



INFORME: MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE

Santiago, Marzo, 2009

CONTENIDO

Contenido	2
Presentación	3
1. Cuenca del Río Paute	4
2. Modelo WEAP	18
3. Metodología de desarrollo de modelo Paute	20
Fase 1: Definición de fronteras espaciales y temporales del estudio	20
Fase 2: Desarrollo del modelo	23
Fase 3. Calibración	45
Fase 4: Creación de escenarios futuros	61
Fase 5: Evaluación	62
4. Futuras mejoras al modelo del Río Paute	68
5. Conclusiones	71
Referencias	73
Anexos	75

PRESENTACIÓN

El Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en Ecuador (PACC) tiene como meta “incorporar los riesgos asociados al cambio climático dentro de las prácticas de manejo del recurso hídrico en el Ecuador”. Su objetivo es “aumentar la capacidad de adaptación en respuesta a los riesgos del cambio climático en la gestión de recursos hídricos a nivel nacional y local”.

Durante la fase de preparación del proyecto, se ha gestionado y consolidado una importante red de actores nacionales y provinciales (Azuay, Loja, Manabí y Los Ríos), quienes han mostrado interés en apoyar las actividades que se desarrollen en el marco del PACC. Esta red de aliados estratégicos incluye a entidades del gobierno central, gobiernos provinciales y locales, organismos de desarrollo regional, empresas privadas, asociaciones productivas comunitarias, ONGs (nacionales e internacionales), oficinas locales del gobierno central.

Uno de los resultados esperados en el proyecto tiene que ver con el desarrollo de sistemas de manejo de la información que reflejen los impactos del cambio climático en el sector hídrico y que sirvan de base para la formulación de políticas y estrategias. En este contexto, el proyecto prevé la aplicación de modelos de planificación que soporten la toma de decisiones sobre la asignación de los recursos hídricos a los diversos sectores considerando la oferta y la demanda, los modos de gestión del recurso y las necesidades locales en los planes.

Dichos modelos de planificación se llevarán a cabo en seis cuencas estratégicas del país que han sido seleccionadas en etapas previas del proyecto: cuencas de los ríos Chone, Portoviejo, Babahoyo, Paute, Jubones y Catamayo.

El presente informe tiene como objetivo describir las características básicas de una de estas cuencas la del Río Paute y describir también la metodología a seguir en la modelación de esta cuenca utilizando el modelo WEAP. El desarrollo de esta herramienta servirá para mejorar el proceso de planificación en relación con el manejo de los recursos hídricos en esta cuenca estratégica para el desarrollo del país.

El informe consta de las siguientes secciones: una primera sección está destinada a una descripción de la cuenca del Río Paute. Esta sigue de una sección donde se describe el modelo WEAP y finalmente se analizan los aspectos metodológicos a seguir en el proceso de modelación de la cuenca del Paute con esta herramienta

1. CUENCA DEL RÍO PAUTE

A continuación se presenta una descripción básica de la cuenca del Río Paute basada en el Estudio de Vulnerabilidad Actual al Riesgo Climático elaborado por el Proyecto GEF de Adaptación al Cambio Climático (PACC). Esta descripción incluye una caracterización geográfica, biofísica, climática y socio-económica de la cuenca así como también incorpora una descripción de cada uno de los elementos esenciales que componen la cuenca desde el punto de vista del manejo dado a los Recursos Hídricos.

La cuenca del Río Paute se encuentra emplazada en tres Provincias Azuay, Morona Santiago y Cañar, está comprendida entre las coordenadas 3°16'37.36"S, 2°17'55.20"S; 79°21'51.19"W, 78°15'36.54"W. Cubre el área de aproximadamente 6.436 Km² (ver Figura 1). Es parte de la cuenca del Río Santiago, la misma que limita al norte con las cuencas del Río Guayas y Paztaza, al sur con las cuencas del Río Mayo, Catamayo-Chira, al este con las cuencas del Río Catamayo-Chira, Jubones, Balao, Cañar y al oeste con la cuenca del Río Morona y el límite internacional con el Perú.

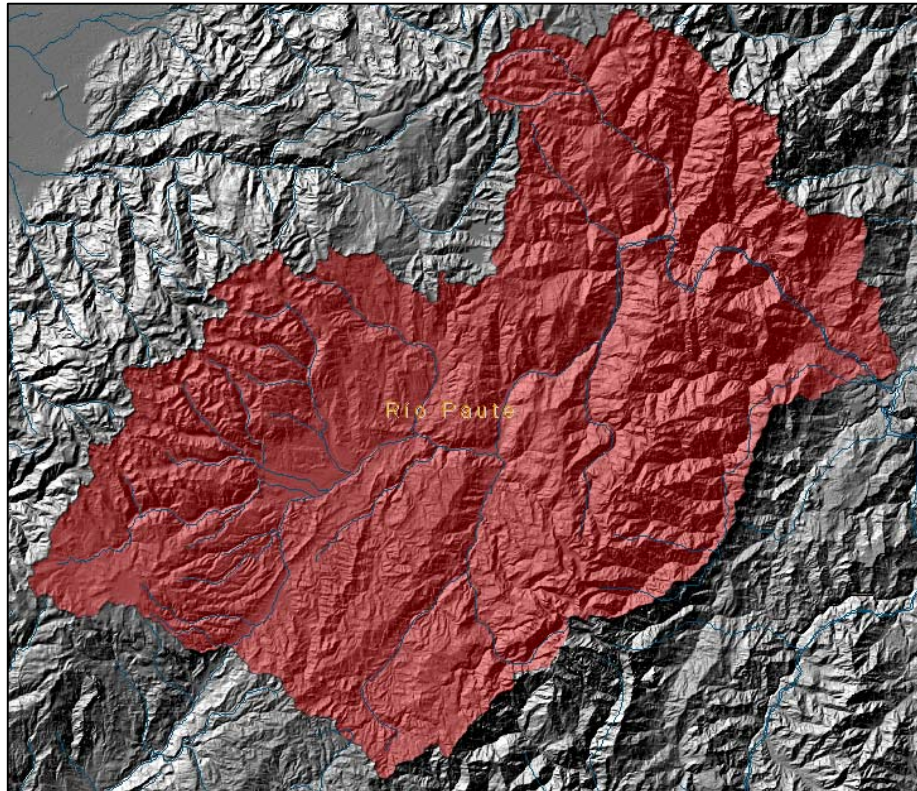


Figura 1.- Cuenca del Río Paute

Caracterización biofísica

La cuenca del Río Paute forma parte del callejón interandino, con pendientes que se encuentran en el rango de 25 a 50%; el relieve escarpado es representativo de la zona media y baja, le sigue un relieve montañoso. Los rangos altitudinales varían entre los 500 y 4000 m.s.n.m. La

Figura 2 muestra la topografía de la cuenca del Río Paute y su sistema hidrográfico primario.

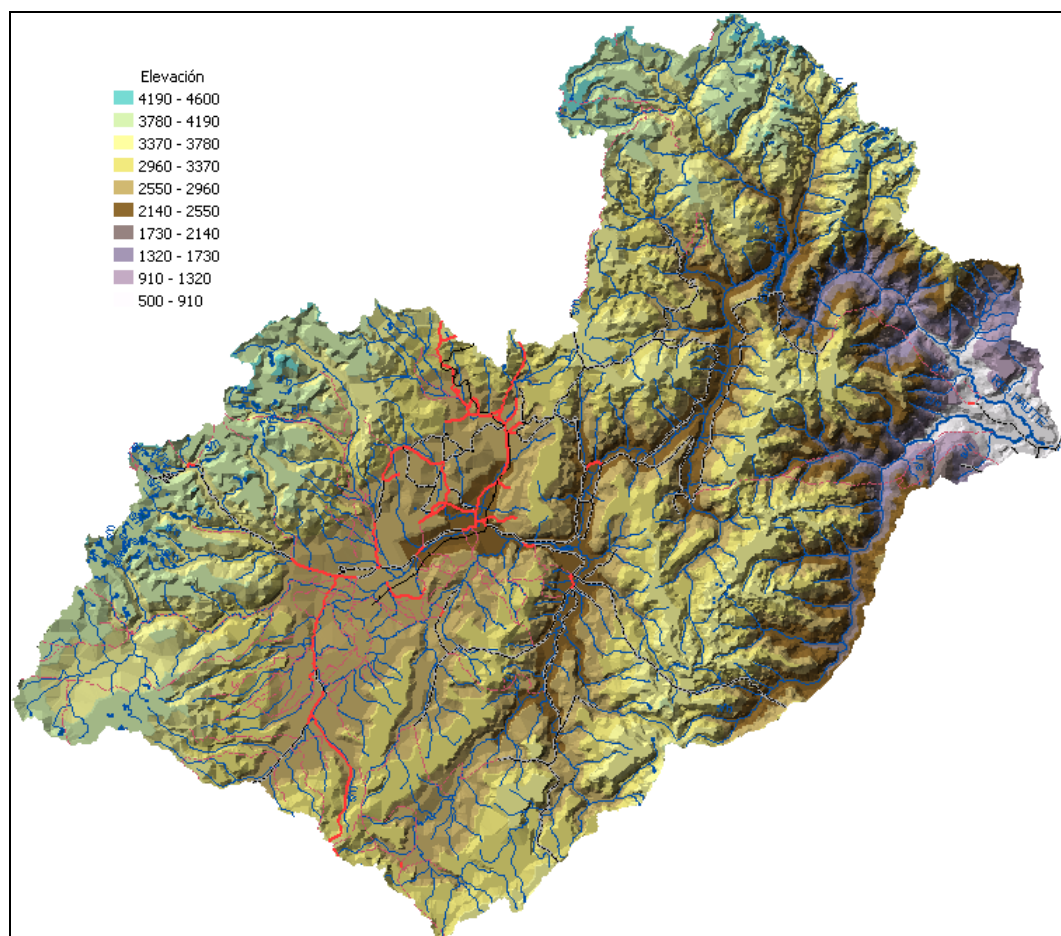


Figura 2.- Topografía de la Cuenca del río Paute. Fuente: CGPaute

Características Climáticas Generales

La cuenca del río Paute contiene una gradiente altitudinal amplia (4250 – 550 m.s.n.m.), por lo cual su régimen de precipitaciones es muy variado en intensidad y duración, teniendo promedios máximos anuales de 2500 – 3000 mm en el extremo oriental de la cuenca correspondiente al cantón Santiago y también la ocurrencia precipitaciones máximas de 1200 a 1500 en la línea de cumbres de la Cordillera Occidental en la franja occidental de la cuenca, sobre los cantones Cañar y Cuenca. A su vez los promedios mínimos anuales de precipitaciones entre 600 - 800 mm se registran en los valles interandinos coincidiendo con los poblados de Cuenca, Azoguez, Sigsig, Gualaceo y Guachapala. Con respecto a la temperatura la cuenca cuenta con un rango de temperatura media multianual que va desde 4.4 a 18.6° C. Este amplio rango de temperatura radica en su igualmente amplia gradiente altitudinal, puesto que la cuenca va desde los 4250 m.s.n.m. (Ecosistema de páramo) hasta los 550 m.s.n.m en la confluencia de los ríos Paute con Negro. Las Zonas de menor temperatura corresponden a la cumbres de la cordillera Occidental de los Andes

con un promedio de temperatura media de 6°C, en tanto las zonas más cálidas se encuentran en los valles interandinos antes descritos y en el oriental de la zona del subtrópico hacia la Amazonía, con promedios de 22 a 26 °C.

El Plan Maestro de la Cuenca del río Paute, caracteriza climatológicamente a la cuenca del río Paute, de acuerdo con el siguiente criterio: “se la puede dividir en zona alta, media y baja, cada una de estas zonas presenta una zona climática en particular y las cuales se las describe a continuación:

Cuenca Alta

Presenta un clima frío semi-húmedo con altitudes entre 2600 y 4600 msnm y precipitaciones que varían de 1000 a 2000 mm/año; temperatura media de alrededor de 8°C, humedad relativa media 88 %, vegetación predominante, típica de páramo con algunos cultivos especialmente de cereales y hortalizas.

Cuenca Media

Comprende el área entre los 2200 y 2600 msnm, de clima templado semihúmedo, esta zona es la más seca de la cuenca, con precipitaciones que fluctúan entre 500 y 1.000 mm/año, temperatura media anual de 15°C, humedad relativa media 84 %. En esta parte del área de estudio se localizan los centros poblados más significativos entre ellos la ciudad de Cuenca. La actividad agrícola está más concentrada y desarrollada, siendo los cultivos predominantes los pastos, caña de azúcar, maíz, frutales y cultivos de exportación como las flores en el sector de Paute.

Cuenca baja

Esta parte de la cuenca del río Paute se desarrolla aproximadamente en altitudes comprendidas entre 500 y 2200 msnm; zona en la cual se ubican las principales obras de la Central Hidroeléctrica Paute así como las obras del Proyecto Hidroeléctrico Mazar.

El clima se clasifica como meso-térmico húmedo, con precipitación media anual superior a 2000 mm llegando hasta los 4000 mm en la parte más baja, la cual la define como área lluviosa de régimen oriental; la temperatura media es de 20°C, la humedad relativa de 91 %. La vegetación que cubre esta zona es bosque natural que se desarrolla en pendientes fuertes, la agricultura y los asentamientos humanos son incipientes, existiendo pequeñas áreas cultivadas, especialmente en las vegas de los ríos.

Descripción Política y Socioeconómica

La cuenca del río Paute pertenece a cuatro provincias Chimborazo, Cañar, Morona Santiago y Azuay; contiene 15 cantones, de los cuales 1 pertenece a Chimborazo (Alausí); 2 a Morona Santiago (Santiago, Limón Indanza); 4 a Cañar (Azogues, Deleg, Cañar y Biblian) y 8 a Azuay (Sevilla de Oro, Paute, Guachapala, El Pan, Gualaceo, Chordeleg, Sigsig, Cuenca).

De acuerdo al último censo de población y vivienda, en la cuenca del Río Paute viven 573.751 personas, lo que la constituye en la Cuenca más poblada de las seis que comprende el estudio, el 47% de las cuales son hombres y el 53% mujeres, lo cual visualiza el fenómeno migratorio que afecta principalmente a los hombres. El 35% de la población tiene menos de 15 años, lo que da cuenta que se trata de una población joven, en el otro extremo, el 11% tiene más de 60 años. La densidad poblacional es de 90 habitantes por km², muy superior al valor promedio nacional que es de 47,4, de hecho, es la segunda densidad poblacional más alta de las seis Cuencas en estudio. El siguiente cuadro muestra la distribución de esta población y sus características esenciales por cantón.

Cuadro 1.- Superficie y población de los cantones de la cuenca del río Paute

CANTONES	Población Total	Superficie Total	Superficie Cuenca	% en la Cuenca	Densidad	Población Cuenca	Urbana Cuenca	Rural Cuenca
ALAUSI	42.823	1.636,1	583,6	36	26	13.290	0	13.290
AZOGUES	64.910	598,3	598,3	100	108	64.910	27.866	37.044
BIBLIAN	20.727	239,2	226,9	95	87	19.882	4.371	15.511
CAÑAR	58.185	1.819,7	73,0	4	32	1.888	0	1.888
CHORDELEG	10.859	91,5	91,5	100	119	10.859	2.374	8.485
CUENCA	417.632	3.099,3	1.799,2	58	135	358.795	277.374	81.421
DELEG	6.221	75,9	75,9	100	82	6.221	686	5.535
EL PAN	3.075	134,4	134,4	100	23	3.075	423	2.652
GUACHAPALA	3.125	45,9	45,9	100	68	3.125	817	2.308
GUALACEO	38.587	364,2	364,2	100	106	38.587	10.682	27.905
LIMON INDANZA	10.192	2.194,7	285,0	13	5	876	0	876
PAUTE	23.106	266,9	266,9	100	87	23.106	5.014	18.092
SANTIAGO	9.841	1.807,1	881,3	49	5	3.886	0	3.886
SEVILLA DE ORO	5.234	317,7	317,7	100	16	5.234	774	4.460
SIGSIG	24.635	657,3	609,7	93	37	23.092	3.327	19.765
TOTAL	736.077		6.353,3		90	573.751	333.285	240.466
						PORCENTAJE	58	42

Fuente: SIISE, versión 4.5

La población rural (42%) es inferior a la población urbana (58%), lo que obedece a la composición de la población del cantón Cuenca, puesto que en todos los demás, la población rural es superior a la urbana. La ciudad más importante en la zona de estudio, es la ciudad de Cuenca, capital de la provincia de Azuay, con cerca de 300 mil habitantes, seguida muy de lejos por Azogues (capital provincial de Cañar), cuya población es diez veces inferior a la de Cuenca; otras ciudades importantes son Gualaceo (11 mil habitantes) y Paute (cinco mil).

La tasa de crecimiento poblacional en la provincia de Azuay es de 1,54%, inferior al promedio nacional que es de 2,10%. Ahora bien, considerando solamente la población rural, la tasa de crecimiento poblacional es negativa (-0,02).

La actividad económica predominante en la cuenca del Paute es la Agricultura, en correspondencia con la población rural mayoritaria. En las zonas media y alta predomina la agricultura de subsistencia y la mediana producción, teniendo al maíz, el fréjol y la papa como cultivos transitorios principales, mientras que los frutales (tomate de árbol, manzana) se cuentan entre los cultivos permanentes. La población de ganado vacuno, es la más importante de las seis cuencas en estudio, con más de 250 mil cabezas, al igual que la de cuyes con una población cercana a un millón de unidades.

Descripción de los recursos hídricos de la Cuenca del Paute

En la Figura 3 se presenta un esquema topológico de la cuenca del Río Paute donde se incorporan los aspectos particulares y relevantes, la red hidrográfica y la infraestructura principal, cuya observación sintetizan y clarifican el manejo del recurso hídrico al interior de la cuenca.

A continuación se realiza una resumida descripción de las principales obras de infraestructura civil relacionadas con el manejo, control o uso del recurso hídrico existentes en la cuenca del Río Paute. Inicialmente en el Cuadro 2, se describen las obras de infraestructura ya construidas y por ende en fase de operación, posteriormente en el Cuadro 3, se identifican un conjunto de obras contempladas en los planes hidráulicos y/o de desarrollo y que actualmente se encuentran en fase de planificación o esperando financiamiento, especialmente en el Sector Hidroeléctrico.

Cuadro 2.- Infraestructura hídrica existente - Cuenca río Paute

Infraestructura para Generación Hidroeléctrica - Ubicación	Infraestructura para Dotación de Riego -Ubicación	Otro tipo de Infraestructura relacionada al manejo del Recursos Hídrico - Ubicación
Central Hidroeléctrica Paute (Molino)	Sistemas de Riego:	Sistema de Agua Potable para la Ciudad de Cuenca y Alrededores:
Central Hidroeléctrica Mazar	Sidcay – Río Machángara	Sistema Tomebamba (900 l/s)
Central Hidroeléctrica Saucay	Machángara – Río Machángara	Sistema Machángara (700 l/s) y
Central Hidroeléctrica Saymirín	Tasqqi – Sigsig – Río Gualaceo	Sistema Yanuncay (450 l/s)
	Gualaceo – Río Gualaceo	Planta de Tratamiento de aguas Residuales de la Ciudad de Cuenca – PTAR de Ucubamba
	Paute – Río Paute	Umbrales para la corrección de la Pendiente Longitudinal del Río Cuenca para evitar erosión y modificación del cauce.

Fuente: Estudio Vulnerabilidad PACC, 2008.

Cuadro 3.-Infraestructura hídrica propuesta - Cuenca río Paute
Resumen de los proyectos hidroeléctricos identificados

Subcuenca	Proyecto	Potencia	Potencia Total	Porcentaje
		(MW)	(MW)	(%)
Paute	Paute A, B y C	1075,0	1904,0	79,7
	Mazar	190,0		
	Sopladora	312,0		
	Cardenillo	327,0		
Machángara	Saucay I	8,0	38,4	1,6
	Saucay II	16,0		
	Saymirín I-II	6,4		
	Saymirín III-IV	8,0		
Yanuncay	Soldados	5,5	28,2	1,2
	Yanuncay	16,2		
	Minas	6,5		
Mazar	Alazán	6,6	17,4	0,7
	San Antonio	10,8		

Subcuenca	Proyecto	Potencia	Potencia Total	Porcentaje
		(MW)	(MW)	(%)
Negro	Pambil	23,2	181,8	7,6
	Patos	58,6		
	San Bartolo	100,0		
Juval	Siliapungo	38,2	176,1	7,4
	El Chorro	137,9		
Tomebamba	Tahual	24,7	30,7	1,3
	Tomebamba	6,0		
Collay	Collay	5,8	5,8	0,2
Dudas	Dudas	6,7	6,7	0,3
Total		2389,1		100

Fuente: Estudio Vulnerabilidad PACC, 2008.

Finalmente se presenta en el Cuadro 4 información relativa al registro de concesiones del CNRH existentes en la cuenca del Río Paute. De acuerdo a esta base de datos se puede observar que la principal fuente de origen principal para las Concesiones de Agua en la cuenca del Río Paute son los ríos (97.3%), los cuales son abastecidos por la zonas húmedas que constituyen los páramos de las cordilleras. A su vez los usos de mayor demanda lo constituyen la generación hidroeléctrica (91.5%), debido a la presencia de la central hidroeléctrica de Paute y la demanda para riego (5.2%). La cuenca contabiliza un total de 4.093 concesiones. Las concesiones legalmente otorgadas, derivan un caudal de 181.2 m³/s.

Cuadro 4.- Resumen General de Concesiones por Subcuencas – Cuenca Río Paute

N°	FUENTE ORIGEN	Caudal concesión									Porcentaje fuente
		l/s	Domést.	Industr	Abreva	Riego	Psicult.	Potable	Hidroeléc.	Recr.	
4	Canal	12		7		6					
20	Lago/Laguna	1562	12		0	30	1020		500		0%
11	Pozo	33	2	20	11	0					1%
555	Quebrada	1725	192	17	11	1280	135	91			0%
419	Río	176312	949	566	34	7130	543	1890	165200		1%
91	Remanente de otras concesiones	67	15	2	2	48					97%
2993	Vertiente	1457	450	17	35	903	28	20		3	0%
											1%
	Qtotal (l/s)	181168	1619	628	94	9396	1726	2001	165700	3	100%
	Porcentaje por uso	100.0%	0.9%	0.3%	0.1%	5.2%	1.0%	1.1%	91.5%	0.0%	

Fuente: CNRH

2. MODELO WEAP

WEAP¹ (Water Evaluation And Planning System) es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos. Proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas. WEAP fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute² sede en Boston y el Tellus Institute³.

WEAP apoya una planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). WEAP emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz grafica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible. WEAP es un modelo forzado por variables climáticas a diferencia de modelos de recursos hídricos típicos que se basan en modelación hidrológica externa. Por otra parte, de manera similar a estos modelos de recursos hídricos, WEAP incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua para diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características convierten a WEAP en un modelo ideal para realizar estudios de cambio climático donde es importante estimar cambios en la oferta de agua (e.j. cambios en la precipitación proyectados) y demanda de agua (e.j. cambios en las demanda por evaporación en cultivos) y como estos cambios convergen en un balance de agua diferente a nivel de cuenca (Purkey et al., 2007).

Una serie de artículos (Yates et al 2005a, 2005b, y 2006) describen la manera en que el modelo hidrológico está integrado en WEAP. En breve, este modelo hidrológico es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca en análisis. Una set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas que se encuentra dividida en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo. Un modelo cuasi físico unidimensional, con dos receptáculos de balance de agua para cada tipo de cobertura/uso de suelo reparte el agua entre escorrentía

¹ <http://www.weap21.org/>

² <http://www.sei-us.org/>

³ <http://www.tellus.org/>

superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los valores desde cada una de estas áreas se suman para obtener los valores agregados en una subcuenca. En cada tiempo de corrida del modelo, WEAP calcula primero los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos y acuíferos asociados. La distribución de agua se realiza para el mismo tiempo de corrida, donde las restricciones relacionadas con las características de los embalses y la red de distribución, las regulaciones ambientales y a la vez las prioridades y preferencias asignadas a diferentes puntos de demanda son usadas como condiciones de operación de un algoritmo de programación lineal que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible.

Las aplicaciones del modelo WEAP incluyen generalmente los siguientes pasos:

1. **Definición del Estudio:** En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema, y la configuración del problema.
2. **Calibración:** Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
3. **Escenarios:** Una vez teniendo un modelo calibrado 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.
4. **Evaluación:** Cada uno de estos escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, los costes y los beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables dominantes.

Para el caso de aplicación del modelo WEAP se ha considerado una metodología que contempla estos pasos y que se describe en la próxima sección de este informe.

3. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE MODELO PAUTE

La metodología de implementación de un modelo WEAP contempla las etapas mencionadas en la sección anterior. A continuación se describirán brevemente las características esenciales de este trabajo con respecto a cada uno de estos componentes.

FASE 1: DEFINICIÓN DE FRONTERAS ESPACIALES Y TEMPORALES DEL ESTUDIO

Esta fase inicial del trabajo de modelación define el alcance de la modelación identificando las fronteras espaciales y temporales del modelo a realizar.

- Delimitación temporal: Tomando en cuenta la información disponible de datos climatológicos e hidrológicos se considera como periodo de simulación y posterior calibración el periodo transcurrido entre los años 1975 y 1989. Durante este periodo se concentra el mayor traslape de información disponible para realizar las simulaciones base y concuerda además con periodos de simulación considerados en trabajos previos en la cuenca (Celleri, 2007).
- Delimitación espacial/esquema: La base de delimitación de subcuencas a considerar en el modelo se basa en coberturas GIS provenientes del Proyecto de Desarrollo de la Cuenca del Río Paute, desarrollado por CG-Paute en conjunto con la Universidad del Azuay (2008), la cual posee una escala de 1:50.000. En algunos casos particulares ha sido necesario ampliar el número de subcuencas para representar las siguientes situaciones de puntos de cierre⁴:
 - Estación de monitoreo de caudal
 - Represa (existente o proyectada)
 - Confluencia de ríos importantes (toda vez que la subcuenca que agrupa ambas posea condiciones climatológicas heterogéneas)

La delimitación de subcuencas consideradas en el modelo se muestra en la Figura 4. Esta Figura también muestra la principal red hidrológica de la cuenca del Río Paute. Esta red hidrológica con las subcuencas asociadas ha sido desarrollada en un esquema en el modelo WEAP tal como se muestra en la Figura 5. Se han incluido en este esquema también la ubicación de los principales centros urbanos en la cuenca: la ciudad de Cuenca y los poblados de Azogues y Gualaceo.

⁴ Este proceso de delimitación fue llevado a cabo por un equipo al interior de PROMAS (Programa de Agua y Suelo de la Universidad de Cuenca).

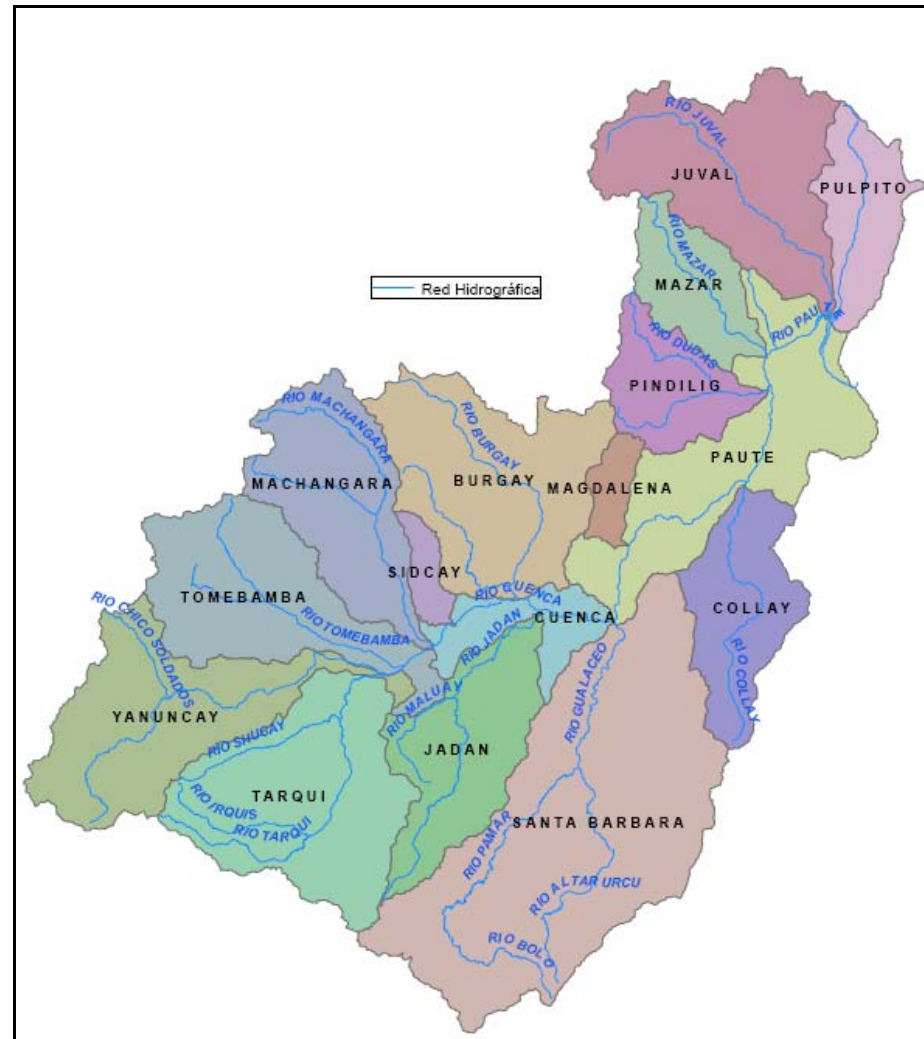
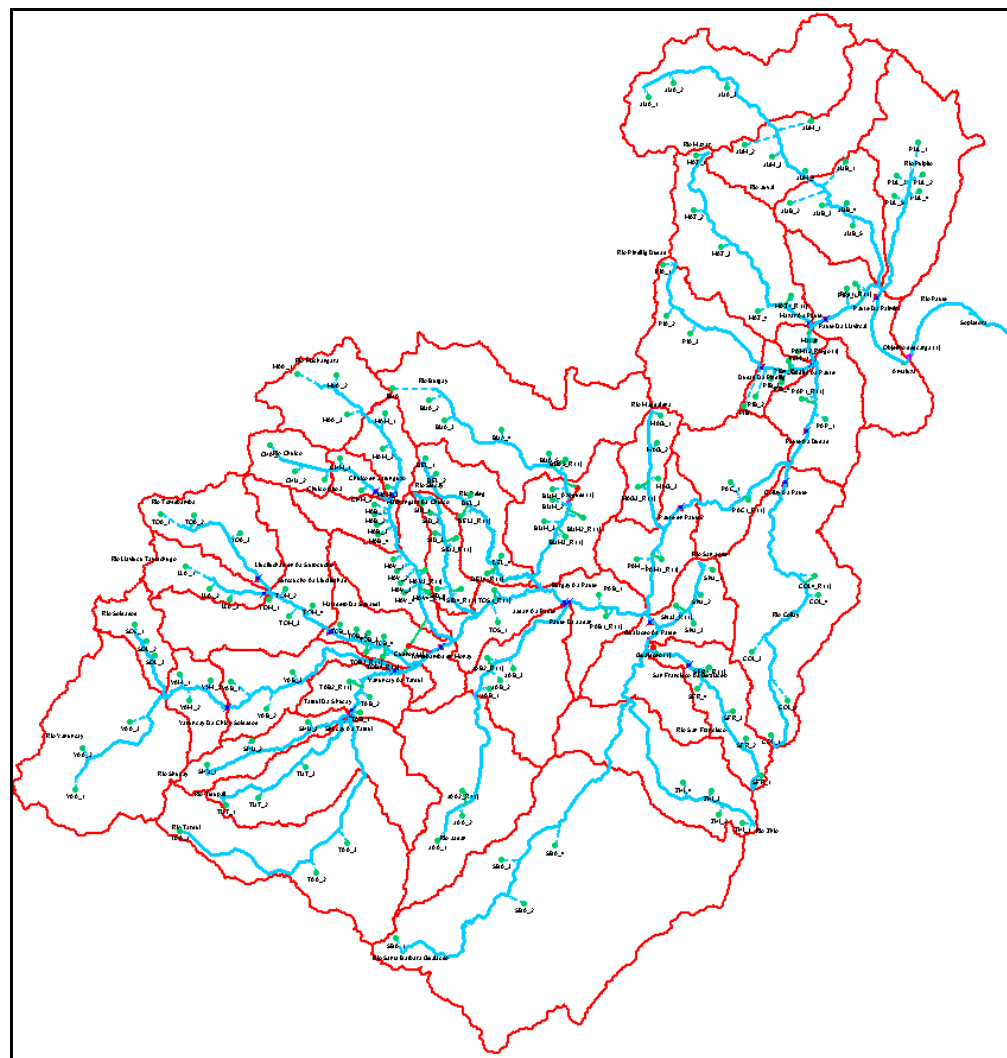


Figura 4.- Subcuencas y Red hidrográfica consideradas en el modelo



FASE 2: DESARROLLO DEL MODELO

En la etapa de desarrollo del modelo se considera la representación base que hace posible una simulación de las condiciones históricas en la cuenca. Para llevar a cabo esta simulación es necesario rellenar el modelo con las diferentes características esenciales de oferta y demanda de agua. A continuación se describe la metodología propuesta para cada una de estas sub-etapas.

Análisis de oferta de agua

Los componentes del balance hidrológico modelados usando el programa WEAP son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base. WEAP requiere entrada de datos climáticos para estimar estos componentes del balance hidrológico. Los datos climáticos necesarios para realizar esta modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud, y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante). Adicionalmente, datos de caudales en estaciones de medición son necesarios para poder comparar los resultados del modelo y realizar calibraciones. Finalmente en el análisis de oferta de agua es necesario incorporar la información relativa a la infraestructura física de control y aprovechamiento existente al interior de la cuenca.

Información climatológica:

Para la elaboración del modelo mencionado, toda la información meteorológica necesaria fue obtenida, a través del software Hydraccess, de la base de datos generada como parte del proyecto titulado: “Asistencia técnica e hidrológica para el desarrollo de herramientas de caracterización y monitoreo hidrológico y evaluación de alternativas de gestión de los recursos hídricos”, elaborado por CG-Paute (2008). Cabe señalar que la información disponible con una adecuada distribución espacial en la cuenca se encuentra con una resolución temporal mensual, tanto como para variables climatológicas, como para fluviométricas.

Precipitación:

Los datos de precipitación para cada subcuenca se obtuvieron de los datos de las estaciones pluviométricas y climatológicas operadas por el INAMHI, ETAPA y PROMAS

de la Universidad de Cuenca. La Figura 6 muestra la ubicación de las estaciones existentes. La extensión en años y cantidad de datos existentes en estas estaciones se presentan en los Cuadro 5 y Cuadro 6. Para la extrapolación de la información de precipitación al interior de la cuenca se considera el trabajo llevado a cabo en el Proyecto “Plan Maestro de la Cuenca del Rio Paute (CG-Paute, 2008). Uno de los productos de ese trabajo ha sido la generación de coberturas en GIS con un mapa de las isoyetas de precipitación anual en la cuenca. La creación de este mapa considera el cambio que posee la precipitación con la altura al interior de la cuenca (Celleri, 2007). Para poder representar de manera adecuada este gradiente en los niveles de precipitación con altura se ha realizado una división de cada una de las subcuencas del modelo entre bandas de elevación separadas cada 500 m, (Figura 7).

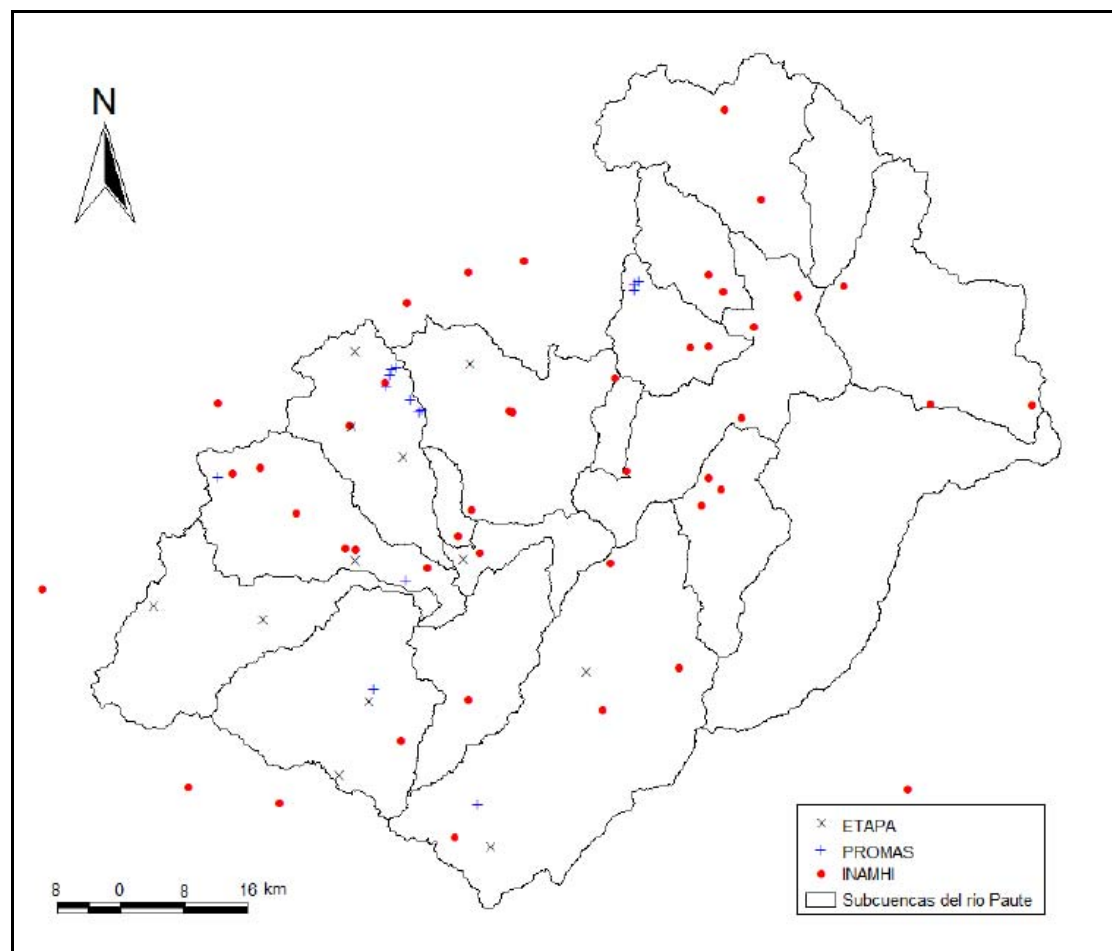


Figura 6.- Estaciones meteorológicas disponibles.
Fuente: CGPaute, 2008.

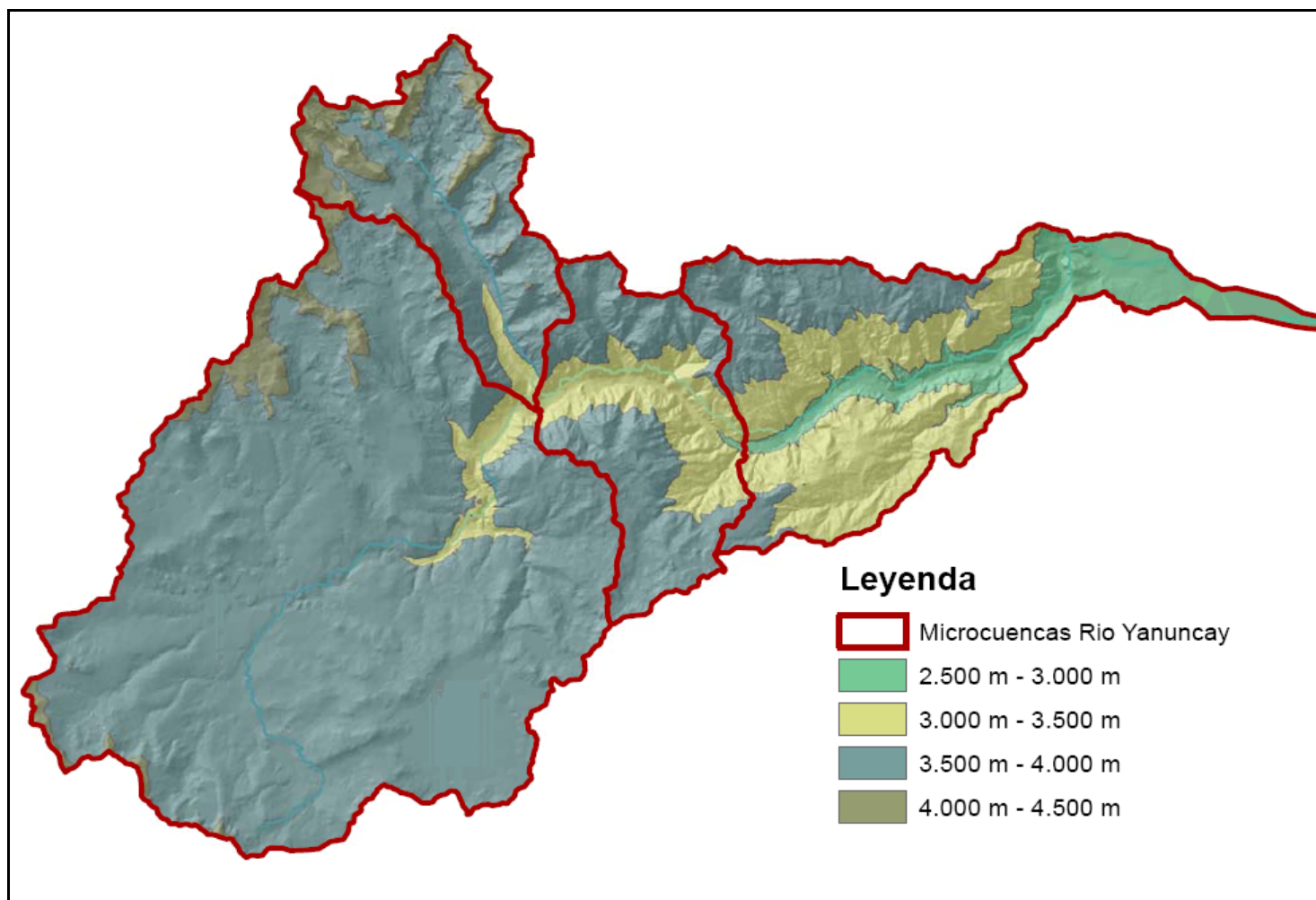


Figura 7.- Subdivisión microcuencas por bandas de altura - Subcuenca Rio Yanuncay

Para la creación de las series de tiempo de precipitación para cada una de estas bandas de elevación se procedió de la siguiente manera:

- 1º. Intersectando la cobertura SIG de isoyetas anuales con la cobertura de bandas de elevación de subcuencas se calcula la isoyeta anual ponderada por banda de elevación para cada subcuenca.⁵
- 2º. Para cada una de las regiones de precipitación definidas en Celleri (2007) (Figura 8) se consideran las estaciones que posean la mejor calidad de datos para el periodo de simulación considerado. Para cada región se consideran (si es posible) dos estaciones: una para las partes altas y otra para las partes medias y bajas (la ubicación de estas estaciones con su identificación correspondiente se muestra en la Figura 9). Se espera que la distribución de la precipitación a lo largo del año (i.e. modo uni o bimodal de precipitación) sea homogéneo al interior de cada subcuenca y representado de manera correcta por estas estaciones índices.
- 3º. Para cada una de las bandas de elevación dentro de cada subcuenca se comparan la isoyeta anual con la precipitación anual promedio de la estación índice asignada. Este valor se utiliza posteriormente para modificar la serie de tiempo de datos de la estación índice considerada y así obtener una serie de tiempo de niveles de precipitación de la banda de elevación.

Este procedimiento asume que la variabilidad inter e intranual dentro de una subcuenca no varía siendo este similar al existente en la estación índice. Pese a que este puede ser un supuesto no válido se considera pertinente de utilizar en casos donde la extensión y calidad de estaciones de precipitación no es alta como es la situación en la cuenca del Paute.

⁵ Este proceso fue llevado a cabo por un equipo al interior de PROMAS.

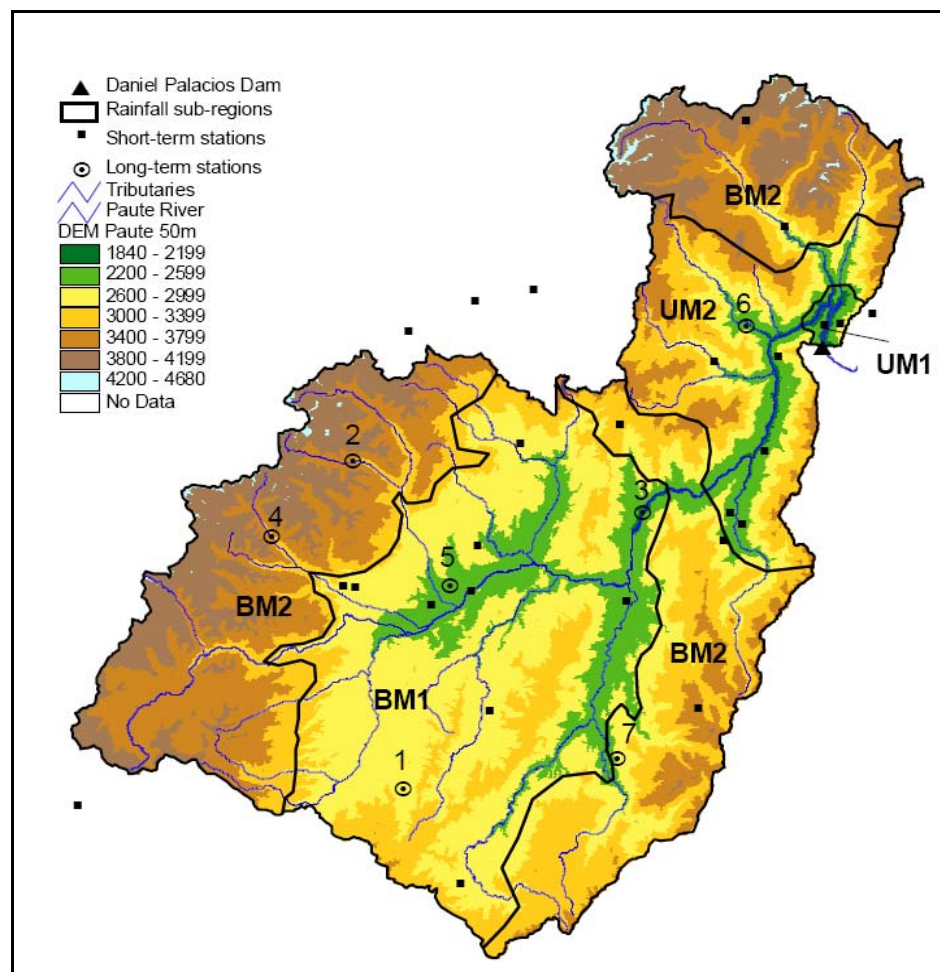


Figura 8.- Caracterización regímenes de precipitaciones. UM1 = Uni-modal 1; UM2 = Uni-modal 2; BM1 = Bimodal 1; BM2 = Bi-modal 2.
Fuente: (Celleri, 2007)

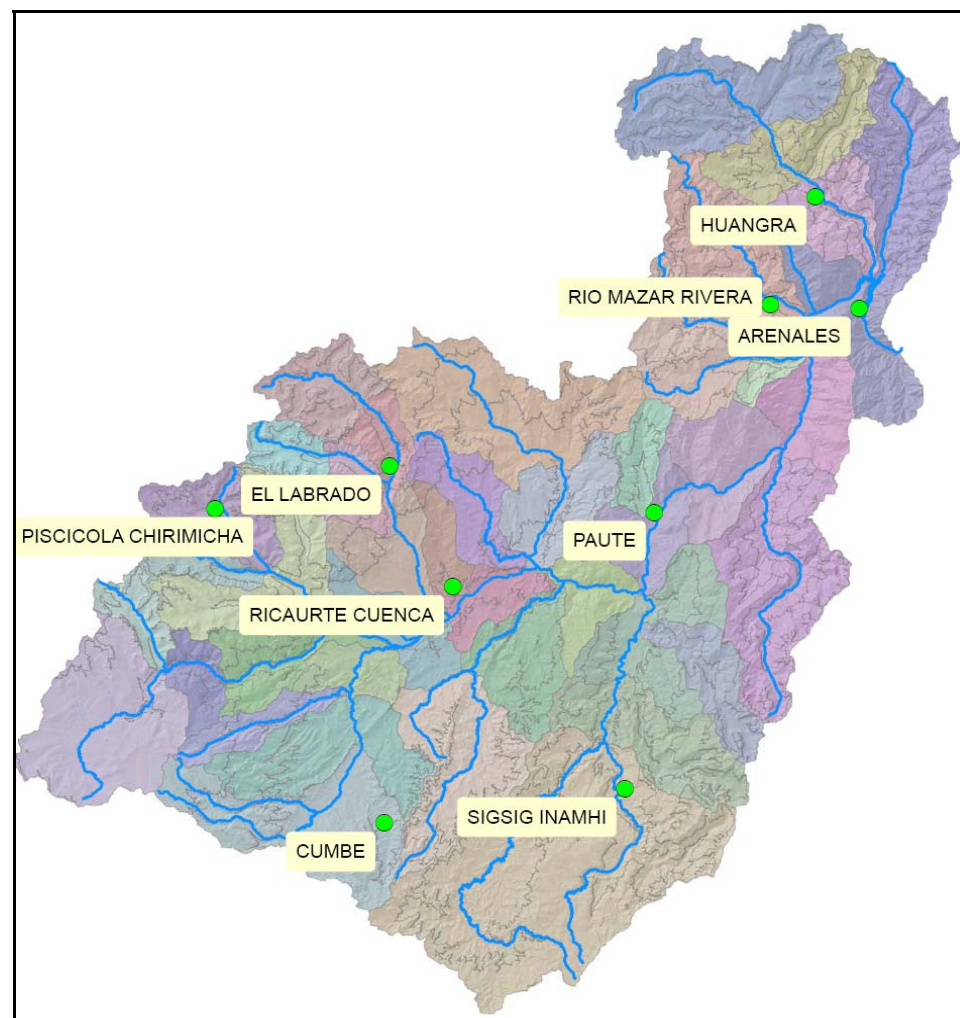


Figura 9.- Estaciones Meteorológicas índice - Precipitación

Cuadro 5.- Registros de precipitación mensual disponibles (estaciones del INAMHI)

ESTACION	CODIGO	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	
PALMAS - AZUAY	M045																8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	4	12		
ARENALES - COLA SAN	M050														9	2	12	12	12	12	11	11	11	2	6	12	12	12	12		7	10		10						
CUENCA AEROPUERTO	M067				4		12	12	12			11	12	8	12	11	11	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12		
BIBLIAN	M137																12	12	7				12	12	9	3	11	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12			
PAUTE	M138					8	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	4		7	12	12	12	12	12	12	12			
GUALACEO	M139					8	12	12	12	11	12	12	12	10	12	11	12	11	10	10	12	12	11	12	11	12	11	12	7	9	9	12	12	10	12	10	11	12		
UCUBAMBA	M140											9	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	11	12	12	10	11	11	12	12	12	12			5			
EL LABRADO	M141					1	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	11	12	10	11	6	12	12	9		
JACARIN	M197																8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	6				
PATOCOA	M199																										3	12	12	11	12	12	12	12	10	2	10	12		
GUARUMALES MANIOBRAS	M206																	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	9		3		9	8	4			3			
PEÑAS COLORADAS	M217																8	12	12	11	11	12	12	12	11	12	12	12	11	11	12	12	9	9	11	3	2	12		
INGAPATA	M222																								5	12	11	12	12	12	10	8	1							
RIO MAZAR RIVERA	M410						12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	10	11		12	12	11	12	12	8	12	11	11	11	6	11	12	10	11	12	12		
CHANI	M414						12	12	7	6	9	12	12	12	12	7	11	11	7	7	12	11	12	12	12	11	12	12	9	12	10	12	12	12	11	12	10	11		
EL PAN	M416						7	12	12	12					4	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	7	1	1	11	8						
PISCICOLA CHIRIMICHAY	M417						8	12	7	8	9	11	12	12	12	12	12	11	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	
CUMBE	M418						7	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	10	12	12	12	12	12	
GIRON	M419	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	10	12	12	12	10	12	11	12	10							
NABON	M420														11	11	10	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	9	10	11	12	12	11	12	12	12	11	
OÑA	M421														12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12		
SIGSIG INAMHI	M424											12	12	11	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	
RICARTE CUENCA	M426					8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		11	11	10	12	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
SAYALSI (MATADERO DJ)	M427									4	12	11	12	12	12	12		12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	
SURUCUCHO (LLULLUCHIS)	M429						12	7	8	9	12	12	12	12	12	12	12	11	6	12	12	12	11	12	4	12	12	11	12	12	11	12	12	12	12	9	5	12		
QUINDAS	M430										6	12	9	8	6	12	12	10	11	3																				
SEVILLA DE ORO	M431																									5	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	11	12	
PAN GRANDE SAN VICEN	M538																8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	8	6								
BUENOS AIRES AZUAY	M539																	10	11	9	4	12	12	12	11	12	12	6	12	12	2	11								
COCHAPAMBA QUINGEO	M541																7	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		9	12	11	9	12	12	12					
PINDILIG	M583					7	12	12	12	11	11	12	12	12	12	11	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	10		12	12							
BIBLIAN INECEL	M625																8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12										
SIGSIG INECEL	M664																8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12			12	12							
CHAUCHA	M665																																			9				
PATUL	M667																																			11				
MATAGLO GULAG	M668																																							
GIMA	M669																																							
SAN FERNANDO INAMHI-INECEL	M666																																							
HUANGRA	M671																																							
COPAL	M673																																							
LINDILIG	M686																																							
MANZANAPATA	M723																8	12	12	12	12	11	7																	
CHAILUD INAMHI-INECEL	M441																																							
MANZANAHUAYCO	M672																																							

Fuente: CGPaute, 2008.

Cuadro 6.- Registros de precipitación mensual disponibles (estaciones de ETAPA, PROMAS)

ESTACION	CODIGO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
CANCAN (CABECERA YANUNCAY)	ETA010			4	12	12	12	12	12	12	12			
PORTETE (cabecera Tarqui)	ETA014			2	12	12	12	12	12	12	12			
UCUBAMBA-ETAPA	ETA022				3	12	12	12	12	12	12			
LA ESMERALDA	ETA019			4	12	12	12	12	12	12	12			
JIMA (cabecera Sta. Bárbara)	ETA025			4	12	8	12	12	12	12	12			
CHANLUD (Machángara Cabe)	ETA004								12	12	12			
EL LABRADO (Chulco Cabec)	ETA003								12	12	12			
YANUNCAY en Pucán	ETA009			4	12	12	12	12	12	12	2			
TARQUI D.J. Cumbe	ETA012			4	12	12	12	12	12	12	12			
MATADERO en Sayausí	ETA005			4	12	12	12	12	12	12	12			
GUALACEO D.J. Pamar (Pir)	ETA024			5	12	12	12	12	12	12	12			
MACHANGARA D.J. Chulco (ETA02								12	12	12			
CHANLUD	PR001								1	7				
LA ESMERALDA_Laberinto	PR002						8	11	9	3				
CAJAS	PR003						6							
TARQUI	PR004						6	6						
PROMAS	PR005								9	4				
HUAGRAUMA ALTO	PR006							7	10	4				
HUAGRAUMA CENTRO	PR007							7	12	7				
HUAGRAUMA BAJO	PR008							7	12	5				
SOROCHE ALTO	PR009							2	8	1				
SOROCHE CENTRO	PR010							2	11	3				
SOROCHE BAJO	PR011								11	5				
NINGAR ALTO	PR012								10	7				
NINGAR CENTRO	PR013								10	7				
NINGAR BAJO	PR014								10	7				

Fuente: CGPaute, 2008.

- Temperatura:

Debido a que la distribución espacial y temporal de la temperatura es más homogénea que en el caso de la precipitación, se considera que es suficiente una extrapolación por altura de la información de temperatura proveniente de una o dos estaciones existentes dentro de la cuenca. El gradiente de temperatura con la altura se estima considerando los valores de temperatura promedio para estaciones ubicadas a diferentes elevaciones.

La Figura 10 presenta dicha relación para estaciones localizadas en la cuenca del Río Paute. Considerando dos estaciones índices para la cuenca (ubicadas a diferentes alturas) y la altura de cada una de las bandas de elevación de cada subcuenca se derivaron series de tiempo de temperatura que toman como base la serie de tiempo histórica para las estaciones índices y la diferencia de altura entre las bandas y la ubicación de las estaciones (Figura 11).

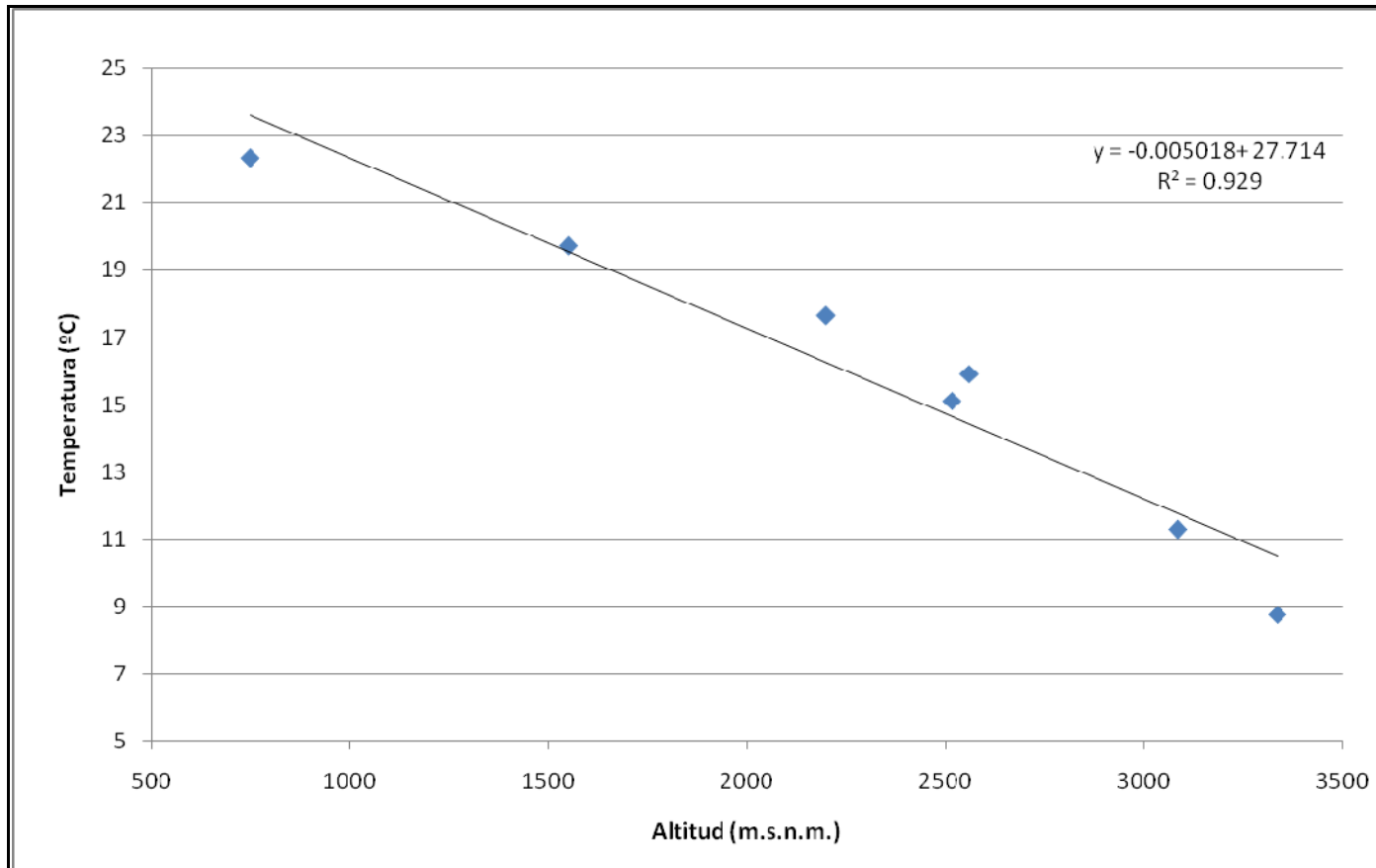


Figura 10.- Relación Temperatura - Altura. Cuenca río Paute

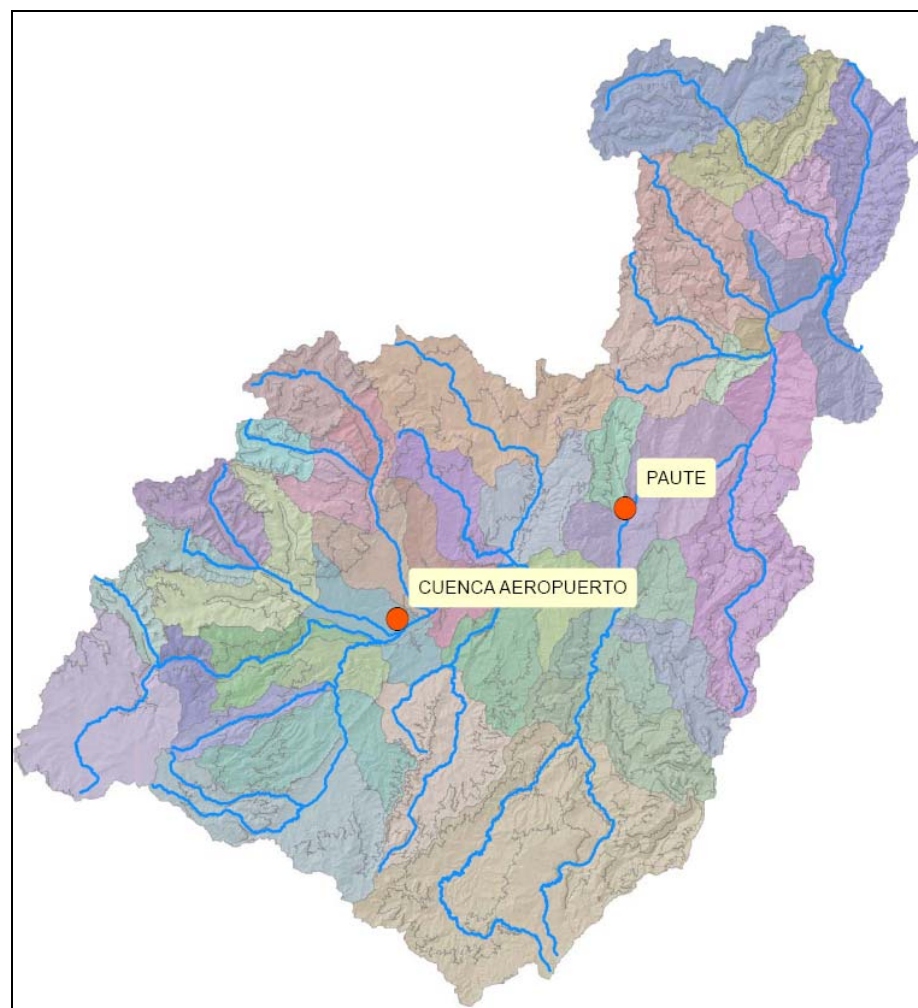


Figura 11.- Estaciones Meteorológicas Índices - Temperatura

- **Humedad, viento y latitud:**

La asignación de las variables humedad y viento requirió de una clasificación por altura de todos los catchments de la cuenca. Así, catchments situados sobre los 3.000 m.s.n.m. fueron considerados “altos”, mientras que bajo los 3.000 metros se consideraron medios-bajos. Para cada una de las variables climáticas, se consideró el promedio mensual histórico de dos estaciones índices ubicadas en zonas altas y medias-bajas, asumiendo una nula variación inter-anual, así como tampoco algún gradiente continuo relacionado con la altura, salvo la asignación discreta de las estaciones índices para las zonas antes mencionadas. Particularmente, para el caso de la humedad, se consideró el promedio mensual histórico de las estaciones El Labrado y Ucubamba, para zonas altas y medias-bajas respectivamente. Para el caso del viento, se consideró a las estaciones Palmas-Azuay y El Labrado, para zonas medias-bajas y altas respectivamente.

El cálculo de la latitud se realizó mediante un software GIS (ArcGIS® 9.2), obteniendo la latitud del centroide que define cada microcuenca.

Condiciones hidrológicas existentes en la cuenca:

- **Ríos**

La Figura 14 muestra la ubicación de las 50 estaciones hidrométricas localizadas al interior de la cuenca. Se identificaron aquellas cuencas consideradas aportantes de las cuencas intermedias y bajas. Para cada una de estas se incluyeron en el modelo series históricas de caudales que fueron posteriormente utilizadas en la calibración del modelo.



Figura 13.- Estaciones meteorológicas índices - humedad

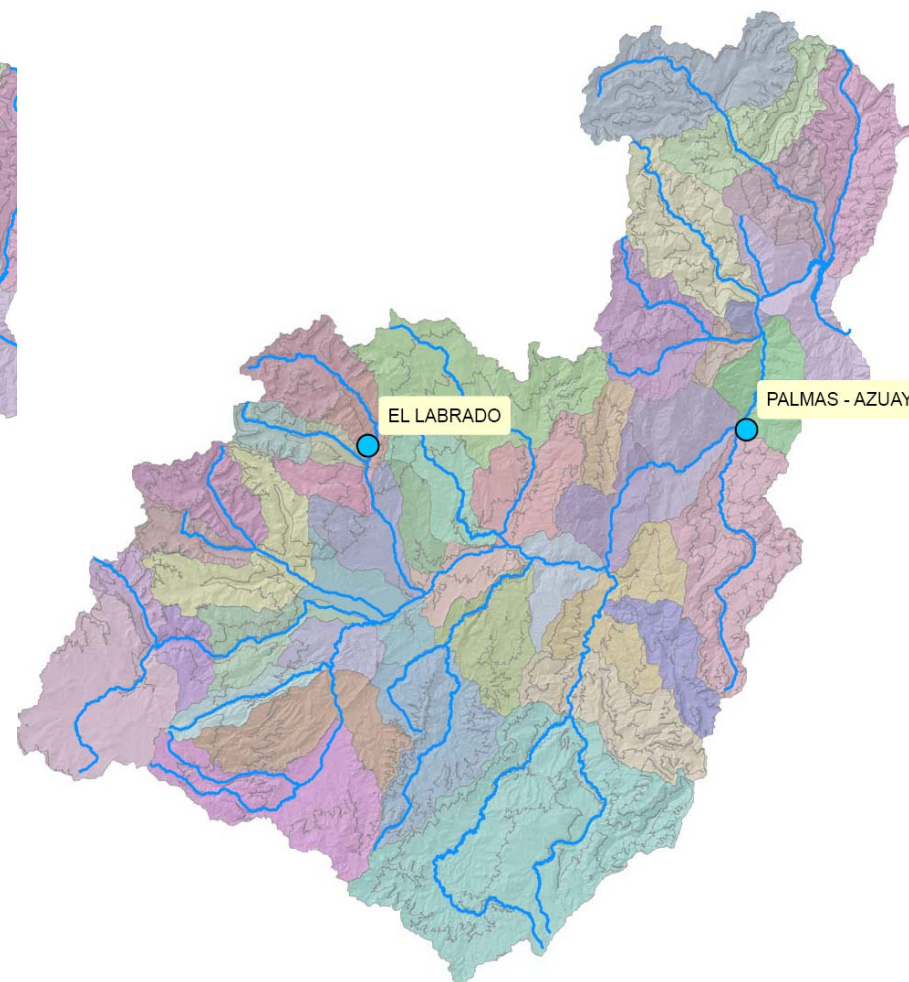


Figura 12.- estaciones meteorológicas índices - viento

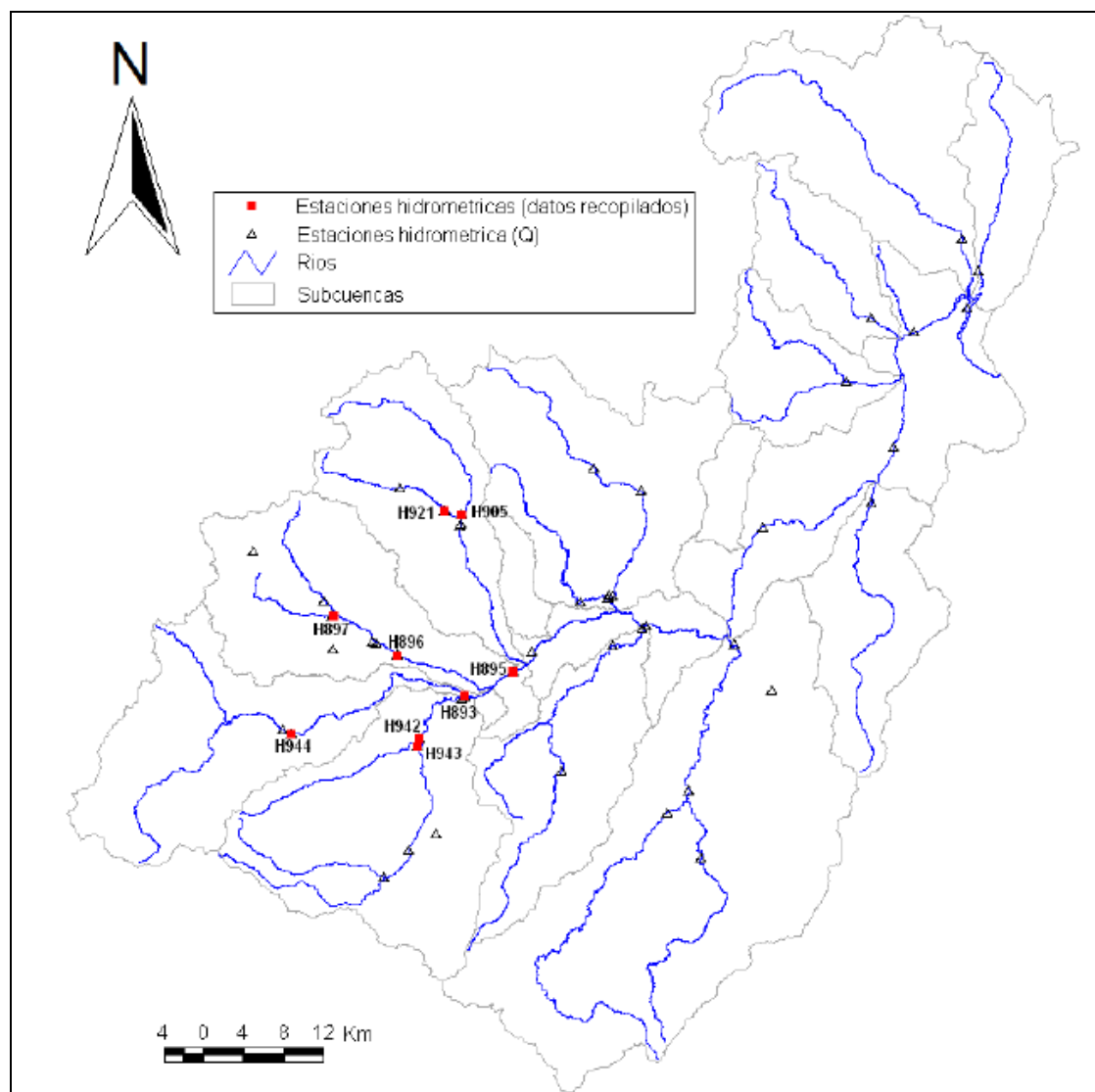


Figura 14.- Estaciones hidrológicas disponibles en la cuenca del río paute

Infraestructura física de control y aprovechamiento de recursos hídricos:

- **Embalses:**

En el modelo desarrollado se han ingresado los datos físicos y de operación asociados al embalse Amaluza operado por Hidropaute. En etapas posteriores se podrán incorporar en el modelo otras obras de infraestructura (ej. centrales de pasada en el Río Machángara, central Mazar, embalses Chanlud y Labrado) cuyas características no fueron proporcionadas para el desarrollo del modelo en esta oportunidad. Se pueden incluir en el futuro también obras de infraestructura que están en etapa de planificación.

- **Sistemas de regadío:**

No se ha podido contar con información relacionada con la infraestructura asociada a los sistemas de regadío. La representación de la demanda de agua asociada a estos sistemas se describe en la próxima sección.

- **Sistema de distribución de agua potable para la ciudad de Cuenca:**

Debido a falta de información relacionada con este sistema no ha sido posible incluir estos elementos en el modelo. Sin perjuicio de lo anterior el modelo puede perfeccionarse incluyendo mayor detalle con respecto a estos elementos.

Análisis de demanda de agua

Para complementar el balance hidrológico realizado por el modelo en sus componentes naturales e intervenidas es importante realizar un análisis de la demanda de agua. Este análisis considera una serie de sub-etapas que se describen a continuación:

- **Definición usos de suelo:**

De acuerdo a la información obtenida de las coberturas de suelo en SIG desarrolladas en el proyecto “Aplicaciones de la información temática digital de la Cuenca del Río Paute”, desarrollado por CG-Paute en conjunto con la Universidad del Azuay (2008), ha sido posible realizar un análisis de uso de suelo para cada una de las bandas de elevación por subcuenca. La información disponible existe para dos años:

1991 y 2000. Para el desarrollo del estudio en cuestión se ha considerado la cobertura correspondiente al año 1991. La Figura 15 la distribución de cobertura de suelo para ese año.

El número de categorías de la cobertura original ha sido reducido para disminuir el esfuerzo en el desarrollo y calibración del modelo. La equivalencia entre las categorías original y finales usadas en el modelo se muestra en el Cuadro 7. La cobertura del año 1991 fue intersectada con la cobertura SIG de las bandas de elevación por subcuenca para finalmente obtener la distribución espacial de coberturas en la cuenca⁶. La categoría de cultivos fue desagregada nuevamente considerando los tipos principales existentes en la cuenca. El patrón de desagregación de cultivos para cada una de las bandas de elevación y subcuencas fue desarrollado considerando la información que CGPaute ha preparado para la subcuenca del Río Santa Bárbara (Inventario hídrico de la Subcuenca del Río Santa Bárbara, CG-Paute, 2008). Sería ideal en futuras mejoras del modelo considerar una distribución de cultivos que refleje de mejor manera las características particulares de cada una de las subcuencas.

⁶ Este proceso fue llevado a cabo por un equipo al interior de PROMAS

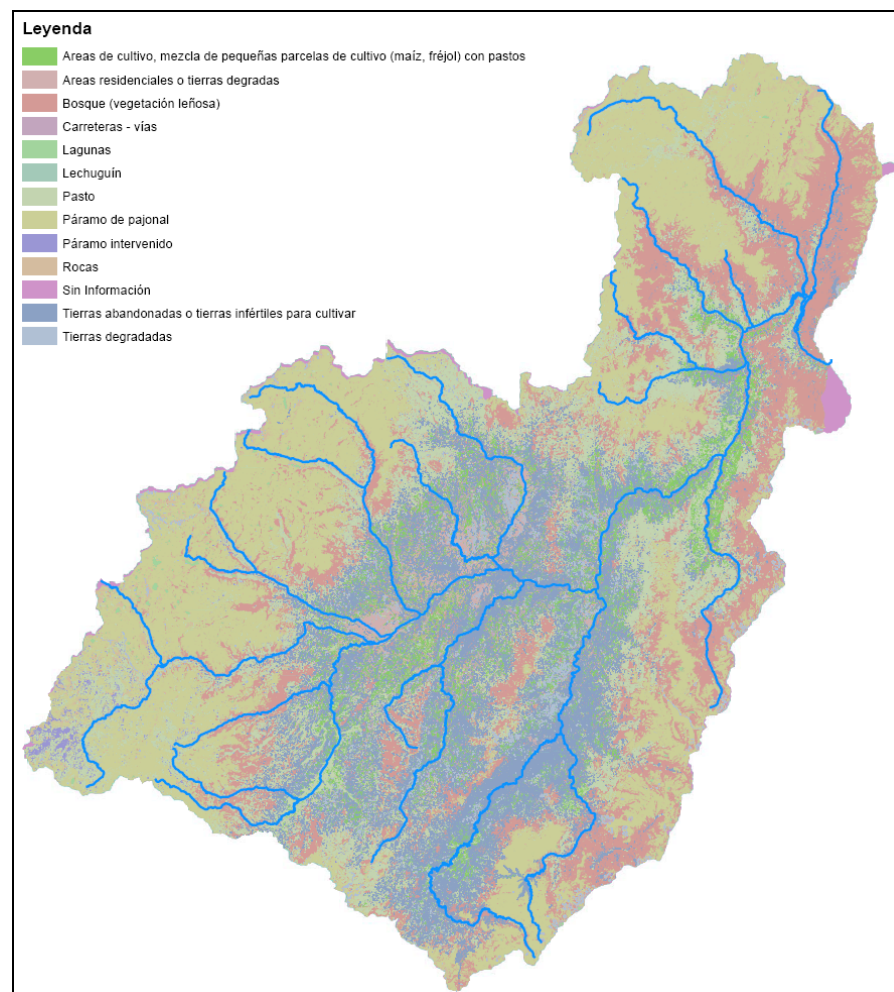


Figura 15.- Uso de suelo en la cuenca del río paute

Cuadro 7.- Uso de suelo original y agrupación utilizada en el modelo

<i>Uso de suelo original (1991)</i>	<i>Uso de suelo utilizado en el modelo</i>
Paramo de pajonal	Paramo
Paramo intervenido	Paramo Intervenido
Bosque (vegetación leñosa)	Bosque
Lagunas Lechuguin	Lagunas Lechuguin
Pasto	Pasto
Rocas	Rocas
Tierras degradadas Carreteras - vías Áreas residenciales o tierras degradas	AreasUrbanas Degradadas
Tierras abandonadas o tierras infértiles para cultivar	Tierras Infértiles
Áreas de cultivo, mezcla de pequeñas parcelas de cultivo (maíz, frejol) con pastos	Cultivos Maíz Pasto Hortalizas Plantación Papa Frutales

- **Cultivos bajo riego:**

Debido a la falta de información con respecto a la ubicación espacial de los diferentes sistemas de riego existentes en la cuenca se ha procedido a incluir la demanda asociada a cultivos bajo riego en la cuenca de la siguiente manera:

- 1º. Primero se seleccionan aquellas unidades (bandas de elevación por subcuenca) en las que la existencia de cultivos resulta relevante como utilización del espacio. Los criterios considerados para mostrar esta relevancia han sido seleccionados de manera de obtener un número limitado de unidades que cubran aquellas zonas que a priori se consideran tienen acceso a riego (zonas bajas de la cuenca). El criterio utilizado selecciona aquellas bandas de elevación que posean un porcentaje de cobertura en cultivos mayor al 45% y/o que correspondan a las zonas bajas en los ríos que desembocan en el Río Paute y/o las unidades aledañas a este Río. La Figura 16 muestra la ubicación de las unidades elegidas en base a estos criterios.
- 2º. Posteriormente se crean al interior del esquema WEAP las unidades asociadas a riego en cada banda de elevación y subcuenca. (Figura 17). Estas nuevas unidades comparten todas las características físicas y climatológicas de las unidades de origen excepto la distribución de coberturas como se explica a continuación.
- 3º. Utilizando información proveniente del último Censo Agropecuario (PACC, 2008) y coberturas en SIG de la ubicación de cantones y unidades de análisis se obtuvieron porcentajes ponderados de cultivos bajo riego para cada una de las unidades de análisis.
- 4º. Considerando este porcentaje de cultivos bajo riego recién determinado se disminuyeron las áreas bajo cultivo de las unidades de análisis originarias y se traspasaron a las nuevas unidades bajo riego.

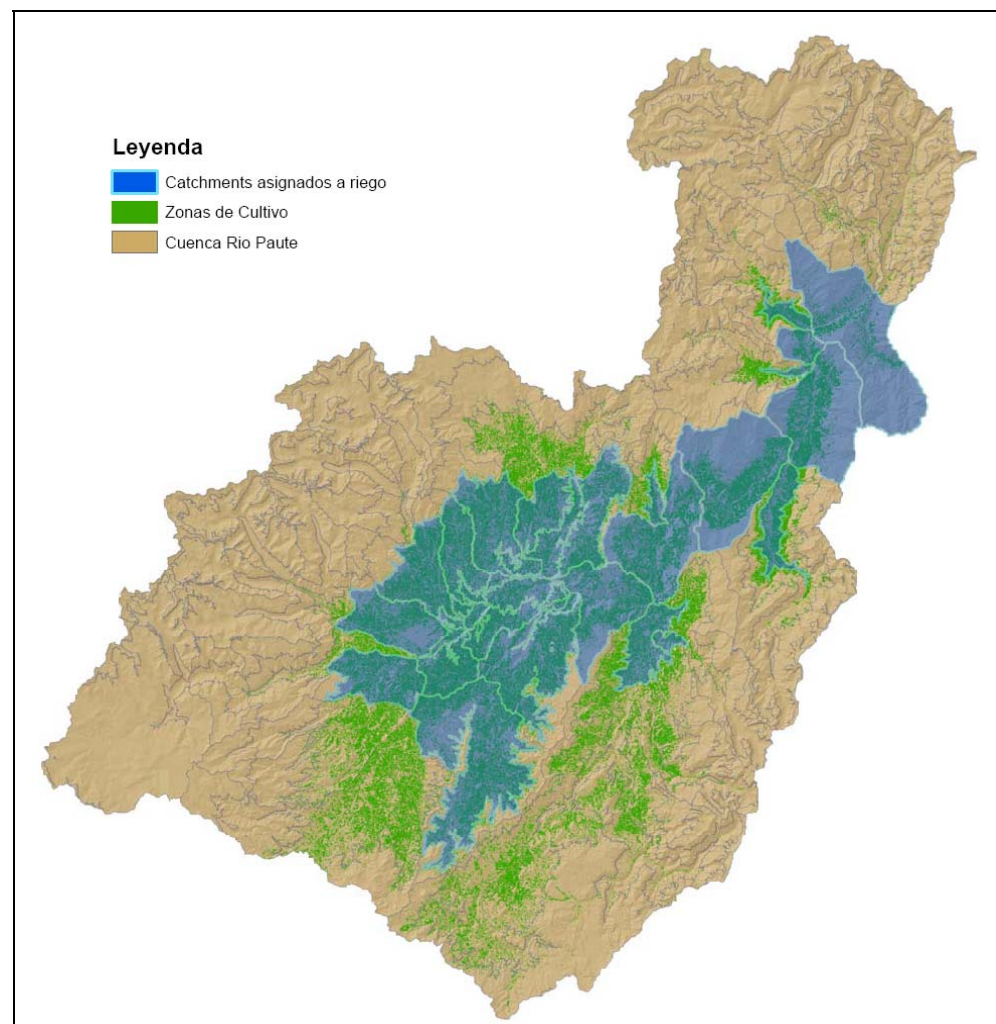


Figura 16.- Zonas de riego y catchments asignados a riego.

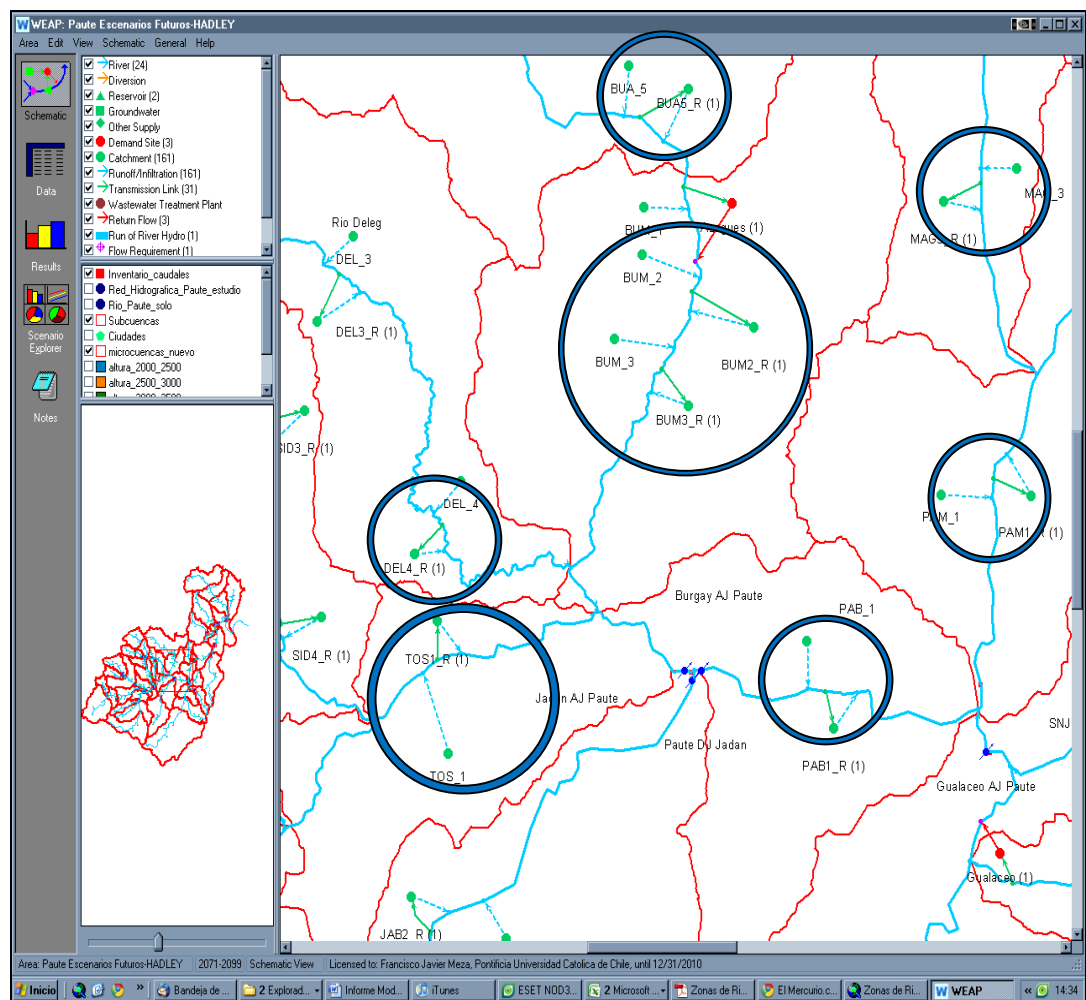


Figura 17.- Esquema de creación de unidades de riego en modelo Weap

- **Parámetros agronómicos/hidrológicos:**

De manera preliminar se incorporan valores para los parámetros críticos a utilizar por el modulo hidrológico de WEAP. Estos parámetros se obtienen de manera inicial de modelo que ha sido desarrollado previamente para condiciones hidrológicos/climatológicas similares. Estos valores iniciales se modifican posteriormente en el proceso de calibración del modelo que se explica más adelante.

- **Demanda Urbana:**

Para establecer la demanda urbana se considera la información proveniente del último Censo de población (estudio vulnerabilidad). Se ha decidido considerar como población efectiva en los centros urbanos incluidos en el modelo la población urbana de los cantones representativos de estos centros urbanos. Se considera también una tasa de consumo de 150 l/hab/día, valor utilizado previamente en estudios para regiones similares. Se estima que un 85% de esta agua requeridas retornan al río a través de flujos de retorno implementado en el modelo.

FASE 3. CALIBRACIÓN

El proceso de calibración del modelo desarrollado de acuerdo al análisis de oferta y demanda de agua descrito con anterioridad se realiza en 3 etapas consecutivas.

Calibración cuencas aportantes:

Una primera etapa consiste en una calibración hidrológica de las subcuencas aportantes. Se espera que la influencia humana en estas subcuencas sea baja (subcuencas en régimen natural). De suma importancia en esta etapa del proceso de calibración es el analizar las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas de paramos. Igualmente importante será la revisión de la literatura existente (e.j. Buytaert, 2004; Buytaert et al. 2003; Celleri et al. 2001; Celleri et al., 2006; Celleri, 2007).

Las subcuencas consideradas en esta primera etapa corresponden a las subcuencas del Yanuncay, Tomebamba y Tarqui. En una primera aproximación se establecieron factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales modificaron los parámetros de conductividad en la zona de raíces (Ks) y el Factor de Resistencia al Ecurrimiento (RRF). Los factores antes mencionados fueron establecidos según la clasificación de alturas de cada catchment, lo que finalmente conllevó la existencia de una proporción entre zonas altas y medias-bajas en cuanto a los valores de conductividad y resistencia al escurrimiento. Luego se ajustaron los factores de calibración mediante la comparación de los caudales modelados con los registros históricos de estaciones de aforo de caudales de la zona, las cuales corresponden a las estaciones de Matadero en Sayausí, Surocucho AJ Lluccluchas, Yanuncay DJ Chico Soldados, Yanuncay AJ Tarqui, Tarqui DJ Shucay y Tomebamba en Monay (Figura 18). Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se utilizaron dos índices/métricas utilizadas normalmente en la calibración de modelos hidrológicos: el índice de Nash Sutclif y el sesgo (o Bias o desviación relativa de los caudales) (Weglarczyk 1988).

Al no obtener una relación general y uniforme para cada subcuenca, esto es, no obteniendo la reactividad necesaria o flujos de caudales base inconsistentes con los registros históricos de las estaciones (RRF y Ks, respectivamente) se procedió luego a realizar calibraciones particulares por grupos de microcuencas, las cuales tenían efecto sobre estaciones de aforo individuales, pudiendo calibrar individualmente cada caudal modelado con su correspondiente estación de referencia.

Luego de obtener un buen ajuste entre los caudales modelados y los observados para las estaciones consideradas se obtuvo los resultados presentados en el Cuadro 8.

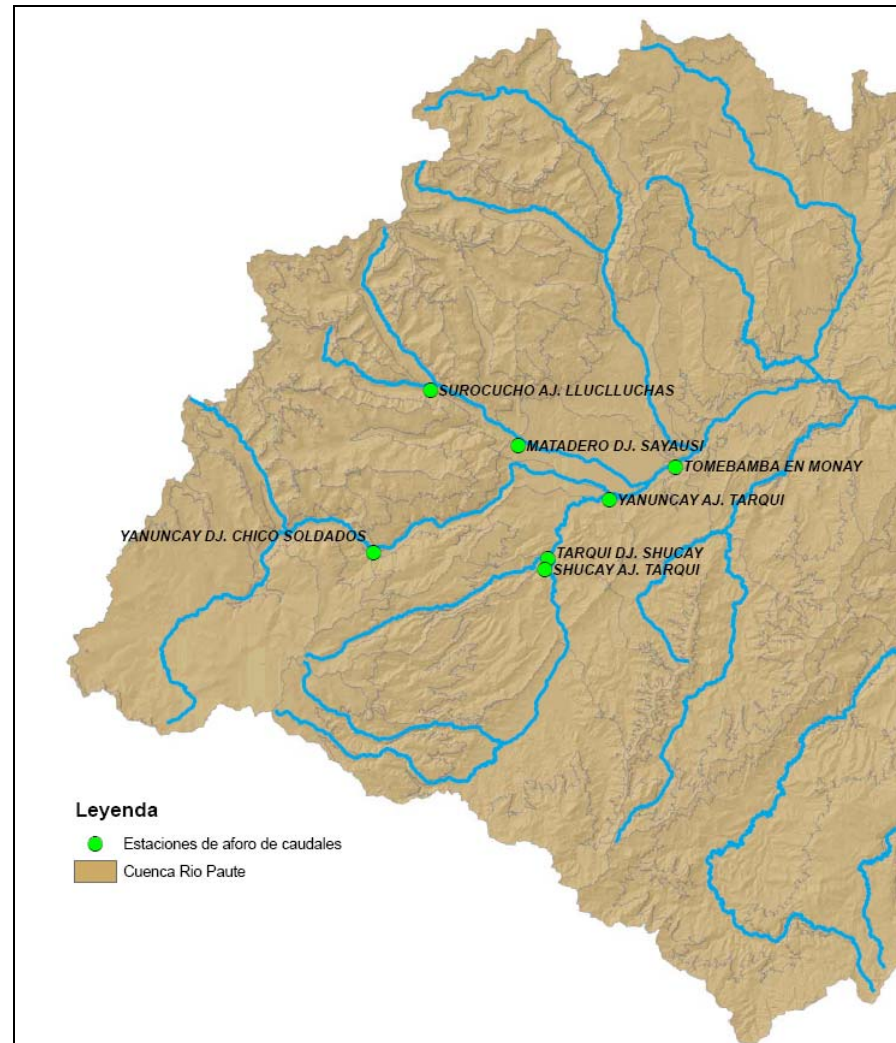


Figura 18.- estaciones de aforo para calibración - zona alta

Cuadro 8.- Resultados calibración - parte alta

	Nash-Sutcliff	BIAS
Surocucho AJ Lluclluchas	0,35	7%
Tomebamba en Monay	0,62	12%
Matadero en Sayausí	0,48	-4%
Yanuncay DJ Chico Soldados	0,47	19%
Yanuncay AJ Tarqui	0,47	-5%
Turqui DJ Shucay	0,56	19%

Los valores de los índices de calibración presentados en el Cuadro 8 corresponden a niveles adecuados de calibración considerando las limitaciones de datos existentes en esta cuenca. Estos valores están en concordancia con valores alcanzados en la calibración de cuencas en condiciones de modelación similares (Escobar et al., 2008). Junto a los índices presentados anteriormente, se obtuvo la distribución mensual calibrada para todas las estaciones, así como también la relación entre los caudales modelados y observados para cada una de las estaciones consideradas para todo el periodo de modelación. En las figuras mostradas más adelante, se presentan algunos ejemplos de lo antes mencionado demostrando que en términos generales el modelo esta representando de manera adecuada los patrones temporales de caudales en los ríos de esta sección de la cuenca. Figuras para el listado completo de estaciones de aforo consideradas en esta sección se presenta en el Anexo 1.

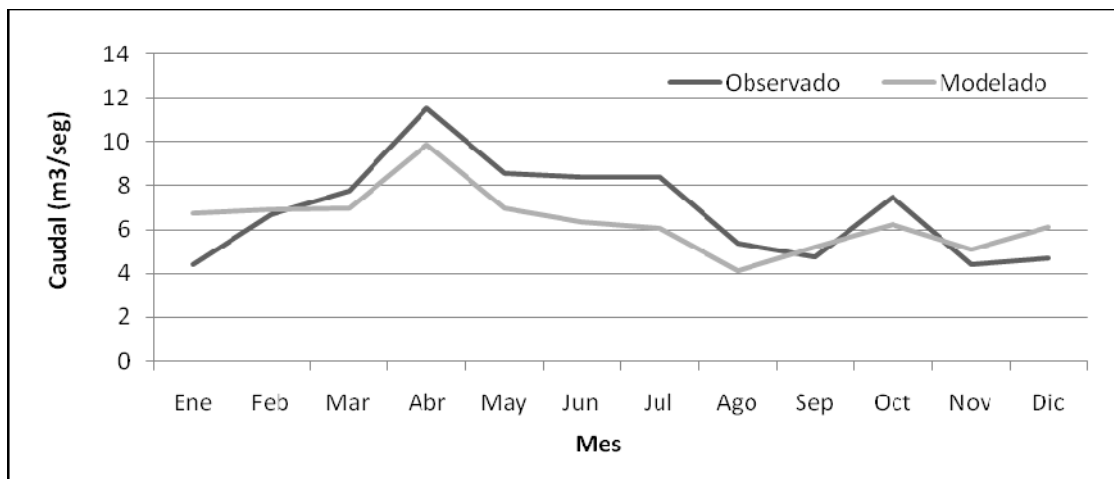


Figura 19.- Distribución mensual de caudales - Estacion Matadero en Sayausí

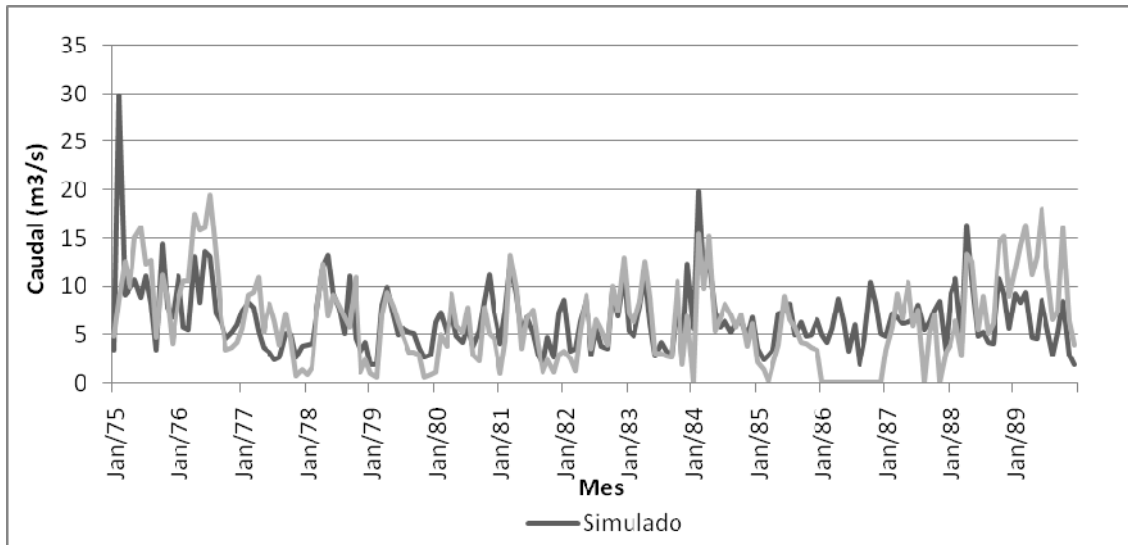


Figura 20.- Caudales simulados y observados para todo el periodo modelado - Estación Matadero en Sayausí.

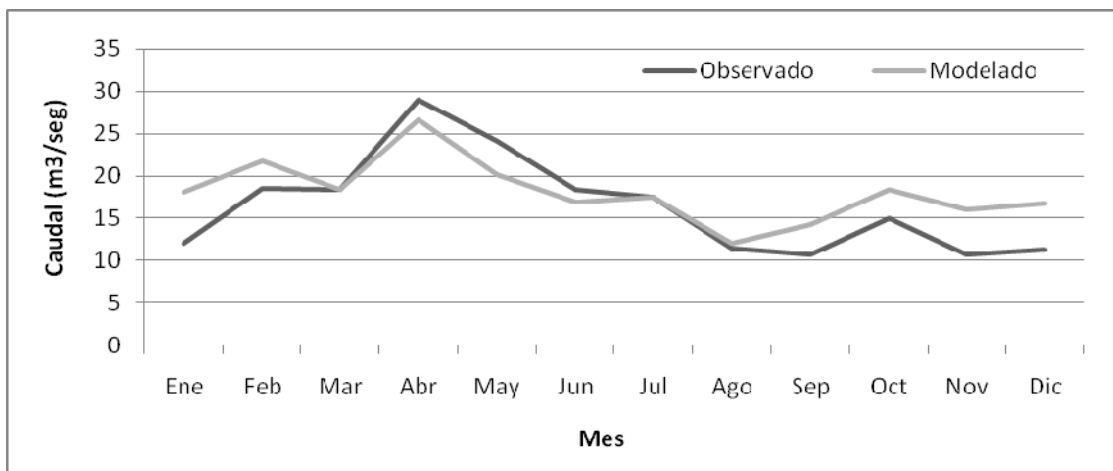


Figura 21.-Distribución mensual de caudales - Estacion Tomebamba en Monay

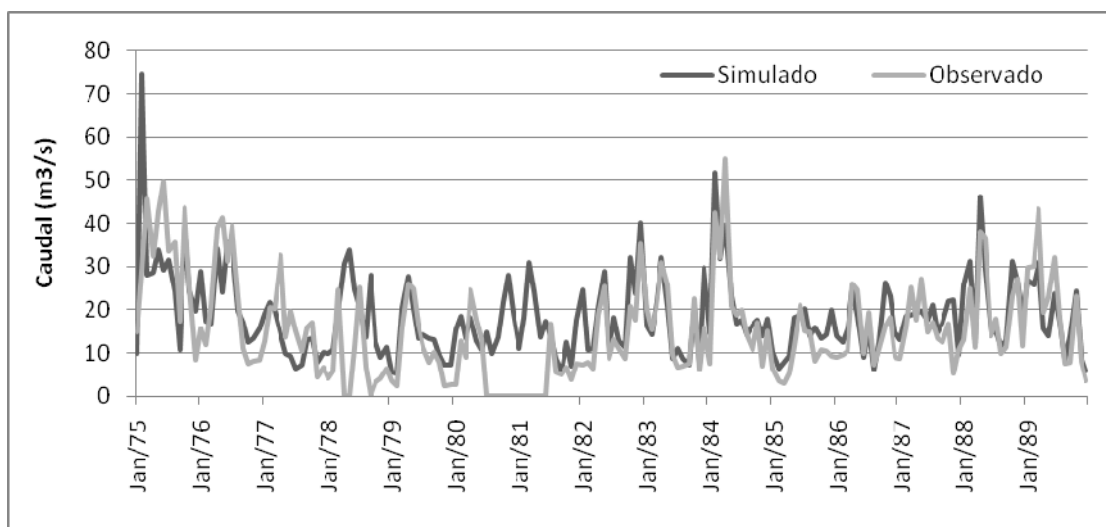


Figura 22.-caudales simulados y observados para todo el periodo modelado - Estación Tomebamba en Monay

Una vez concluida la calibración de esta sección de subcuencas aportantes se procedió a “cerrar” estas subcuencas reemplazando la modelación hidrológica por el caudal observado la estación de Tomebamba en Monay. Para aquellos meses con datos faltantes se utilizó 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 procedió a continuación el proceso de calibración de las subcuencas intermedias.

Calibración cuencas intermedias

La zona intermedia considerada para la cuenca del Rio Paute incluye las subcuencas de los ríos Machangara, Sidcay, Deleg, Burgay, Jadan, Gualaceo, Magdalena y Paute (primera sección). En esta zona se encuentran disponibles las estaciones de aforo: Paute DJ Jadan, Machángara AJ Chulco⁷, Gualaceo AJ Paute y Paute en Paute2 (Figura 23).

La metodología de calibración considerada tanto en la zona media y baja de la cuenca del Paute corresponde a una calibración subcuenca por subcuenca. Esta metodología resulta obligatoria en la medida que se ha “cerrado” una parte de la cuenca. Una metodología considerando cambios de parámetros por banda de altura modificaría los valores de las subcuencas ya calibradas.

Una situación particular se desarrolló en la calibración de la Subcuenca del Rio Gualaceo, la cual influencia los caudales en la estación de Paute en Paute2. En esta subcuenca, a pesar de establecer una serie de modificaciones para los valores de los

⁷ La estación Machángara AJ Chulco no ha sido considerada en el proceso de calibración ya que la existencia del embalse Labrado (no incluido en esta etapa de desarrollo del modelo) desnaturaliza los caudales.

parámetros de calibración, los caudales modelados no siguen la estacionalidad observada en la estación de aforo Gualaceo AJ Paute. Frente a esta situación se procedió a revisar la relación lluvia-escorrentía y se verificó que la estacionalidad de los caudales no corresponde a la estacionalidad de las precipitaciones en la subcuenca. Debido a esta razón se re-asignó la estación de precipitaciones original (Paute) a la estación de Arenales. Esta estación presenta una distribución temporal de precipitaciones similar a los caudales, pero con montos mucho mayores a la de la estación original, por lo cual se creó un factor de ajuste de precipitaciones para disminuir los montos y hacerla consistente con los montos originales.

Luego de ajuste precedente, se procedió a calibrar el modelo con la estación de referencia Paute en Paute2, siguiendo la misma metodología utilizada en la parte alta de la cuenca para los parámetros “Factor de Resistencia a la Escorrentía” (Runoff Resistance Factor-RRF) y Conductividad Hidráulica en la zona de las raíces (Ks), en búsqueda de mayor reactividad de los catchments para representar de manera adecuada los caudales máximos, así como también modificar los caudales base modelados. Al no obtener buenos resultados en un primer momento, se adicionaron factores de calibración para los parámetros de Conductividad en el perfil profundo (Kd), aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, con el consecuente aumento de los caudales base. Por otro lado, se aumentó la capacidad hídrica del perfil superior (Sw), a fin de permitir 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), regulando la transmisión de los flujos a los caudales base.

Todo lo anterior responde a que como comportamiento general, los caudales obtenidos por la modelación subestimaban de manera importante los montos observados en la estación de Paute Paute2, situación corregida en parte con la re-asignación de las precipitaciones en la cuenca del Río Gualaceo.

Luego de todo el proceso anteriormente expuesto, se obtuvieron los resultados de calibración mostrados en el Cuadro 9 para las estaciones de aforo consideradas. Al igual que en la zona alta, junto a los índices presentados anteriormente, se obtuvo la distribución mensual calibrada para todas las estaciones, así como también la relación entre los caudales modelados y observados para cada una de las estaciones consideradas para todo el periodo de modelación. En las figuras mostradas más adelante, se muestran algunos ejemplos. Figuras para todas las estaciones se presentan en el Anexo 1.

Los resultados mostrados demuestran un proceso de calibración satisfactorio para esta sección de la cuenca. Una vez finalizada la calibración de la cuenca intermedia se procedió a “cerrar” el modelo en la estación de Paute en Paute2, procedimiento igual al realizado con los caudales en la estación Tomebamba en Monay, pretendiendo así, no arrastrar las desviaciones aceptadas en la sección media hacia la calibración de la parte baja proceso que se inició a continuación.



Figura 23.- estaciones de aforo para calibración - zona media

Cuadro 9.-Resultados Calibración - Parte Media

	Nash-Sutcliff	BIAS
Paute DJ Jadan	0,76	14%
Paute en Paute2	0,60	-5%
Gualaceo AJ Paute	0,34	2%

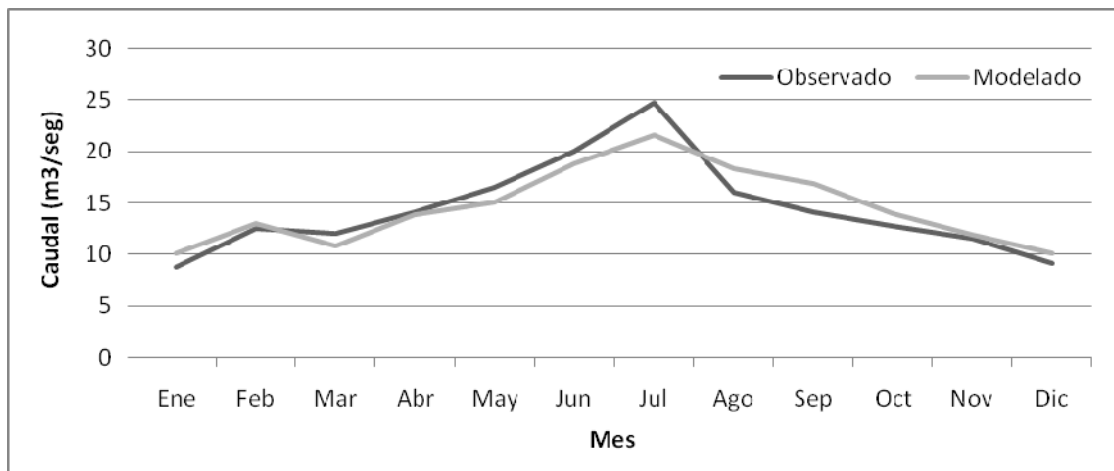


Figura 24.- distribución mensual de caudales – Estación Gualaceo AJ Paute

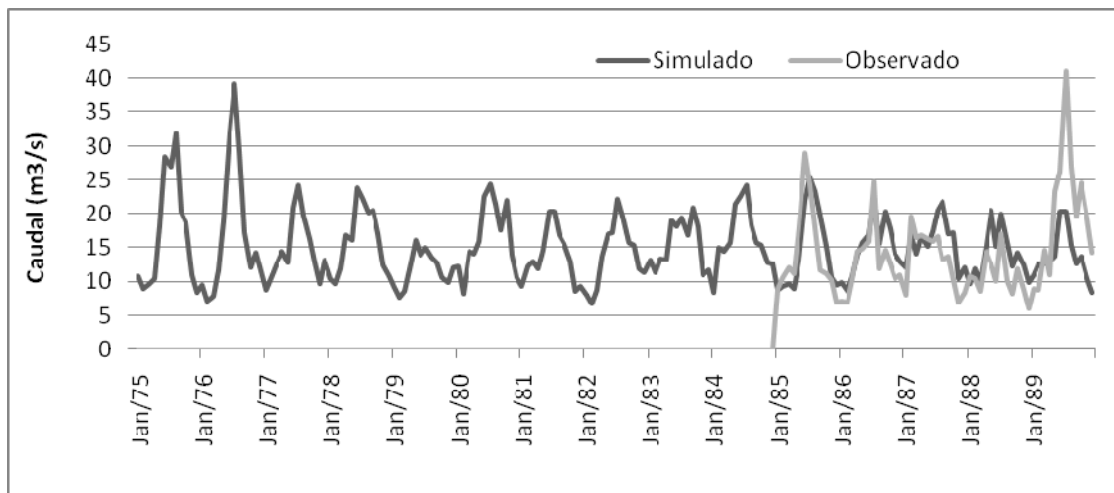


Figura 25.-caudales simulados y observados para todo el periodo modelado - estación Gualaceo AJ Paute

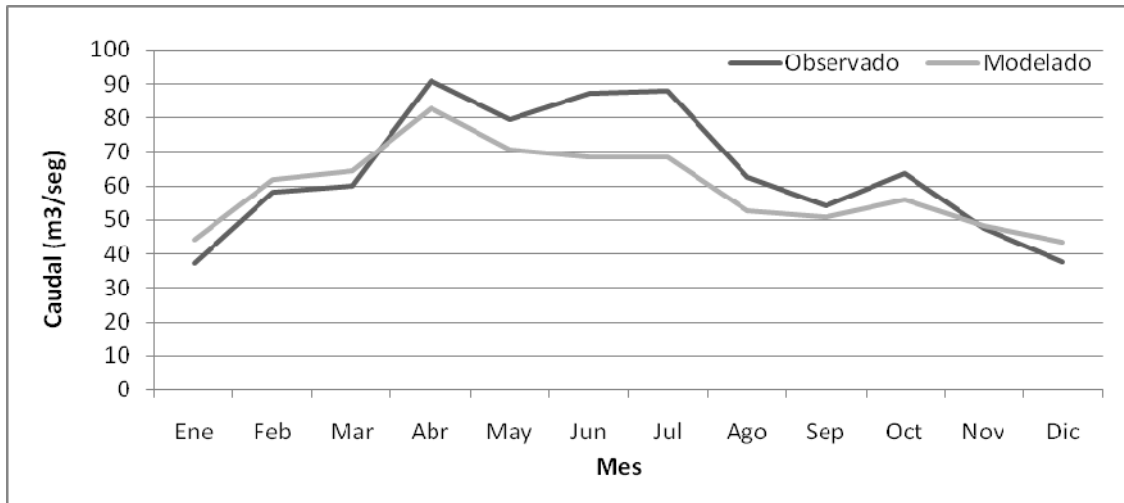


Figura 26.-mensual de caudales - Estación Paute en Paute 2

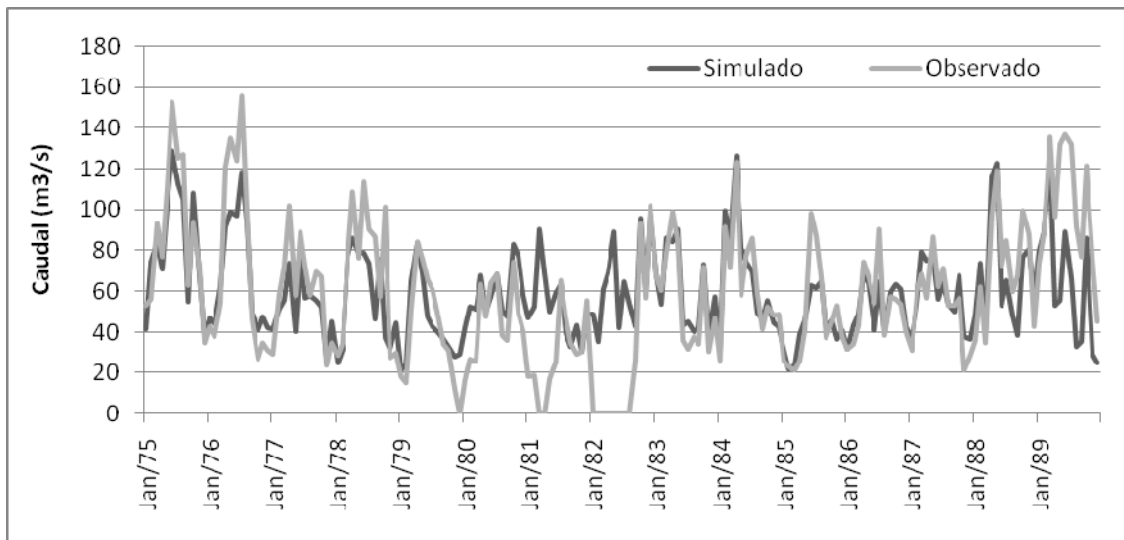


Figura 27.-caudales simulados y observados para todo el periodo modelado - Estación Paute en Paute 2

Calibración cuencas bajas

La zona baja de la cuenca del Río Paute incluye las subcuencas de los ríos Collay, Pindilig, Mazar, Juval y Pulpito, además de las zonas bajas del río Paute (Paute en Collay, Paute en Pindilig, Paute en Mazar y Paute en Juval), las cuales consideran las estaciones de aforo: Dudas AJ Paute, Mazar AJ Paute, Paute AJ Dudas y Paute en Palmira, esta última estación final de la calibración para la cuenca del río Paute (Figura 28)

En este sector, luego de calibrar cada una de las subcuencas aportantes de manera individual, se logró obtener los índices de calibración presentados en el Cuadro 10 para el sector bajo de la cuenca (aguas debajo de Paute en Paute2). En este punto se debe señalar que en los registros históricos de la estación Paute en Palmira existen

valores en el periodo de Sep-87 a Mar-89, que no son congruentes con el comportamiento de los caudales en el periodo inicial de calibración, lo cual altera los índices al incorporar un comportamiento completamente anómalo, por lo cual no se consideraron al momento del cálculo de los mencionados índices.

Para el caso particular de la calibración de la Subcuenca del río Mazar, el registro de caudales simulados presentó concordancia con los montos registrados en la estación de Paute en Mazar. No obstante lo anterior, la distribución mensual de los mismos no presentan la misma estacionalidad que la de los registros históricos, por lo cual se presumió de una pequeña variación en cuanto a la distribución estacional de las precipitaciones. Debido a lo anterior, se incorporó un factor de corrección de las precipitaciones, al cual modifica en promedio un 20% el monto de las precipitaciones en los meses con diferencias negativas entre el caudal histórico y el caudal simulado.

Cuadro 10.- Resultados Calibración - Parte Baja

	Nash-Sutcliff	BIAS
Dudas AJ Paute	0,54	2%
Paute en Palmira	0,89	0%
Mazar AJ Paute	0,28	-4%
Paute AJ Dudas	0,78	3%

Al igual que en la zona media de la cuenca, junto a los índices presentados anteriormente, se obtuvo la distribución mensual calibrada para todas las estaciones, así como también la relación entre los caudales modelados y observados para cada una de las estaciones consideradas para todo el periodo de modelación. En las figuras mostradas más adelante, se muestran algunos ejemplos. El listado completo de figuras para las subcuencas de esta sección se presenta en el Anexo 1.

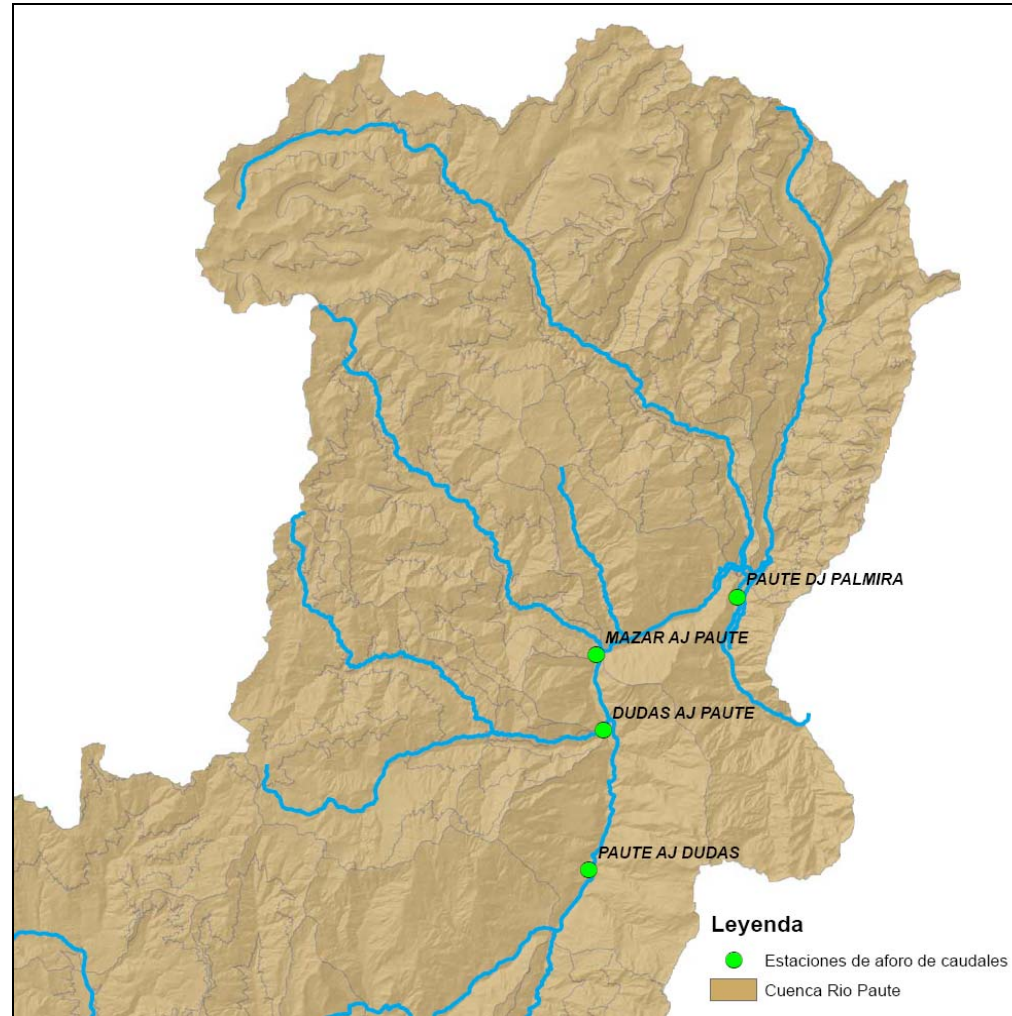


Figura 28.-estaciones de aforo para calibración - zona baja

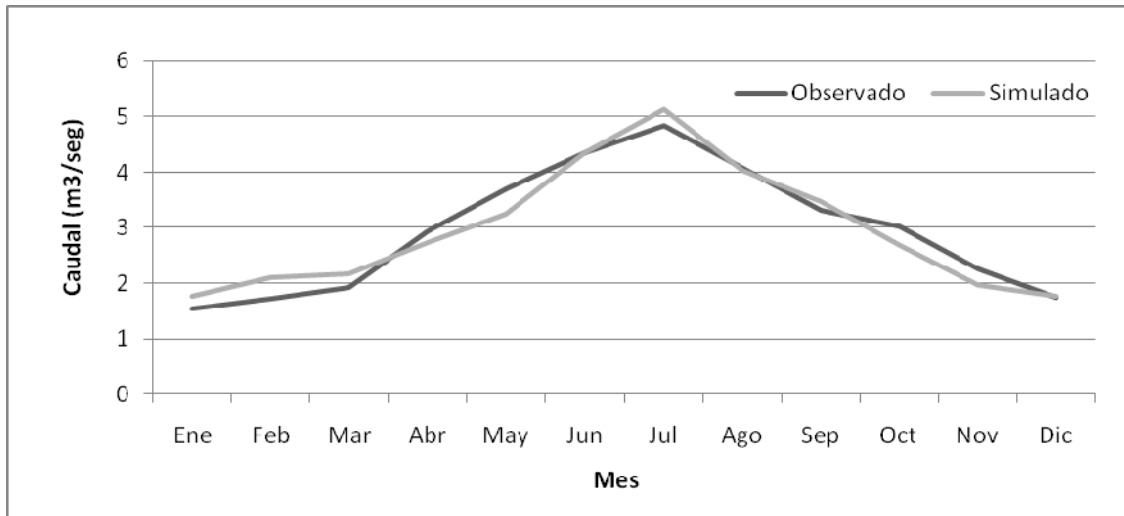


Figura 29.-Distribución mensual de caudales - Estación Dudas AJ Paute

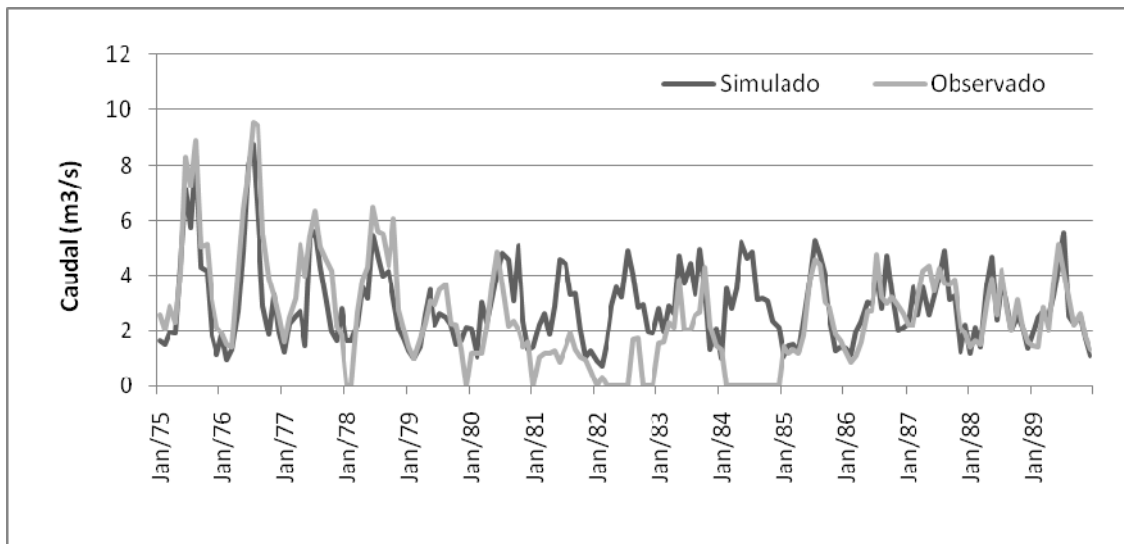


Figura 30.-caudales simulados y observados para todo el periodo modelado - Estación Dudas AJ Paute

Una vez terminada la calibración hidrológica y de manejo de recursos hídricos en las tres secciones de la cuenca del Río Paute se puede concluir que el proceso es satisfactorio llegando a valores razonables de índices de calibración tomando en cuenta las limitaciones de información existentes en la cuenca.

Calibración operación embalse Amaluza

Completada la etapa de calibración hidrológica se procedió a calibrar la operación del Embalse Amaluza ubicado en el punto de cierre de la cuenca del Río Paute. Este embalse es operado por la empresa Hidropaute en la generación de hidroelectricidad contribuyendo a un porcentaje relevante de la electricidad generada en el país (alrededor de 50%) con los más de 1,000 MW de capacidad instalados en la central Molino ubicada en la base del embalse.

Para calibrar la operación de este embalse es necesario considerar dos factores relevantes. Primero hay que considerar cual es el objetivo de operación del embalse que incide en la descarga de agua por las turbinas y segundo hay que considerar si existe alguna regla de operación asociado a la mantención de niveles de agua embalsados en para operara en periodos de déficit hídrico. Sin la consideración del primer factor el embalse se mantendría siempre con agua copando su capacidad. En el segundo caso, si no se considera un factor de conservación de aguas almacenadas el embalse operaria de manera muy recurrente con niveles de almacenaje sumamente bajos. El modelo WEAP permite representar un mecanismo de conservación de agua al incorporar dos parámetros nuevos en la operación del embalse. Un primer parámetro define un volumen de “amortiguamiento” de agua bajo el cual el modelo asigna solamente una fracción de agua para demandas agua abajo. El segundo parámetro se refiere justamente al valor asignado a esta fracción.

La calibración de la operación del embalse se realiza para el periodo 94-2004. Para este periodo se cuenta con los niveles de agua embalsada, generación hidroeléctrica y entrada y salida de agua hacia y desde el embalse⁸. Sin embargo, la base de datos climatológica considerada en el desarrollo del modelo no contempla este periodo por lo que no es posible hacer una simulación de los caudales de entrada al embalse. Es por esta razón que se decide llevar a cabo una calibración de la operación del embalse para el periodo 94-2004. La cuenca fue “cerrada” en su totalidad para este efecto y su caudal equivalente es considerado a través del caudal observado a la entrada del embalse.

Las próximas figuras muestran los resultados parciales del proceso de calibración de la operación del embalse. Se consideran dos variables en el proceso de calibración: el volumen almacenado y el total de energía generada. Como valor objetivo de descarga se ha utilizado el promedio de agua descargado desde las turbinas. Esto representa una visión simplificada de los objetivos de operación del embalse. Sin embargo, no se posee información más detallada con respecto a estos objetivos. En una etapa posterior de desarrollo del modelo se ha propuesto complementar el modelo de recursos hídrico con un modelo de planificación energética (en plataforma LEAP). Con esta unión es posible obtener de manera dinámica objetivos de operación para determinar descargad de agua desde el embalse.

⁸ Toda esta infrmacion ha sido entregada por Hidroaute.

Las primeras de las Figuras presentan la situación sin considerar parámetros de conservación de agua en el embalse. Se puede apreciar en este caso como el embalse queda sin agua almacenada en gran parte de los meses de simulación. La Figura 33 y la Figura 34 muestra la situación calibrada donde se ha considerado un volumen de amortiguamiento equivalente a 60 millones de m³ (un 60% de la capacidad máxima de almacenamiento). El modelo opera considerando solamente un 10% del agua disponible cada vez que el volumen de agua en Amaluza baja de este nivel. En el Cuadro 11 se presenta una comparación de los resultados de la calibración de la operación del embalse considerando como índice de calibración el coeficiente de correlación entre la serie de tiempo de la variable observada y la simulada.

Es importante considerar que en el desarrollo de las características básicas del embalse Amaluza en el modelo no ha incluido cambios en la capacidad de almacenamiento debido a la carga de sedimentos histórica. Incluir este factor se presume mejoraría considerablemente la simulación del nivel de agua embalsado. Se puede ver por ejemplo que el máximo volumen considerado en el modelo (100 millones de m³) correspondiente al diseño original no se logra en ninguno de los meses en la simulación.

Cuadro 11.- Resultados Calibración (coeficiente de correlación) – Operación Embalse

Variable	Escenario Base	Escenario Calibrado
Volumen Almacenado	0,69	0,87
Energía Generada	0,93	0,93

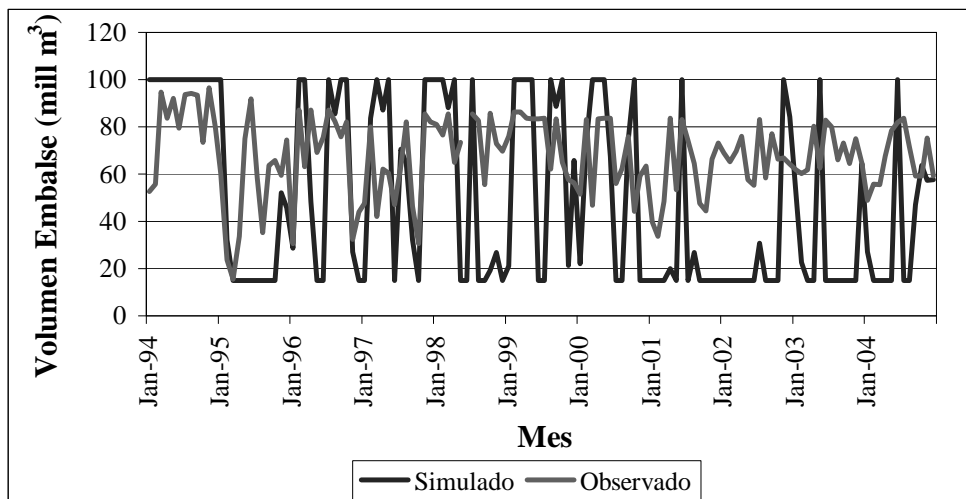


Figura 31.-Comparación de volumen de agua almacenado en embalse Amaluza de acuerdo a simulación y observación – Escenario Base

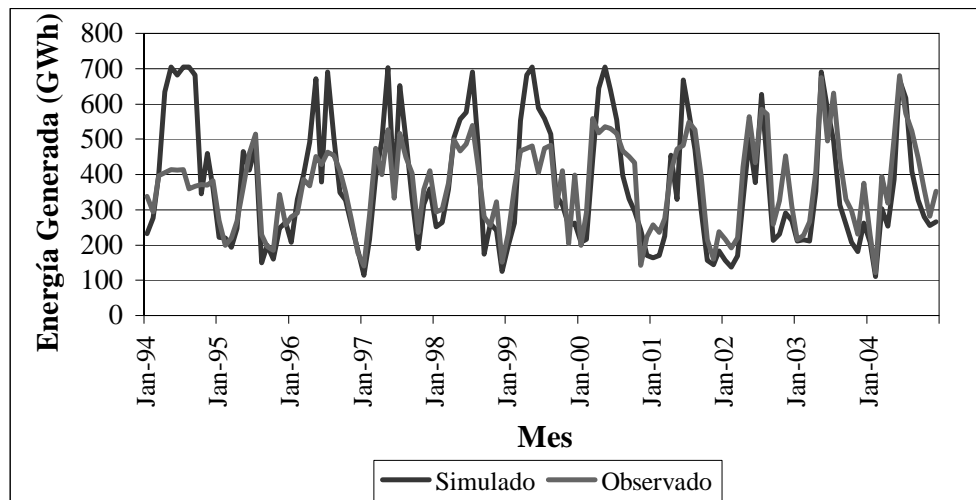


Figura 32.-Comparación de energía generada en central Molino de acuerdo a simulación y observación – Escenario Base

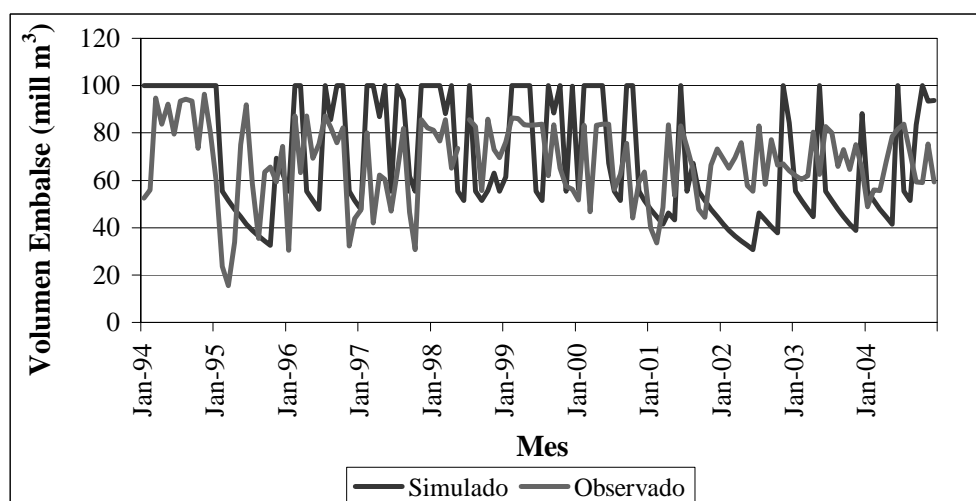


Figura 33.-Comparación de volumen de agua almacenado en embalse Amaluza de acuerdo a simulación y observación – Escenario Calibrado

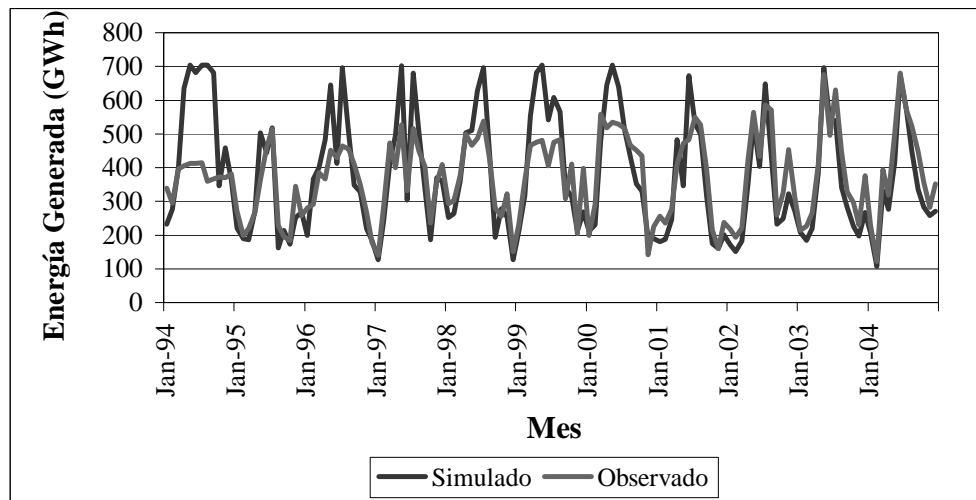


Figura 34.-Comparación de energía generada en central Molino de acuerdo a simulación y observación – Escenario Calibrado

FASE 4: CREACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS

Una vez que se cuente con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos. Una clase de estos estudios corresponde a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. En el desarrollo de este modelo se han desarrollado escenarios futuros que contemplan las siguientes características:

- Variables climatológicas: se han creado escenarios futuros de acuerdo a las proyecciones del modelo HadCM y ECHAM (escaladas dinámicamente al Ecuador utilizando la herramienta PRECIS) para el periodo 2070-2100 en ambos casos.
- Se consideran escenarios que incluyen las centrales hidroeléctricas actualmente en proceso de construcción y/o planificación: Mazar y Sopladora.

Para considerar los escenarios climatológicos futuros se debe seguir una metodología de ajuste de datos que contempla los siguientes pasos:

1. Una primera etapa consiste en relocalizar las proyecciones climatológicas históricas (de control) provenientes del modelo de cambio climático regional (PRECIS) a la ubicación de las estaciones índice tanto de temperatura como de precipitación.
2. Una vez relocalizadas estas proyecciones se realiza una comparación mensual de los valores de acuerdo a la simulación y observación histórica. De esta comparación se derivan factores de ajuste mensuales para temperatura y precipitación. En el caso de la temperatura, este factor de ajuste consiste en la diferencia entre los promedios mensuales de temperatura simulado y observado para el periodo histórico. En el caso de la precipitación, este factor de ajuste considera la división entre los promedios mensuales de precipitación simulado y observado.
3. Posteriormente es necesario relocalizar las proyecciones climatológicas futuras a la ubicación de las estaciones índice.
4. Finalmente estas proyecciones son modificadas tomando en cuenta el factor de ajuste mensual obtenido para cada estación.

Siguiendo este procedimiento se obtienen series de tiempo de condiciones futuras bajo diferentes escenarios de cambio global. En la siguiente sección del documento se realiza una evaluación de estos escenarios al compararlos con el escenario base histórico.

FASE 5: EVALUACIÓN

Se han considerado cuatro escenarios futuros de cambio climático para la cuenca del Río Paute. Estos escenarios corresponden a las proyecciones asociadas a dos modelos de clima global (HadCM3 y ECHAM) corridos bajo dos escenarios de emisión de gases de invernadero (A2 y B2). Las condiciones climatológicas asociadas a estos escenarios se presentan en el Cuadro 12. Estos valores se presentan para tres variables: temperatura en la estación Cuenca en Aeropuerto y precipitación en las estaciones Piscícola Chirimicha (representativa de las subcuencas aportantes) y Arenales (ubicada en la mitad oriental de la cuenca). Para todas estas variables se presenta primero el valor para las condiciones históricas observadas y después el cambio proyectado para cada uno de los escenarios de cambio climático. En el caso del cambio de temperatura se presenta el cambio en grados Celsius con respecto al promedio de temperatura anual. En el caso de precipitación el cambio se presenta como cambio porcentual sobre el escenario histórico.

De los resultados presentados se puede apreciar que existe un aumento en el nivel de temperatura en toda la cuenca del orden de 3-4,5 °C (no se muestran resultados para otras estaciones pero este es el caso). Las proyecciones de temperatura son más elevadas para los escenarios A2 que los B2 para ambos modelos de clima global. Con respecto a las proyecciones de precipitación la situación es más diversa. Existen diferencias notables entre los dos modelos: en general el modelo ECHAM proyecta aumentos considerables en la precipitación mientras que el modelo HadCM3 proyecta aumentos más discretos y en algunos casos disminución de los niveles de precipitación. En ambos casos las proyecciones de precipitación indican aumentos más considerables para la estación Arenales. Finalmente las proyecciones de precipitación son mayores para el escenario A2 que el escenario B2.

Las proyecciones climatológicas recién descritas se muestran gráficamente en las Figuras 35, Figura 36 y Figura 37. Se puede apreciar en estas figuras que en el caso de las proyecciones basadas en el modelo HadCM3 se cuenta con datos solamente para el periodo 2070-2100 sin contar con información para periodos de tiempo más cercanos.

Cuadro 12.- Escenarios climatológicos futuros -2070-2100 (cambio con respecto a escenario base)

Escenario	Temperatura Cuenca (°C)	Precipitación Piscícola Chirimicha (mm-%)	Precipitación Arenales (mm-%)
Histórico	14.9	1330	3310
HadCM3 A2	4,0	43	12
HadCM3 B2	3,0	22	5
ECHAM A2	4,5	32	49
ECHAM B2	3,3	17	32

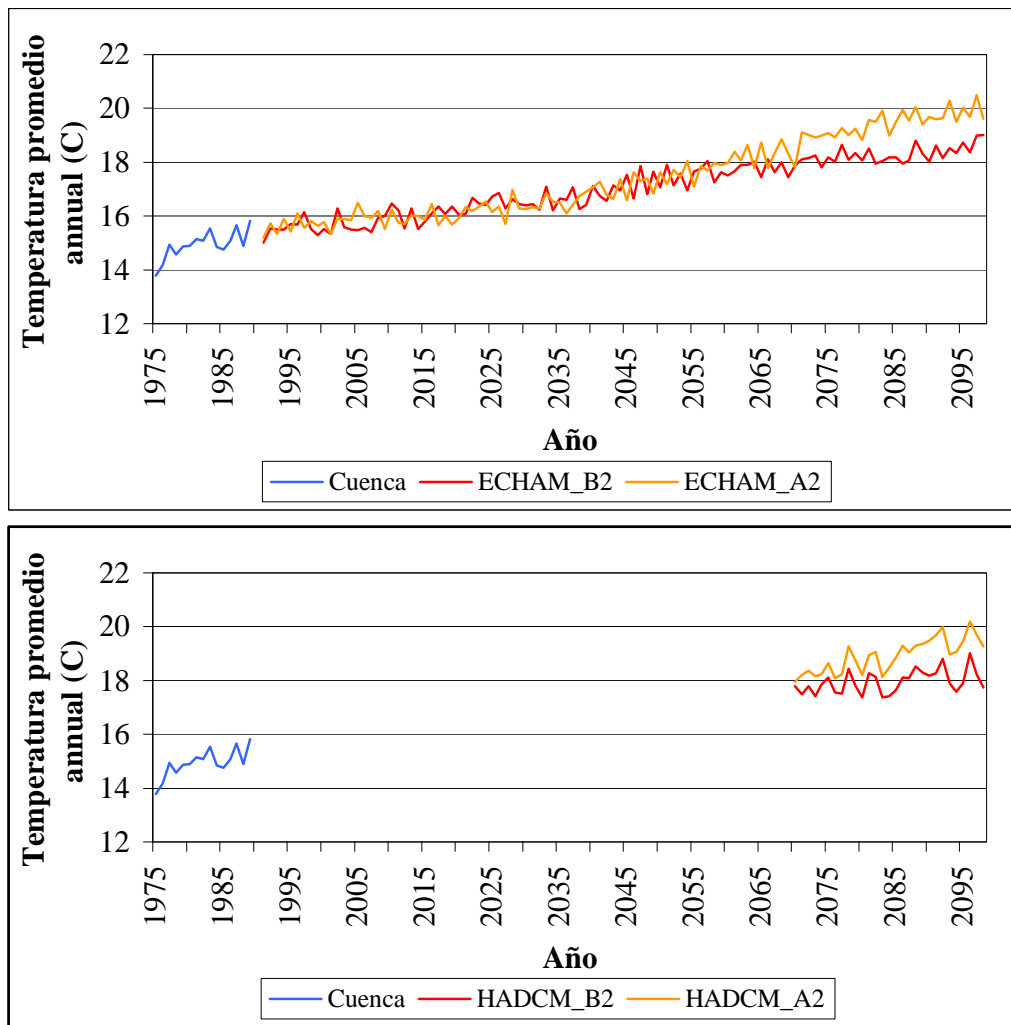


Figura 35.-Proyección de temperatura en estación Cuenca para modelo ECHAM y HadCM3

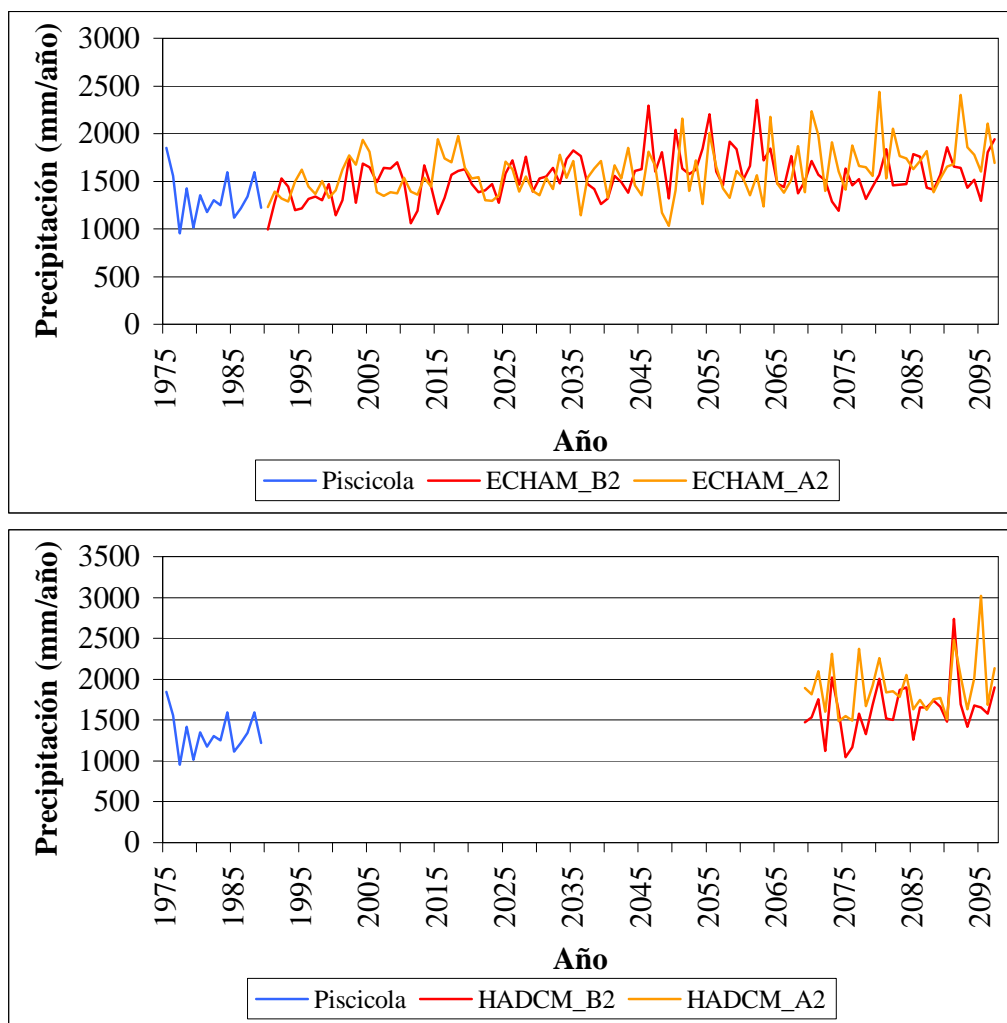


Figura 36.-Proyección de precipitación en estación Piscicola Chirimicha para modelo ECHAM y HadCM3

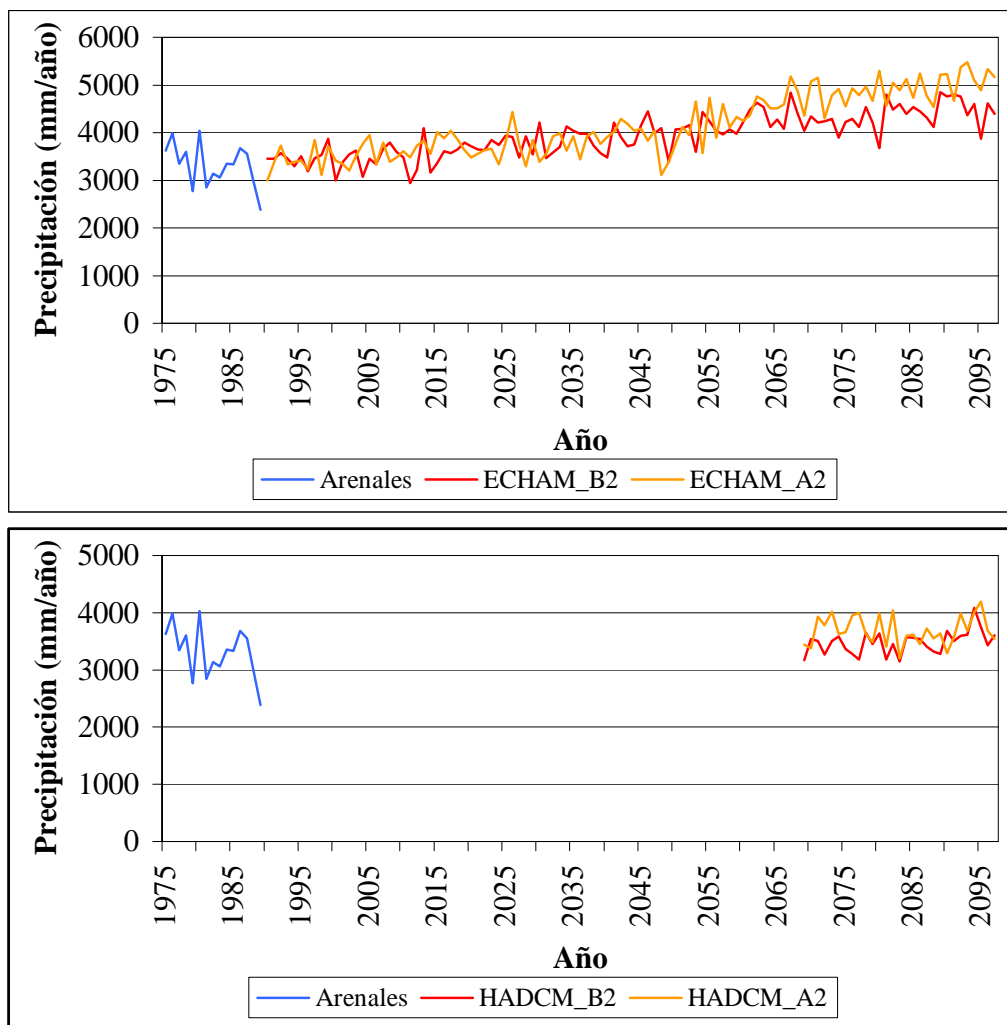


Figura 37.-Proyección de precipitación en estación Arenales para modelo ECHAM y HadCM3

Utilizando estas nuevas series de tiempo de variables climatológicas se realizaron simulaciones con el modelo WEAP de la cuenca del Río Paute que ya estaba calibrado desde el punto de vista hidrológico y operacional. En estas corridas se comparan una serie de variables con respecto al escenario histórico base. Las variables consideradas en esta presentación de resultados corresponden a:

- Caudal promedio anual y máximo mensual en los puntos de control Tomebamba en Monay y Paute en Palmira. El primer punto representa el caudal de la sección aportante de la cuenca y el segundo corresponde a la desembocadura de la cuenca justo aguas arriba del embalse Amaluza.
- Con respecto al uso del agua en la cuenca se considera la cobertura promedio anual de la satisfacción de demanda de agua para riego en la micro cuenca del Río

San Francisco (en la subcuenca del Río Gualaceo) y la generación de energía en la central Molino del Embalse Amaluza.

Para cada una de estas variables y de manera similar a la que se presentaron los nuevos escenarios climatológicos se presenta primero el valor correspondiente al valor base histórico y después el cambio asociado a cada uno de los escenarios en términos porcentuales. Los resultados para cada una de estas variables se presentan en el Cuadro 13. Se puede apreciar en este cuadro que se cumple el supuesto de que los cambios en precipitación son los que determinan los cambios en caudales promedios. En el caso del caudal promedio en Tomebamba en Monay la magnitud del cambio es de un valor similar al cambio proyectado de la precipitación en Piscícola Chirmicha. Algo similar sucede en el caso del caudal en Paute en Palmira y la precipitación en la sección oriental de la cuenca (estación Arenales). Sin embargo, existen algunas pequeñas diferencias. Se puede apreciar por ejemplo que en el caso del caudal en Tomebamba en Monay el cambio en caudal es menor al cambio en precipitación. En cambio en el caso de Paute en Palmira el cambio es igual o incluso mayor. La razón de estas diferencias tiene que estar asociada al grado de estrés hídrico en la que se encuentren las diferentes subcuencas. En aquellos casos donde exista un déficit hídrico en el caso base un aumento de temperatura aumenta la demanda potencial por evaporación y por ende disminuye el aporte del subsuelo a los caudales. En aquellos casos donde no exista un déficit hídrico el aumento en demanda evaporativa no implica cambios importantes en el balance hídrico del subsuelo.

Con respecto al cambio esperado en los caudales máximos las conclusiones son menos obvias que en el caso anterior. Se ven que hay escenarios que al parecer tienen una baja ostensible en la ocurrencia de eventos extremos (escenarios B2) pero en otros (gran parte de los escenarios A2) el cambio en el caudal máximo es de magnitud mayor al cambio en los caudales promedio.

En todos los casos estudiados existe un aumento en la cobertura de demanda para los sectores de riego. En el caso de los escenarios ECHAM los aumentos implican llegar a una cobertura del 100%. Con respecto a la generación hidroeléctrica se puede apreciar un aumento para todos los escenarios. Sin embargo, este aumento es menor al aumento del caudal de agua disponible a la entrada del embalse (ej. ECHAM-A2). Esto se debe a que en general no se puede capturar el exceso de agua disponible en el río debido a limitaciones físicas en la operación de la central o capacidad de embalse.

Cuadro 13.- Comparación variables escogidas para los escenarios climatológicos evaluado

Escenario	Caudal en Tomebamba en Monay		Cobertura demanda riego Río San Francisco (%)	Caudal en Paute en Palmira		Generación hidroeléctrica (GWh-%)
	Promedio (m ³ /s-%)	Máximo (m ³ /s-%)		Promedio (m ³ /s-%)	Máximo (m ³ /s-%)	
Base	18,6	79,7	89	113,7	245,5	4627
HadCM3						
A2	36	46	8	12	40	11
HadCM3						
B2	20	-16	8	5	-8	5
ECHAM						
A2	28	12	12	50	64	43
ECHAM						
B2	14	-14	12	33	36	31

4. FUTURAS MEJORAS AL MODELO DEL RÍO PAUTE

El modelo desarrollado para la cuenca del Río Paute ha sido calibrado tanto en sus características hidrológicas como operacionales. Como tal es un modelo que puede empezar a ser utilizado para una serie de estudios, entre ellos el impacto que tendría el cambio climático en la cuenca tal como fuera presentado en la parte final de la sección anterior.

Sin perjuicio de lo anterior es importante destacar que el modelo es aun perfectible. Existen una serie de componentes que pueden ser mejorados sustancialmente o agregados para poder dar una mayor versatilidad y capacidad de análisis al modelo. Dentro de las áreas principales de mejoras que se pueden introducir están las que se presentan en esta sección.

Mejoras riego

La representación de la superficie regada en la cuenca fue representada de manera muy simplificada en el modelo. Esto debido a falta de información que permitiera tener una visión general de este tema para toda la cuenca. Se sugiere en etapas posteriores de desarrollo del modelo mejorar esta situación, representando explícitamente los principales sistemas de riego (ej. sistemas Sidcay, Machángara, Tarqui, Sigsig, Gualaceo). Estos sistemas deben ser representados con catchments independientes asegurándose que el área correspondiente a ellos sea reducida de los catchment originales. En esta representación es importante considerar condiciones físicas tales como la capacidad de los canales de distribución. También se tienen que considerar características operacionales como la cantidad de agua asociado a las concesiones de estos sistemas.

Mejoras representación Machángara-Tomebamba

El subsistema del Río Machángara-Tomebamba posee una serie de elementos que en esta primera etapa de desarrollo del modelo no han sido incorporados. Ejemplos de estos elementos son las centrales hidroeléctricas Saucay y Saymirin ambas localizadas en el Río Machángara. La incorporación de estas centrales implica incorporar en el modelo la operación de los embalses Chanlud y Labrado además de los canales de abastecimiento con sus respectivas restricciones (físicas y operaciones tipo caudales mínimos). Un ejemplo de la configuración asociada a estos elementos (en este caso asociado a la Central Saymirín se muestra en la Figura 38. Adicionalmente a estas centrales hidroeléctricas es importante también considerar los sistemas de riego que se nutren de las aguas del Río Machángara (ej. Sidcay y Machángara) y finalmente los acueductos de agua potable ubicados en el Río Machángara y Tomebamba que utiliza la empresa de agua potable ETAPA para abastecer de agua a la ciudad de Cuenca.

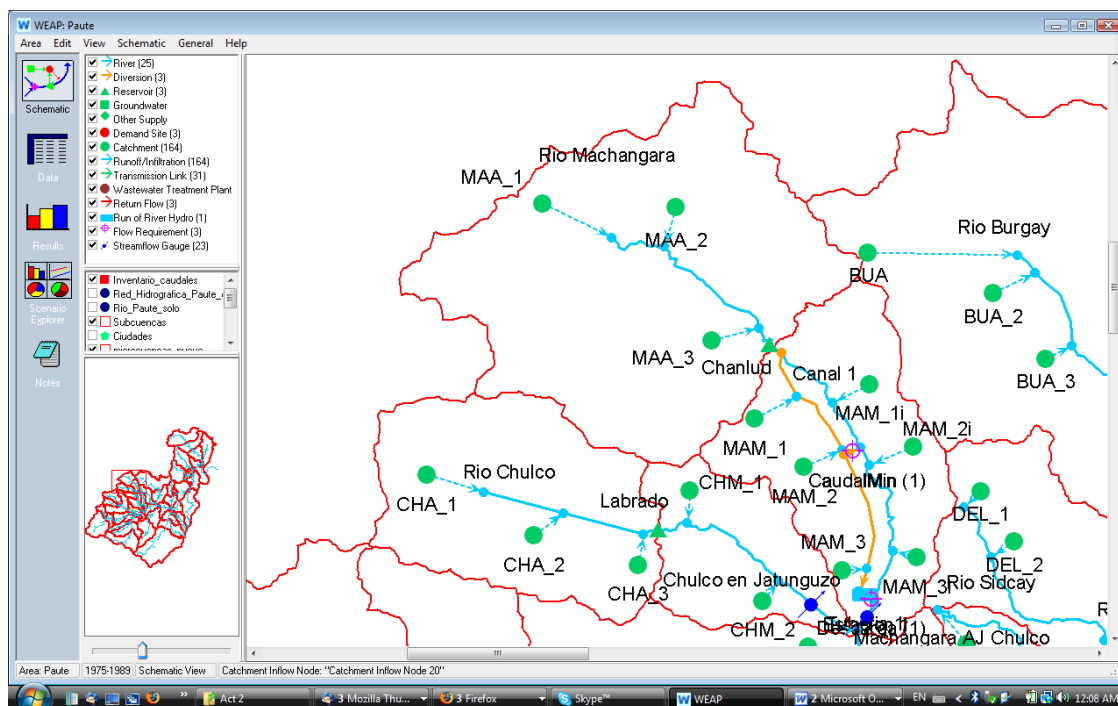


Figura 38.-Representación de la configuración del sistema asociado a central hidroeléctrica de Saymirin en Río Machángara

Sedimentos

Uno de los principales problemas en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del Río Paute esta asociado a las diferentes dimensiones del impacto que tiene la lluvia sobre los fenómenos de erosión, deslizamiento y aluviones. Todos estos impactos tienen como causa común las características de la cobertura natural del suelo (a mayor cobertura menor es la erosión) y el potencial de erosividad de la lluvia (a mayor intensidad de lluvia mayor erosión). Estos impactos finalmente se traducen en daños materiales y pérdidas humanas y también en costos económicos en la operación de la infraestructura de la cuenca. Por ejemplo las altas tasas de sedimentación implican una reducción en la vida útil (o capacidad útil) del embalse Amaluza y aumentan los costos de operación debido al dragado de sedimentos.

En este sentido un complemento muy importante en el desarrollo del modelo seria la introducción de ecuaciones simplificadas (tipo MUSLE) que permitan relacionar tasas de sedimentación en la cuenca con parámetros básicos como precipitación y tipo de cobertura. Utilizando estas ecuaciones será posible simular de manera dinámica la capacidad de almacenaje de agua en el embalse Amaluza y costos asociados a actividades de drenaje en caso de que se quiera incluir ese tipo de adaptación a los impactos previstos para el futuro. Existen una serie de trabajos de académicos del PROMAS de la Universidad de Cuenca que podrían indicar la manera de incluir este tipo de relaciones en el modelo (ej. Pacheco et al., 2008).

Operación embalses

Finalmente una mejora importante para incluir en futuros desarrollos del modelo dice relación con la manera en que se modelan la operación de los embalses en la cuenca. En principio Amaluza pero en un futuro cercana habría que incluir la operación del embalse Mazar también. Para mejorar la representación de la operación de estos embalses es importante entender los objetivos y restricciones de operación. Una manera de lograr esta representación es considerar de manera explícita la demanda de electricidad a la que se ve afecto el sistema Paute. Como actividad complementaria al trabajo presentado acá se propone llevar a cabo este trabajo incluyendo de manera complementaria un modelo de planificación energética para el Ecuador basado en la plataforma LEAP.

5. CONCLUSIONES

El Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en Ecuador (PACC) tiene como meta “incorporar los riesgos asociados al cambio climático dentro de las prácticas de manejo del recurso hídrico en el Ecuador”. Su objetivo es “aumentar la capacidad de adaptación en respuesta a los riesgos del cambio climático en la gestión de recursos hídricos a nivel nacional y local”.

Uno de los resultados esperados en el proyecto tiene que ver con el desarrollo de sistemas de manejo de la información que reflejen los impactos del cambio climático en el sector hídrico y que sirvan de base para la formulación de políticas y estrategias. En este contexto, el proyecto prevé la aplicación de modelos de planificación que soporten la toma de decisiones sobre la asignación de los recursos hídricos a los diversos sectores considerando la oferta y la demanda, los modos de gestión del recurso y las necesidades locales en los planes.

Siguiendo con los objetivos impuestos en el proyecto PACC se ha desarrollado de manera polito un modelo hidrológico y de recursos hídricos en la cuenca del Río Paute, cuenca de gran relevancia para el Ecuador debido a su alto potencial de generación hidroeléctrico. El informe presentado tiene como objetivo describir las características básicas de esta cuenca y describir también la metodología a seguir en la modelación de esta cuenca utilizando el modelo WEAP. El desarrollo de esta herramienta servirá para mejorar el proceso de planificación en relación con el manejo de los recursos hídricos en esta cuenca estratégica para el desarrollo del país.

El modelo del río Paute fue desarrollado considerando una cobertura espacial de gran parte de la cuenca del Paute hasta el punto de localización del embalse Amaluza. Las unidades básicas de desagregación fueron desarrolladas en un nivel de subcuenca. Dentro de estas unidades un conjunto único de condiciones climatológicas fue desarrollado asociando la variabilidad espacial de estas variables a estaciones meteorológicas claves. Parte de las limitaciones del desarrollo del modelo se debe a faltas en la distribución espacial de estaciones climatológicas que sirvan para representar la totalidad de la cuenca.

Después de que la configuración básica del modelo se comenzó un proceso de calibración. Este proceso de calibración comenzó considerando las subcuencas de cabecera situadas en la sección suroeste de la cuenca. Dentro de estas subcuencas existe poca intervención humana así que la primera fase correspondió a una pura calibración hidrológica. Una segunda etapa del proceso de calibración fue realizada para las subcuencas intermedias y bajas donde se requirió la inclusión de una representación de las necesidades del agua para riego. Esto fue hecho asumiendo simples formulaciones basadas en los datos disponibles a nivel cantón del Censo Agropecuario. La falta de información con respecto al uso de agua en la cuenca especialmente con respecto al agua para riego se considera crítica y debe ser mejorada para lograr un desarrollo más acabado del modelo. La etapa final de la

calibración del modelo considero la representación de las operaciones de la infraestructura principal incluida en el modelo, el embalse de Amaluza.

Considerando las limitaciones ya descritas en cuanto a falta de información meteorológica y de uso del agua en la cuenca se considera que el proceso de calibración es razonable alcanzándose una buena correspondencia entre las condiciones hidrológicas y operacionales simuladas y observadas. El nivel alcanzado en el proceso de calibración permite que se empiece a utilizar este modelo en evaluaciones de infraestructura futura, políticas de manejo de los recursos y de evaluación de impactos de condiciones climatológicas proyectadas a futuro. Con respecto a este último punto se entregan en este informe los resultados de simulaciones climatológicas futuras considerando cuatro escenarios basadas en salidas de modelos de circulación general (GCM). Las series de tiempo de estas condiciones climatológicas futuras sugieren que en la cuenca del Río Paute existiría un aumento generalizado en los caudales promedio que sería levemente inferior al aumento proyectado en las precipitaciones. Esto último se debe en parte al aumento en evapotranspiración asociado al aumento en temperatura. Asociado al cambio mencionado en general hay un aumento en la cobertura de la demanda agrícola y de la generación de hidroelectricidad estos escenarios de cambio climático. No fue incluido en el análisis los cambios potenciales de las tasas de sedimentación que podrían ocurrir asociados a estos nuevos escenarios.

Pese a que el modelo se encuentra en capacidad de ser utilizado no por esto debe concluirse erróneamente que es un modelo terminado. Existen una serie de mejoras que pueden ser introducidas en el desarrollo del modelo y que son descritas en el presente informe. Para lograr algunas de estas mejoras es necesario, sin embargo, mejorar la calidad y disponibilidad de información necesario para representar de manera adecuada como se ha mencionado anteriormente la variabilidad espacial de las condiciones climatológicas en la cuenca y también los usos de agua, de manera especial el uso de agua para riego.

REFERENCIAS

- Buytaert, B., 20004. The properties of the soils of the south ecuadorian páramo and the impact of land use change on their hydrology, PhD thesis, K.U. Leuven, Belgium.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Deckers, J. y Wyseure G., 20003. Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOPMODEL, III Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrograficas, 8-13 Junio 2003, Arequipa, Peru.
- Célleri, R. 2007. Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin – Southern Ecuadorian Andes. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Belgica.
- Célleri, R., De Bievre, B. Cisneros, F. y Feyen, J., 2001. Modelos hidrológicos distribuidos como soporte para la planificación del riego en cuencas de alta pendiente, Informe final del Proyecto P BID 130 Métodos de riego y control de erosión en suelos andinos, PROMAS, Universidad de Cuenca.
- Célleri, R., et al., 2006. Modelación hidrológica de microcuencas del páramo, PROYECTO IDIUC II, MIKE SHE, PROMAS, Universidad de Cuenca.
- CGPaute, 2008, Informe final. Asistencia técnica en hidrología para el desarrollo de herramientas de caracterización y monitoreo hidrológico y evaluación de alternativas de gestión de los recursos hídricos.
- CGPaute, 2008. DVD. Aplicaciones de la información temática digital de la Cuenca del Rio Paute. Proyecto de desarrollo de la Cuenca del Rio Paute. Universidad del Azuay – CG-Paute.
- Escobar, M., Condom, T., Suarez, W., Purkey, D., Pouget, J.C. , Ramos, C. 2008. Construcción del Modelo WEAP del Río Santa. Proyecto: Evaluación de Impactos de Cambio Climático en Hidrología de Montañas: Desarrollo de una Metodología a través de un Estudio de Caso en Perú. IRD, SEI-US, Banco Mundial
- 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.
- Pacheco, E., Cisneros, F., Mora, D., Bièvre, B., y G. Govers. Variabilidad espacio-temporal de la producción de sedimento en la cuenca hidrográfica del río Paute.
- Purkey, D., B. Joyce, S. Vicuna, M. Hanemann, L. Dale, D. Yates and J.A. Dracup. 2007. "Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley". *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-007-9375-8
- Weglarczyk, S. 1998. The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. *Journal of Hydrology*, 206, 98-103.

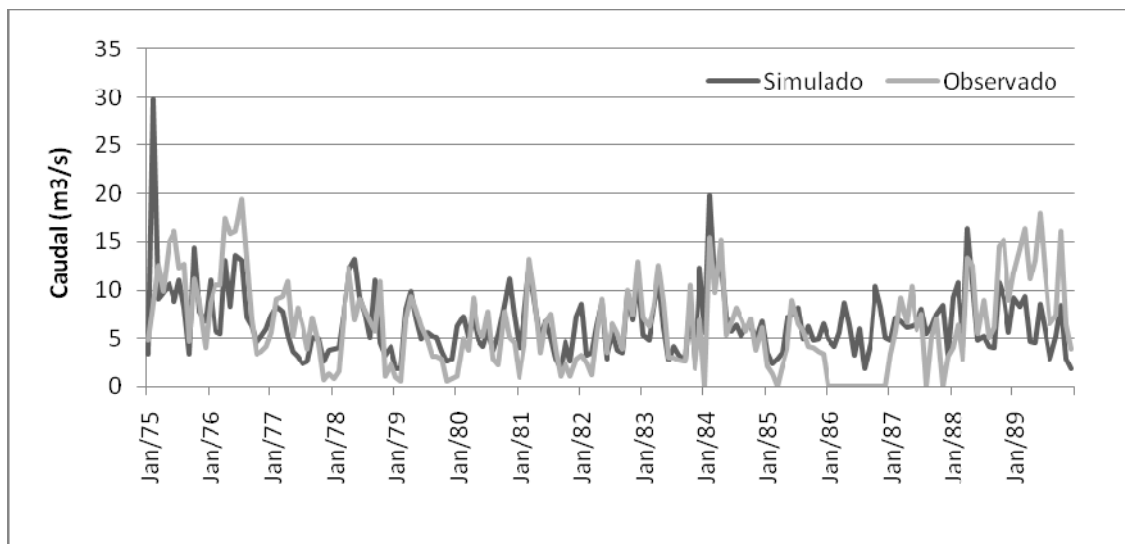
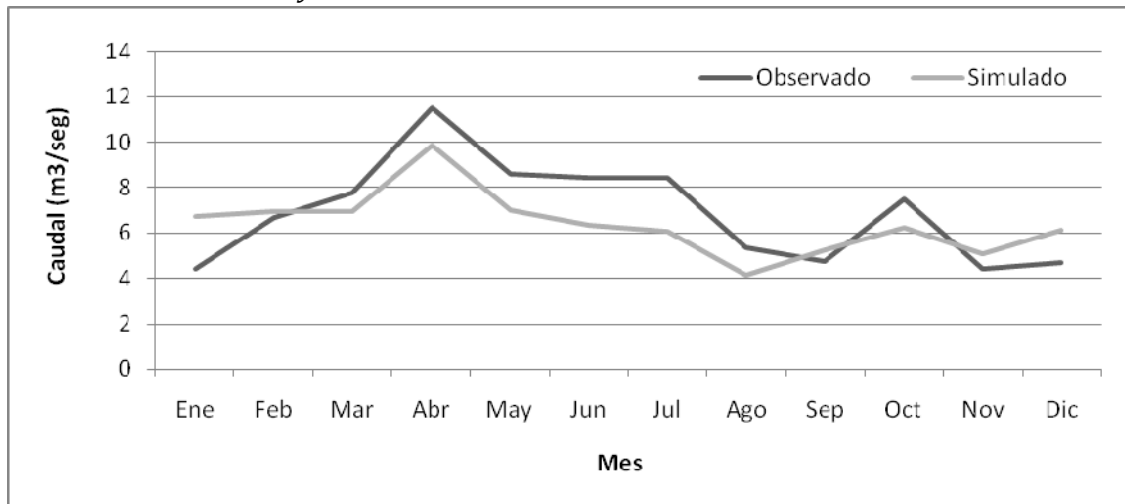
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, and H. Galbraith. 2005a. WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*. 30(4):487-500.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, WEAP21. 2005b. A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 1, model characteristics. *Water International*. 30(4):501-512.
- Yates, D., D. Purkey, J. Sieber, A. Huber-Lee , H. Galbraith, J. West, and S. Herrod-Julius. 2007. A physically-based, water resource planning model of the Sacramento Basin, California USA. ASCE J. of Water Res. Management.

ANEXOS

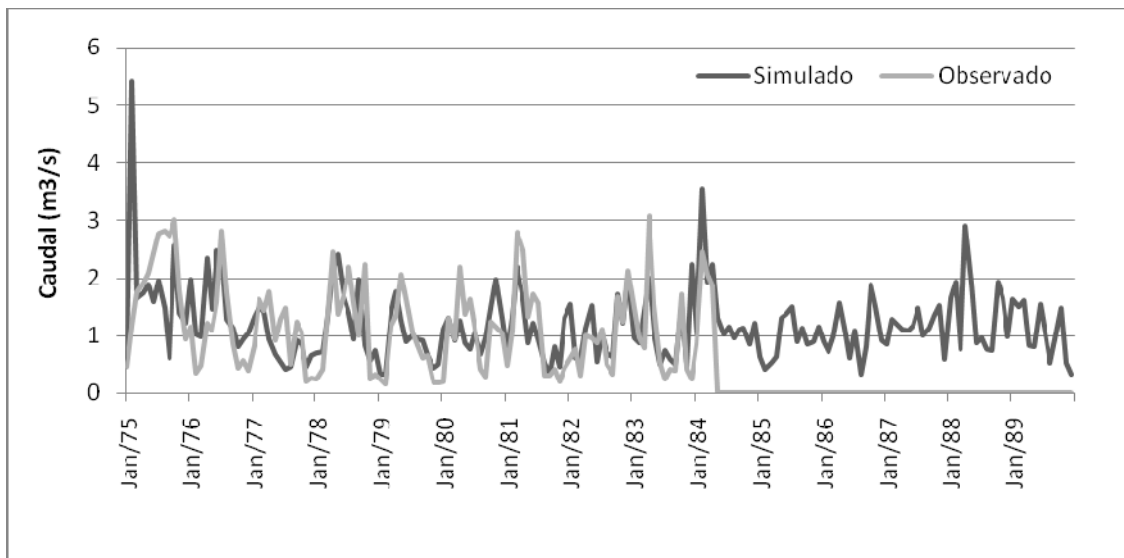
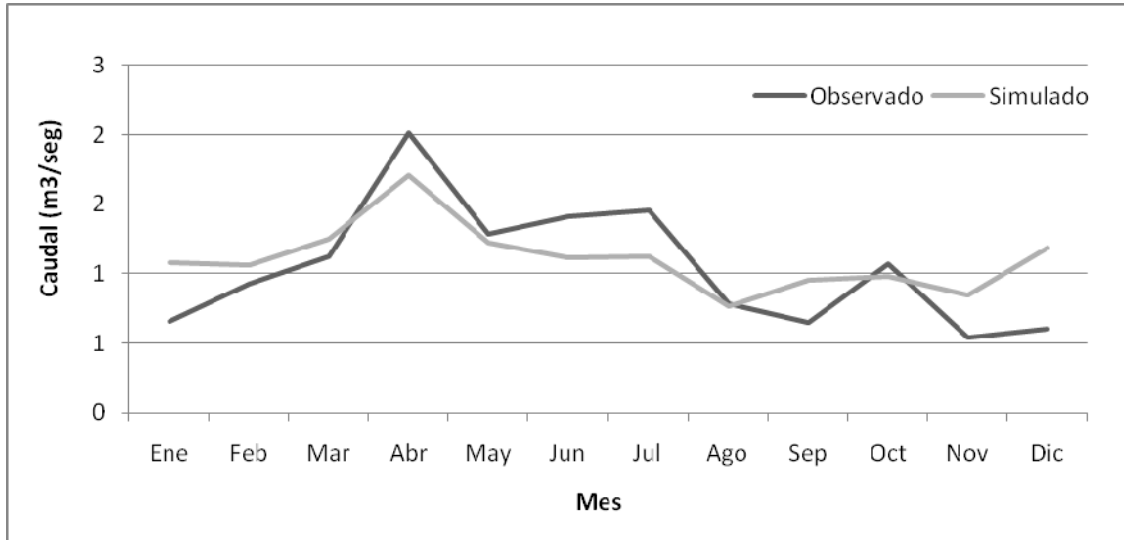
ANEXO 1. RESULTADOS CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA

Resultados de calibración cuencas aportantes:

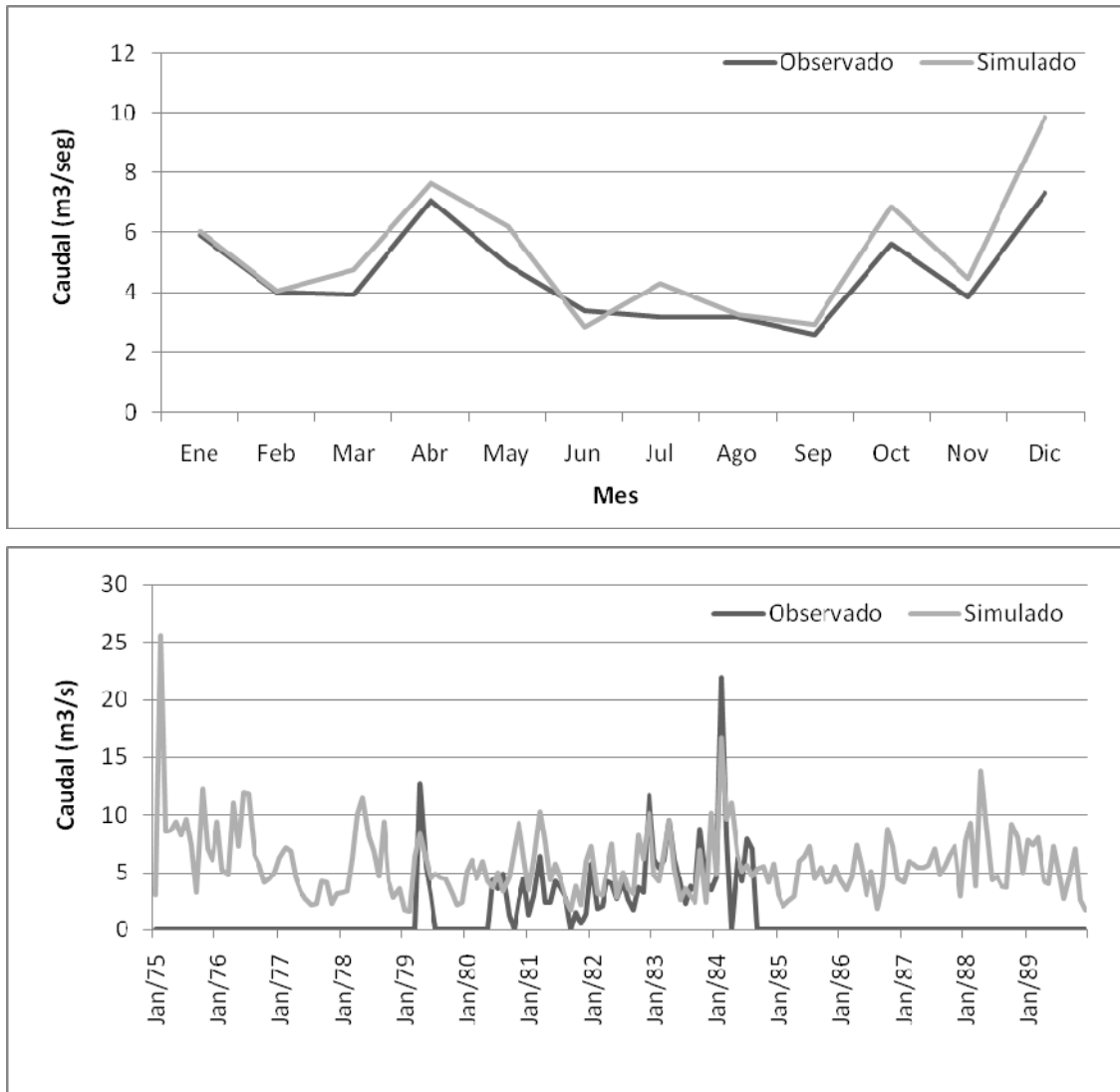
Estación Matadero en Sayausí:



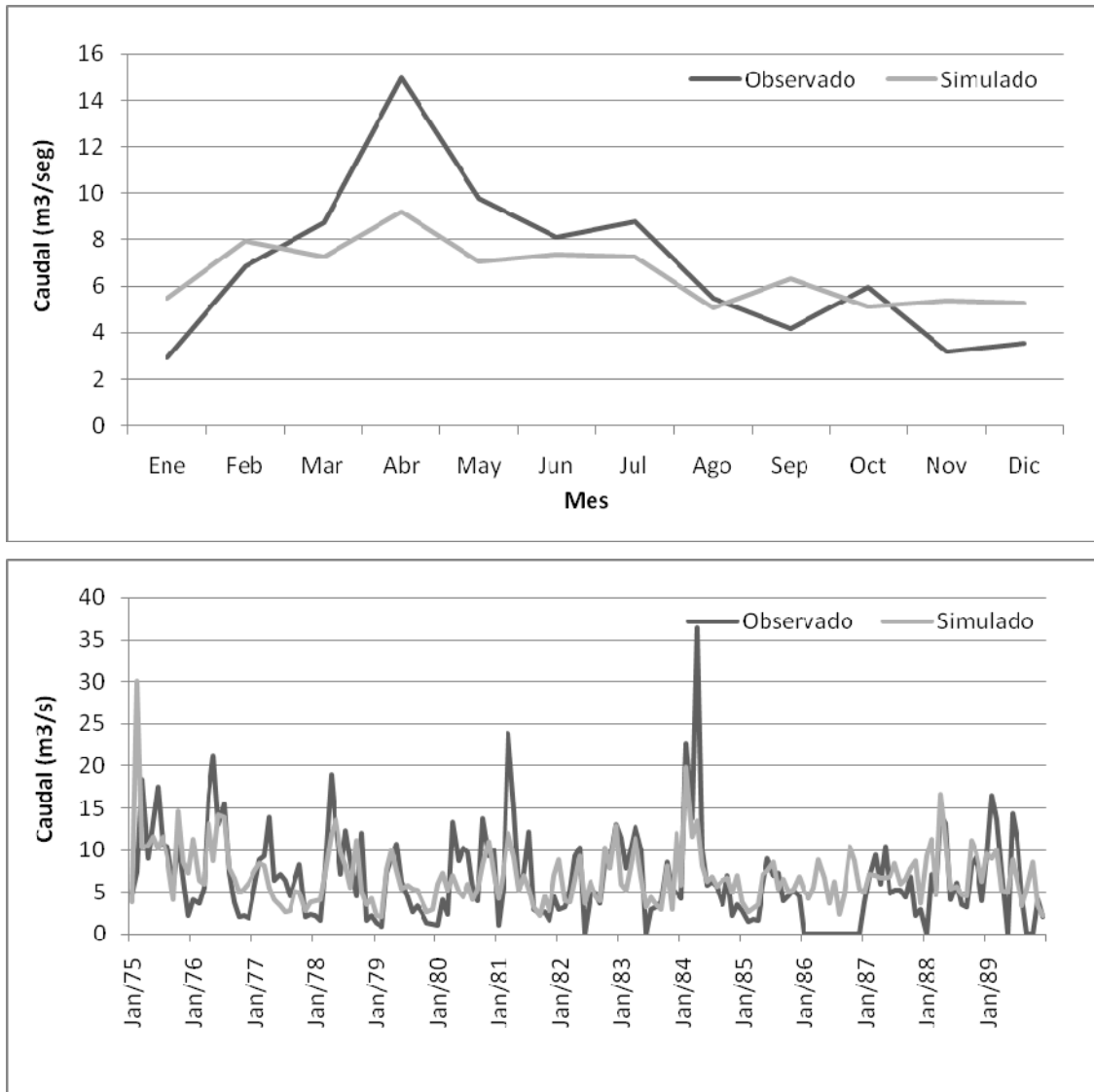
Estación Surocucho AJ Lluclluchas:



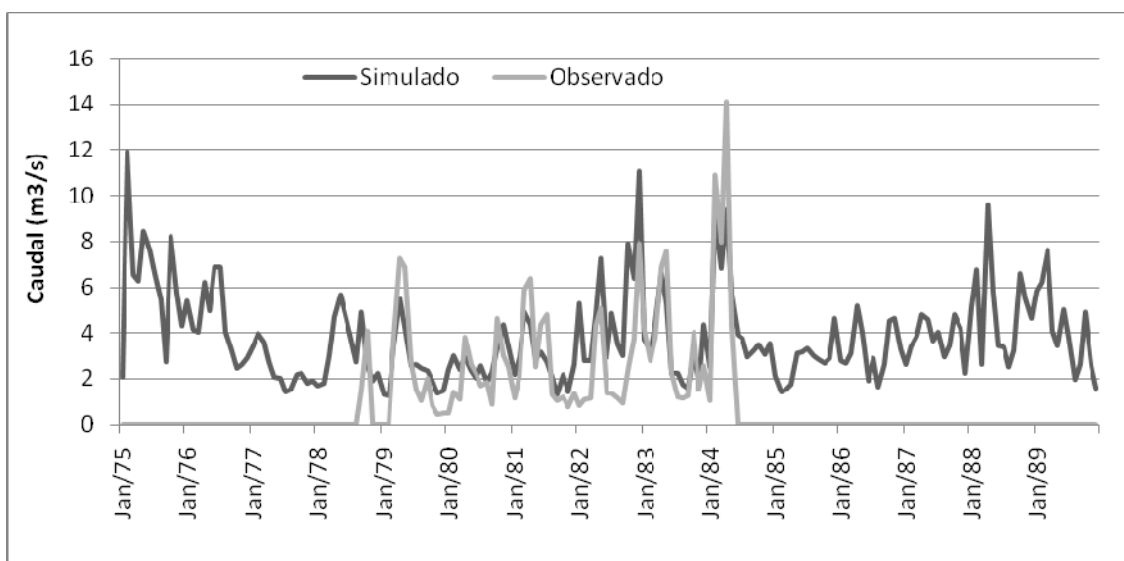
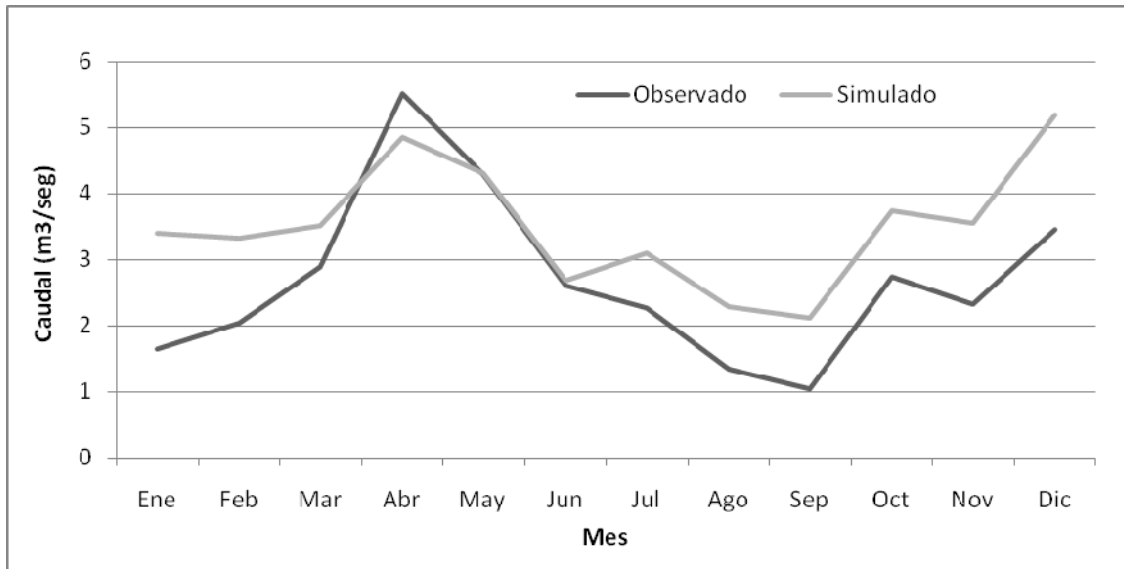
Estación Yanuncay DJ Chico Soldados:



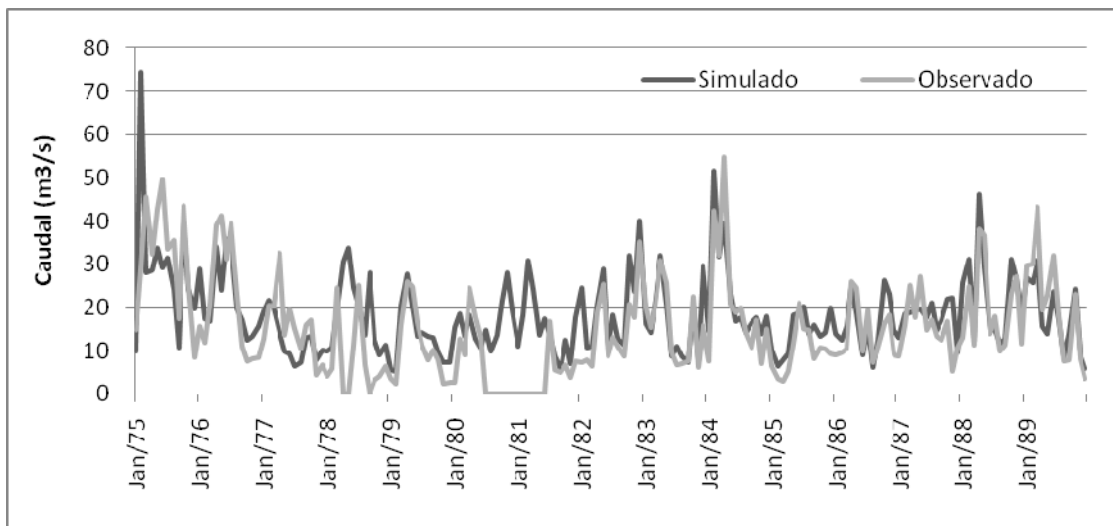
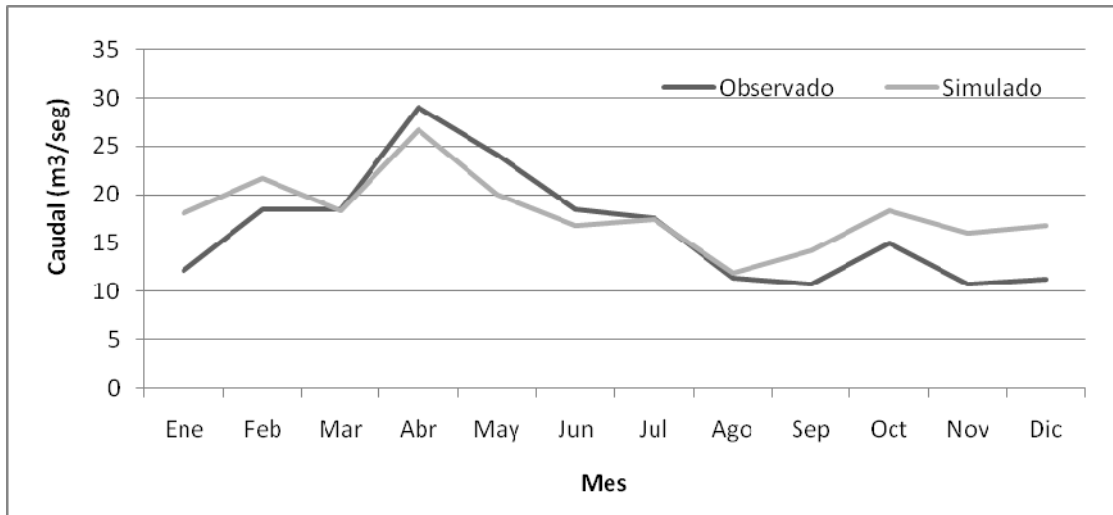
Estación Yanuncay AJ Tarqui:



Estación Tarqui DJ Shucay:

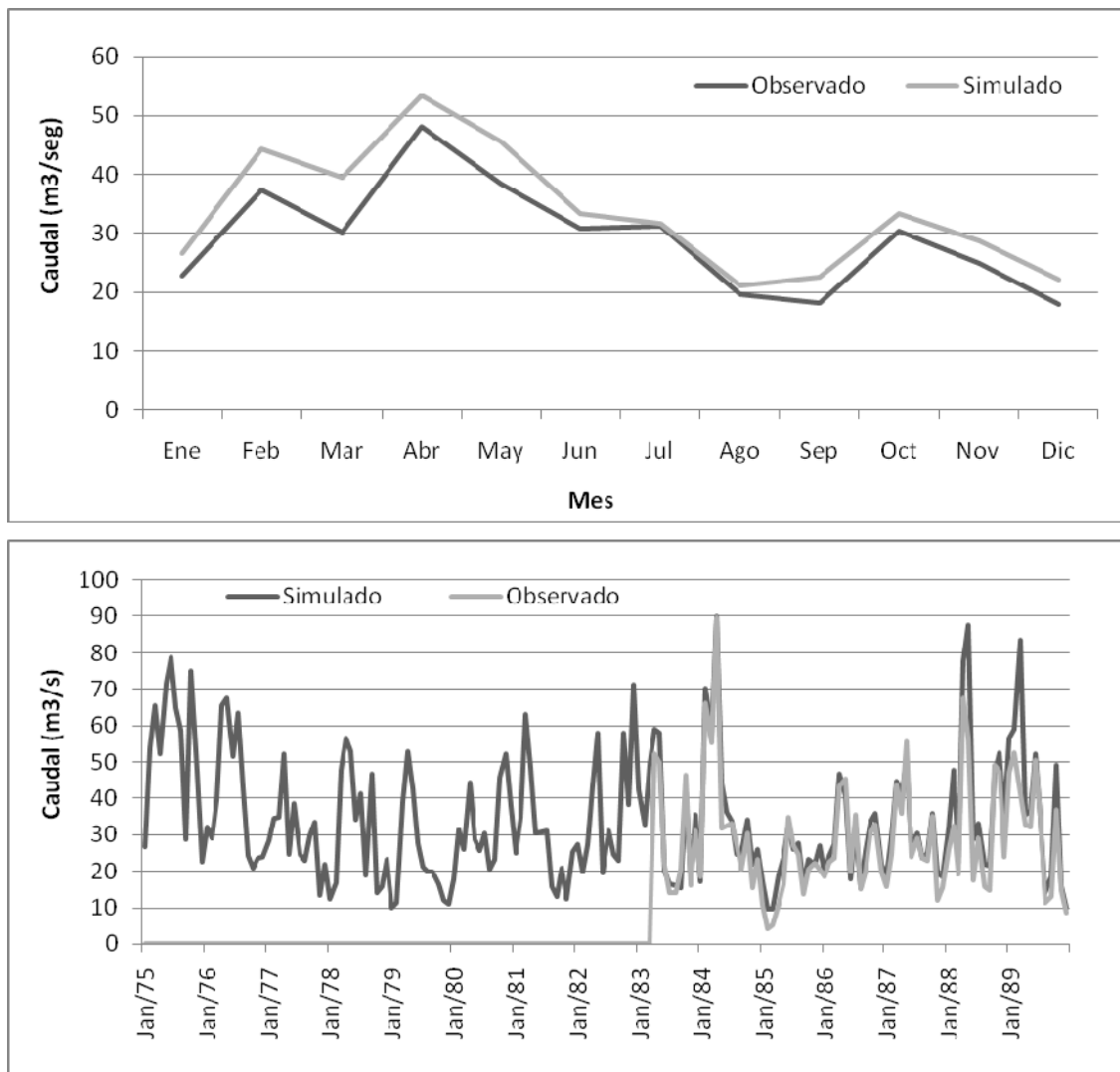


Estación Tomebamba en Monay:

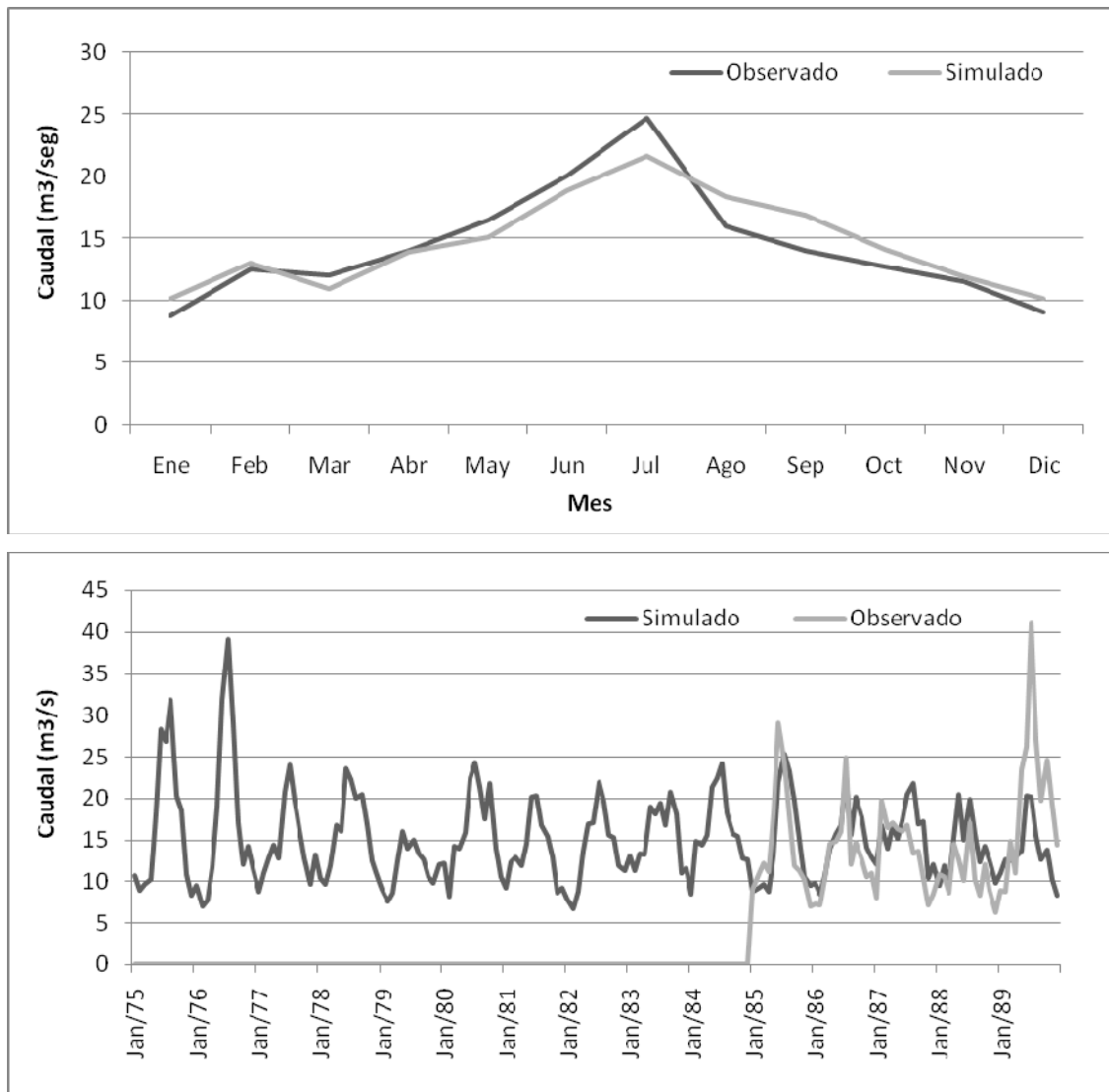


Resultados de calibración zona media:

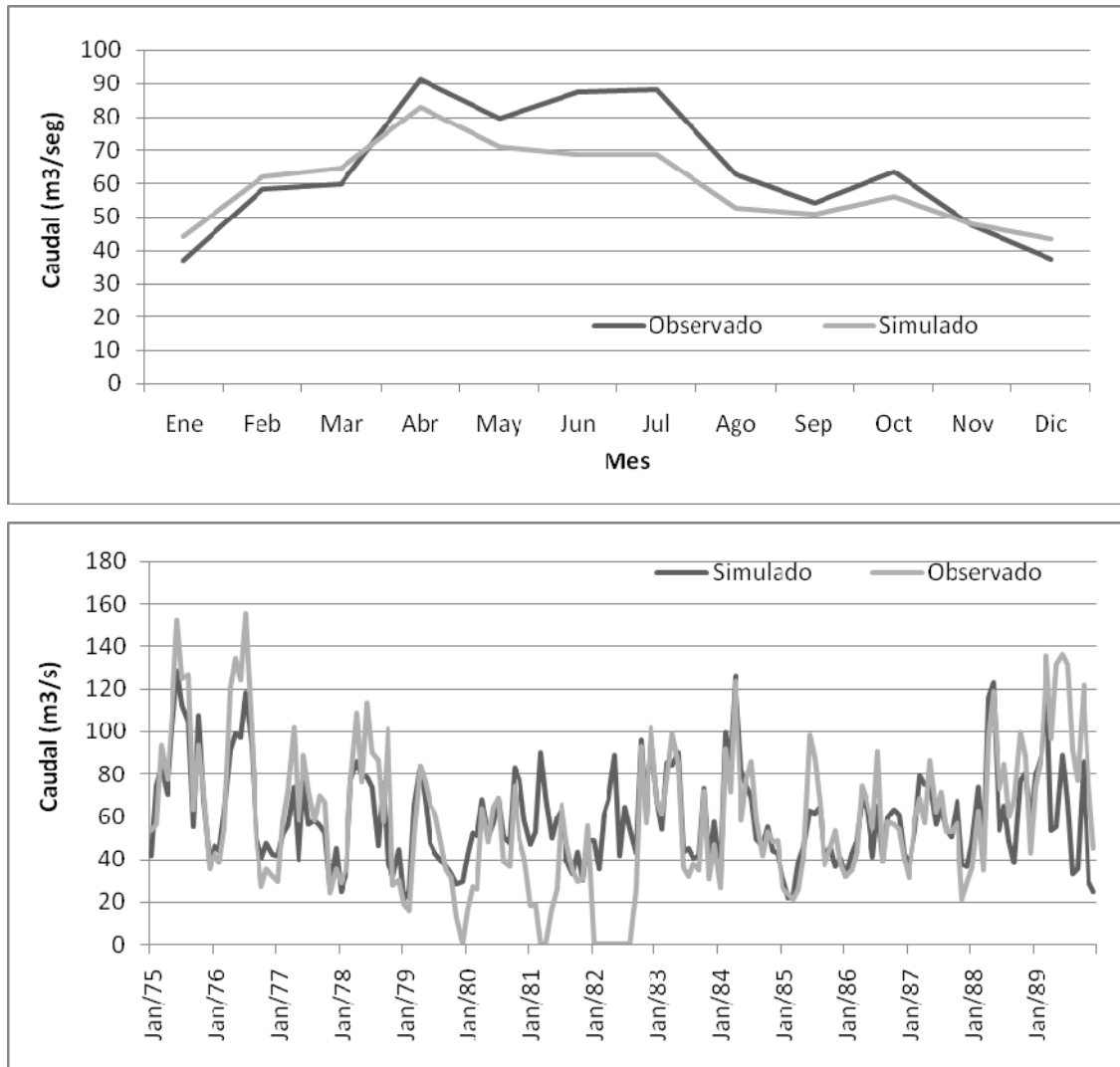
Estación Paute DJ Jadán:



Estación Gualaceo AJ Paute:

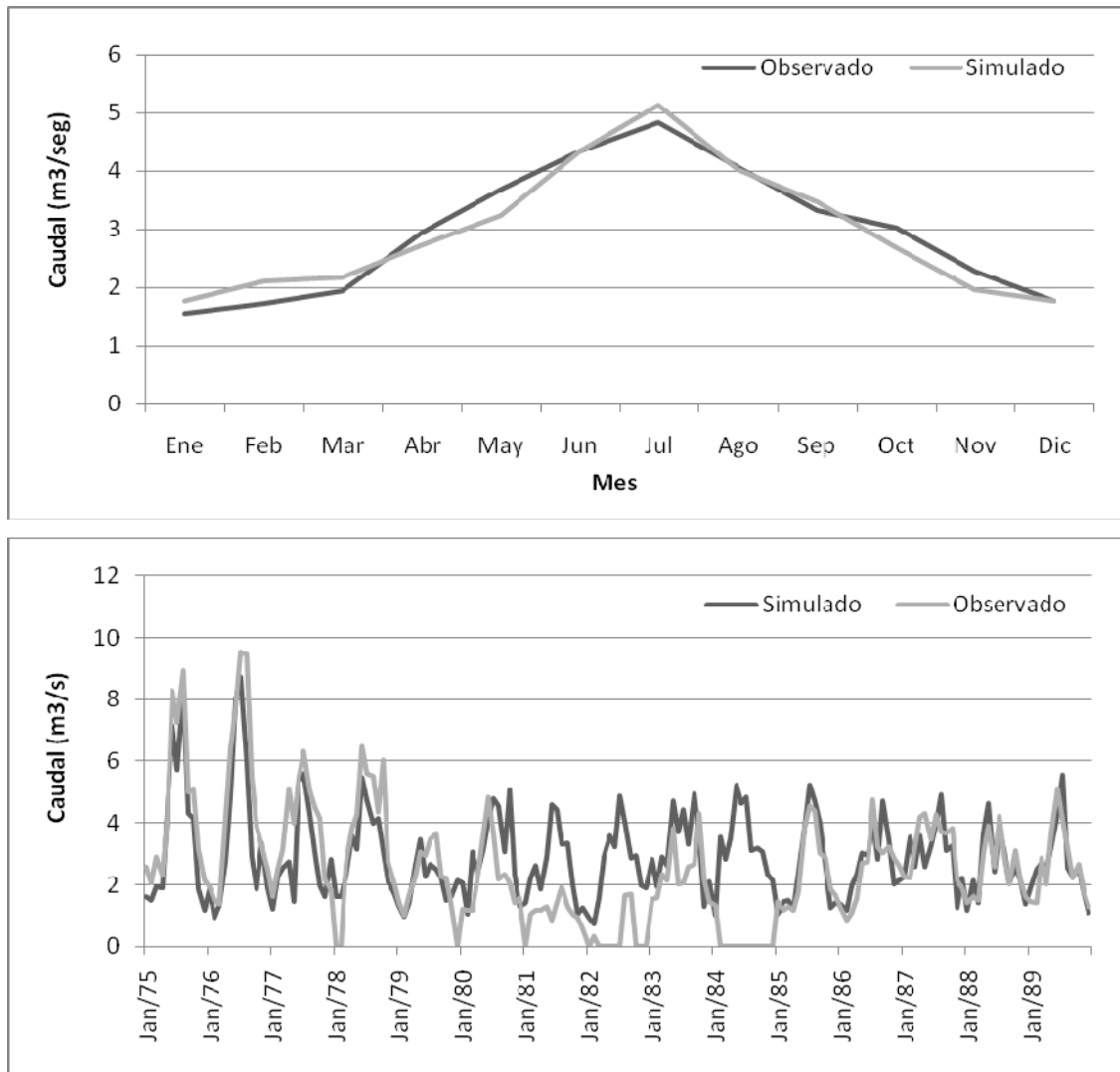


Estación Paute en Paute2:

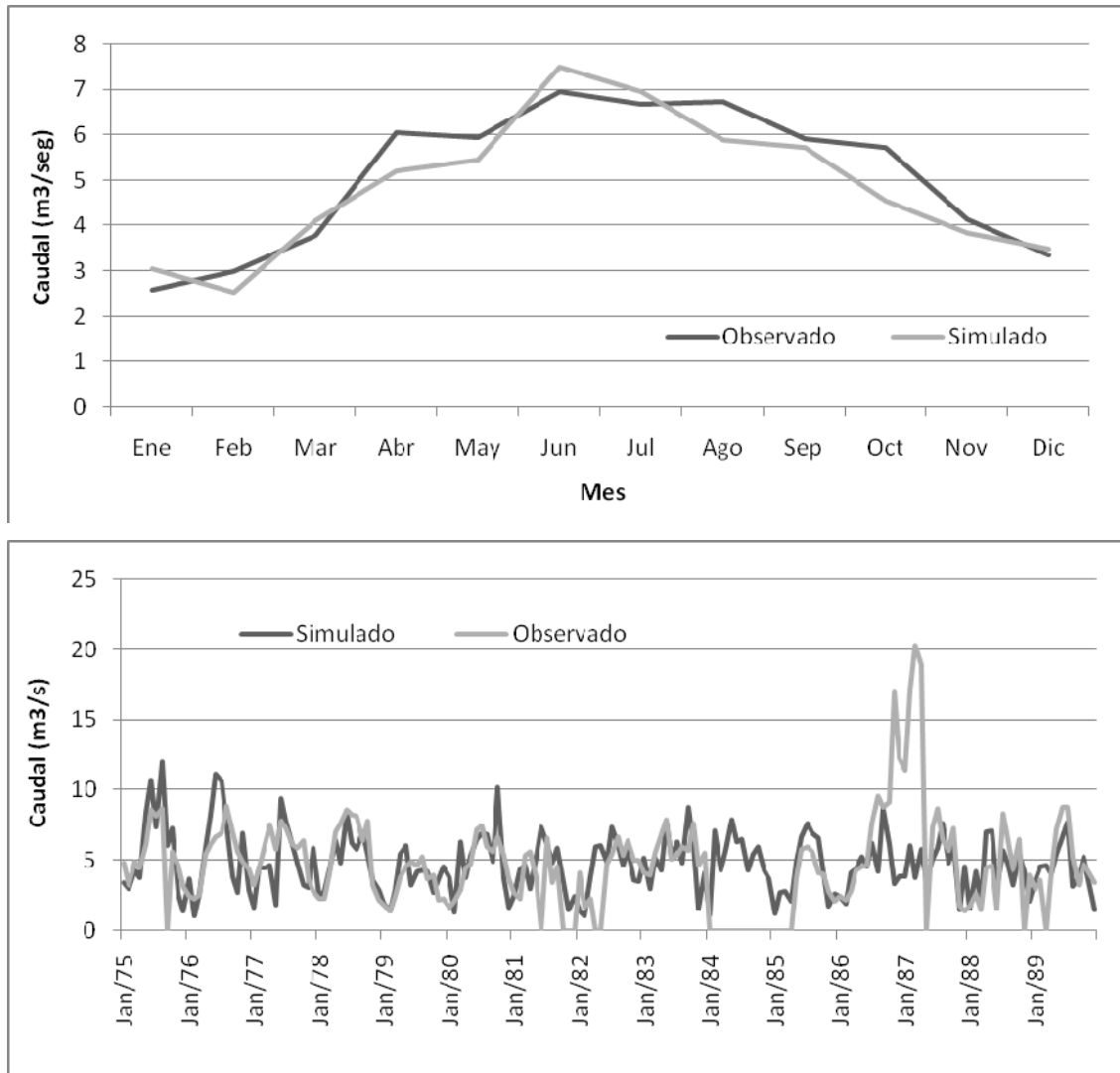


Resultados de calibración zona baja – promedios caudales medios y caudales para todo el periodo de calibración (1975-1989)

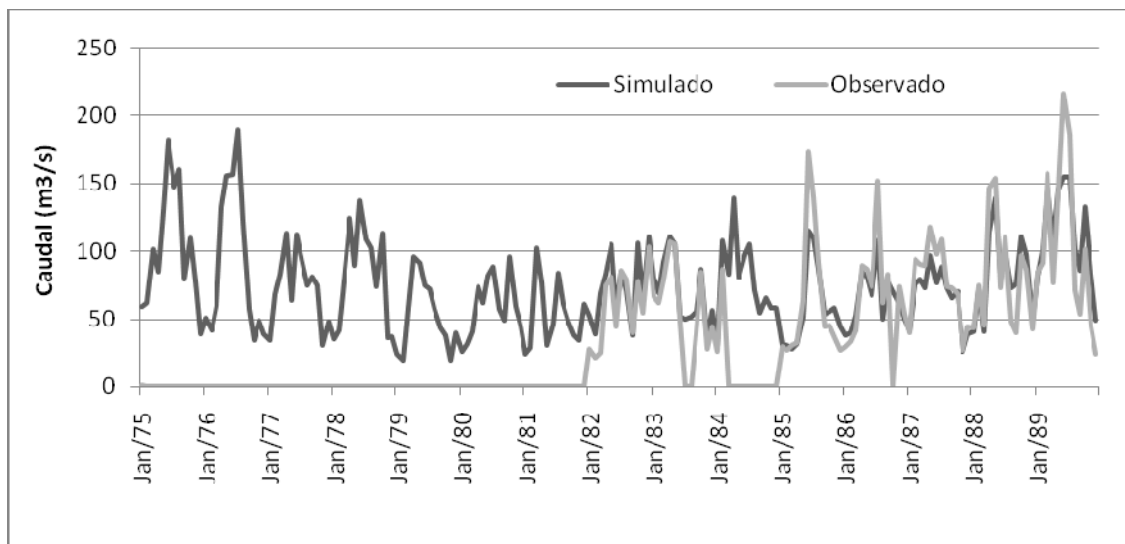
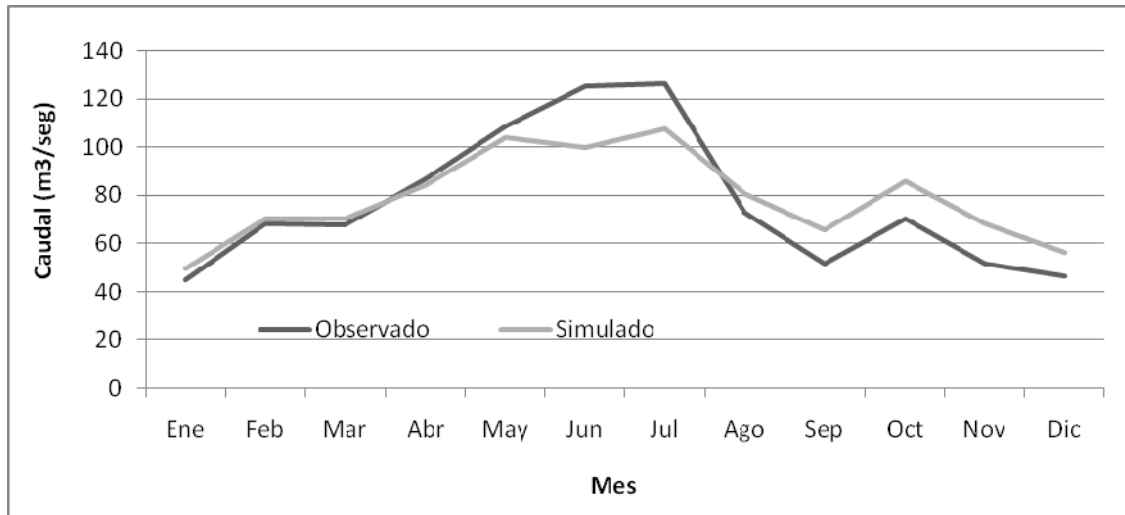
Estación Dudas AJ Paute:



Estación Mazar AJ Paute:



Estación Paute AJ Dudas:



Estación Paute en Palmira:

