer periodo de 1996 – 2005, a (0.389) en el periodo 1997 – 2005, indica que los parámetros obtenidos de la calibración son buenos y se debe explicar la variación del año 1996.

Para una mejor correlación se escogió un periodo mas corto: 2002 – 2005 (figura 4.27 y figura 4.28).

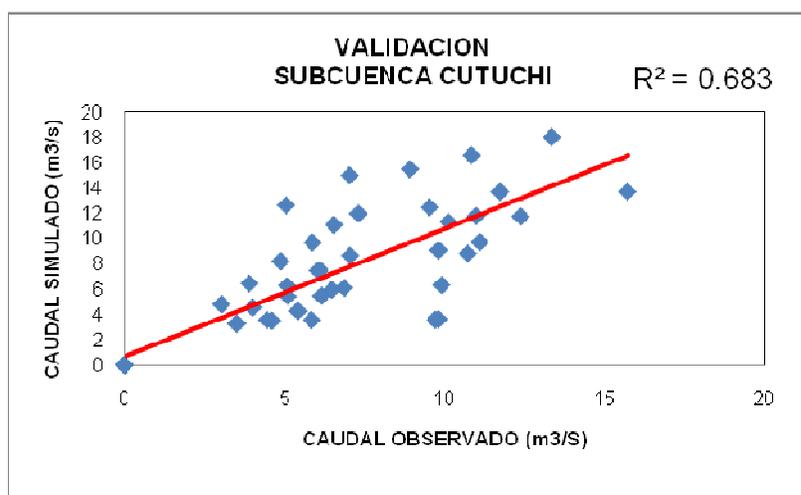


Figura 4.31 Coeficiente de determinación en la validación de la subcuenca Cutuchi (2002 – 2005)

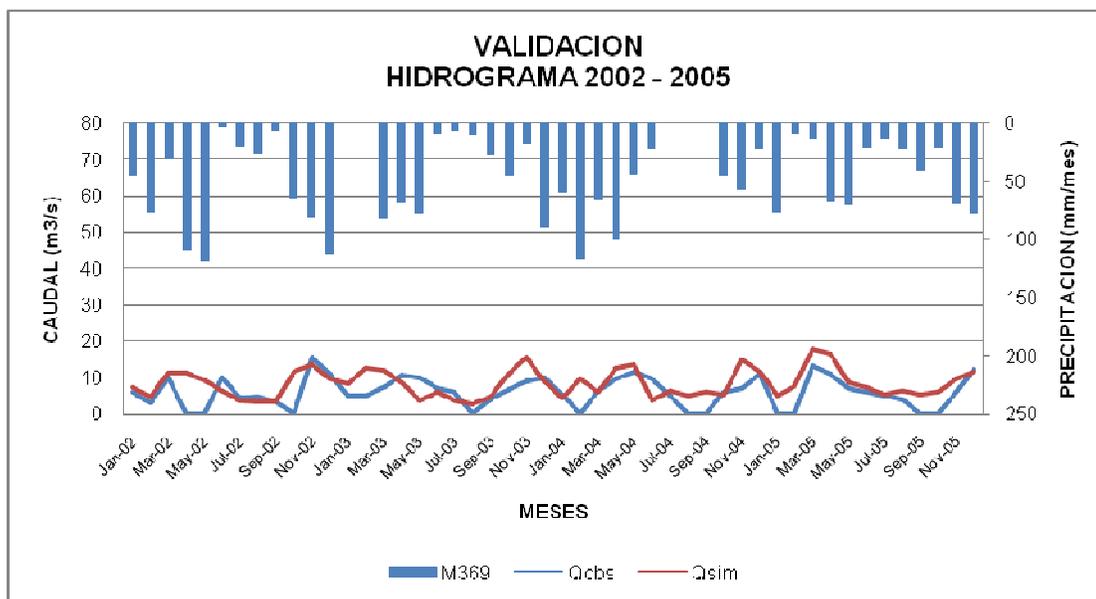


Figura 4.32 Hidrograma obtenido en la validación de la subcuenca Cutuchi (2002 – 2005)

4.3.2 VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE AMBATO

La subcuenca aportante Ambato tiene un periodo de validación más corto de 1987 – 1989, por lo que se esperaría un mejor coeficiente de determinación (figura 4.29 y figura 4.30).

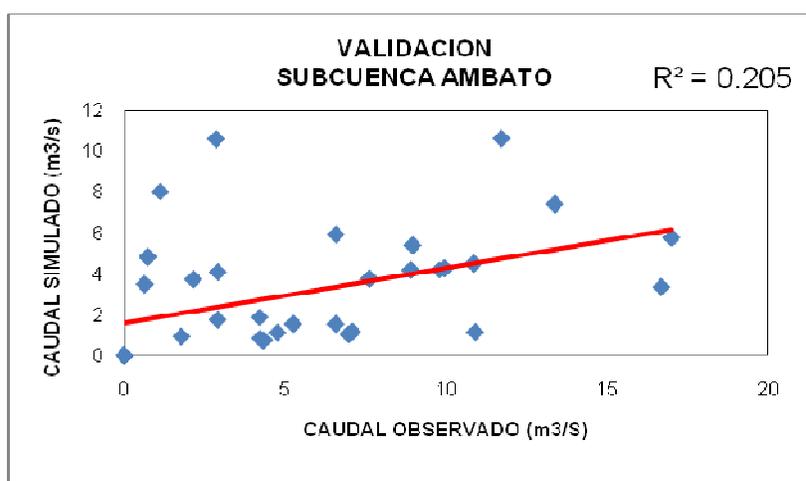


Figura 4.33 Coeficiente de determinación en la validación de la subcuenca Ambato (1987 – 1989)

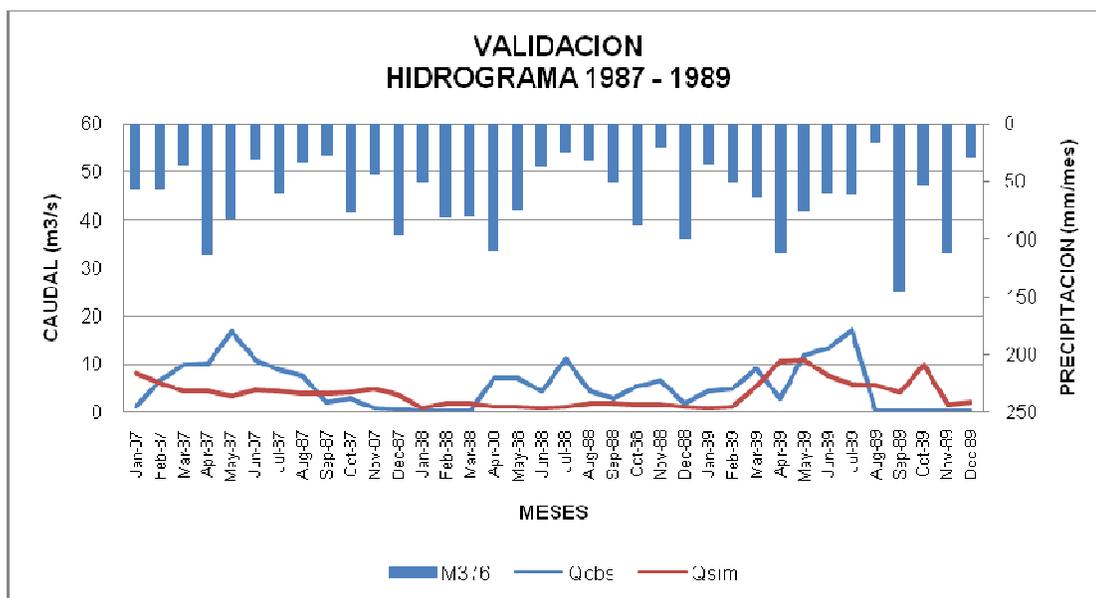


Figura 4.34 Hidrograma obtenido en la validación de la subcuenca Ambato (1987 – 1989)

4.4 SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS PARA LAS SUBCUENCAS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO WEAP

El análisis de sensibilidad consiste en cambiar algunos parámetros sobre los resultados que se tienen calibrados en el modelo (Proaño y Unda, 1995).

Este análisis se lo realizará en el modelo calibrado, en la tabla 4.36 se mostrarán los resultados de coeficientes de determinación (R^2) para el periodo (1982 – 1995).

Tabla 4.36 Resultados de R^2 y R obtenidos para el periodo de calibración de la subcuenca Cutuchi

AÑO	MESES FALTANTES	R^2	R
1982	0	0.726	0.852
1983	7	0.727	0.853
1984	4	0.688	0.829
1985	0	0.137	0.370
1986	3	0.755	0.869
1987	1	0.671	0.819
1988	8	0.882	0.939
1989	10	0.914	0.956

Tabla 4.36 Continuación

AÑO	MESES FALTANTES	R ²	R
1990	0	0.242	0.492
1991	0	0.245	0.495
1992	1	0.437	0.661
1993	1	0.443	0.666
1994	1	0.38	0.616
1995	0	0.703	0.838

Del análisis anterior, debido a que se tiene un rango de variación amplio de R², el análisis de sensibilidad se lo realizará con el promedio multimensual de todo el periodo de calibración de la subcuenca Cutuchi (1982 – 1995), para una mejor comparación de los parámetros y las variaciones de estos que se realicen.

En el análisis de sensibilidad del modelo WEAP se mostrarán los parámetros más sensibles al modelo. Es necesario aclarar que se escogió los parámetros del estudio de la cuenca del río Paute donde se presentan los parámetros que intervienen en la variación de los caudales pico y los que intervienen en la variación de los caudales base.

Para todos los parámetros se toma el valor de caudal al valor del parámetro ajustado para la calibración y se cuantifica su porcentaje de aumento o disminución en función del mismo.

Para el modelo WEAP el análisis de sensibilidad se realiza en base a las fórmulas utilizadas en la tabla 4.25 y tabla 4.26; es decir se da valores a los factores que multiplican a cada uno de los parámetros. Se mantienen los parámetros de calibración y se analiza uno a uno para determinar la sensibilidad y la cuantificación de sus caudales con respecto al caudal calibrado.

A continuación se presenta la sensibilidad de los parámetros utilizados para la calibración del modelo, y otros que no fueron variados pero resultan sensibles para el modelo. El significado de cada uno de ellos dentro del modelo se explicó en la sección 4.1.5.

Para escoger los parámetros que van a ser variados se toma en cuenta el trabajo realizado con WEAP en la cuenca del río Paute (Vicuña, comunicación personal, 2009)

4.4.1 CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA DE RAICES (Sw)

La tabla 4.37 muestra el rango de variación del parámetro Sw.

Tabla 4.37 Valores de Factor Sw para determinar la sensibilidad del parámetro Sw

Tipo de Cobertura	Key Sw	FactorSw											
		0	0.5	1	2	4	6	8	12	20	100	500	1000
AreaUrbana_Degradada	600	0	300	600	1200	2400	3600	4800	7200	12000	60000	300000	600000
Bosques	750	0	375	750	1500	3000	4500	6000	9000	15000	75000	375000	750000
Cultivos													
Cultivos Frutales	500	0	250	500	1000	2000	3000	4000	6000	10000	50000	250000	500000
Cultivos Maiz	1000	0	500	1000	2000	4000	6000	8000	12000	20000	100000	500000	1000000
Cultivos Pasto	950	0	475	950	1900	3800	5700	7600	11400	19000	95000	475000	950000
Cultivos Plantacion	700	0	350	700	1400	2800	4200	5600	8400	14000	70000	350000	700000
Paramo	300	0	150	300	600	1200	1800	2400	3600	6000	30000	150000	300000
Pasto	950	0	475	950	1900	3800	5700	7600	11400	19000	95000	475000	950000
Rocas	100	0	50	100	200	400	600	800	1200	2000	10000	50000	100000
Tierras_Infertiles	250	0	125	250	500	1000	1500	2000	3000	5000	25000	125000	250000

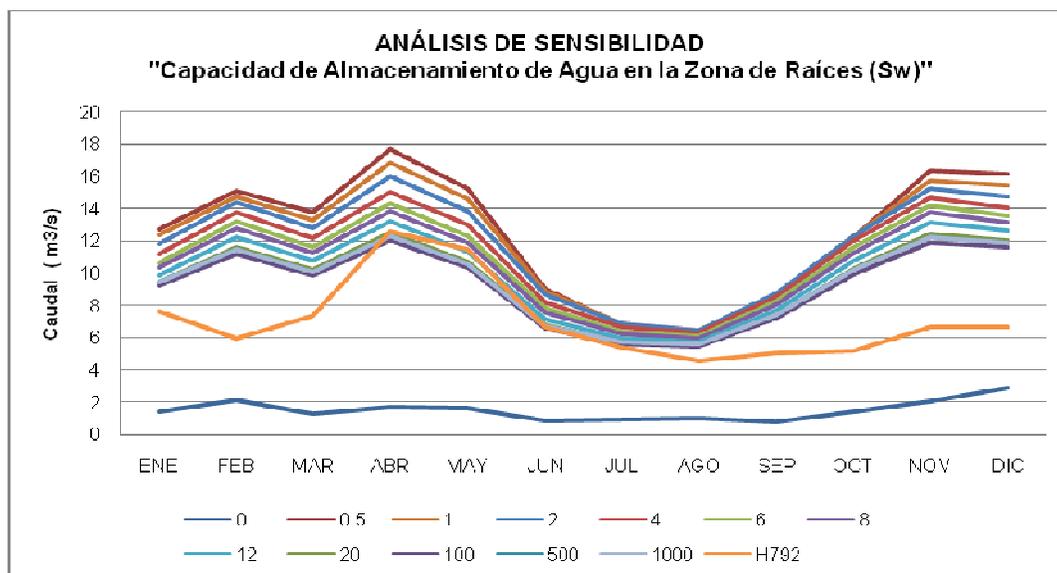


Figura 4.35 Análisis de sensibilidad variando el parámetro Sw sobre la serie multimensual del periodo (1982 – 1995)

De la figura 4.31 se observa claramente que para un valor de ($Sw=0$), no se tiene una capacidad de almacenamiento en la zona de raíces y por lo tanto no se genera caudal. A valores pequeños de factor Sw (0.5, 1, 4) los caudales simulados presentan un mayor porcentaje de sobreestimación, mientras que si los valores de Sw son del orden de (6, 12, 20, 500, 1000) se acercan más a los valores observados de caudal, aunque los últimos no tan significativamente.

Para cada valor de factor Sw , le corresponde un valor de caudal simulado de cada mes, la tabla 4.38 muestra que porcentaje es, con respecto al caudal obtenido en la mejor prueba de calibración.

Tabla 4.38 Cuantificación de caudales con respecto al caudal calibrado con FactorSw= 6

MES	CUANTIFICACIÓN DE CAUDAL											
	Sw											
	CALIBRACION 6	0	0.5	1	2	4	8	12	20	100	500	1000
ENE	10.67	1.42	12.72	12.38	11.84	11.14	10.32	9.87	9.45	9.22	9.41	9.45
FEB	13.21	2.10	15.08	14.77	14.36	13.73	12.79	12.21	11.63	11.20	11.43	11.49
MAR	11.65	1.28	13.77	13.31	12.81	12.14	11.27	10.75	10.22	9.83	10.04	10.09
ABR	14.34	1.70	17.68	16.84	15.99	15.00	13.85	13.19	12.53	12.03	12.27	12.33
MAY	12.34	1.62	15.24	14.60	13.86	12.95	11.89	11.31	10.74	10.34	10.54	10.59
JUN	7.83	0.87	9.05	8.92	8.67	8.20	7.53	7.15	6.78	6.57	6.73	6.76
JUL	6.39	0.97	6.79	6.89	6.85	6.62	6.20	5.95	5.69	5.56	5.71	5.74
AGO	6.10	1.02	6.32	6.45	6.46	6.29	5.95	5.73	5.53	5.45	5.60	5.63
SEP	8.26	0.81	8.39	8.66	8.74	8.54	8.02	7.68	7.34	7.18	7.38	7.42
OCT	11.61	1.47	12.23	12.29	12.28	11.99	11.27	10.78	10.27	9.92	10.17	10.23
NOV	14.19	2.04	16.38	15.71	15.23	14.68	13.76	13.14	12.46	11.89	12.18	12.25
DIC	13.56	2.90	16.14	15.42	14.71	14.03	13.18	12.64	12.08	11.63	11.88	11.94
PROM	10.84	1.52	12.48	12.19	11.82	11.28	10.50	10.03	9.56	9.24	9.45	9.49
%	100	13.99	115.11	112.38	108.97	103.98	96.86	92.51	88.16	85.17	87.10	87.55

4.4.2 ZONA RADICULAR DE CONDUCTIVIDAD (Ks)

La tabla 4.39 y la tabla 4.40 muestran el rango del parámetro Ks .

Tabla 4.39 Valores de MultiplicadorKs para determinar la sensibilidad del parámetro Ks (FactorKs Alto)

Tipo de Cobertura	Key Ks	FactorKs Alto	Multiplicador Ks										
			0	0.1	0.2	0.5	0.8	1	1.5	2	4	10	20
AreaUrbana_Degradada	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Bosques	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Cultivos													
Cultivos Frutales	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Cultivos Maiz	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Cultivos Pasto	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Cultivos Plantacion	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Paramo	300	0.4	0	12	24	60	96	120	180	240	480	1200	2400
Pasto	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Rocas	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200
Tierras_infertiles	150	0.4	0	6	12	30	48	60	90	120	240	600	1200

Tabla 4.40 Valores de MultiplicadorKs para determinar la sensibilidad del parámetro Ks (FactorKs Medio y Bajo)

Tipo de Cobertura	Key Ks	FactorKs Medio y Bajo	Multiplicador Ks										
			0	0.1	0.2	0.5	0.8	1	1.5	2	4	10	20
Área Urbana _degradada	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Bosques	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Cultivos													
Cultivos Frutales	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Cultivos Maíz	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Cultivos Pasto	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Cultivos Plantación	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Paramo	300	1	0	30	60	150	240	300	450	600	1200	3000	6000
Pasto	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Rocas	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000
Tierras _infértiles	150	1	0	15	30	75	120	150	225	300	600	1500	3000

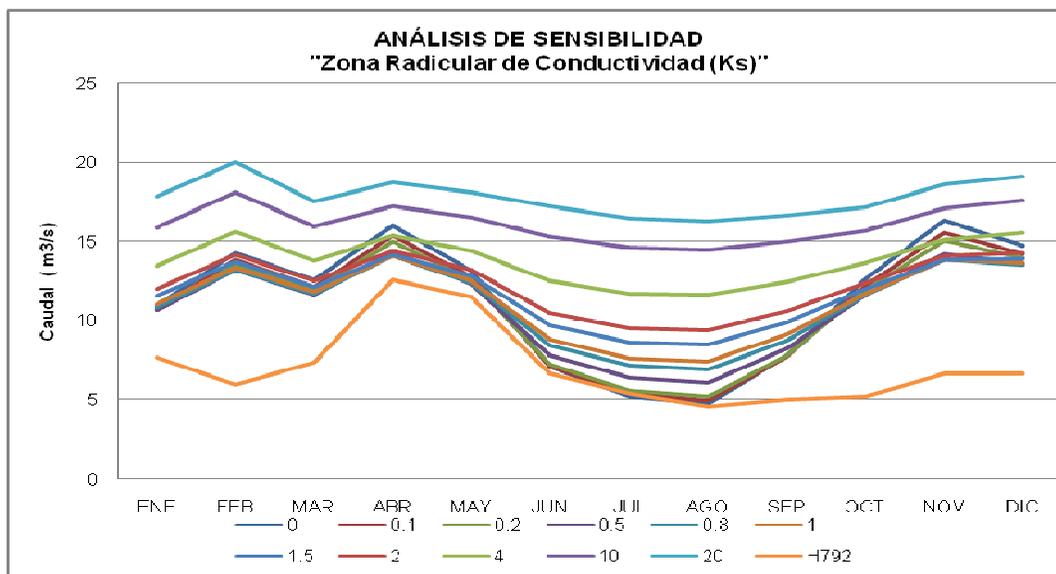


Figura 4.36 Análisis de sensibilidad variando el parámetro Ks sobre la serie multimensual del periodo (1982 – 1995)

De la figura 4.32, a valores bajos de Ks, el caudal simulado se compara con el caudal observado y no tiende a ser sobrestimado; y a valores altos de Ks la tendencia de la curva disminuye, es decir no es comparable con los caudales observados.

La tabla 4.41 muestra la cuantificación del caudal en porcentaje con respecto al caudal calibrado.

Tabla 4.41 Cuantificación de caudales con respecto al caudal calibrado
Multiplicador Ks = 0.5

MES	CUANTIFICACIÓN DE CAUDAL										
	CALIBRACION 0.5	Ks									
		0	0.1	0.2	0.8	1	1.5	2	4	10	20
ENE	10.67	10.96	10.75	10.65	10.89	11.07	11.56	12.03	13.49	15.90	17.89
FEB	13.21	14.28	13.84	13.55	13.24	13.34	13.72	14.14	15.62	18.12	20.05
MAR	11.65	12.56	12.17	11.92	11.69	11.79	12.14	12.52	13.82	15.96	17.57
ABR	14.34	16.02	15.42	15.00	14.12	14.09	14.19	14.41	15.37	17.26	18.80
MAY	12.34	13.14	12.79	12.57	12.40	12.50	12.84	13.21	14.45	16.54	18.14
JUN	7.83	7.10	7.14	7.27	8.44	8.84	9.72	10.46	12.51	15.33	17.26
JUL	6.39	5.23	5.38	5.60	7.17	7.65	8.68	9.52	11.73	14.60	16.47
AGO	6.10	4.75	4.95	5.22	6.94	7.45	8.54	9.40	11.65	14.49	16.29
SEP	8.26	7.81	7.77	7.83	8.78	9.13	9.92	10.59	12.45	14.99	16.68
OCT	11.61	12.66	12.22	11.94	11.62	11.71	12.03	12.40	13.64	15.69	17.18
NOV	14.19	16.35	15.59	15.05	13.88	13.81	13.89	14.11	15.14	17.12	18.66
DIC	13.56	14.75	14.26	13.95	13.54	13.62	13.94	14.30	15.55	17.62	19.17
PROM	10.84	11.30	11.02	10.88	11.06	11.25	11.76	12.26	13.78	16.13	17.85
%	100	104.20	101.66	100.33	101.98	103.74	108.49	113.03	127.12	148.78	164.58

4.4.3 FACTOR DE RESISTENCIA A LA ESCORRENTÍA (RRF)

La tabla 4.42, la tabla 4.43 y la tabla 4.44 muestran el rango de variación del parámetro RRF.

Tabla 4.42 Valores de FactorRRF para determinar la sensibilidad del parámetro RRF (RRF Alto)

Tipo de Cobertura	Key LAI	Key RRF Alto	FactorRRF												
			0	0.2	0.4	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2	4	8	10	
AreaUrbana_Degradada	2	0.4	0	0.2	0.3	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	3.2	6.4	8	
Bosques	5	0.4	0	0.4	0.8	1.6	2	2.4	3	3.6	4	8	16	20	
Cultivos															
Cultivos Frutales	5	0.4	0	0.4	0.8	1.6	2	2.4	3	3.6	4	8	16	20	
Cultivos Maiz	4	0.4	0	0.3	0.6	1.3	1.6	1.9	2.4	2.9	3.2	6.4	13	16	
Cultivos Pasto	3	0.4	0	0.2	0.5	1	1.2	1.4	1.8	2.2	2.4	4.8	9.6	12	
Cultivos Plantacion	4	0.4	0	0.3	0.6	1.3	1.6	1.9	2.4	2.9	3.2	6.4	13	16	
Paramo	3.5	0.4	0	0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.1	2.5	2.8	5.6	11	14	
Pasto	3	0.4	0	0.2	0.5	1	1.2	1.4	1.8	2.2	2.4	4.8	9.6	12	
Rocas	1	0.4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.6	3.2	4	
Tierras_Infertiles	1.6	0.4	0	0.1	0.3	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.3	2.6	5.1	6.4	

Tabla 4.43 Valores de FactorRRF para determinar la sensibilidad del parámetro RRF (RRF Medio)

Tipo de Cobertura	Key LAI	Key RRF Medio	FactorRRF												
			0	0.2	0.4	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2	4	8	10	
Área Urbana _ degradada	2	0.2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.6	3.2	4	
Bosques	5	0.2	0	0.2	0.4	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2	4	8	10	
Cultivos															
Cultivos Frutales	5	0.2	0	0.2	0.4	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2	4	8	10	
Cultivos Maíz	4	0.2	0	0.2	0.3	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	3.2	6.4	8	
Cultivos Pasto	3	0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2	2.4	4.8	6	
Cultivos Plantación	4	0.2	0	0.2	0.3	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	3.2	6.4	8	
Paramo	3.5	0.2	0	0.1	0.3	0.6	0.7	0.8	1.1	1.3	1.4	2.8	5.6	7	
Pasto	3	0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2	2.4	4.8	6	
Rocas	1	0.2	0	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.8	1.6	2	
Tierras_ infértiles	1.6	0.2	0	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	1.3	2.6	3.2	

Tabla 4.44 Valores de FactorRRF para determinar la sensibilidad del parámetro RRF (RRF Bajo)

Tipo de Cobertura	Key LAI	Key RRF Bajo	FactorRRF												
			0	0.2	0.4	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2	4	8	10	
Área Urbana _ degradada	2	1	0	0.4	0.8	1.6	2	2.4	3	3.6	4	8	16	20	
Bosques	5	1	0	1	2	4	5	6	7.5	9	10	20	40	50	
Cultivos															
Cultivos Frutales	5	1	0	1	2	4	5	6	7.5	9	10	20	40	50	
Cultivos Maíz	4	1	0	0.8	1.6	3.2	4	4.8	6	7.2	8	16	32	40	
Cultivos Pasto	3	1	0	0.6	1.2	2.4	3	3.6	4.5	5.4	6	12	24	30	
Cultivos Plantación	4	1	0	0.8	1.6	3.2	4	4.8	6	7.2	8	16	32	40	
Paramo	3.5	1	0	0.7	1.4	2.8	3.5	4.2	5.3	6.3	7	14	28	35	
Pasto	3	1	0	0.6	1.2	2.4	3	3.6	4.5	5.4	6	12	24	30	
Rocas	1	1	0	0.2	0.4	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2	4	8	10	
Tierras_ infértiles	1.6	1	0	0.3	0.6	1.3	1.6	1.9	2.4	2.9	3.2	6.4	13	16	

Con los resultados anteriores, se obtienen las curvas de variación del parámetro RRF (figura 4.33).

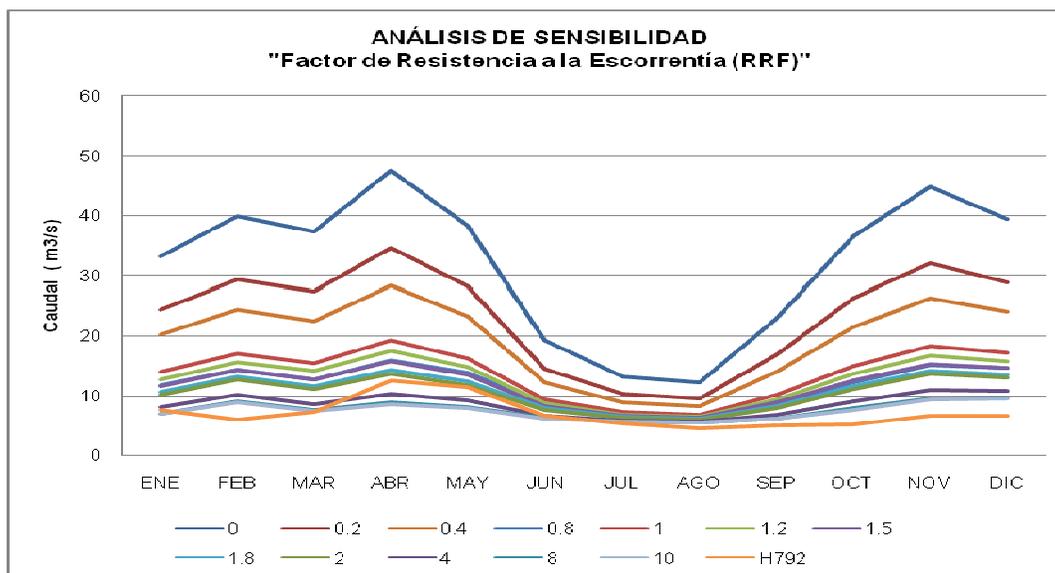


Figura 4.37 Análisis de sensibilidad variando el parámetro RRF sobre la serie multimensual del periodo (1982 – 1995)

Al tener valores pequeños del factor *RRF* la sobreestimación de los caudales es alta; si son valores altos, los caudales simulados se comparan mejor con los observados, lo cual se estima de cuantificar su caudal (tabla 4.45).

Tabla 4.45 Cuantificación de caudales con respecto al caudal calibrado

FactorRRF=1.8

MES	CUANTIFICACIÓN DE CAUDAL											
	RRF											
	CALIBRACION 1.8	0	0.2	0.4	0.8	1	1.2	1.5	2	4	8	10
ENE	10.67	33.16	24.39	20.19	11.84	13.97	12.84	11.58	10.20	7.99	7.06	6.89
FEB	13.21	39.97	29.32	24.31	14.36	17.02	15.70	14.25	12.67	10.19	9.11	8.90
MAR	11.65	37.33	27.31	22.51	12.81	15.42	14.13	12.68	11.11	8.62	7.59	7.41
ABR	14.34	47.65	34.58	28.36	15.99	19.23	17.56	15.69	13.64	10.32	8.89	8.63
MAY	12.34	38.34	28.14	23.31	13.86	16.18	14.87	13.40	11.79	9.18	8.07	7.87
JUN	7.83	19.22	14.41	12.28	8.67	9.31	8.80	8.23	7.62	6.69	6.31	6.23
JUL	6.39	13.26	10.19	8.89	6.85	7.17	6.89	6.59	6.29	5.87	5.70	5.66
AGO	6.10	12.22	9.46	8.29	6.46	6.77	6.53	6.27	6.02	5.67	5.54	5.52
SEP	8.26	23.03	16.82	14.01	8.74	10.14	9.48	8.76	8.00	6.80	6.23	6.10
OCT	11.61	36.51	26.18	21.47	12.28	14.89	13.75	12.49	11.15	8.98	7.90	7.66
NOV	14.19	44.93	32.09	26.31	15.23	18.22	16.82	15.28	13.63	10.95	9.62	9.33
DIC	13.56	39.41	28.87	24.01	14.71	17.09	15.86	14.51	13.06	10.76	9.74	9.54
PROM	10.84	32.09	23.48	19.49	11.82	13.78	12.77	11.65	10.43	8.50	7.65	7.48
%	100	295.88	216.53	179.77	108.97	127.11	117.74	107.39	96.20	78.41	70.52	68.97

4.4.4 CONDUCTIVIDAD DE ZONA PROFUNDA (Kd)

La tabla 4.46 muestra la variación del parámetro Kd.

Tabla 4.46 Valores de FactorKd para determinar la sensibilidad del parámetro Kd

Clasificación por altura	Key Kd	FactorKd											
		0.05	0.10	0.15	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	4.0	8.0	10.0
Alto	100	5	10	15	25	50	75	100	150	200	400	800	1000
Medio	50	2.5	5	7.5	12.5	25	37.5	50	75	100	200	400	500
Bajo	30	1.5	3	4.5	7.5	15	22.5	30	45	60	120	240	300

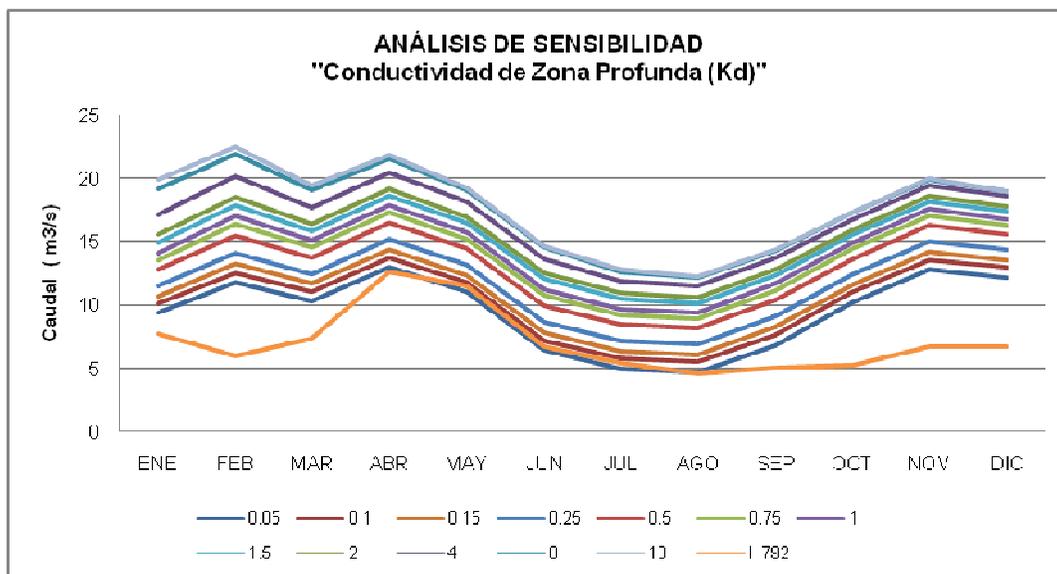


Figura 4.38 Análisis de sensibilidad variando el parámetro Kd sobre la serie multimensual del periodo (1982 – 1995)

A valores altos de Kd le corresponde una sobrestimación de caudales y a valores bajos la mínima sobrestimación (figura 4.34), que es comparable con la serie multimensual resultante de la observación (tabla 4.47).

Tabla 4.47 Cuantificación de caudales con respecto al caudal calibrado
FactorKd=0.15

MES	CUANTIFICACIÓN DE CAUDAL											
	Kd											
	CALIBRACION 0.15	0.05	0.1	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2	4	8	10
ENE	10.67	9.35	10.10	11.50	12.76	13.53	14.10	14.92	15.53	17.13	19.15	19.90
FEB	13.21	11.75	12.58	14.13	15.52	16.37	16.99	17.88	18.52	20.14	21.92	22.47
MAR	11.65	10.32	11.07	12.48	13.73	14.49	15.04	15.82	16.38	17.73	19.03	19.39
ABR	14.34	12.96	13.75	15.20	16.49	17.27	17.83	18.62	19.17	20.46	21.59	21.85
MAY	12.34	10.99	11.76	13.18	14.42	15.17	15.70	16.44	16.96	18.13	19.05	19.25
JUN	7.83	6.43	7.22	8.69	9.97	10.74	11.28	12.03	12.55	13.68	14.50	14.66
JUL	6.39	5.03	5.81	7.23	8.47	9.20	9.72	10.43	10.91	11.94	12.63	12.76
AGO	6.10	4.73	5.51	6.94	8.17	8.90	9.41	10.10	10.57	11.53	12.14	12.24
SEP	8.26	6.83	7.65	9.13	10.39	11.13	11.65	12.35	12.81	13.75	14.31	14.39
OCT	11.61	10.23	11.02	12.45	13.67	14.38	14.87	15.53	15.96	16.82	17.30	17.36
NOV	14.19	12.75	13.57	15.05	16.31	17.03	17.53	18.19	18.63	19.47	19.91	19.96
DIC	13.56	12.16	12.96	14.40	15.60	16.30	16.77	17.40	17.81	18.58	18.97	19.00
PROM	10.84	9.46	10.25	11.70	12.96	13.71	14.24	14.98	15.48	16.61	17.54	17.77
%	100	87.24	94.52	107.88	119.49	126.41	131.30	138.09	142.78	153.20	161.77	163.86

4.4.5 DIRECCIÓN PREFERENCIAL DE FLUJO (pfd)

La tabla 4.48, muestra la variación del parámetro pfd en el modelo WEAP.

Tabla 4.48 Valores de Factorpfd para determinar la sensibilidad del parámetro pfd

Clasificación por altura	Key pfd	Factorpfd										
		0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.8	1	1.2	1.5	1.6	1.7
Alto	0.6	0	0	0.1	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.9	1	1
Medio	0.4	0	0	0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7
Bajo	0.15	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

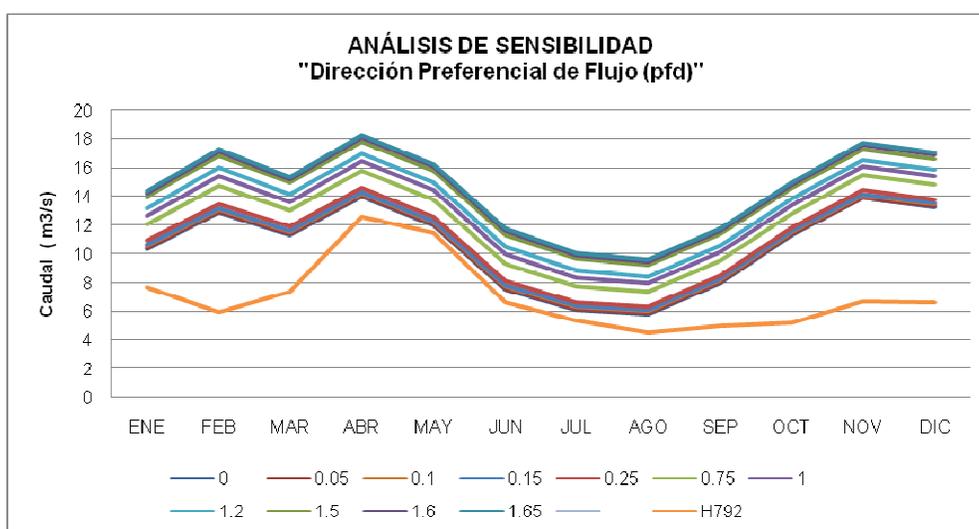


Figura 4.39 Análisis de sensibilidad variando el parámetro pfd sobre la serie multimensual del periodo (1982 – 1995)

Valores menores se acercan a los valores observados, mientras valores mayores se alejan (figura 4.35). Al variar la dirección preferencial de flujo se mantiene la estacionalidad de la simulación.

En la tabla 4.49 se observa el porcentaje de cada variación respecto del caudal calibrado.

Tabla 4.49 Cuantificación de caudales con respecto al caudal calibrado
Factor pfd=0.15

	CUANTIFICACIÓN DE CAUDAL										
	pfd										
	CALIBRACION 0.15	0	0.05	0.1	0.25	0.75	1	1.2	1.5	1.6	1.65
ENE	10.67	10.34	10.45	10.56	10.89	12.05	12.66	13.17	13.98	14.26	14.40
FEB	13.21	12.85	12.97	13.09	13.46	14.74	15.42	15.99	16.88	17.19	17.35
MAR	11.65	11.32	11.43	11.54	11.87	13.03	13.65	14.17	14.98	15.26	15.41
ABR	14.34	14.00	14.11	14.22	14.57	15.80	16.45	16.99	17.84	18.14	18.29
MAY	12.34	12.00	12.11	12.23	12.57	13.78	14.42	14.95	15.79	16.09	16.23
JUN	7.83	7.48	7.59	7.71	8.06	9.29	9.94	10.48	11.34	11.64	11.79
JUL	6.39	6.07	6.18	6.28	6.61	7.74	8.35	8.85	9.65	9.93	10.08
AGO	6.10	5.80	5.90	6.00	6.31	7.38	7.95	8.44	9.20	9.47	9.61
SEP	8.26	7.96	8.06	8.16	8.46	9.53	10.10	10.58	11.35	11.62	11.75
OCT	11.61	11.32	11.42	11.51	11.80	12.83	13.38	13.84	14.59	14.85	14.98
NOV	14.19	13.88	13.98	14.08	14.39	15.47	16.06	16.54	17.32	17.60	17.74
DIC	13.56	13.26	13.36	13.46	13.76	14.83	15.40	15.89	16.66	16.93	17.07
PROM	10.84	10.52	10.63	10.74	11.06	12.20	12.81	13.32	14.13	14.41	14.56
%	100	97.04	98.02	99.01	102.01	112.54	118.17	122.87	130.32	132.92	134.25

4.4.6 CAPACIDAD DE AGUA PROFUNDA (Dw)

La tabla 4.50 muestra el rango de variación del parámetro Dw.

Tabla 4.50 Valores de FactorDw para determinar la sensibilidad del parámetro Dw

Clasificación por altura	Key Dw	FactorDw										
		0	0.5	1	2	4	8	10	20	50	80	100
Alto	2000	0	1000	2000	4000	8000	16000	20000	40000	100000	160000	200000
Medio	8000	0	4000	8000	16000	32000	64000	80000	160000	400000	640000	800000
Bajo	15000	0	7500	15000	30000	60000	120000	150000	300000	750000	1200000	1500000

Para un valor de Dw=0, se pierde la estacionalidad de la curva y los valores son muy pequeños comparados con los observados. Valores pequeños sobreestiman los caudales simulados y valores grandes se aproximan a los observados (figura 4.40).

El porcentaje de caudal para cada valor de variación con respecto del caudal calibrado, se muestra en la tabla 4.52.

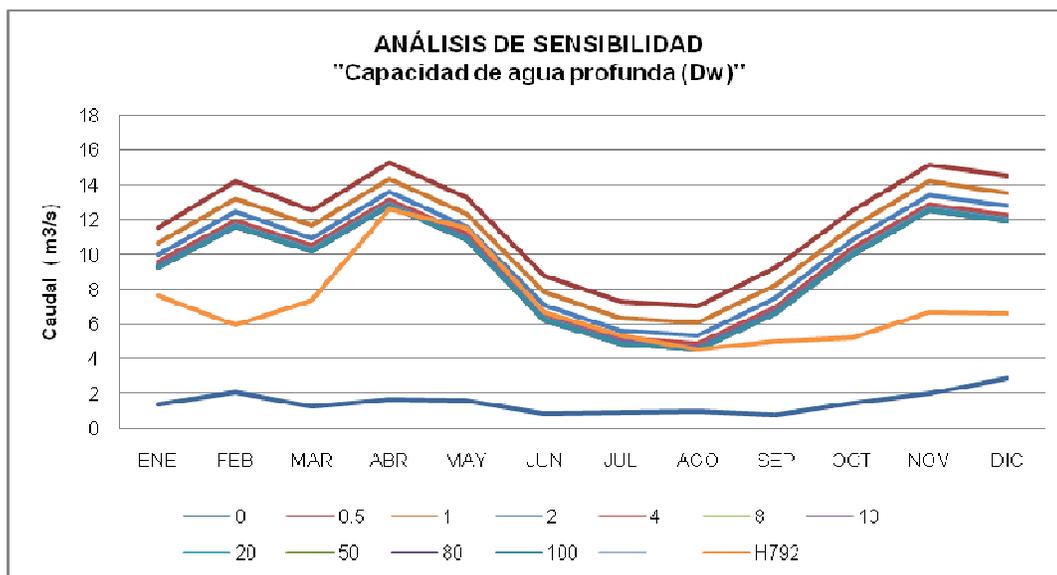


Figura 4.40 Análisis de sensibilidad variando el parámetro Dw sobre la serie multimensual del periodo (1982 – 1995)

Tabla 4.51 Cuantificación de caudales con respecto al caudal calibrado FactorDw=1

MES	CUANTIFICACIÓN DE CAUDAL										
	Dw										
	CALIBRACION 1	0	0.5	2	4	8	10	20	50	80	100
ENE	10.67	1.43	11.58	9.96	9.57	9.39	9.36	9.29	9.25	9.24	9.24
FEB	13.21	2.11	14.23	12.42	11.98	11.78	11.74	11.66	11.62	11.61	11.60
MAR	11.65	1.29	12.58	10.92	10.53	10.34	10.30	10.23	10.19	10.18	10.18
ABR	14.34	1.71	15.31	13.58	13.17	12.97	12.93	12.86	12.81	12.80	12.80
MAY	12.34	1.63	13.29	11.60	11.19	10.99	10.96	10.89	10.84	10.83	10.83
JUN	7.83	0.88	8.81	7.05	6.62	6.41	6.38	6.30	6.26	6.25	6.24
JUL	6.39	0.98	7.35	5.63	5.21	5.01	4.97	4.90	4.85	4.84	4.84
AGO	6.10	1.03	7.07	5.33	4.91	4.70	4.66	4.59	4.54	4.53	4.53
SEP	8.26	0.81	9.26	7.45	7.01	6.80	6.75	6.68	6.63	6.62	6.62
OCT	11.61	1.48	12.59	10.83	10.39	10.18	10.14	10.06	10.02	10.01	10.00
NOV	14.19	2.05	15.20	13.37	12.91	12.69	12.65	12.57	12.52	12.51	12.51
DIC	13.56	2.91	14.54	12.76	12.31	12.09	12.05	11.97	11.93	11.92	11.91
PROM	10.84	1.52	11.82	10.07	9.65	9.45	9.41	9.33	9.29	9.28	9.27
%	100	14.06	108.97	92.90	88.98	87.11	86.75	86.06	85.66	85.56	85.53

4.5 APLICACIÓN DEL MODELO WEAP SOBRE LA CUENCA DEL RIO PASTAZA (HASTA LA JUNTA CON EL RIO PALORA)

Para la aplicación del modelo WEAP sobre la cuenca del río Pastaza, se considera un periodo diferente (1982 – 1989), debido a la falta de información hidrológica para comparar los resultados que se obtienen de la modelación.

A pesar de tener 9 estaciones hidrológicas en la cuenca solo pocas de ellas contienen información y la misma es deficiente. No se tiene una estación en el punto de interés, la junta del río Pastaza con el río Palora, es por eso que la modelación a realizarse se cierra en la estación Pastaza A.J. Encanto (H798).

En la cuenca del río Pastaza se ubica el Embalse de Agoyán, seguido de la Central Hidroeléctrica del mismo nombre y al no contar con amplia información del mismo, no se asegura una buena modelación de la cuenca.

La información del embalse de Agoyán está en la tabla 4.52.

Tabla 4.52 Datos de ingreso del Embalse de Agoyán para la modelación de la cuenca del río Pastaza

DESCRIPCION	VALOR		UNIDAD	
Año de inicio de operación	1987		--	
Capacidad total del reservorio	0.76		Millones de m ³	
Relación entre volumen de reservorio y elevación	<i>Volumen</i>	<i>Elevación</i>	<i>Volumen</i>	<i>Elevación</i>
	0	0	Millones de m ³	m
	0.76	1651	Millones de m ³	m
Mínimo caudal en la turbina	19.4		m ³ /s	
Máximo caudal en la turbina	58.5		m ³ /s	
Caída neta en la turbina	149		m	

Fuente: HIDROAGOYÁN, 2009.

El modelo WEAP tiene varios parámetros de los embalses que no han sido utilizados para esta modelación, ya que los más importantes se detallaron anteriormente.

Además se necesitan las series mensuales de caudales que retornan al río después de la generación de hidroeléctrica, información que no pudo concretarse

hasta el término de este proyecto; por lo que se decide que al río Pastaza retorna la media entre el mínimo y el máximo caudal turbinado, es decir, un caudal igual a $38.95 \text{ m}^3/\text{s}$ (HIDROAGOYÁN, 2009).

Después del ingreso del embalse, se procede con la modelación, aplicando primero los parámetros de calibración de la subcuenca Cutuchi y segundo los parámetros de calibración de la subcuenca Ambato, tratando de evaluar y determinar cuales son los parámetros que se ajustan a la cuenca en general.

4.5.1 MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA CUTUCHI

Al aplicar los parámetros de calibración de la subcuenca Cutuchi para la cuenca del Río Pastaza, hasta donde se tiene una estación y se obtienen los siguientes resultados (figura 4.41 y figura 4.42).

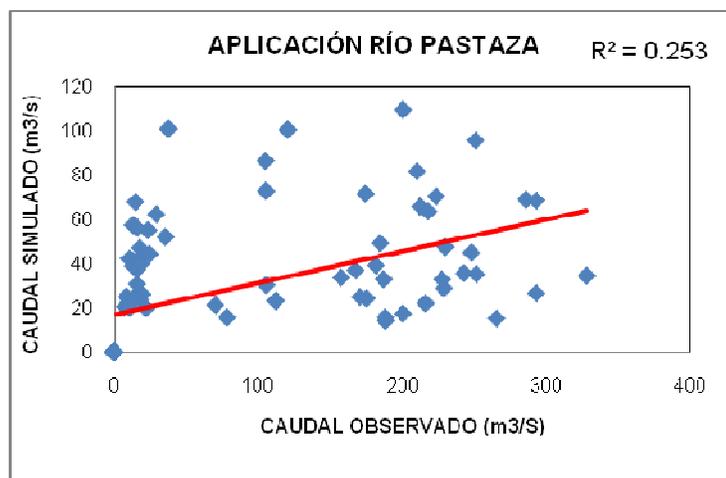


Figura 4.41 Coeficiente de determinación APLICACIÓN RÍO PASTAZA, parámetros de calibración subcuenca Cutuchi

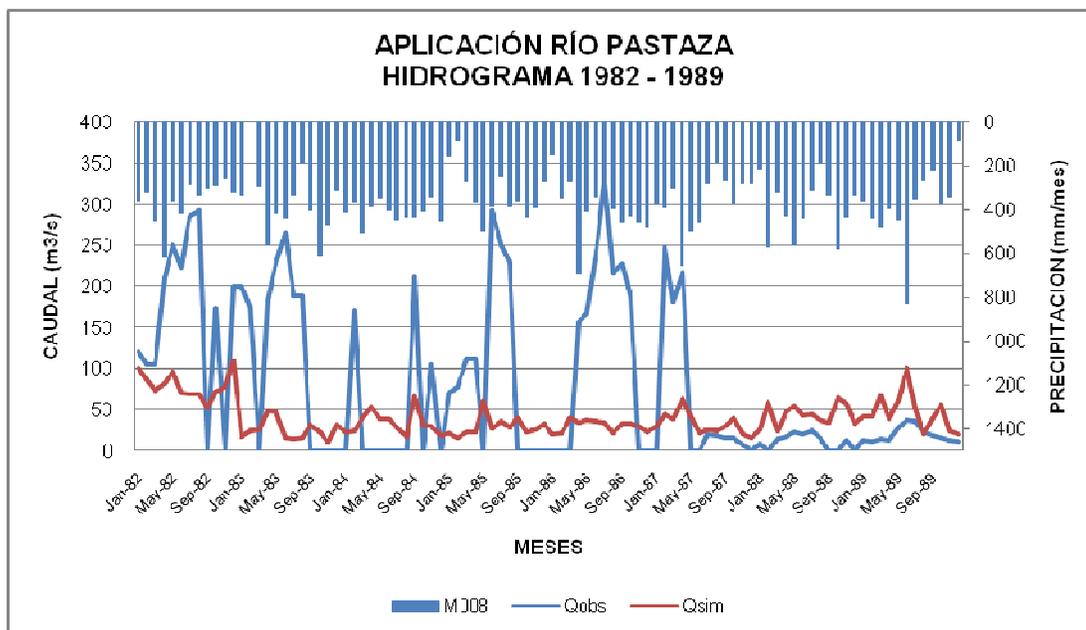


Figura 4.42 Hidrograma obtenido en la APLICACIÓN RÍO PASTAZA, parámetros de calibración subcuenca Cutuchi

Al utilizar los parámetros de calibración de la subcuenca Cutuchi se obtienen los índices de correlación descritos en la tabla 4.54.

Tabla 4.53 Índices de correlación para la aplicación del modelo WEAP en la cuenca del río Pastaza, utilizando los parámetros de calibración de la subcuenca Cutuchi

INDICE	VALOR
R^2	0.253
r	0.503
Ef	0.352
BIAS	15984.5
RMSE	127.4

4.5.2 MODELACION DE LA CUENCA DEL RÍO PASTAZA UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA AMBATO

Utilizando los parámetros de calibración de la subcuenca Ambato, los resultados no deberán ser muy diferentes de los obtenidos en la sección 4.5.1.

Las figuras 4.43 y 4.44 muestran los resultados al utilizar los parámetros de calibración de la subcuenca Ambato.

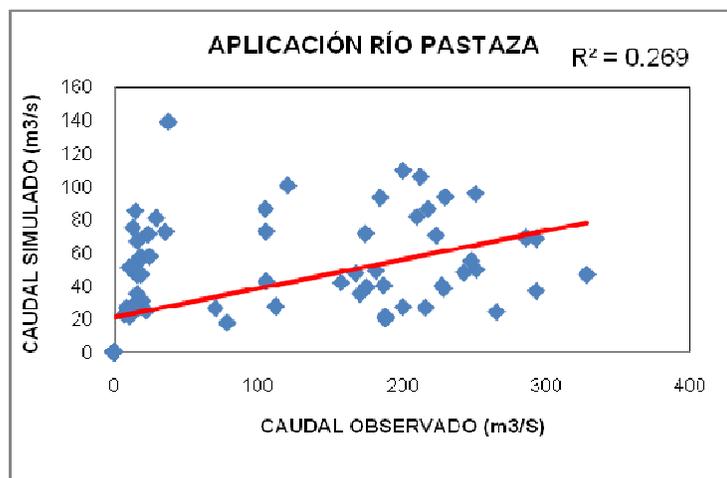


Figura 4.43 Coeficiente de determinación APLICACIÓN RÍO PASTAZA, parámetros de calibración subcuenca Ambato

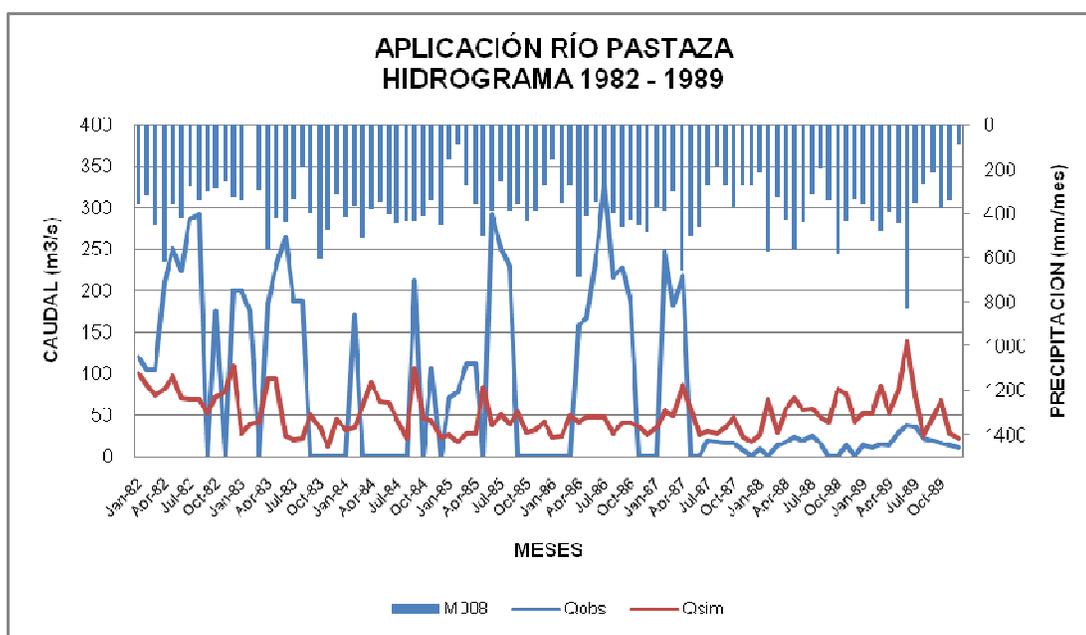


Figura 4.44 Hidrograma obtenido en la APLICACIÓN RÍO PASTAZA, parámetros de calibración subcuenca Ambato

La correlación para esta simulación se determina con los índices de la tabla 4.55.

Tabla 4.54 Índices de correlación para la aplicación del modelo WEAP en la cuenca del río Pastaza, utilizando los parámetros de calibración de la subcuenca Ambato

INDICE	VALOR
R^2	0.269
r	0.519
Ef	0.407
BIAS	14633.0
RMSE	121.9

Al aplicar los parámetros de calibración de las dos subcuencas Cutuchi y Ambato, y no obtener buenos resultados en la aplicación a toda la cuenca, se puede realizar una calibración de subcuencas intermedias ó bajas, según sea el caso.

Es decir; una vez concluida la calibración de las subcuencas aportantes se procede a “cerrar” estas subcuencas reemplazando la modelación hidrológica por el caudal observado en la estación de estas subcuencas. Para aquellos meses con datos faltantes se utiliza el valor del caudal simulado. Al hacer este reemplazo o cierre de las subcuencas se evita arrastrar errores o desviaciones del proceso de calibración que desvirtúen el proceso de calibración de las subcuencas que se encuentran aguas abajo. Se procede entonces con el proceso de calibración de las subcuencas intermedias y bajas, según sea el caso.

Para la estación Pastaza A.J. Encanto (H798), la subcuenca a calibrarse es baja ya que no se cuenta con ninguna otra estación aguas debajo de la misma.

4.5.3 CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA CON EL CIERRE DE LAS SUBCUENCAS APORTANTES

Para la calibración de esta subcuenca se tiene un periodo de 1982–1985, y se realiza el mismo proceso de la calibración de las subcuencas aportantes.

En la prueba 1 de calibración, donde todos los parámetros son igual a (1), se obtiene los resultados de las figuras 4.45 y 4.46.

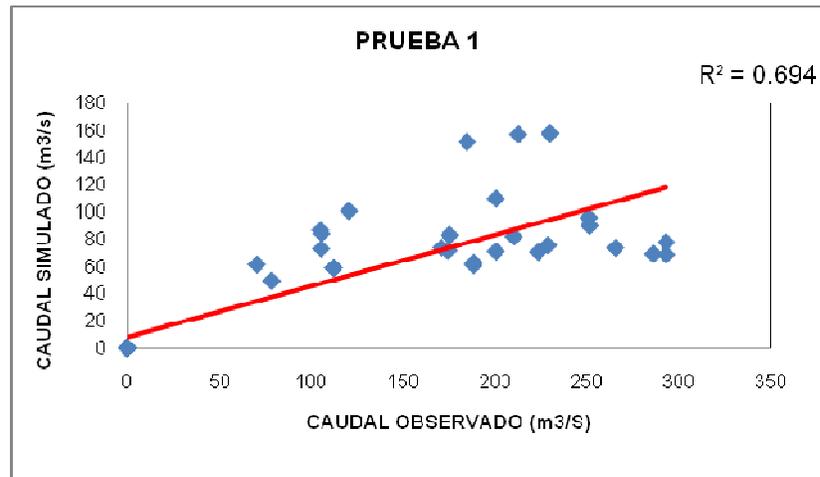


Figura 4.45 Coeficiente de determinación PRUEBA 1, subcuenca baja del río Pastaza

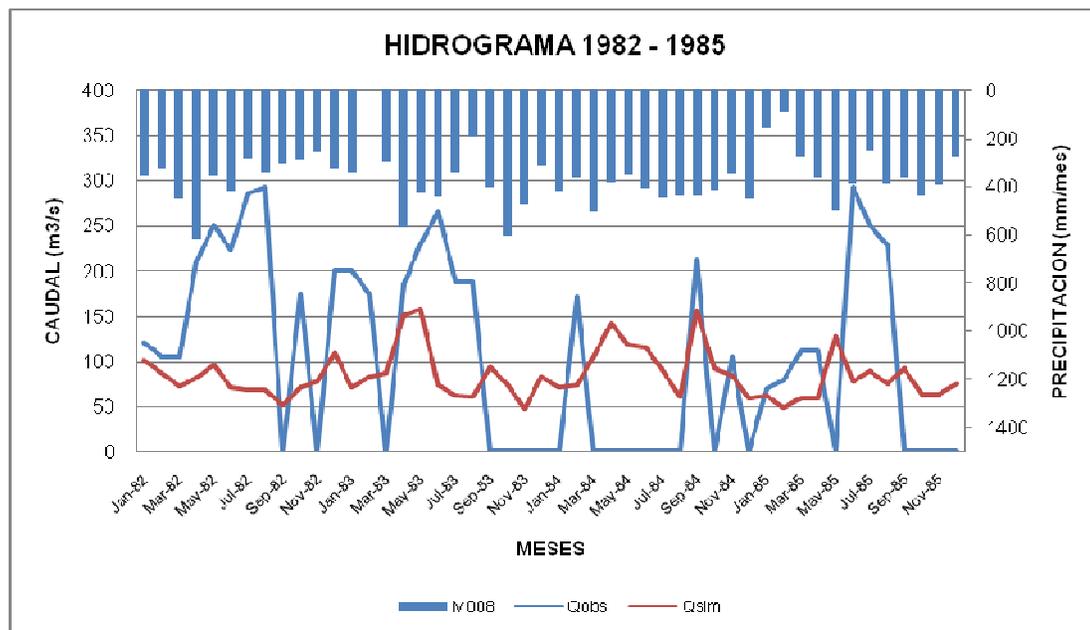


Figura 4.46 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 1, subcuenca baja del río Pastaza

Para las pruebas siguientes se obtienen resultados de la tabla 4.55.

Tabla 4.55 Resultados obtenidos en las pruebas de calibración de la subcuenca baja del río Pastaza

SUPUESTO CLAVE		PRUEBAS DE CALIBRACION (1982-1985)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
FactorSw	ALTO	1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	MEDIO	1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	BAJO	1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
FactorRRF	ALTO	1	1	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3
	MEDIO	1	1	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3
	BAJO	1	1	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3
MultiplicadorKs	ALTO	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
	MEDIO	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
	BAJO	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
FactorKd	ALTO	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1.2
	MEDIO	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1.2
	BAJO	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1.2
Factorpfd	ALTO	1	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2
	MEDIO	1	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2
	BAJO	1	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2
R^2		0.694	0.669	0.648	0.604	0.589	0.578	0.580	0.580	0.548
r		0.833	0.818	0.805	0.777	0.767	0.760	0.762	0.762	0.740
Ef		-2.47	-2.455	-2.357	-2.169	-2.201	-2.252	-2.18	-2.15	-2.02
BIAS		14688.6	14638.2	14221.0	13425.1	13559.2	13777.0	13475.9	13346.3	12783.9
RMSE		123.5	123.3	121.5	118.1	118.7	119.6	118.3	117.7	115.2

Con la prueba 9 de calibración, se obtienen resultados aceptables (figura 4.47 y figura 4.48).

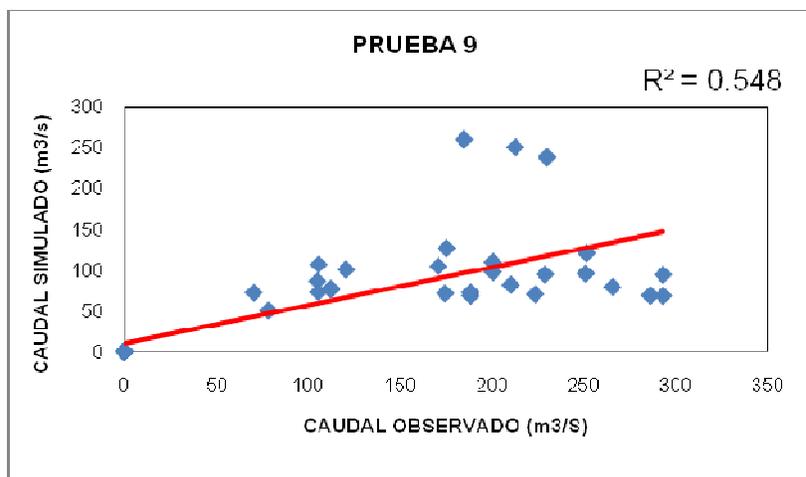


Figura 4.47 Coeficiente de determinación PRUEBA 9, subcuenca baja del río Pastaza

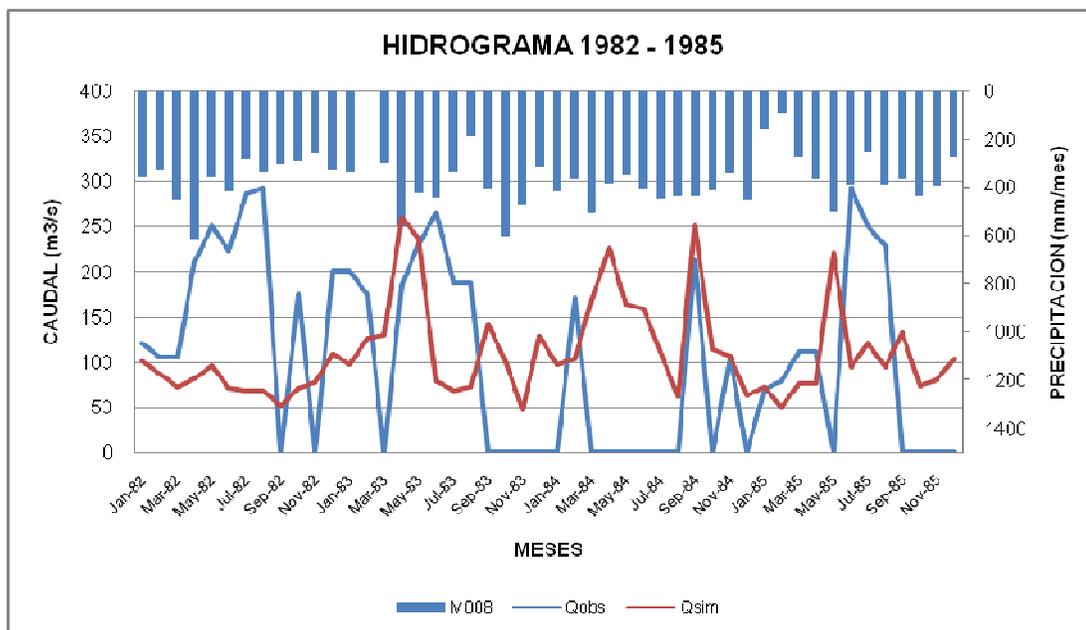


Figura 4.48 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 9, subcuenca baja del río Pastaza

4.5.4 VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA BAJA DEL RÍO PASTAZA CON EL CIERRE DE LAS SUBCUENCAS APORTANTES

Para validar los resultados obtenidos en la calibración se utilizan los parámetros de la Prueba 9 de calibración y un periodo diferente 1986 – 1989 (figura 4.48 y figura 4.49).

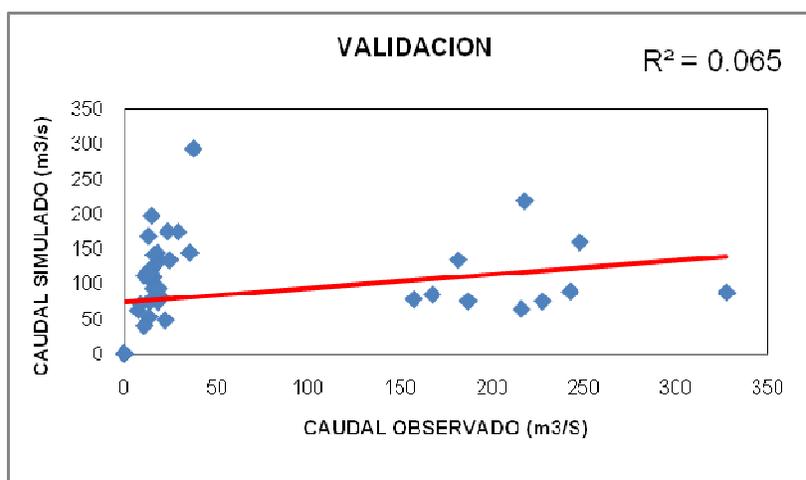


Figura 4.49 Coeficiente de determinación obtenido en la validación de la subcuenca baja del río Pastaza (1986 – 1989)

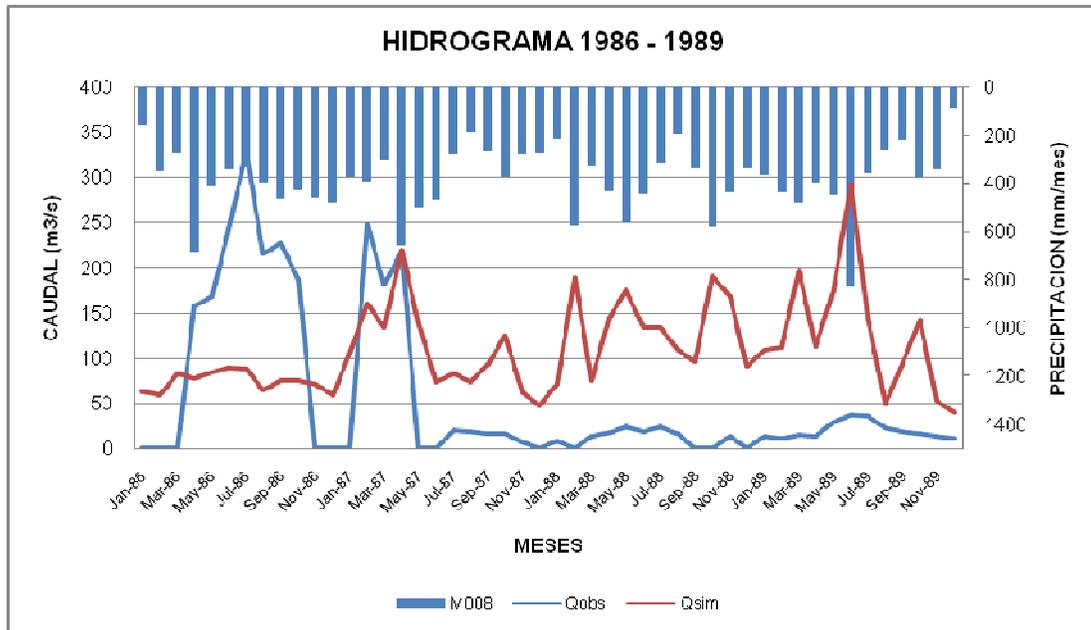


Figura 4.50 Hidrograma obtenido en la validación de subcuenca baja del río Pastaza (1986 – 1989)

Al observar los resultados obtenidos en la validación de la subcuenca baja del río Pastaza, se puede decir que el modelo no responde adecuadamente para esta subcuenca.

4.6 GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE APLICACIÓN

Debido a la variabilidad espacial del medio físico de la cuenca, ya sea por aplicación de políticas de conservación, urbanización, deforestación o cambio en el uso de suelo, es necesaria la generación de escenarios que permitan determinar el efecto de dichas variaciones sobre el comportamiento de la cuenca y específicamente en la generación de caudales a futuro.

Para la generación de escenarios se toman los datos de las series PRECIS-ECHAM, generadas por el Proyecto de Adaptación al Cambio Climático (PACC, 2008), las mismas que cuentan con datos desde el año 1991; es por eso que la generación de los escenarios PRECIS-ECHAM se realizará sobre la subcuenca

Cutuchi que cuenta con información meteorológica e hidrológica del año 1982 al año 2005.

4.6.1 ESCENARIO 1

En el primer escenario se analiza la variación de la precipitación, temperatura y humedad relativa, de acuerdo al escenario A2 de las series PRECIS-ECHAM; es decir que con los gráficos obtenidos se calcula la variación de cada fenómeno meteorológico y se obtiene nuestra serie de ingreso de datos al modelo para dicho escenario (Anexo 2.2).

Los datos fueron obtenidos de los gráficos que se encuentran en la página web del Proyecto de Adaptación al Cambio Climático, a partir de las gráficas (Anexo 2.4) para cada mes del año.

4.6.2 ESCENARIO 2

El escenario 2, no es más que otro escenario de las series PRECIS-ECHAM (B2), pero, con distintos valores de variación para cada fenómeno (Anexo 2.3).

Al correr los escenarios propuestos para el modelo WEAP en la cuenca del río Pastaza, específicamente, en la subcuenca Cutuchi, se obtienen los valores registrados en la tabla 4.57.

La figura 4.51 muestra la variación de caudal en los distintos meses, para los dos escenarios propuestos y escenario referencia (calibrado).

**Tabla 4.56 Generación de caudal según los escenarios propuestos
(Promedio multimensual 1991-2005)**

ESCENARIO	1	2	REFERENCIA	1	2	REFERENCIA
	VOLUMEN Millones de m ³			CAUDAL m ³ /s		
ENERO	25855277.61	20206142.50	24367329.59	9.65	7.54	9.10
FEBRERO	36588293.75	31472134.77	29421399.04	15.12	13.01	12.16
MARZO	38374425.27	37183390.13	35358493.04	14.33	13.88	13.20
ABRIL	42257631.84	34478869.92	34482064.56	16.30	13.30	13.30
MAYO	31772897.74	28618021.01	28346537.49	11.86	10.68	10.58
JUNIO	21489323.58	20178331.94	21392151.62	8.29	7.78	8.25
JULIO	17571712.85	16202471.77	16363126.13	6.56	6.05	6.11
AGOSTO	17732170.95	15569363.45	16163515.11	6.62	5.81	6.03
SEPTIEMBRE	24634139.57	22184971.50	21741726.46	9.50	8.56	8.39
OCTUBRE	32299239.88	27628111.06	26469838.27	12.06	10.32	9.88
NOVIEMBRE	46060456.30	34708324.68	36694173.73	17.77	13.39	14.16
DICIEMBRE	42484617.02	35019324.79	35206697.86	15.86	13.07	13.14
TOTAL	377120186.37	323449457.55	326007052.90	143.94	123.41	124.32

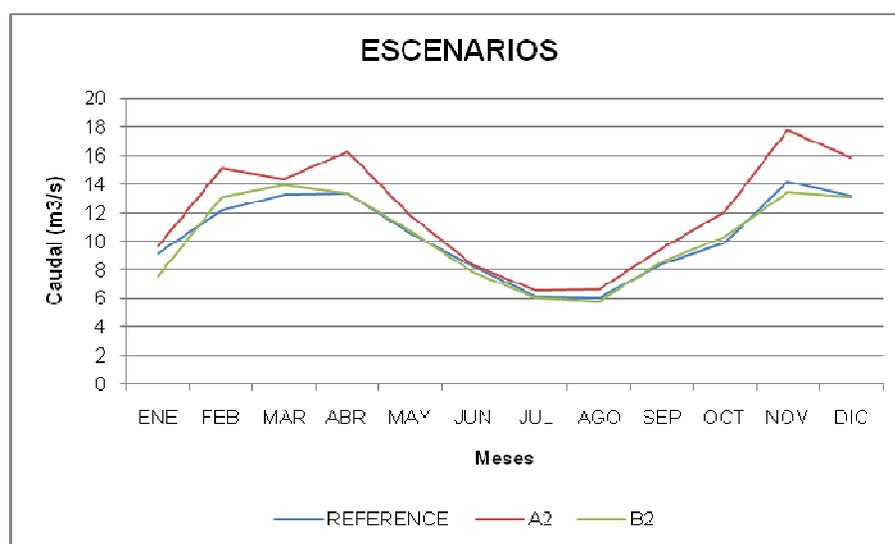


Figura 4.51 Generación de caudal según los escenarios propuestos, para el período 1991-2005

Para una mejor relación de los escenarios con la estación Cutuchi A.J. Yanayacu (H792), a continuación se muestran los gráficos de comparación para cada uno (figura 4.51, figura 4.52 y figura 4.53).

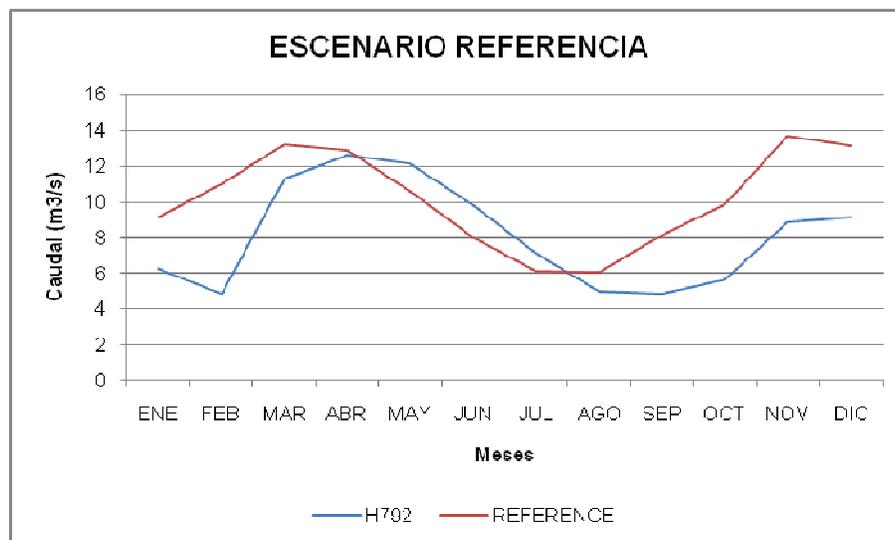


Figura 4.52 Comparación de la Estación H792 con el escenario de referencia (datos de calibración del modelo)

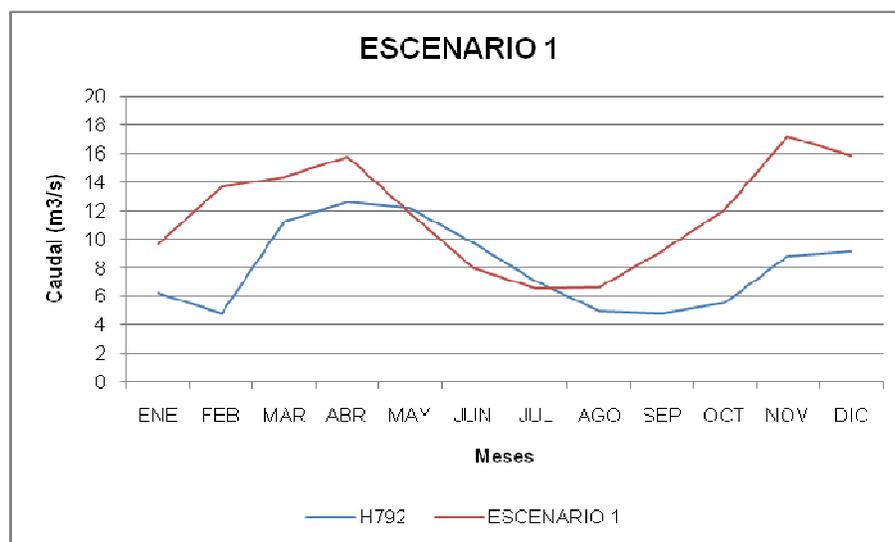


Figura 4.53 Comparación de la Estación H792 con el escenario 1 (Serie PRECIS-ECHAM Escenario A2)

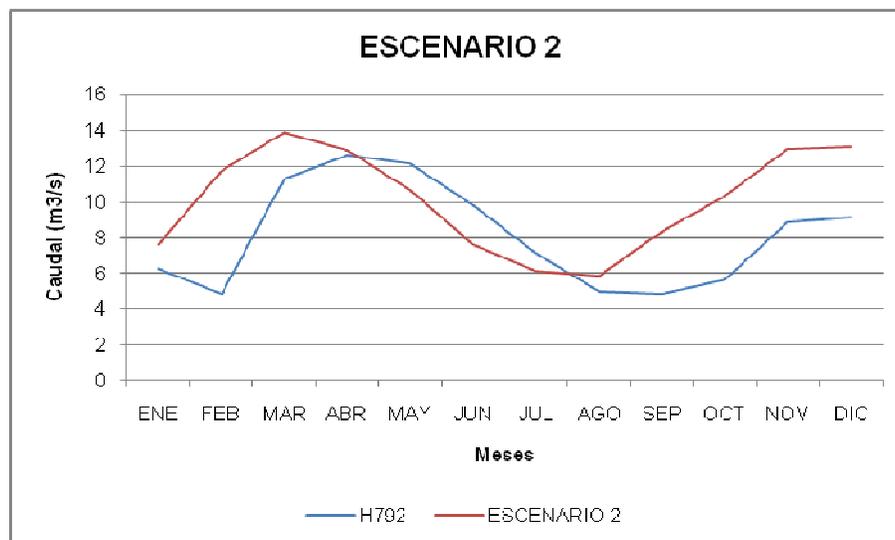


Figura 4.54 Comparación de la Estación H792 con el escenario 2 (Serie PRECIS-Escenario B2)

CAPÍTULO 5

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en la aplicación del modelo WEAP sobre la cuenca del río Pastaza (Anexo 3).

Cabe recordar que para el proceso de calibración del modelo WEAP, se dispuso de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas: (Puyo) M008, Pilahuin (M376), Huambaló (M380) y Alao (M396).

5.1 PROGRAMA WEAP, CALIBRACIÓN DE SUBCUENCAS APORTANTES

En la etapa de calibración del modelo fue necesario realizar varias pruebas para lograr obtener resultados satisfactorios; sin variar precipitación, temperatura y humedad, sino únicamente los parámetros de uso de suelo, como son: Capacidad de Almacenamiento de Agua en la Zona de Raíces (Sw), Factor de resistencia a la escorrentía (RRF), Zona Radicular de Conductividad (Ks), Conductividad Profunda (Kd) y Dirección de Flujo preferente (pfd).

Los tres primeros parámetros mencionados intervienen en la variación de los caudales pico simulados por el modelo y los dos últimos en la variación del caudal base.

Para la subcuenca del río Cutuchi inicialmente no se varió ningún parámetro de los indicados en la sección 4.2.1. En la primera prueba de calibración se obtuvo un $r=0.788$, que indica un buen valor de correlación entre los datos observados y los simulados y un $BIAS=111.2$, indicando una sobreestimación del caudal. Este primer intento, sin variación de los parámetros, nos lleva a una buena correlación pero en el doble del caudal observado (figura 5.1).

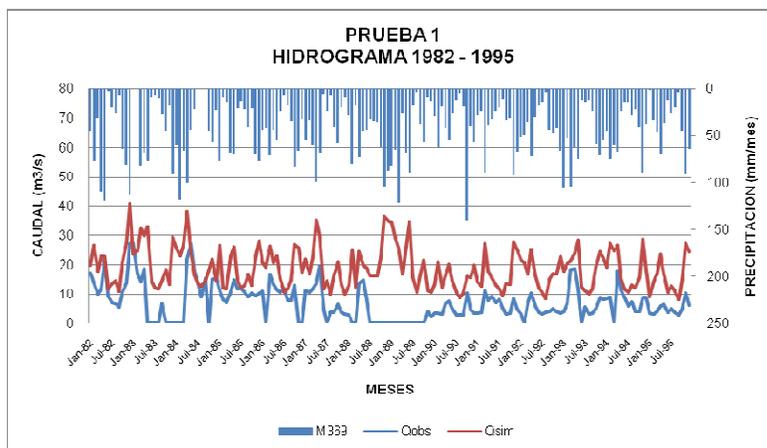


Figura 5.1 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 1, subcuenca Cutuchi

Para la segunda prueba de calibración se varió la conductividad profunda y la dirección de flujo preferente; ya que la primera prueba indicaba sobrestimación del 100%; entonces variando estos parámetros se varía el caudal base que el modelo calcula internamente. Se obtiene $r=0.742$ y $BIAS=88.6$, que indica una buena correlación y una disminución de la sobrestimación del caudal.

En la tercera, cuarta y quinta pruebas de calibración se continúa variando la conductividad profunda y la dirección de flujo preferente, hasta tener valores lo más cercano posibles a los observados, llegando a obtener un $r=0.697$ y un $BIAS=58.7$, que son buenos indicadores que hay buena correlación y disminución en la sobrestimación del caudal (figura 5.2).

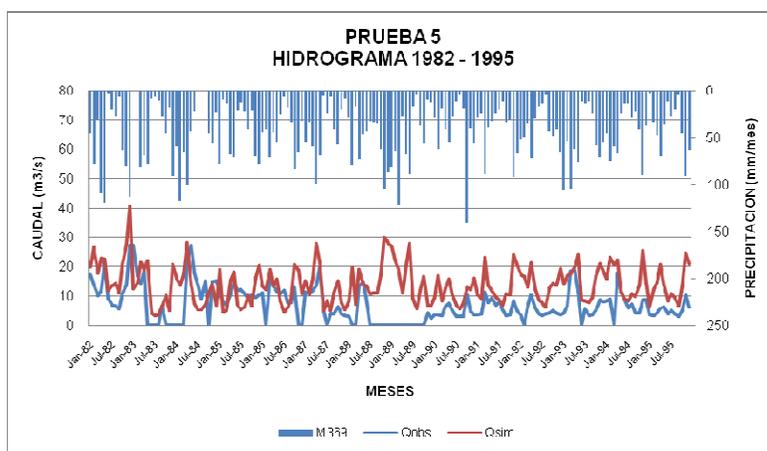


Figura 5.2 Hidrograma obtenido en la PRUEBA 5, subcuenca Cutuchi

Para la sexta prueba de calibración se mantienen los parámetros variados anteriormente y se varía un tercer parámetro, la capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, uno de los parámetros que modifica los caudales pico. En este caso se obtiene $r=0.698$ y $BIAS=59.8$, que cumplen con el objetivo, mantener una buena correlación y disminuir la sobrestimación de los caudales.

Para la octava prueba de calibración, se mantienen los parámetros variados de la séptima prueba y se varía otro parámetro, el factor de resistencia a la escorrentía y se obtiene un valor de $r=0.686$ y de $BIAS=53.6$, cumpliéndose una vez más el objetivo.

En la décima prueba de calibración, se mantienen los parámetros variados de la novena prueba y se varía el último parámetro considerado, la zona radicular de conductividad, llegando a obtener un $r=0.626$ y un $BIAS=41.2$.

Hay que destacar que en el proceso de calibración, el índice de correlación (r) fue disminuyendo en un rango de (0.8) a (0.6), pero no descarta la posibilidad de una buena correlación entre los datos observados y los datos simulados o calculados, ($BIAS$) disminuyó a un porcentaje que para el modelo puede ser aceptable por las falencias que presenta, del (111.2%) de sobrestimación a tan solo el (40%) es una cifra significativa, y ($RMSE$) no se acerca a (0), pero es el menor valor que se pudo calcular de entre todas las pruebas de calibración realizadas.

Al realizar la validación del modelo sobre la subcuenca del río Cutuchi, se realizó tres pruebas, sin variar ninguno de los parámetros obtenidos en la décima prueba de calibración, pero si considerando diferentes períodos de validación.

Tabla 5.1 Resultados de R^2 y R obtenidos para el periodo de validación de la subcuenca Cutuchi

PERIODO	R^2	r
1996 - 2005	0.186	0.431
1997 - 2005	0.389	0.624
2002 - 2005	0.683	0.826

De la tabla 5.1, se obtienen valores de r dentro de un rango de 0.8 a 0.6, confirmando que la etapa de calibración se realizó adecuadamente.

La tabla 5.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos en cada prueba de calibración y en la etapa de verificación de la subcuenca aportante del río Cutuchi. De la misma tabla se puede observar que el caudal pico es el mismo para todas las pruebas, correspondiente a diciembre de 1982, el volumen total de las pruebas realizadas es mayor que el volumen total observado, de ahí la sobrestimación del método BIAS.

Tabla 5.2 Resumen de datos de respuesta de la subcuenca Cutuchi-WEAP

	CAUDAL PICO (m ³ /s)	VOLUMEN TOTAL (Mm ³)
DATOS OBSERVADOS (1982 - 1995)	27.38	3144076992.00
PRUEBA 1	40.57	8454642775.36
PRUEBA 2	40.57	7584774578.45
PRUEBA 3	40.57	6787564153.71
PRUEBA 4	40.57	6353616995.39
PRUEBA 5	40.57	6242990547.04
PRUEBA 6	40.57	6235561517.28
PRUEBA 7	40.57	6213525942.11
PRUEBA 8	40.57	5979981498.82
PRUEBA 9	40.57	5783370330.58
PRUEBA 10	40.57	4777719137.76
DATOS OBSERVADOS (1997 - 2005)	27.99	2563503724.80
VALIDACIÓN	19.06	2271292346.71

Para la calibración de la subcuenca del río Ambato, se tomó un periodo diferente de la subcuenca del río Cutuchi, y en la primera prueba de calibración, sin variar ningún parámetro antes descrito, se obtiene un ($r=0.709$) y un (BIAS=17.4), que indica una buena correlación y poca sobrestimación de los caudales.

En la segunda y tercera prueba de calibración se varían dos parámetros, la conductividad profunda y la dirección de flujo preferente, llegando a obtenerse un ($r=0.647$) y un ($BIAS=11.4$.)

En las siguientes pruebas de calibración se mantienen los parámetros que ya fueron variados y se continúan modificando los demás, es decir, que para la sexta prueba de calibración de la subcuenca Ambato ya se variaron los cinco parámetros considerados, obteniendo ($r=0.637$) y ($BIAS=10.5$).

Es decir que para la subcuenca del río Ambato se obtienen mejores resultados, la subcuenca ya calibrada tiene un buen índice de correlación ($r=0.637$), una eficiencia lo más posible cercana a 0 ($Ef=0.19$), una sobrestimación pequeña de los caudales ($BIAS=10.5\%$) y un error medio cuadrático pequeño en comparación con los otros obtenidos ($RMSE=3.3$).

En la validación de la subcuenca del río Ambato, los valores son ($r=0.453$), ($BIAS=29.9$) y ($RMSE=5.6$), que comparados con los resultados obtenidos en la décima prueba de calibración de la subcuenca del río Cutuchi, son buenos.

Tabla 5.3 Resumen de datos de respuesta de la subcuenca Ambato-WEAP

	CAUDAL PICO (m ³ /s)	VOLUMEN TOTAL (Mm ³)
DATOS OBSERVADOS (1982 - 1986)	15.43	666782496.00
PRUEBA 1	19.13	1028845861.74
PRUEBA 2	17.76	901455122.09
PRUEBA 3	15.87	727742857.46
PRUEBA 4	14.09	712091572.54
PRUEBA 5	15.20	744210608.40
PRUEBA 6	13.11	684151782.20
DATOS OBSERVADOS (1987 - 1989)	16.99	510361344.00
VALIDACIÓN	10.64	361892872.06

De la tabla 5.3 se observa que en la etapa de validación el caudal pico y el volumen total generado son menores que el caudal pico y el volumen total

observados, y en la etapa de calibración se puede decir que los caudales pico generados casi se ajustan al caudal pico observado.

5.2 APLICACIÓN DEL MODELO WEAP

Una vez calibradas las subcuencas aportantes, se toma los parámetros de las dos subcuencas y se los aplica sobre la cuenca en estudio para analizar los resultados que se obtienen.

Al utilizar los parámetros obtenidos de la subcuenca del río Cutuchi se obtiene: ($r=0.503$) y ($BIAS=15984.5$), es decir, una buena correlación pero una exagerada sobrestimación de caudales.

Utilizando los parámetros de la subcuenca del río Ambato: ($r=0.519$) y ($BIAS=14633$), una vez más, buena correlación y nuevamente una exagerada sobrestimación de los caudales.

Es por estas razones, que se aplica la teoría del cierre de cuencas aportantes, para la calibración de cuencas intermedias, y el cierre de cuencas intermedias, para la calibración de cuencas bajas; de forma que como no se tienen más subcuencas en el modelo de la cuenca del río Pastaza, se cierran las cuencas aportantes y se calibra la cuenca baja.

Se realizan nueve pruebas de calibración, variando los cinco parámetros respectivos, pero es difícil obtener buenos o excelentes resultados sin contar con información hidrológica, es decir, caudales de descarga mensuales de la Central Hidroeléctrica Agoyán (específicamente San Francisco). Esta información interviene para la comparación exacta de caudales observados y los caudales generados aguas abajo de la descarga, con lo cual la aplicación del modelo sería mejor. Por esta razón se toma en cuenta solo el coeficiente de correlación (r).

En la primera prueba, no se varía ningún parámetro, obteniéndose un ($r=0.833$). En las pruebas siguientes (de la segunda a la sexta prueba de

calibración), se varían los parámetros que corresponde a la variación de los caudales pico, obteniéndose un ($r=0.76$), y en las tres pruebas siguientes, se varían los parámetros de variación del caudal base, llegando a un ($r=0.74$); encontrándose (r) en el rango antes mencionado, es decir de entre (0.6 y 0.8).

5.3 ESCENARIOS

Usando las series PRECIS-ECHAM, se tiene dos escenarios A2 y B2, casos aplicables para la subcuenca aportante del Cutuchi, ya que contiene datos del año 1991 en adelante.

Se disponen correctamente los archivos necesarios de precipitación, temperatura y humedad relativa usando las tablas 5.4 a la tabla 5.9, según sea el escenario.

Tabla 5.4 Valores para corregir los datos de precipitación del Escenario 1

VALORES DEL CAMBIO EN % PORCENTAJE DE LA PRECIPITACION												
ESCENARIO A2												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	-24.0	-10.0	-10.0	10.0	50.0	-19.2	69.0	-	-	-	-	-
1992	-6.0	50.0	6.7	13.3	-10.0	-20.0	46.5	-14.2	-6.3	-10.0	40.0	64.3
1993	-34.0	-1.3	21.3	-3.3	-19.2	-15.8	27.0	-8.3	-15.0	14.4	68.9	0.0
1994	-16.0	22.7	-20.0	-30.0	-35.0	-7.5	4.5	40.0	5.0	1.3	20.0	0.7
1995	120.0	46.7	24.0	13.3	20.0	-9.2	-40.5	31.7	-15.0	39.4	100.0	47.1
1996	-18.0	-22.7	14.0	25.0	14.2	27.5	-36.0	0.0	0.0	8.1	-6.7	-40.0
1997	21.0	20.0	21.3	-13.3	11.7	0.0	-24.0	36.7	15.0	13.8	24.4	7.1
1998	22.0	60.0	-11.3	8.3	32.5	-40.0	-25.5	3.3	-2.5	42.5	6.7	21.4
1999	6.0	54.0	-4.0	-13.3	23.3	-35.0	12.0	0.0	18.8	15.0	20.0	40.0
2000	-20.0	36.7	-40.0	6.7	16.7	-25.0	34.5	-15.8	18.8	30.0	-8.9	-37.9
2001	-10.0	32.0	30.0	-5.8	-12.5	-10.0	0.0	-2.5	30.0	-3.1	47.8	-27.1
2002	8.0	-7.3	20.0	40.0	-27.5	-20.0	30.0	-26.7	-13.8	13.8	-13.3	53.6
2003	20.0	2.7	16.7	73.3	40.0	-21.7	40.5	-11.7	2.5	56.3	36.7	57.1
2004	12.0	12.7	16.0	48.3	0.0	48.3	-10.5	3.3	-1.3	40.0	20.0	17.1
2005	-2.0	-26.0	-6.0	80.0	4.2	35.0	90.0	23.3	60.0	67.5	-25.6	32.9

Fuente: PRECIS-ECHAM, A2, PACC, 2009.

Tabla 5.5 Valores para corregir los datos de temperatura del Escenario 1

VALORES DEL CAMBIO EN TEMPERATURA (GRADOS)												
ESCENARIO A2												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	-0.304		-0.430	0.170	-0.070	0.200	0.600	-	-	-	-	-
1992	0.600	0.420	0.770	0.500	0.260	0.330	0.570	0.120	0.260	0.400	0.600	0.300
1993	1.140	0.900	1.000	0.490	0.490	0.460	0.470	0.460	0.690	0.660	0.730	1.120
1994	0.190	0.000	0.440	0.370	0.540	0.500	0.600	0.390	0.420	0.600	0.400	0.320
1995	1.570	1.250	1.090	0.740	0.500	0.490	0.700	0.740	0.820	1.120	1.400	1.400
1996	0.690	0.830	0.590	0.780	0.600	0.800	0.900	0.940	0.970	0.720	1.000	0.320
1997	1.310	0.910	0.600	0.620	0.400	0.910	0.570	1.200	1.160	1.280	1.400	1.000
1998	0.610	0.300	0.730	0.550	0.330	0.630	0.990	0.820	0.920	0.830	0.800	0.660
1999	1.600	0.950	1.130	0.800	0.730	0.580	0.840	0.800	0.990	1.320	1.200	1.400
2000	0.490	0.160	0.810	0.400	0.680	0.600	0.600	0.300	0.690	0.740	0.400	0.450
2001	1.260	0.770	0.810	0.540	0.500	0.400	0.840	0.530	0.690	1.080	1.000	0.800
2002	0.240	0.000	0.360	0.200	0.440	0.460	1.100	0.900	0.800	0.650	0.530	0.400
2003	1.830	1.500	1.340	0.700	0.830	0.690	0.770	1.200	1.000	1.400	1.600	1.700
2004	0.510	0.600	0.590	0.600	0.800	0.740	0.770	0.950	0.850	0.900	0.660	0.710
2005	1.390	0.990	1.500	1.200	1.400	1.510	1.500	1.370	1.260	1.070	1.280	1.030

Fuente: PRECIS-ECHAM, A2, PACC, 2009.

Tabla 5.6 Valores para corregir los datos de humedad relativa del Escenario 1

VALORES DEL CAMBIO EN % PORCENTAJE DE LA HUMEDAD RELATIVA												
ESCENARIO A2												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	-0.100	0.080	-0.370	-1.110	1.000	0.000	-	-	-	-	-	-
1992	0.670	0.140	-0.350	1.000	-2.000	-2.140	1.530	0.610	-1.910	-1.000	0.120	0.190
1993	-1.400	-0.140	0.130	0.500	-0.450	-1.770	0.530	-1.000	-0.220	-1.320	1.960	-1.090
1994	0.000	-0.920	-0.500	-2.570	-0.590	-1.000	-0.400	-1.000	0.430	-1.500	0.500	-1.500
1995	1.900	2.500	1.000	-0.250	-0.860	-1.550	-3.000	-0.700	-2.000	0.250	1.120	1.590
1996	0.230	2.440	0.000	-0.320	-0.230	-0.770	-4.730	-0.740	-2.570	1.000	0.270	-1.720
1997	0.000	1.000	0.740	-1.640	0.640	-0.180	-2.670	0.390	-0.430	-0.500	-0.500	-0.220
1998	0.330	3.000	-0.070	-0.360	-0.550	-0.450	-1.530	-1.830	-1.000	0.000	1.000	2.340
1999	-0.370	0.000	-1.370	-0.250	-1.360	-2.140	-0.270	-1.130	-0.650	-2.000	-1.310	0.000
2000	-2.500	1.500	-1.46	0.500	-0.140	-2.500	1.000	-0.610	-1.610	1.500	-1.380	-1.250
2001	-1.000	0.140	0.090	-0.710	-1.320	-0.910	-1.470	1.390	0.000	-1.320	0.500	-0.500
2002	-0.270	-0.500	1.500	0.000	-2.500	-2.640	-1.870	-0.520	0.090	-0.320	-3.000	1.720
2003	1.500	1.220	-0.500	1.430	2.000	-2.910	-0.400	0.740	0.000	1.250	1.500	0.690
2004	2.470	1.220	1.000	0.750	1.000	0.770	-0.800	1.260	-2.570	0.000	-1.380	1.000
2005	-3.000	0.250	0.220	1.110	1.730	2.320	1.000	2.000	0.170	2.000	2.000	1.280

Fuente: PRECIS-ECHAM, A2, PACC, 2009.

Tabla 5.7 Valores para corregir los datos de precipitación del Escenario 2

VALORES DEL CAMBIO EN % PORCENTAJE DE LA PRECIPITACION												
ESCENARIO B2												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	-60.0	-32.8	-50.0	-10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
1992	-21.1	15.6	-10.0	-30.0	10.8	-11.2	-10.5	-12.7	-3.9	-20.0	1.1	18.9
1993	-43.3	0.0	13.6	-20.0	40.0	-12.0	3.0	40.0	6.7	-2.2	-2.2	10.0
1994	-6.7	2.8	10.0	-6.7	29.2	-36.0	105.0	20.0	10.0	16.7	-10.0	0.0
1995	2.2	-3.9	2.1	-20.0	-15.0	-30.0	90.0	-27.3	20.0	5.0	0.0	-20.0
1996	-27.8	15.6	2.1	20.0	0.0	-2.4	-34.5	11.8	-22.2	-10.0	-44.4	-5.6
1997	-22.8	30.0	-30.0	-10.0	44.2	-20.0	-43.5	9.1	-37.8	28.3	-12.2	-10.0
1998	-21.7	33.9	-3.6	14.4	20.0	-31.2	-34.5	-29.1	-20.0	10.0	-1.7	17.8
1999	-37.2	7.2	22.9	27.2	-14.2	-28.8	-33.0	-48.2	22.2	-10.0	12.2	-40.0
2000	-55.6	-10.0	50.0	0.0	-23.3	30.4	-12.0	-40.0	14.4	20.0	16.7	-38.9
2001	-55.6	33.9	0.0	0.0	-40.0	8.8	3.0	-34.5	-12.8	-10.0	-28.9	0.0
2002	-10.0	-30.0	-14.3	13.3	-51.7	-20.0	-12.0	0.0	5.6	30.0	-10.0	38.3
2003	28.9	40.0	32.9	-25.6	30.0	6.4	-27.0	80.0	35.6	40.0	20.0	30.0
2004	-48.3	-10.0	5.0	-5.6	20.0	-12.0	-9.0	68.2	7.8	-7.8	-20.0	43.3
2005	-41.7	30.0	5.7	21.1	14.2	-15.2	-7.5	8.2	-6.1	-3.3	0.0	20.0

Fuente: PRECIS-ECHAM, A2, PACC, 2009.

Tabla 5.8 Valores para corregir los datos de temperatura del Escenario 2

VALORES DEL CAMBIO EN TEMPERATURA (GRADOS)												
ESCENARIO B2												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	-0.120	0.400	0.600	0.440	0.600	0.220	-	-	-	-	-	-
1992	0.120	0.350	0.330	0.470	0.570	0.410	0.300	0.400	0.340	0.400	0.150	0.290
1993	1.270	0.800	0.800	0.670	0.680	0.650	0.880	0.800	0.700	0.710	0.680	0.660
1994	0.300	0.000	0.700	0.350	0.550	0.400	0.670	0.620	0.430	0.750	0.480	0.300
1995	1.230	0.900	0.930	0.550	0.690	0.330	0.580	0.700	0.480	0.810	0.940	0.950
1996	0.850	0.880	0.600	0.820	0.750	0.800	0.830	0.990	0.660	0.880	0.490	0.740
1997	0.430	0.200	0.440	0.760	0.990	0.880	1.000	1.000	0.840	0.950	0.600	0.500
1998	1.630	1.200	1.000	1.000	1.180	0.520	0.700	0.940	1.000	1.200	1.200	1.100
1999	0.330	0.280	0.970	0.550	0.500	0.050	0.240	0.400	0.270	0.490	0.350	0.380
2000	0.680	1.000	0.720	0.650	0.500	0.250	0.290	0.400	0.330	0.630	0.830	0.800
2001	0.780	0.510	0.630	0.400	0.400	0.520	0.600	0.520	0.360	0.850	0.530	0.360
2002	0.070	0.000	0.620	0.350	0.530	0.730	1.100	0.750	0.800	0.450	0.830	0.400
2003	2.230	1.600	1.260	0.900	0.800	0.890	1.200	0.950	1.000	1.040	1.600	1.740
2004	-0.300	0.200	0.000	0.250	0.380	0.410	0.800	0.720	0.650	0.750	0.560	0.100
2005	1.200	0.200	0.600	0.800	0.380	0.470	0.570	0.780	0.300	1.000	1.000	1.200

Fuente: PRECIS-ECHAM, A2, PACC, 2009.

Tabla 5.9 Valores para corregir los datos de humedad relativa del Escenario 2

VALORES DEL CAMBIO EN % PORCENTAJE DE LA HUMEDAD RELATIVA												
ESCENARIO B2												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1991	-5.250	-0.750	-3.000	-1.500	1.500	-2.700	-	-	-	-	-	-
1992	-0.810	-0.860	-0.500	-3.250	-0.300	-1.200	-1.500	-1.100	-0.300	-3.000	0.500	2.000
1993	-2.000	-0.190	-0.500	-1.500	1.100	-1.000	-0.640	2.000	-0.800	-0.800	-0.400	1.100
1994	-0.500	0.810	-0.180	0.250	1.500	-2.500	-0.070	1.500	0.300	0.000	-1.300	1.100
1995	0.650	-1.000	-0.110	-1.770	-1.000	-1.800	-0.140	-1.000	0.800	-0.200	1.000	-1.000
1996	-2.000	0.330	0.570	-0.230	-1.000	-0.600	-2.000	1.000	-1.100	-0.300	-6.000	0.600
1997	-0.850	1.500	-2.500	-0.500	2.000	-1.900	-2.290	0.800	-3.600	0.500	-1.100	-1.500
1998	-1.690	1.440	1.250	0.810	1.900	-3.800	-2.500	0.000	-1.800	0.100	0.500	0.300
1999	-1.650	-1.670	0.860	1.500	-0.200	-4.500	-3.210	-2.600	1.400	0.400	1.700	-2.400
2000	-4.120	-1.000	1.68	0.500	-3.000	-1.000	-1.750	-1.800	1.000	0.900	0.900	-6.000
2001	-4.310	1.000	2.360	1.650	-2.900	-1.500	-0.180	-0.800	-1.000	0.000	0.100	-1.500
2002	0.000	-0.390	-1.000	0.730	-3.200	-0.900	-2.000	-0.700	-1.200	2.000	-0.100	1.400
2003	0.310	0.360	1.000	-1.500	1.000	0.000	-2.000	3.000	1.700	0.200	0.400	0.700
2004	-2.000	-1.000	1.500	-1.620	1.700	-1.700	-0.110	3.000	2.100	-0.900	-4.000	3.500
2005	-3.750	1.750	0.500	0.500	1.100	-2.300	-1.500	0.500	0.800	-1.800	0.000	1.200

Fuente: PRECIS-ECHAM, A2, PACC, 2009.

Al modelar los escenarios, se puede ver claramente que para el periodo 1991 – 2005, los promedios multimensuales de toda la serie tienen una tendencia parecida al escenario referencia (llamado de referencia, porque es allí donde se realiza la calibración o donde se aplican las variaciones de parámetros), pero el Escenario 1(A2) distorsiona más de la línea de referencia.

De la tabla 5.10 se puede observar que el escenario 2 se ajusta mejor a la tendencia del escenario referencia ya que solo se aleja de la curva un 5%, a excepción del mes de enero que hay un 20% de alejamiento; y el escenario 1 considera mayores caudales que los obtenidos en el escenario referencia.

Comparando los tres escenarios, referencia, escenario 1 y escenario 2, con los datos de la estación Cutuchi A.J. Yanayacu H792 se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 5.10 Porcentaje de caudal de los Escenarios 1 y 2, con respecto al escenario de referencia

ESCENARIO	1	2	REFERENCE	1	2
	CAUDAL m3/s			% CAUDAL con respecto al escenario referencia	
ENERO	9.65	7.54	9.10	106.11	82.92
FEBRERO	15.12	13.01	12.16	124.36	106.97
MARZO	14.33	13.88	13.20	108.53	105.16
ABRIL	16.30	13.30	13.30	122.55	99.99
MAYO	11.86	10.68	10.58	112.09	100.96
JUNIO	8.29	7.78	8.25	100.45	94.33
JULIO	6.56	6.05	6.11	107.39	99.02
AGOSTO	6.62	5.81	6.03	109.70	96.32
SEPTIEMBRE	9.50	8.56	8.39	113.30	102.04
OCTUBRE	12.06	10.32	9.88	122.02	104.38
NOVIEMBRE	17.77	13.39	14.16	125.53	94.59
DICIEMBRE	15.86	13.07	13.14	120.67	99.47

Tabla 5.11 Porcentaje de caudal de los Escenarios Referencia, 1 y 2, con respecto al caudal observado (H792)

H792	REFERENCIA	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	REFERENCIA	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
CAUDAL m3/s				% CAUDAL con respecto al caudal observado		
ENE	6.25	9.10	9.65	7.54	145.60	120.74
FEB	4.82	10.98	13.66	11.75	227.90	243.78
MAR	11.23	13.20	14.33	13.88	117.55	123.61
ABR	12.59	12.87	15.78	12.87	102.26	102.26
MAY	12.13	10.58	11.86	10.68	87.24	88.07
JUN	9.75	7.99	8.02	7.53	81.96	77.31
JUL	7.08	6.11	6.56	6.05	86.30	85.45
AGO	4.98	6.03	6.62	5.81	121.19	116.73
SEP	4.85	8.12	9.20	8.28	167.48	170.89
OCT	5.59	9.88	12.06	10.32	176.77	184.51
NOV	8.84	13.70	17.20	12.96	154.99	146.60
DIC	9.13	13.14	15.86	13.07	143.92	143.15

De la tabla 5.11 se observa claramente que los datos observados no tienen una buena correlación con los datos obtenidos en los tres escenarios, pero sin embargo, después del proceso de calibración y validación, se obtienen buenas correlaciones con el escenario referencia, y éste a su vez interactúa con los

escenarios del modelo de aplicación en estudio. Para los tres casos hay una sobrestimación de caudales, a excepción de algunos casos donde se los subestima; es decir, que los escenarios generados en base a las series PRECIS-ECHAM, generan caudales mayores o los caudales observados.

De la tabla 5.12, se puede ver que los volúmenes generados por los dos escenarios, son mayores, en algunos casos hasta el doble.

Tabla 5.12 Porcentaje de volumen de los Escenarios 1 y 2, con respecto al caudal observado

MES	H792 Mm ³	ESCENARIO 1 Mm ³	ESCENARIO 2 Mm ³	ESCENARIO 1 %	ESCENARIO 2 %
ENE	16735357.44	25855277.61	20206142.5	154.49	120.74
FEB	12909818.88	36588293.75	31472134.77	283.41	243.78
MAR	30080039.04	38374425.27	37183390.13	127.57	123.61
ABR	33718464	42257631.84	34478869.92	125.32	102.26
MAY	32493813.12	31772897.74	28618021.01	97.78	88.07
JUN	26101094.4	21489323.58	20178331.94	82.33	77.31
JUL	18960929.28	17571712.85	16202471.77	92.67	85.45
AGO	13337360.64	17732170.95	15569363.45	132.95	116.73
SEP	12981945.6	24634139.57	22184971.5	189.76	170.89
OCT	14974041.6	32299239.88	27628111.06	215.70	184.51
NOV	23675155.2	46060456.3	34708324.68	194.55	146.60
DIC	24462541.44	42484617.02	35019324.79	173.67	143.15

Una explicación para la generación de mayores volúmenes y caudales en los escenarios, puede radicar en el tipo de información recolectada y el tratamiento que se dio a ésta.

Al comparar los dos escenarios entre sí (Tabla 5.13), se puede que los volúmenes del escenario 2 son menores que los volúmenes del escenario 1, sucediendo lo contrario al comparar el escenario 1 con respecto al escenario 2. Pero los dos escenarios generan volúmenes y caudales mayores a los observados de la estación Cutuchi A.J. Yanayacu (H792)

Tabla 5.13 Porcentaje de volumen del Escenario 2 con respecto a 1 y viceversa

MES	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	2 con respecto a 1	1 con respecto a 2
	Mm ³	Mm ³	%	%
ENE	25855277.61	20206142.5	78.15	127.96
FEB	36588293.75	31472134.77	86.02	116.26
MAR	38374425.27	37183390.13	96.90	103.20
ABR	42257631.84	34478869.92	81.59	122.56
MAY	31772897.74	28618021.01	90.07	111.02
JUN	21489323.58	20178331.94	93.90	106.50
JUL	17571712.85	16202471.77	92.21	108.45
AGO	17732170.95	15569363.45	87.80	113.89
SEP	24634139.57	22184971.5	90.06	111.04
OCT	32299239.88	27628111.06	85.54	116.91
NOV	46060456.3	34708324.68	75.35	132.71
DIC	42484617.02	35019324.79	82.43	121.32

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

La cuenca del río Pastaza hasta la junta con el río Palora tiene un área muy extensa, por lo que, para fines de la modelación, se la dividió en diez subcuencas, en cada una de las cuales se puede diferenciar las bandas de nivel y en estas los tipos de cobertura vegetal, con sus respectivas características físicas y climatológicas. Para este caso en estudio no se realizó el análisis de caudales en todas las subcuencas, ya que no se disponía de registros de caudales para cada una de ellas, información necesaria para evaluar la calibración y verificación del modelo WEAP. En el presente trabajo se analizó únicamente los caudales generados en tres puntos específicos: para la subcuenca del río Cutuchi con la estación Cutuchi A.J. Yanayacu (H792), para la subcuenca del río Ambato con la estación Ambato en Ambato (H801) y para la parte baja de la cuenca con la estación Verde A.J. Encanto (H798).

El encontrarse con información hidrológica distinta de la recopilada, fue un gran tropiezo. Se cuenta con registros diarios de caudal de las estaciones señaladas anteriormente, transformados a registros mensuales, de la institución que administra la información hidrometeorológica en el país; y los registros mensuales del “Estudio hidro-sedimentológico de la cuenca del río Pastaza y la cuenca del río Paute”, desarrollado en la Universidad Central del Ecuador (Morales,2000). Al realizar la comparación respectiva entre los datos se tienen errores de hasta el 400%, en algunos casos y falta de registros en ciertos años, como se muestra en la tabla 6.1, de tres de años de registros.

Tabla 6.1 Comparación de los registros de caudal165 obtenidos

AÑO	MES	INAMHI						ESTUDIO (MORALES, 2000)					ERROR RESPECTO A INAMHI (%)				
		H801	H789	H792	H800	H798	H787	H801	H789	H792	H800	H798	H801	H789	H792	H800	H798
1982	1	1.08	1.62	17.28	44.27	120.39	2.82	1.3	2.1	13	61.6	111	120.41	129.56	75.24	139.13	92.20
1982	2	0.70		15.17	37.30	116.16	2.41	1.6	1.9	11.2	55	105	229.98		73.81	147.47	90.39
1982	3	0.86		10.09	40.69	105.31	3.50	1	1.9	7.1	58.4	95.2	115.96		70.34	143.54	90.40
1982	4	3.30		12.29	78.39	216.97	7.76	3	4.1	8.9	96.7	232	91.00		72.39	123.36	106.93
1982	5	5.63		21.48	92.78	250.61	6.60	4.8	4	16.3	111	283	85.21		75.89	119.64	112.93
1982	6	3.67	2.61	9.67	76.80	230.61	6.84	3.2	3.4	6.8	95.2	251	87.21	130.05	70.32	123.96	108.84
1982	7	10.48		7.03	103.89	285.64	9.60	9	3.8	4.7	121	381	85.90		66.87	116.47	133.39
1982	8	10.95		6.66	117.36	292.64	10.02	9.5		4.5	135	409	86.77		67.56	115.03	139.76
1982	9	3.92		5.75	74.22		7.16	3.3		3.9	92.6	312	84.27		67.78	124.76	
1982	10	3.42		10.78	72.92	174.22	5.27	3		7.7	91.3	236	87.84		71.43	125.20	135.46
1982	11	5.18	3.58	14.26	80.73		4.29	4.6	4.6	10.5	101		88.77	128.34	73.61	125.11	
1982	12	6.21	3.41	27.38	107.17	200.19	4.16	5.5	4.4	21.5	125	271	88.56	129.02	78.51	116.64	135.37
1983	1	6.21	3.41	27.38	107.17	200.19	4.16	39.4	4.2	14.4	118	290	634.42	123.16	52.58	110.10	144.86
1983	2		3.25	18.85	101.23	193.72	5.61	5.7	4.6	10.4	117	247		141.65	55.18	115.57	127.50
1983	3	6.37		14.13	100.69		7.89	8.7	5.8	14.6	134	284	136.55		103.30	133.08	
1983	4	9.56	4.85	19.18	116.73	190.60		7.8	8.8	18.1	172	354	81.63	181.30	94.39	147.34	185.73
1983	5	8.71			156.48	229.53	7.08	10.9	9.1		193	442	125.10			123.34	192.57
1983	6	12.14	8.16		180.34	273.97	10.65	4.5	5.9		103	281	37.07	72.28		57.12	102.56
1983	7	5.13	4.95		84.69	188.06	5.75	1.9	6		94.8	288	37.03	121.10		111.93	153.14
1983	8				77.21	188.00	9.14	4.1	6.9	8.3	94.7	310				122.65	164.89
1983	9	4.75		6.84	76.44		9.41	4.4	6.7		107	318	92.56			139.97	
1983	10	4.92	5.77		88.47		9.28	26	5.7		109	290	528.97	98.87		123.21	
1983	11		4.70		91.11			1.1	6.1		57.1	183		129.82		62.67	
1983	12	1.35	5.23		39.72		2.95	2	4.2		59.6	197	147.98	80.24		150.05	
1984	1	2.09	2.47					1.7	3.2		54.9	152	81.16	129.41			
1984	2					188.80		4.7	3.8		90.7	284					150.42
1984	3	2.81	3.19		70.63		4.38	2.4	4.1		88.6	239	85.53	128.59		125.43	
1984	4	1.68	4.31	22.52	98.83		4.71	1.4	5.3	23.8	118	276	83.12	122.89	105.69	119.40	
1984	5	4.48	5.42	27.18	102.44		6.49	3.9	6.4	27.4	118	284	87.00	118.14	100.81	115.19	
1984	6	7.36		18.38	137.92			6.5	8.3	20.1	153	437	88.35		109.35	110.93	

En base al análisis de consistencia realizado en el presente trabajo, se concluye que la falta de continuidad de la información proporcionada presenta problemas al aplicar el modelo WEAP, es decir que los datos faltantes son importantes para la determinación de un buen comportamiento hidrológico de las subcuencas y de la cuenca en general.

Para la aplicación del modelo WEAP es imprescindible los registros de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Al tener un área extensa, el modelo requiere datos mensuales, que pueden ser calculados a partir de la información diaria proporcionada por el INAMHI, como es el caso de esta modelación. Se prefiere que la información sea completa y continua.

WEAP no tiene un proceso interno de auto calibración, es decir, el proceso de calibración es manual, razón por la cual todos los factores son importantes, pero los parámetros que tienen mayor incidencia en la generación de escurrimiento son: la capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (S_w), el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la zona radicular de conductividad (K_s), la conductividad profunda (K_d) y la dirección de flujo preferente (pfd). Estos cinco parámetros intervienen en el ajuste de los caudales pico y los caudales base.

Al aplicar el modelo WEAP sobre la cuenca del río Pastaza, se observa un coeficiente de determinación (R^2) dentro del rango 0.4 a 0.6. que en un principio es un valor relativamente alto para la calidad de información disponible, pero al comparar los valores del coeficiente de correlación (r) (0.6-0.8) coincide dentro de un rango aceptable. En el presente caso, se determina un buen ajuste del modelo a los datos observados en base al coeficiente de correlación (r), sin dejar de tomar en cuenta los demás índices, pero el más importante es (r).

Para obtener mejores resultados al momento de la calibración, el periodo escogido debe ser el menor posible (2 a 3 años), donde los índices de correlaciones son buenos.

Este modelo comprueba que cada subcuenca es distinta, los parámetros aplicados a una subcuenca no pueden ser aplicados a otra, y obtener buenos resultados para las dos.

Tomando como referencia el análisis de consistencia, se debería tomar en cuenta las correcciones a realizarse en las bases de datos de los registros de la información hidrológica.

La aplicación del modelo WEAP sobre una cuenca, debe considerar primeramente una etapa de recolección de información necesaria para el procesamiento de misma del programa, es decir, un primer informe donde consten todos los datos que se tiene dentro de la cuenca y todos aquellos que no están procesados pero se los puede obtener fácilmente, con el fin de llevar a cabo un modelo completo, útil para otras investigaciones.

En el caso de la modelación de la cuenca del río Pastaza no se tomó en cuenta las concesiones del recurso hídrico, debido a que no se tenía una base de datos depurada, donde constara la fecha de inicio de la concesión, la fecha de término de la misma, su ubicación exacta y el punto de retorno, además de la existencia de trasvases en la cuenca, información sumamente útil al momento de la modelación.

6.2. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones a nivel general son las siguientes:

Es necesario tomar conciencia de la gran riqueza que posee el Ecuador en cuanto se refiere a los recursos hídricos, razón por la cual se hace necesario promover el manejo integrado de las cuencas hidrográficas a nivel nacional. Se debe tomar en cuenta que las diferentes actividades antrópicas pueden afectar positiva y negativamente a las cuencas.

A nivel específico:

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) debe mejorar el monitoreo de la cuenca del río Pastaza, con el incremento de estaciones de control tanto hidrológicas como meteorológicas ya que la mayoría están ubicadas en la parte alta a partir de los 2000 m.s.n.m y esta área representa menos del 50% del total de la cuenca.

Es necesario que el INAMHI realice una evaluación y depuración de la información hidrometeorológica ya que existen muchos vacíos en los registros de datos, lo que no permite tener un periodo extenso para la aplicación del modelo.

En el registro de datos de los caudales diarios existen valores de “0” (cero), los cuales no se saben si son porque no fueron tomados ó porque no existe caudal debido a que el recurso esta sobre-concesionado en la parte alta de la cuenca.

El Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP), debe proveer la información actualizada los diferentes tipos y usos del suelo (características físicas y químicas) que existen en el país y que son necesarios en los modelos hidrológicos como es el caso del WEAP.

Para mejorar la aplicación del modelo hidrológico WEAP es necesario tomar en cuenta la presencia de las centrales hidroeléctricas Agoyán y San Francisco y el impacto que generan aguas abajo, razón por la cual se debe tener acceso a la información de los caudales de descarga a nivel mensual del Sistema Hidroeléctrico integrado Agoyán – San Francisco, lo cual no fue posible para la realización de este proyecto.

Es importante estandarizar las plataformas informáticas de todas las instituciones públicas que administran el recurso hídrico del país, para que los usuarios e investigadores puedan proporcionar estudios satisfactorios y complementarios de otros ya existentes manteniendo una secuencia lógica desde el estudio más específico hasta el más general de una cuenca.

CAPÍTULO 7

7 BIBLIOGRAFÍA

- ♦ AGUAMARKET, Diccionario del agua
<http://www.aguamarket.com/diccionario/términos.asp?Id=5720>
- ♦ AMATO C., MACKINNEY D., INGOL-BLANCO E. Y TEASLEY R., 2006. WEAP Hydrology Model Applied: The Rio Conchos Basin, Center for research in water resources.
<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>
- ♦ APARICIO FRANCISCO, 1994, Fundamentos de hidrología de superficie, Limusa.
- ♦ BINGER, R., C. MURPHREE y C. MUTCHLER, 1989. Comparison of sediment yield models on watersheds en Mississippi. Trans.ASAE. Vol. 32(2):529-534.
- ♦ BUYTAERT, W., CÉLLERI, R., DE BIÉVRE, B., DECKERS, J. Y WYSEURE G., 2003. Modelando el comportamiento hidrológico de micro cuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOPMODEL, III Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas, 8-13 Junio 2003, Arequipa, Perú.
- ♦ CHOW, V.T, *"Hidrología Aplicada"*, McGraw Hill, Santafé de Bogotá, Colombia, 1994
- ♦ CLARK, C. O., 1945. "Storage and the unit hydrograph." Transactions, ASCE, 110, 1419-1446.
- ♦ DUAN Q., GUPTA H., SOROOSHIAN S., ROUSSEAU A., TURCOTTE R., "Calibration of Watershed Models", Washington, DC, 2003

- ♦ ESTACIO MARGARITA, ORTEGA LILIAN, “Aplicación de los modelos de simulación hidrológica SWRRBWQ y HEC-HMS en la cuenca del río Quijos dj Oyacachi, dentro del proyecto AARAM”, Quito, 2005
- ♦ ESCOBAR M., PURKEY D., POUGET J., SUAREZ W., CONDOM T. y RAMOS C., 2008. Construcción del Modelo WEAP del Río Santa, Perú, IRD, SEI-US, Banco Mundial.
- ♦ Ex – INECEL “Estudio de manejo en la cuenca alta del río Pastaza”, Quito, 1993
- ♦ HIDALGO MARCELO, 2005, Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas, E.P.N., Ecuador.
- ♦ INAMHI, ORSTOM, “Regionalización de la pluviometría anual del Ecuador para el estudio del impacto del ENSO en los regímenes pluviométricos”, Quito, 1996
- ♦ JONES R., NOGUER M., HASSELL D., HUDSON D, WILSON S., JENKINS G., MITCHELL J., “Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS” Reino Unido, 2004
http://precis.metoffice.com/docs/PRECIS_Handbook.pdf
- ♦ KALIPEDIA, Geografía del Ecuador
<http://www.kalipedia.com/geografia-ecuador/tema/graficos-pisos-climaticos.html>
- ♦ MOLNAR L', MIKLANEK P., MESZAROS I., “Developments in hydrology of mountains area” UNESCO, Paris, 1997
- ♦ MONSALVE GERMÁN, 2002. Hidrología en la Ingeniería.
- ♦ MORALES DARWIN, “Estudio hidrosedimentológico de la cuenca del río Pastaza y la cuenca de río Paute” Universidad Central del Ecuador. 2001

- ♦ PROYECTO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO (PACC) a través de una efectiva Gobernabilidad del Agua en Ecuador, 2008. Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en los recursos hídricos en la cuenca del Paute.
- ♦ PROAÑO OSWALDO, UNDA BORIS, 1995. Aplicación del modelo de simulación hidrológica SWRRB (Simulador de recursos hídricos en cuencas rurales) a cuencas hidrográficas del Ecuador.
- ♦ PROYECTO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO (PACC), “Generación de escenarios PRECIS”
<http://www.pacc-ecuador.org>
http://www.pacc-ecuador.org/index.php?option=com_wrapper&Itemid=58
- ♦ SINGH. VIJAY P., 1992. Elementary Hydrology, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp: 450, 707.
- ♦ STOCKHOLM ENVIROMENT INSTITUTE (SEI), “Water Evaluation And Planning System User Guide” Boston, 2005
- ♦ STOCKHOLM ENVIROMENT INSTITUTE (SEI), “WEAP en una hora” Boston. 2007
- ♦ VICUÑA S., 2009. Guía Metodológico. Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos en el Modelo WEAP. Santiago, Boston.
- ♦ VICUÑA S., “Herramientas de Decisión para Evaluar Vulnerabilidades y Estrategias de Adaptación al Cambio Climático”, Asunción-Paraguay, 2006
- ♦ VILLÓN M., “Hidrología Estadística”, Lima – Perú, 2005
- ♦ WIKIPEDIA, Conceptos básicos
<http://es.wikipedia.org>

- ♦ Características Provincia del Pastaza
<http://www.fbu.com.ec/spanish/detalles-com.htm>
- ♦ YARROW M., "Modelación de la cuenca de Aysén Avances en la aplicación de SWAT"
http://ecosistemas.uchile.cl/ecomanager/documentos/cd-watersheat/documentos/Coyhaique_Yarrow2.pdf

ANEXOS

ANEXO 1

MAPAS

ANEXO 1.1

ANEXO 1.2

ANEXO 1.3

ANEXO 2

INFORMACIÓN DEL MODELO

ANEXO 2.1

ANEXO 2.2

ANEXO 2.3

ANEXO 2.4

ANEXO 3

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

ANEXO 4

ARCHIVO DIGITAL