



---

## GUIA METODOLÓGICA

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE RECURSOS HÍDRICOS CON EL MODELO WEAP

---

*Santiago, Boston, Abril, 2009*

**Favor citar este documento como:**

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

Desarrollada con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.

## Contenido

<b>1</b>	<b>Presentación .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Preguntas y Retos que WEAP Ayuda a Resolver .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>¿Quiénes Usan WEAP? .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3</b>	<b>Requerimientos para Usar la Herramienta.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4</b>	<b>Descripción y Aplicaciones de WEAP.....</b>	<b>6</b>
<b>2.5</b>	<b>El Proceso de Aplicación de un Modelo WEAP .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Definición del Estudio .....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Búsqueda de Información .....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>Desarrollo del modelo.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1</b>	<b>Aspectos Metodológicos.....</b>	<b>17</b>
5.1.1	Análisis de la Oferta de Agua .....	17
5.1.2	Análisis de la Demanda de Agua .....	26
<b>5.2</b>	<b>Aspectos Prácticos de la Construcción del Modelo.....</b>	<b>28</b>
5.2.1	Procesamiento de Datos Previo a Construcción del Modelo .....	28
5.2.2	Incorporación de Información en el Modelo .....	34
<b>6</b>	<b>Calibración .....</b>	<b>62</b>
<b>6.1</b>	<b>Aspectos Metodológicos de la Calibración del Modelo .....</b>	<b>62</b>
6.1.1	Calibración de cuencas aportantes o en zonas de régimen natural .....	62
6.1.2	Calibración de cuencas intermedias.....	66
6.1.3	Calibración de operación recursos hídricos .....	67
<b>6.2</b>	<b>Aspectos Prácticos de la Calibración del Modelo .....</b>	<b>69</b>
6.2.1	Uso de <i>key assumptions</i> .....	72
6.2.2	Uso de hoja de Excel para estimar estadísticas.....	75
<b>7</b>	<b>Uso del modelo, Creación de Escenarios .....</b>	<b>80</b>
<b>7.1</b>	<b>Aspectos prácticos de la construcción de escenarios climatológicos .....</b>	<b>81</b>
	<b>Referencias.....</b>	<b>83</b>
	<b>Anexo. Procesamiento de datos de SIG para aplicaciones de WEAP.....</b>	<b>85</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Selección de proyectos donde se han realizado proyectos WEAP en varios lugares alrededor del mundo. ....	5
Figura 2. Subcuencas y Red hidrográfica consideradas en el modelo del Río Paute, Ecuador ....	12
Figura 3. Esquema modelo WEAP del Río Paute, Ecuador .....	13
Figura 4. Elementos hidrológicos modelados en WEAP .....	18
Figura 5. Caracterización de los regímenes de precipitaciones. Ejemplo Cuenca del Río Paute. ....	21
Figura 6. Estaciones Meteorológicas índice – Precipitación. Ejemplo Cuenca Río Paute .....	22
Figura 7. Relación Temperatura - Altura. Cuenca Río Paute .....	23
Figura 8. Estaciones Meteorológicas Índices – Temperatura. Ejemplo Cuenca Río Paute .....	24
Figura 9. Delimitación de <i>Catchments</i> , ejemplo en Cuenca Río Paute, Ecuador .....	30
Figura 10. Cuadro para observar la extensión de datos de precipitación (ejemplo Cuenca Río Paute). ....	33
Figura 11. Creación de estructura a interior de <i>catchments</i> .....	36
Figura 12. Parámetros de Uso de Suelo en <i>key assumptions</i> .....	41
Figura 13. Vista de WEAP con ecuaciones ReadFromFile para precipitación. ....	43
Figura 14. Funciones de temperatura en <i>key assumptions</i> . ....	46
Figura 15. Función BUSCARV de Excel .....	49
Figura 16. <i>Edit/Export expressions to Excel</i> del Menú General de WEAP.....	50
Figura 17. Uso de la Función Concatenar en Excel poblar el parámetro de suelo Kc.....	54
Figura 18. Uso de Función Concatenar para poblar el parámetro Precipitación .....	61
Figura 19. Estaciones de Aforo para Calibración - Zona Alta cuenca del Río Paute .....	63
Figura 20. Estaciones de aforo para calibración - Zona Media Cuenca del Río Paute.....	67
Figura 21. Zonas de modelación de embalses en WEAP .....	69
Figura 22. Obtención de Resultados de Caudales.....	70
Figura 23. Uso de <i>key assumptions</i> durante calibración del modelo .....	73
Figura 24. Uso de escenarios durante la calibración del modelo.....	74
Figura 25. Uso de gráficos favoritos para estimar estadísticas Nash y BIAS en Excel.....	76

# **1 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 gestión de los recursos hídricos en Ecuador”. Su objetivo es “aumentar la capacidad de adaptación en respuesta a los riesgos del cambio climático en la gestión de los 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 (en las provincias de Azuay, Loja, Manabí y Los Ríos), quienes han mostrado un gran 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) y 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 sirvan de apoyo a la toma de decisiones en la asignación de los recursos hídricos a diversos sectores considerando: la oferta y la demanda de agua, 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, las cuales han sido seleccionadas en etapas previas del proyecto. Las cuencas objeto de estudio corresponden a las de los ríos Chone, Portoviejo, Babahoyo, Paute, Jubones y Catamayo.

El presente documento tiene como objetivo presentar una guía metodológica para el desarrollo de modelos en estas cuencas, que a su vez sirva como base para el desarrollo de un modelo WEAP en cualquier cuenca hidrográfica. Este documento sirve además como un complemento de otras ayudas que se encuentran disponibles en la pagina web <http://www.weap21.org/> para la construcción de modelos WEAP incluyendo la Guía de Usuario o *User Guide* disponible en ingles, y el Tutorial que se encuentra disponible en ingles y español,

## 2 Introducción

### 2.1 Preguntas y Retos que WEAP Ayuda a Resolver

WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas. WEAP tiene una amplia base de usuarios en todo el mundo y está disponible en diferentes idiomas, incluido el español. En el mapa que se muestra a continuación (Figura 1), se presenta una selección de proyectos que usan WEAP en diferentes regiones del mundo. En la página web de WEAP están disponibles un gran número de recursos para los usuarios (ver <http://www.weap21.org/>).

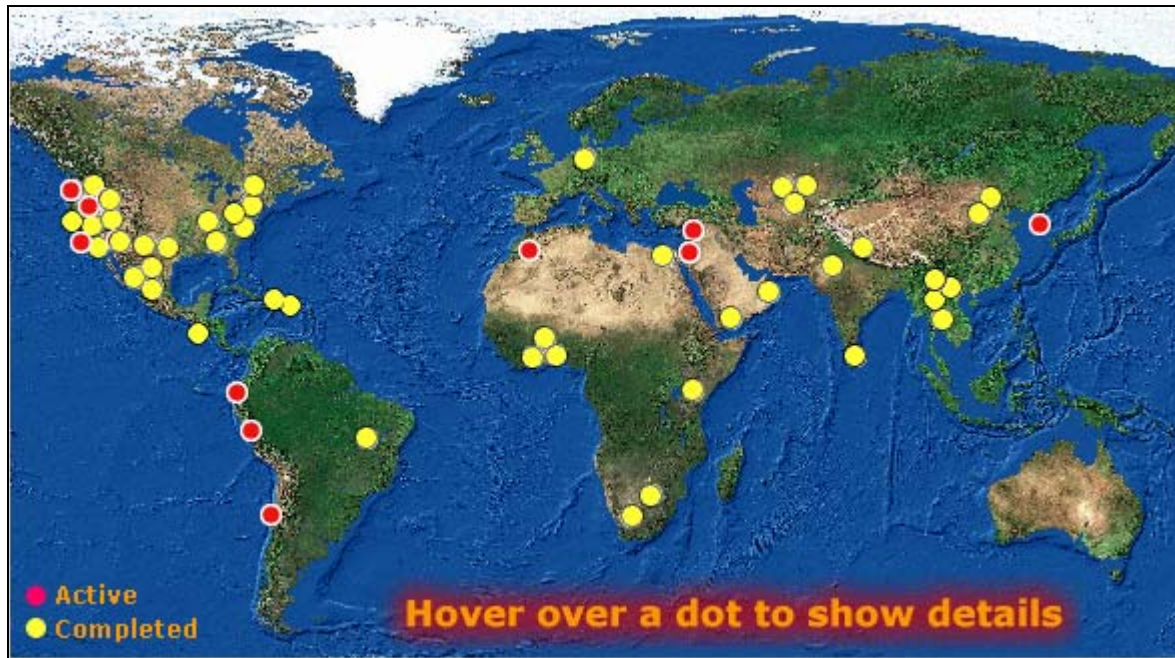


Figura 1. Selección de proyectos donde se han realizado proyectos WEAP en varios lugares alrededor del mundo.

WEAP explícitamente incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso. WEAP incluye un modelo hidrológico, así como varios módulos que permiten integrar WEAP con el modelo de agua subterránea MODFLOW y con el modelo de calidad del agua QUAL2K. WEAP también ha sido utilizado en conjunción con modelos socio-económicos. Información acerca de ejemplos de aplicaciones específicas usando estos vínculos entre modelos se encuentra en la página de publicaciones de WEAP (<http://www.weap21.org/index.asp?doc=16>).

## **2.2 ¿Quiénes Usan WEAP?**

WEAP tiene una audiencia múltiple dependiendo del tipo de interacción. Abarca a un gran número de usuarios, desde aquellos encargados de la planificación hidrológica, hidrólogos, agrónomos, economistas, hasta funcionarios públicos encargados del recurso hídrico, y comunidades locales. Usando la esquemática de WEAP, entidades públicas de planeación de agua y comunidades locales pueden colaborar en la descripción física de la zona de interés. Una vez el sistema está construido, se pueden implementar las demandas y suministros de agua y observar el balance del recurso en la región.

## **2.3 Requerimientos para Usar la Herramienta**

WEAP es accesible debido a su interfaz gráfica, lo cual lo hace más simple que otros modelos similares. Sin embargo, se requiere conocimiento técnico para usarlo y se recomienda disponer de un computador de buena calidad con acceso a Internet. Finalmente, dependiendo de las cuestiones que se esperan resolver con WEAP, el modelo puede requerir un rango amplio de datos, ya sea desde poca información si el problema es simple, hasta una gran cantidad de datos climáticos, y de suministro y demanda de agua si se está modelando la hidrología y los recursos hídricos de un sistema complejo.

## **2.4 Descripción y Aplicaciones de WEAP**

WEAP apoya la 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 gráfica 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. A diferencia de otros modelos de recursos hídricos típicos basados en modelación hidrológica externa, WEAP es un modelo forzado por variables climáticas. Por otra parte y de manera similar a estos modelos de recursos hídricos, WEAP incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre 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, en los que es importante estimar cambios en la oferta de agua (e.j. cambios en la precipitación proyectados) y en la demanda de agua (e.j. cambios en la demanda por

evaporación en cultivos), los cuales producirán 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 general, 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 de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas 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 superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los valores de 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.

## **2.5 El Proceso de Aplicación de un Modelo WEAP**

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

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. Búsqueda de información: En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
3. Desarrollo del modelo: En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
4. 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.
5. Uso del modelo, generación de escenarios: Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las

políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

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.



### **3 Definición del Estudio**

Un ejercicio de modelación efectivo requiere una cantidad considerable de datos, así como tiempo y recursos para diseñar, implementar y revisar el modelo. Este esfuerzo será menor si se obtiene una mayor comprensión del problema. Por esta razón, la naturaleza del problema y el propósito del modelo deben ser claros desde el principio para asegurar un uso eficiente de los recursos disponibles para un determinado proyecto. Esta fase inicial del trabajo de modelación define el alcance del modelo. Para esto, se recomienda resolver preguntas como:

- ¿Cuál es el problema que este proyecto quiere resolver?
- ¿Quiénes van a usar los resultados del modelo?
- ¿Existe necesidad para incorporar un componente de escenarios futuros? (Generalmente en proyectos de planeación, la respuesta a esta pregunta debe ser “sí”, lo cual implica la incorporación de escenarios)
- ¿Qué tipo de datos requiere el modelo? ¿Cuánto esfuerzo se va a requerir para recolectar y procesar los datos? (la respuesta a esta pregunta puede ser dada de forma general al principio y se va refinando durante el proceso)

Aquí es recomendable recordar que las características principales de WEAP para apoyar proyectos en recursos hídricos son:

- WEAP esta construido bajo un enfoque de escenarios, lo cual lo hace apropiado para ese propósito
- Tanto la demanda como suministro de agua pueden ser representadas en WEAP
- El régimen y normas de distribución de agua también pueden ser representadas en WEAP
- WEAP es flexible y puede ser vinculado a otros modelos
- Como cualquier otra herramienta de modelación, construir modelos en WEAP requiere datos, tiempo, habilidades de modelación y paciencia!

Las respuestas a las preguntas anteriores conllevan a la identificación de las fronteras espaciales y temporales del modelo.

- Delimitación espacial/esquema: Una vez definido el problema se pueden identificar los límites de la extensión del modelo. En una cuenca específica, esto implica la identificación del punto límite de interés aguas abajo en el río a partir del cual se delinearán la cuenca a modelar. Adicionalmente, se requiere la identificación de puntos de manejo a partir de los cuales se delinearán puntos de cierre de las subcuencas. Puntos de manejo típicos incluyen:
  - Estación de monitoreo de caudal

- Represa (existente o proyectada)
- Confluencia de ríos importantes (siempre que la subcuenca que agrupa a ambas posea condiciones climatológicas heterogéneas)
- Localización de canales de extracción de agua

Un ejemplo de delimitación de subcuencas consideradas en el modelo se muestra en la Figura 2. Esta Figura también muestra la principal red hidrológica de la cuenca del Río Paute en Ecuador. Tal y como se muestra en la Figura 3, esta red hidrológica ha sido desarrollada esquemáticamente en el modelo WEAP, donde se incluye las subcuencas asociadas y además, la ubicación de los principales centros urbanos en la cuenca (Nota: El desarrollo del modelo de la cuenca del Río Paute en Ecuador será utilizado como ejemplo en diferentes partes de este documento).

- Delimitación temporal/paso de tiempo: Tomando en cuenta la información disponible de datos climatológicos e hidrológicos para la cuenca en estudio se debe considerar el período de simulación y el paso de tiempo del modelo. Generalmente se busca que exista una coincidencia entre las series de datos climáticos y las series de datos de medición de caudales. La coincidencia temporal de estas dos fuentes de datos independientes permite realizar la calibración del modelo a través del ajuste de parámetros hidrológicos, de forma que los caudales obtenidos con el modelo produzcan una representación aceptable de los caudales observados. El paso de tiempo del modelo se determina dependiendo de la precisión necesaria. Debido a las características cuasi-físicas y semi-distribuidas del modelo hidrológico dentro de WEAP, la representación de los procesos hidrológicos tiene un nivel de agrupamiento que hace las aplicaciones del modelo sean válidas dentro del paso de tiempo semanal y mensual. Si la aplicación requiere una mayor resolución, se debe considerar el uso del paso de tiempo semanal, pero en muchas ocasiones el paso de tiempo mensual es suficiente para los propósitos de la aplicación.
- Consideración de la demanda: Además de la caracterización física espacial y temporal de la zona de estudio, se requiere la ubicación de los sitios de demanda, los cuales incluyen sistemas de riego, urbes a considerar, población rural y caudales mínimos, entre otros. Dependiendo del objetivo del modelo, esta caracterización puede ser detallada o gruesa. Por ejemplo, las demandas de riego pueden agruparse como un “sitio de demanda” o pueden caracterizarse dentro del modelo hidrológico. Por otro lado, los consumos urbanos pueden asumirse como un consumo per cápita o pueden clasificarse de forma detallada en categorías de uso interno domiciliario (baños, lavandería, etc.) y uso externo (jardines, zonas comunes, etc.).

- Consideraciones especiales: Otros requerimientos del problema en estudio pueden exigir el uso de elementos específicos existentes dentro de WEAP (e.g., agua subterránea o plantas de tratamiento de agua, el uso de la capacidad incorporada en WEAP de vínculo con otros modelos (i.e., QUAL2K, MODFLOW), o la creación de rutinas para la integración de WEAP con otros modelos externos requeridos para la aplicación específica (i.e., modelos económicos, modelos ecológicos de dinámica de población). Adicionalmente y en la medida en que el equipo técnico que desarrolla WEAP este involucrado en un proyecto, se puede lograr el desarrollo de capacidades dentro de WEAP para resolver problemas específicos. Por ejemplo, recientemente se ha implementado la capacidad en WEAP de crear variables y categorías adicionales, lo cual permite gran flexibilidad dentro del modelo. Esta capacidad se ha utilizado exitosamente en la implementación de un modulo para observar la evolución de glaciares en la zona andina.

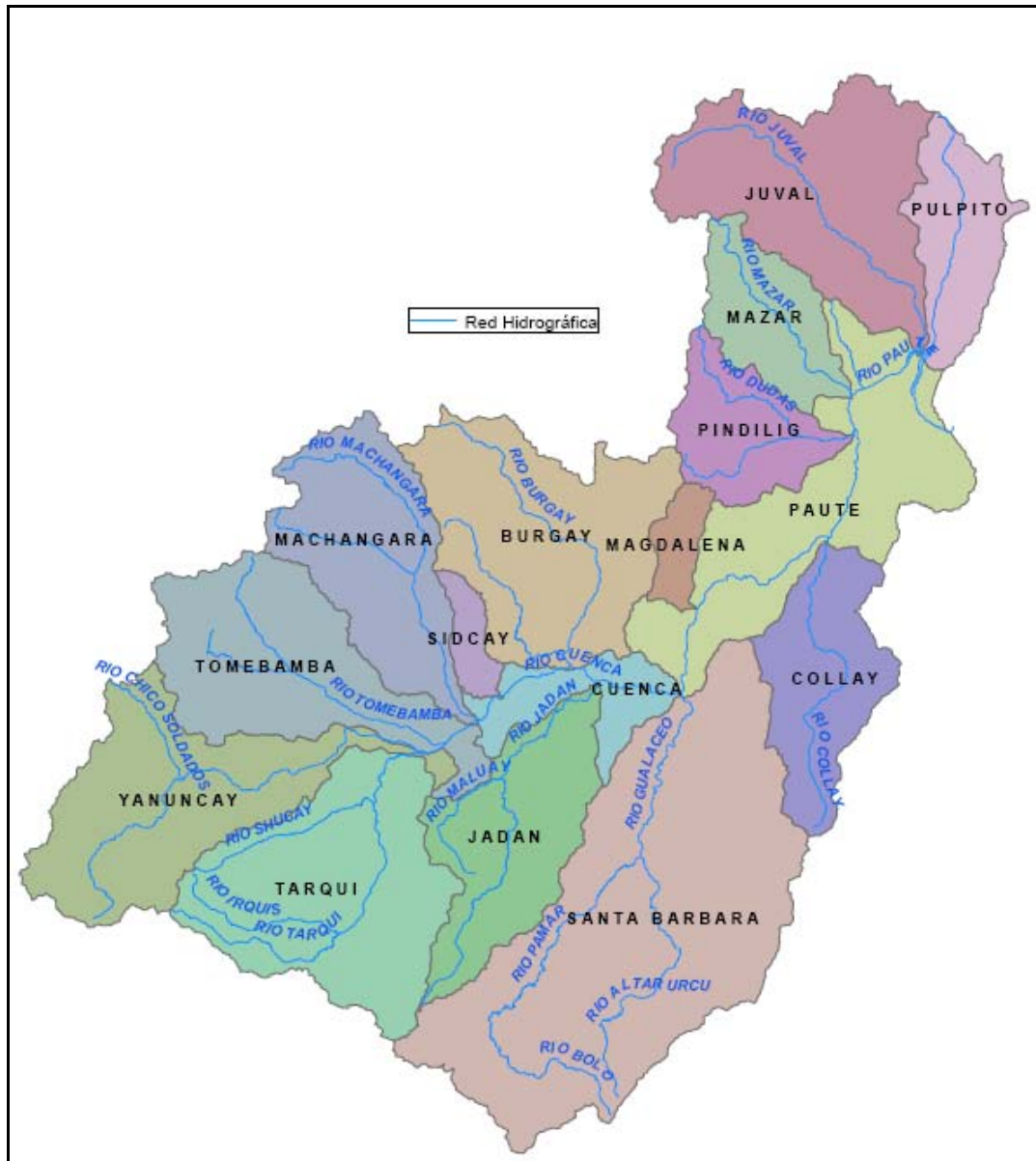


Figura 2. Subcuencas y Red hidrográfica consideradas en el modelo del Río Paute, Ecuador

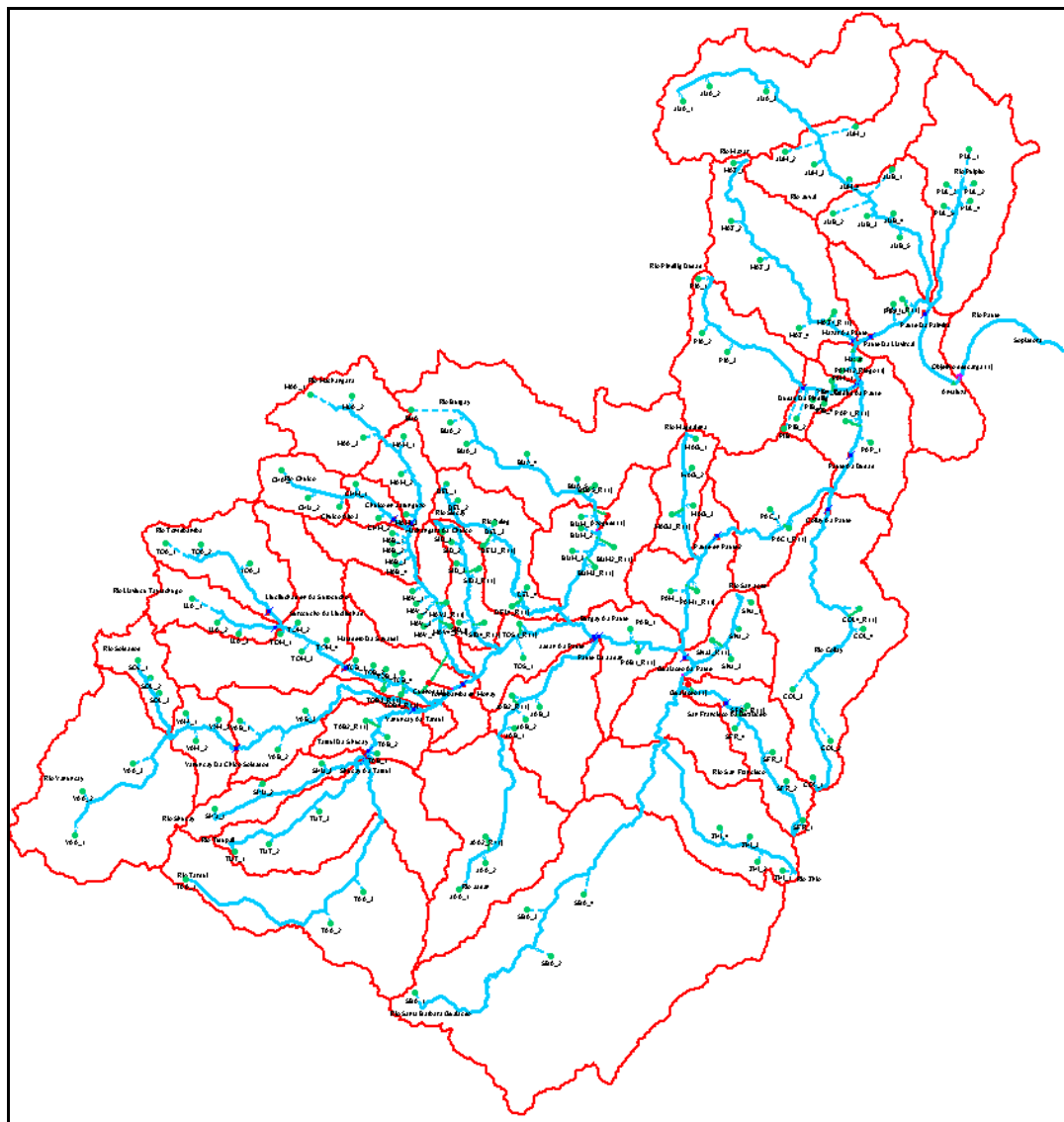


Figura 3. Esquema modelo WEAP del Río Paute, Ecuador

## **4 Búsqueda de Información**

La recopilación de datos para aplicaciones de WEAP generalmente se realiza en dos etapas. La etapa inicial de recopilación de datos tiene como objetivo dar soporte a la aplicación inicial del modelo WEAP. En esta etapa se busca recopilar la información existente en agencias de gobierno, bases de datos internacionales, información de satélite e información publicada en estudios previos. El modelo inicial implementado con estos datos permite evaluar la necesidad de recopilar más datos posteriormente. La aplicación inicial de WEAP no debe ser extremadamente detallada, pero tampoco debe arrojar resultados incorrectos. Por esta razón, se debe realizar una revisión preliminar del modelo. La revisión del modelo se debe enfocar en identificar qué modificaciones deben realizarse en el modelo y qué datos adicionales deben recopilarse para hacer el modelo más preciso. Generalmente, los datos adicionales requeridos para mejorar la precisión del modelo pueden incluir un mayor procesamiento de datos como, por ejemplo, una delineación más detallada de las cuencas usando algún software de Sistema de Información Geográfico (SIG). Otros datos necesarios pueden ser de tipo hidrológico, uso de suelo o datos socioeconómicos.

En la tabla siguiente se presenta una lista de los datos que se deben recopilar para una aplicación de WEAP. La lista incluye una clasificación de prioridad de datos según su importancia para el modelo (1=Muy importante, 2=Relevante). La idea es que el enfoque inicial debe darse en conseguir los datos marcados con 1. Una vez un modelo inicial ha sido desarrollado, se puede refinar el modelo con la consecución de los datos adicionales (marcados con 2). El formato preferido se da como referencia pero no es un requerimiento. Sea cual sea el formato de los datos, generalmente es necesario hacer un procesamiento para poder ingresarlos en el modelo.

Tabla 1. Resumen de Datos Requeridos para Construir un Modelo en WEAP

Datos requeridos para alimentar el modelo y durante el proceso de calibración	Prioridad	Formato preferido	Notas
<b>Datos de Entrada – Demandas</b>			
- Uso de suelo			Estos datos son necesarios para caracterizar la cuenca
o DEM (Modelo de Elevación Digital)	1	GIS	
o Cobertura de vegetación	1	GIS	
o Tipo de suelo	2	GIS	
o Geología	2	GIS	
o Áreas de agricultura irrigada	1	GIS, Excel, texto o csv	
o Tecnologías de irrigación	2	GIS, Excel, texto o csv	
- Clima			Estos datos son necesarios para alimentar el modelo con condiciones climáticas. Precipitación y Temperatura deben ser promedios de cada paso de tiempo dentro el periodo de modelación, mientras que humedad relativa y viento pueden ser un promedio aproximado.
o Precipitación (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del período de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Temperatura (series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del período de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Humedad Relativa (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Viento (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto, o csv	
o Cobertura de nubes	2	Excel, texto, o csv	
o Latitud	1	Excel, texto, o csv, o capas de GIS para extraer datos	
- Sitios de Demanda (ciudades, industrias, zonas agrícolas)			Aunque las demandas agrícolas se pueden estimar dentro del modelo hidrológico, también se pueden agrupar en un sitio de demanda
o Número de usuarios	1	No hay formato preferido	
o Consumo per capita	1	No hay formato preferido	
o Variación Mensual	1	No hay formato preferido	
o Porcentaje de retorno	1	No hay formato preferido	
<b>Datos de Entrada – Suministro y Recursos</b>			
- Reservorios/represas <u>Datos físicos:</u> o Capacidad de almacenamiento o Volumen inicial o Curva de volumen/elevación o Evaporación o Pérdidas a agua subterránea <u>Datos de operación</u> o Máximo nivel de conservación o Máximo nivel de seguridad o Máximo nivel inactivo	1	No hay formato preferido. Los datos pueden venir en diversos formatos o hacer parte de un texto. La curva de volumen/elevación puede venir en Excel.	Si existen reservorios, es importante tener información sobre su localización y sus características físicas y de operación

Tabla 2. Resumen de Datos Requeridos para Construir un Modelo en WEAP (continuación)

<b>Datos requeridos para alimentar el modelo y durante el proceso de calibración</b>	<b>Prioridad</b>	<b>Formato preferido</b>	<b>Notas</b>
- Capacidad hidroeléctrica o Mínimo caudal de turbina o Máximo caudal de turbina o Cabeza hidráulica o Factor de Planta o Eficiencia	1	No hay formato preferido	El modelo requiere estos datos para poder calcular producción hidroeléctrica
- Requerimientos de caudales mínimos	2	No hay formato preferido	
- Canales para extracción de agua (i.e. canales de irrigación)	1	No hay formato preferido	Es importante saber la localización de los canales y acuíferos
- Agua subterránea	2		
<b>Datos para Calibración del Modelo</b>			
- Ríos			Estos datos son importantes para chequear el comportamiento del modelo, y realizar la calibración
o Series de tiempo de caudales	1	Excel, texto, o csv	
- Nieve			
o Series de tiempo de profundidad de nieve o de equivalente de agua	2	Excel, texto, o csv	
o Estimados de volumen de nieve	2	Excel, texto, o csv	
- Glaciares			
o Área de cobertura de glaciares	2	GIS o Excel	
o Escorrentía de agua desde glaciares		Excel, texto, o csv	



## **5 Desarrollo del modelo**

En la etapa de desarrollo del modelo se busca representar la cuenca tomando como base la simulación de las condiciones históricas. 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.

### **5.1 Aspectos Metodológicos**

#### **5.1.1 Análisis de la Oferta de Agua**

Los componentes del balance hidrológico modelados usando el programa WEAP son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial (i.e. interflow), y flujo base (Figura 4). WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como *catchments*. Los *catchments* tienen que ser definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas. A través de este proceso se obtiene la caracterización de cobertura vegetal necesaria, incluyendo el estimado de las áreas y la distribución de cobertura vegetal dentro de cada zona de captación. Los datos climáticos requeridos para realizar la 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.

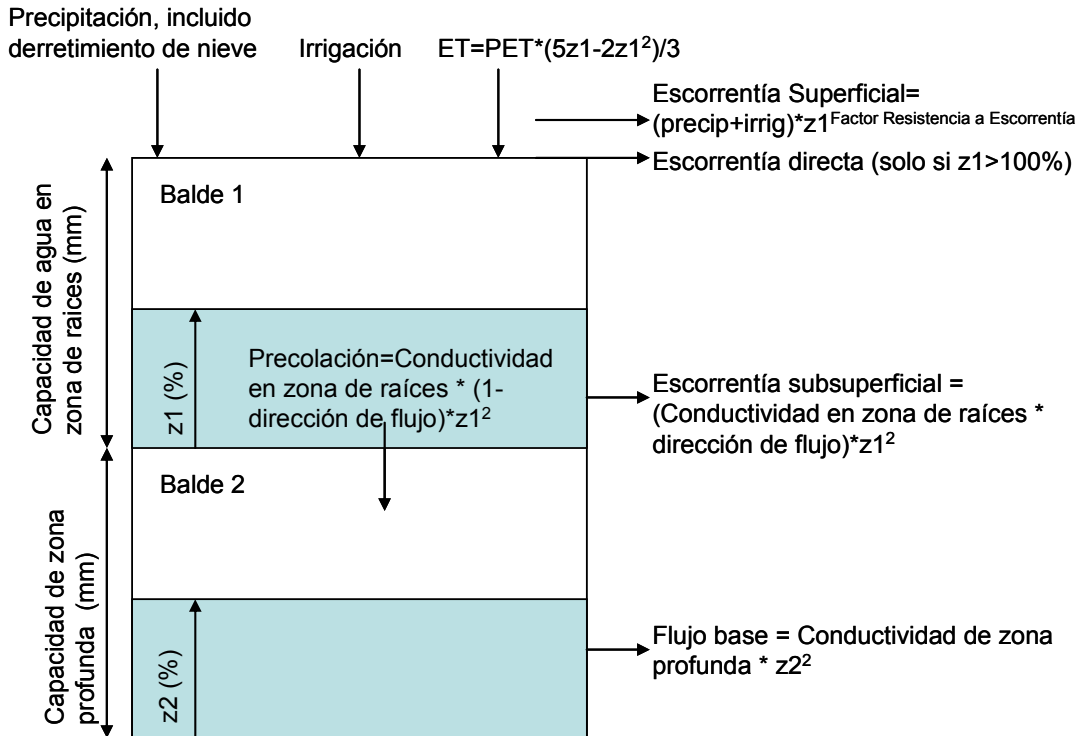


Figura 4. Elementos hidrológicos modelados en WEAP

### Información climatológica:

La información meteorológica obtenida en la etapa de consecución de datos debe ser procesada para formar una base de datos que permita el uso de los datos dentro del modelo. A continuación se presentan algunas guías metodológicas con respecto al procesamiento de estos datos.

### Precipitación:

Dependiendo de los datos de precipitación obtenidos, estos se deben procesar para lograr series de datos continuos para el periodo de modelación. Generalmente, los datos de precipitación pueden presentarse en diferentes formatos incluyendo:

- Isoyetas: en este caso el objetivo es usar esta información para determinar una isoyeta anual ponderada por cada banda de elevación y luego se desarrolla un factor que es aplicado a una estación base (ver Recuadro 1).

- Relaciones de altura-precipitación: en este caso se pueden usar las ecuaciones directamente para estimar la precipitación en cada banda de elevación con base en los datos de una estación base.
- Otras opciones: si no se tienen isoyetas o relaciones de altura-precipitación, se deben procesar los datos de las estaciones disponibles usando algún procedimiento de análisis climatológico (en *softwares* de SIG existen funciones que permiten hacer este tipo de análisis como la media ponderada por la inversa de la distancia (IDW)) que permita distribuir la información de forma que pueda ser utilizada en cada *catchment*.

### **Temperatura:**

Debido a la distribución espacial y temporal de la temperatura, se considera que es suficiente una extrapolación por altura de la información de temperatura proveniente de un grupo de estaciones representativas 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 7 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 pueden derivar series de tiempo de temperatura que toman como base la serie de tiempo histórica de las estaciones índices y la diferencia de altura entre las bandas y la ubicación de las estaciones (ver Figura 8). En la sección de aspectos prácticos se presentan los detalles de este procedimiento.

En caso de que no existan datos de estaciones para desarrollar el gradiente de temperatura basado en un estimado de cambio de temperatura adiabático en función de la altura equivalente a  $6^{\circ}\text{C}$  por cada 1000 m (i.e.  $0.006^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ). Este valor de referencia debe ser corroborado si es posible analizando los promedios de temperatura anual de las diferentes estaciones localizadas en la cuenca. El delta de temperatura puede entonces ser calculado multiplicando el diferencial de altura entre una estación base y la altura promedio de cada subcuenca por  $0.006^{\circ}\text{C}/\text{m}$ .

### **Recuadro 1. Uso de datos de Precipitación cuando existen Isoyetas**

Para la creación de las series de tiempo de precipitación para cada banda de elevación se procede de la siguiente manera:

1°. 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.

2°. Para cada una de las regiones de precipitación se consideran las estaciones que posean la mejor calidad de datos para el período 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 para el ejemplo del Río Paute se muestra en la Figura 5). Se espera que la distribución de la precipitación a lo largo del año (i.e. modo uni o bimodal de precipitación) sea homogénea en el interior de cada subcuenca y esté correctamente representado por estas estaciones índices.

3°. 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 (ver Figura 6) 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 supuesto puede no ser válido, se considera pertinente en aquellos casos en los que la extensión y la calidad de las estaciones de precipitación no es alta, como es la situación en la cuenca del Paute.

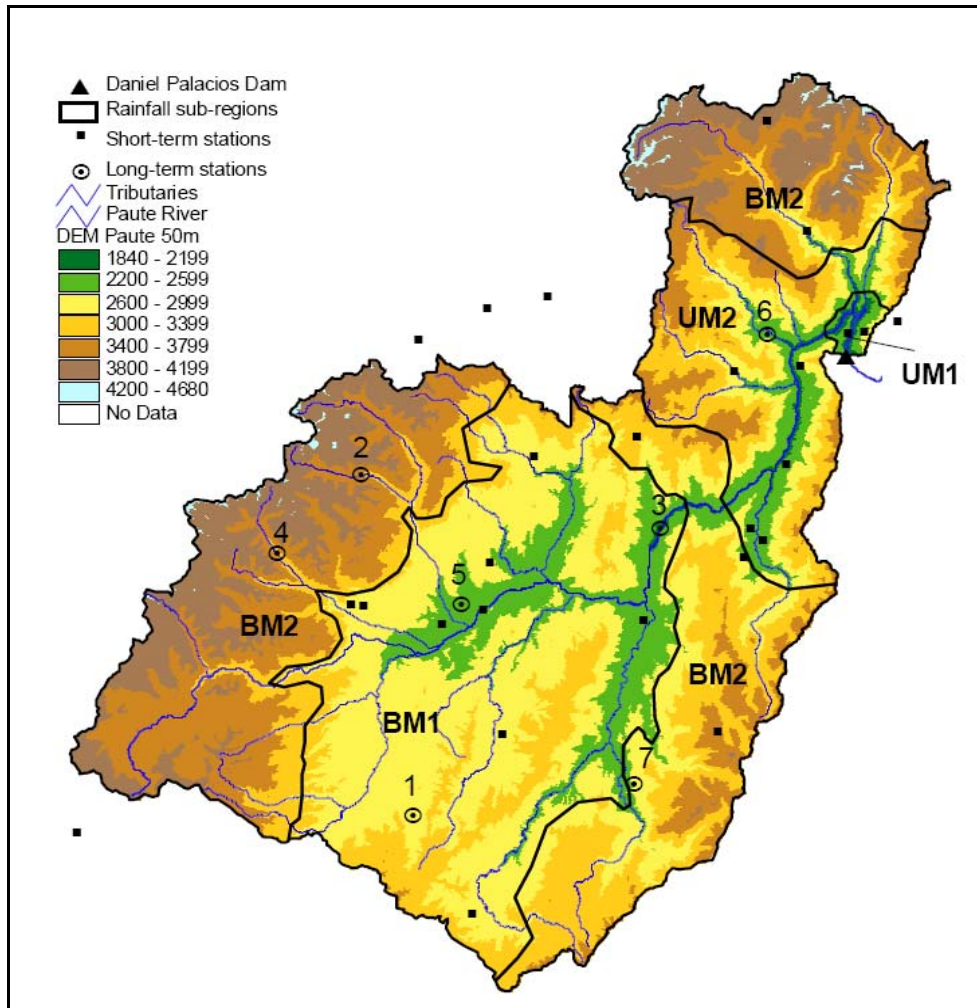


Figura 5. Caracterización de los regímenes de precipitaciones. Ejemplo Cuenca del Río Paute.

UM1 = Uni-modal 1; UM2 = Uni-modal 2; BM1 = Bimodal 1; BM2 = Bi-modal 2. Fuente: (Celleri, 2007)

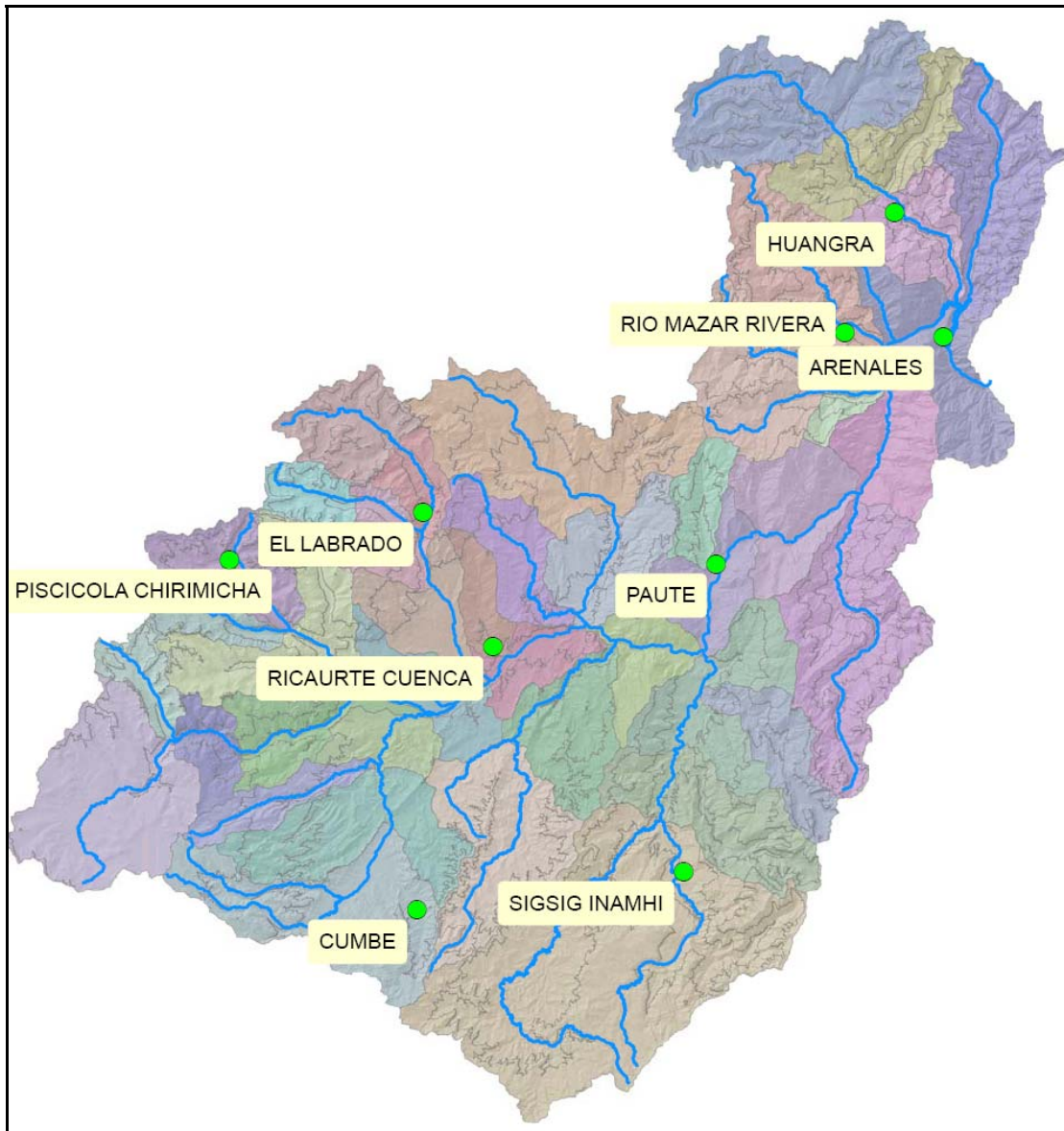


Figura 6. Estaciones Meteorológicas índice – Precipitación. Ejemplo Cuenca Río Paute

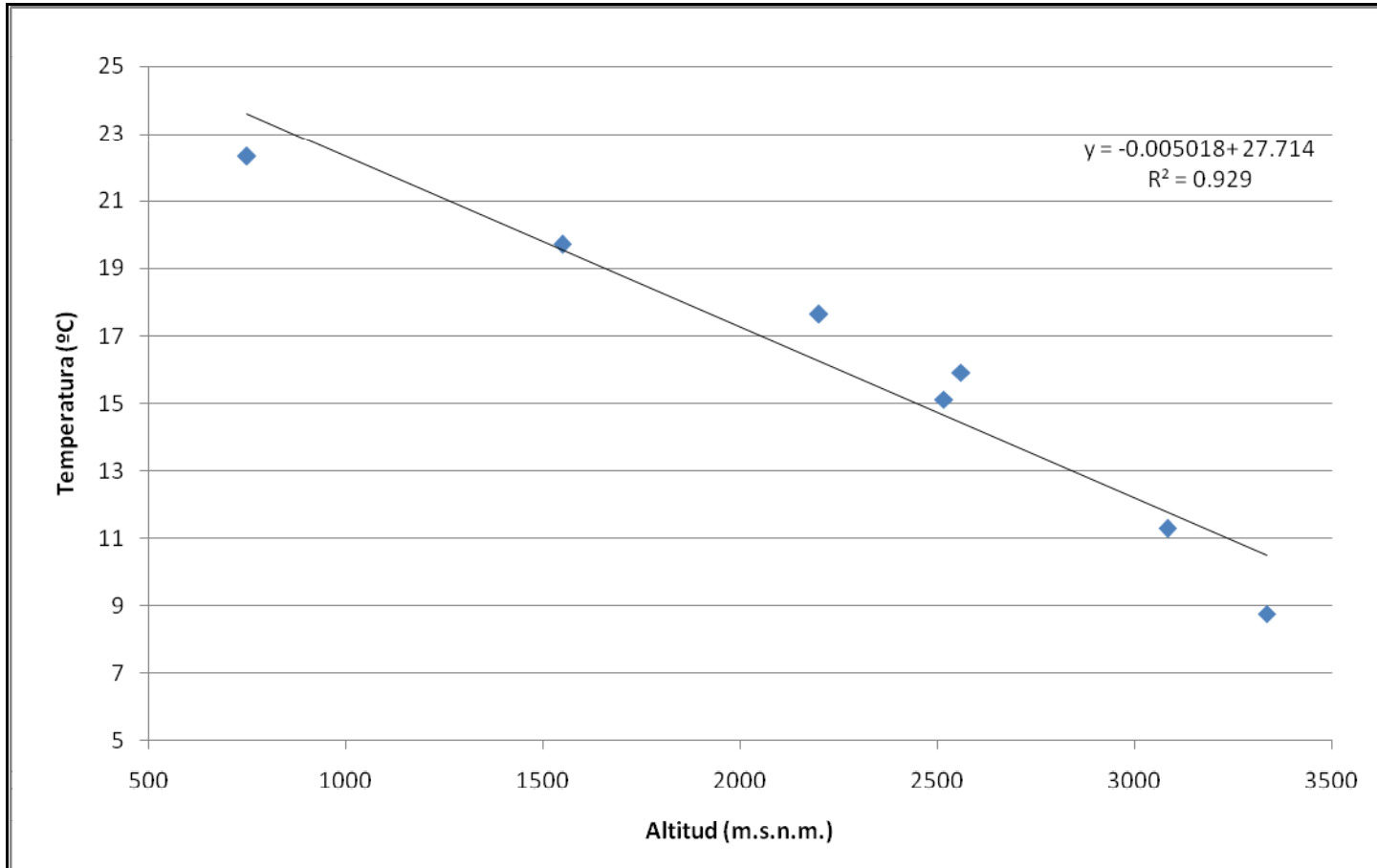


Figura 7. Relación Temperatura - Altura. Cuenca Río Paute



Figura 8. Estaciones Meteorológicas Índices – Temperatura. Ejemplo Cuenca Río Paute



### **Humedad, viento y latitud:**

La asignación de las variables humedad y viento requiere de una clasificación por altura de todos los *catchments* de la cuenca. Por ejemplo, para estas variables climáticas, se puede considerar el promedio mensual histórico de dos estaciones índices ubicadas en zonas altas y medias-bajas, asumiendo una nula variación inter-anual y una variación de altura dada por la diferencia de altura entre las estaciones base. El cálculo de la latitud se realiza mediante un software SIG (i.e. ArcGIS® 9.2, Grass, Manifold), obteniendo la latitud del centroide que define cada microcuenca.

### ***Condiciones hidrológicas existentes en la cuenca:***

#### **Ríos**

Esta información hidrométrica se debe clasificar y ordenar de forma que se tengan disponibles datos de series históricas de caudales, las cuales serán posteriormente utilizadas en la calibración del modelo.

### **Infraestructura física de control y aprovechamiento de recursos hídricos:**

Los diferentes elementos de infraestructura física se deben localizar espacialmente. Así mismo, se debe identificar su importancia dentro de la construcción del modelo para poder asignar prioridades en el momento de la incorporación de operaciones de estos elementos. Los principales elementos a considerar son:

- Embalses
- Sistemas de regadío
- Sistema de distribución de agua potable para ciudades

La información obtenida relacionada con estos elementos se debe clasificar de forma que esté disponible para uso en el momento en que se incorporen estos elementos dentro del modelo.

### **5.1.2 Análisis de la Demanda de Agua**

Para complementar el balance hidrológico realizado por el modelo en sus componentes naturales e intervenidos 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:***

Con los datos de SIG se puede analizar la cobertura vegetal de la cuenca de forma que cada *catchment* pueda tener su distribución de cobertura vegetal correspondiente. Se busca utilizar un número de categorías completa sin ser extremadamente detallada. Cuando se obtiene información de cobertura vegetal muy detallada se recomienda agrupar los tipos de vegetación, ya que la escala de resolución del modelo no requiere una clasificación detallada de la cobertura vegetal. Por otro lado, al realizar esta agrupación, se logran mejorar los tiempos de procesamiento una vez se esté corriendo el modelo. En la siguiente sección se presentan varios aspectos prácticos de cómo realizar esta clasificación de usos de suelo.

#### **Cultivos de Riego**

En caso de que existan cultivos bajo riego y que este sea un aspecto importante dentro del modelo, los cultivos se deben caracterizar de forma más detallada que la caracterización general de cobertura vegetal. Por ejemplo, dentro de la cobertura vegetal puede haber una categoría de cultivos, la cual puede tener subcategorías de acuerdo con el tipo de cultivos.

#### **Parámetros Agronómicos/Hidrológicos:**

De manera preliminar se pueden incorporar valores a los parámetros críticos a utilizar por el modulo hidrológico de WEAP. Estos parámetros se obtienen de manera inicial en los modelos que han sido desarrollados previamente para condiciones hidrológicos/climatológicas similares. Estos valores iniciales se modifican posteriormente en el proceso de calibración del modelo que se explica más adelante. En la Tabla 2 se muestran los valores de parámetros de diferentes aplicaciones de WEAP que pueden servir como guía.

Tabla 3. Resumen de Parámetros del Modulo Hidrológico en WEAP

<b>CUENCA</b>	<b>Rio Santa (Peru)</b>	<b>Rio Limari (Chile)</b>	<b>Cow Creek (California)</b>	<b>Battle Creek (California)</b>	<b>Butte Creek (California)</b>	<b>Sierra Nevada (California)</b>
<b>Paso de tiempo</b>	monthly	monthly	monthly	monthly	weekly	weekly
<b>Documento en WEAP website?*</b>			si	si		
<b>Documento en preparación?</b>	si <sup>1</sup>	si <sup>2</sup>			si <sup>3</sup>	si <sup>4</sup>
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	11,600	2,410	1,440	1,050	512	699 a 9,412 (15 cuencas)
<b>Parámetros</b>						
Kc	1					1.1
Sw cap	80	108-4320	900-720	540-455	54-540	10-1500
DeepCap	500	300-7500	500	5000	1750-2500	5000
Rf	0.8-4	0.9-5.85	3-4.6	1.7-2	50-250	4-20
Swcond	500					
Deep cond	500	140-600	300	300-400	75	10
Dir Flow	1		0.9-0.6	0.2	0.5-0.6	0.5-0.8
<b>Desarrollado por</b>	<b>Condom, T. et. A.</b>	<b>Vicuña, S. et. al.</b>	<b>Yates, D. et. Al.</b>	<b>Yates, D. et. al.</b>	<b>Escobar, M. et. al.</b>	<b>Young, C. et. al.</b>

Nota: Para acceder documentos de soporte visite la pagina: <http://www.weap21.org/index.asp?doc=16>

Para documentos en preparación sobre las aplicaciones favor contactar:

1,3,4 Marisa Escobar, [marisa.escobar@sei-us.org](mailto:marisa.escobar@sei-us.org)

2 Sebastian Vicuña, [svicuna@berkeley.edu](mailto:svicuna@berkeley.edu)

## ***Demanda Urbana:***

Para establecer la demanda urbana se considera la información proveniente de censos disponibles. Utilizando la función de *Growthfrom* en WEAP, se puede determinar la población efectiva para cada año usando como datos de entrada la tasa de crecimiento, el año del censo, y el valor inicial de población. Generalmente se caracterizan las demandas urbanas de acuerdo con el número de habitantes, tasa de crecimiento, y consumo *per capita*. En los casos en que el modelo requiera mayor detalle en la caracterización de demandas urbanas, las demandas se pueden desagregar en subcategorías para incluir aspectos de interés como, por ejemplo, el uso interno de casas (duchas, cocinas, sanitarios, etc.) y usos externos (riego de jardines, lavado de fachadas, etc.).

## **5.2 Aspectos Prácticos de la Construcción del Modelo**

En esta sección se presentan aspectos prácticos de la construcción del modelo en WEAP. Se busca ofrecer indicaciones de los pasos previos necesarios en el procesamiento de datos y presentar herramientas básicas útiles que faciliten el proceso de construir el modelo orientado a un amplio rango de usuarios, desde aquellos con alto conocimiento técnico hasta aquellos con menor conocimiento técnico.

### **5.2.1 Procesamiento de Datos Previo a Construcción del Modelo**

Los datos de SIG y los datos climatológicos obtenidos deben ser procesados antes de ser incorporados en el modelo. Por ejemplo, un modelo de elevación digital es esencial para alimentar el modelo, pero debe ser analizado para obtener los datos de área de los distintos *catchments*. Por otro lado, los datos climatológicos deben ser analizados respecto a la cobertura de la zona y convertidos al paso de tiempo seleccionado para el modelo. A continuación se presentan aspectos comunes que se encuentran en esta etapa e indicaciones de cómo realizar el correspondiente procesamiento de los datos.

### ***Delimitación de Catchments en SIG***

Las subcuencas se deben delimitar en ciertos puntos de interés hidrológico donde se desea conocer exactamente el valor del caudal en un momento determinado durante el uso del modelo, ya sea para la calibración o la simulación de escenarios futuros. Estos puntos son:

- Confluencia de ríos

- Puntos de aforo de caudales
- Reservorios existentes (y proyectados)
- Puntos de inicio y de terminación de canales de derivación de agua

Usando una herramienta SIG se logra realizar la delimitación de las subcuencas en los puntos de interés seleccionados. La Figura 9 muestra un ejemplo del desarrollo del modelo en Paute donde a partir de una delimitación inicial a nivel de subcuencas se decidió en algunos casos agrupar subcuencas en unidades más amplias o subdividir subcuencas en otros casos. Esta decisión se tomaba en función de la existencia de puntos de interés. Es decir, donde no existiera un punto de interés se agregan las unidades y se delimitan subcuencas en puntos de interés no delimitados. Adicionalmente se recomienda subdividir las subcuencas de acuerdo con sus capas de elevación para obtener áreas de captación que son espacialmente uniformes respecto a sus características topográficas y climatológicas. En el Anexo 1 se describe con mayor detalle la metodología a seguir en el análisis espacial de las cuencas previo al desarrollo del modelo en WEAP. Estos *catchments* constituyen las unidades hidrológicas sobre los cuales WEAP aplica las rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base. Los *catchments* además se pueden subdividir dependiendo de su cobertura vegetal para lograr una mejor representación de los procesos hidrológicos en diferentes tipos de cultivo y suelos. Una vez obtenidos los *catchments*, sus áreas y su distribución de cobertura vegetal, se puede general el esquema base dentro de WEAP según se explica en la siguiente sección.

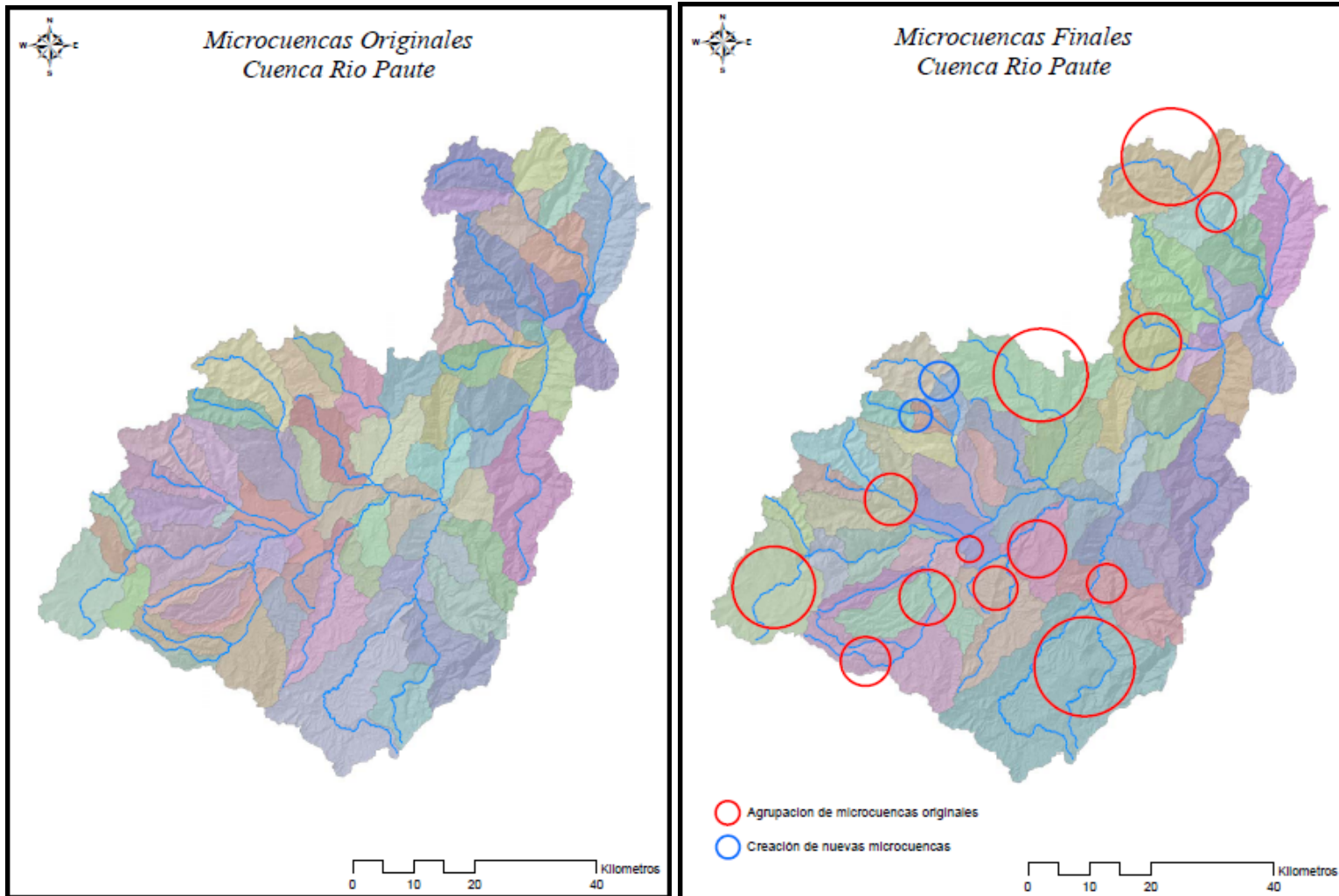


Figura 9. Delimitación de *Catchments*, ejemplo en Cuenca Río Paute, Ecuador.

La Figura de la izquierda muestra la subdivisión original de subcuencas. La Figura de la derecha muestra la delimitación final. En algunos lugares se reagruparon subcuencas (círculos de color rojo) y en otros se subdividieron cuencas (círculos de color azul).

## ***Caracterización de Cobertura Vegetal en SIG***

De acuerdo con la información obtenida de las coberturas de suelo en SIG, también es posible realizar un análisis de uso de suelo para cada una de las bandas de elevación por subcuenca. Es importante analizar el número de categorías de la cobertura original y reducirlo, si es necesario, para disminuir el esfuerzo en el desarrollo y la calibración del modelo. Por ejemplo, la equivalencia entre las categorías originales y finales usadas en el modelo del Río Paute se muestra en la Tabla 3. La cobertura de vegetación es entonces intersectada con la cobertura SIG de las bandas de elevación por subcuenca para finalmente obtener la distribución espacial de coberturas en la cuenca.

Tabla 4. Uso de suelo original y agrupación utilizada en el modelo para el ejemplo del modelo Río Paute

<b><i>Uso de suelo original (1991)</i></b>	<b><i>Uso de suelo utilizado en el modelo</i></b>
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 degradadas	Áreas Urbanas Degradadas
Tierras abandonadas o tierras infértiles para cultivar	Tierras Infértiles
	Cultivos
	Maíz
	Pasto
	Hortalizas
	Plantación
	Papa
	Frutales
Áreas de cultivo, mezcla de pequeñas parcelas de cultivo (maíz, frejol) con pastos	

## ***Climatología***

Para la elaboración del modelo es necesario procesar los datos climáticos conseguidos en la etapa de búsqueda de información y asociarlos con los *catchments*.

## **Precipitación:**

Un primer paso en el procesamiento de datos climáticos es determinar la extensión en años y cantidad de datos existentes en estas estaciones pluviométricas y climatológicas. A partir de este análisis se puede determinar el período de modelación para la calibración, el cual se establece sobre los años en que los datos de precipitación, temperatura y caudales coinciden. Por ejemplo, en la Figura 10 se observa una clasificación de datos para estaciones en la cuenca del Río Paute. En este caso, se nota un incremento en número de estaciones a partir del año 1975-1977 y la ausencia de datos en algunas estaciones a partir de 1990. Por esta razón, el periodo seleccionado es desde 1975 hasta 1989 lo cual proporciona 14 años de datos continuos para utilizar durante el periodo de calibración. Es importante recalcar aquí que la calibración durante este periodo es posible siempre y cuando se tengan datos de caudales que coincidan con este periodo.

En general, dependiendo de la disponibilidad de datos, se recomienda utilizar un periodo de calibración que sea lo suficientemente largo como para que capture un periodo en el cual se presente suficiente variabilidad en los parámetros climáticos, por ejemplo, que presente periodos húmedos y periodos secos.



ESTACION	CODIGO	1958	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	10	4	12								
ARENALES - COLA SAN	M050														9	2	12	12	12	12	11	11	11	2	6	12	12	12																	
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	12							
PAUTE	M138					6	12	12	12	12	12	12	11	12	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	12	11	12	10	11	11	12	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	11	12	10	11	6	12	12	9								
JACARIN	M197																8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	11	6						
PATOCOCCHA	M199																																												
GUARUMALES MANIOBRAS	M206																	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	9		3	12	12	11	12	12	12	12	10	2	10	12				
PENAS COLORADAS	M217																8	12	12	11	11	12	12	12	11	12	12	12	11	11	12	12	9	9	8	4			3						
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						
CHAMIN	M414					12	12	7	6	9	12	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	9	7	1	1	11	8												
PISCICOLA CHIRIMICHAY	M417					8	12	7	8	9	11	12	12	12	12	12	12	11	12	11	12	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	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	10	12	11	12	10													
NABON	M420												11	11	10	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	9	10	11	12	12	11	12	12	12	12	11							
ORA	M421												12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	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	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	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12					
SAYANSI (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	12					
SURUCUCHO (LLULLUCHIS)	M429					12	7	8	9	12	12	12	12	12	12	12	11	6	12	12	12	12	11	12	4	12	12	11	12	12	11	12	12	12	12	12	9	5	12						
QUINDAS	M430										8	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	12	11	12							
PAIN GRANDE SAN VICEN	M538																8	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	12	6	12	12	2	11													
COCHA PAMBA QUINGEO	M541																7	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	11	9	12	12	12											
PINDILIG	M563					7	12	12	12	11	11	12	12	12	12	11	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	M666																																							9					
PATUL	M667																																												
MATAGLO GULAG	M668																																												
GIMA	M669																																												
SAN FERNANDO INAMHI-INECEL	M666																																												
HUANGRA	M671																																												
COPAL	M673																																												
LINDILIG	M686																																												
MANZANAPATA	M723																																												
CHAILUD INAMHI-INECEL	M441																8	12	12	12	12	11	7																						
MANZANAHUAYCO	M672																																												

Figura 10. Cuadro para observar la extensión de datos de precipitación (ejemplo Cuenca Río Paute).

El siguiente paso es procesar los datos de forma que estén en el paso de tiempo del modelo. Por ejemplo, si el modelo se va a hacer en paso de tiempo mensual (lo cual es común para análisis de cambio climático) y se tienen datos en paso de tiempo semanal, estos deben ser convertidos a paso de tiempo mensual. Posteriormente, los datos de estaciones se incorporan dentro del modelo a través de la creación de una estructura de datos usando las suposiciones clave o “*key assumptions*” dentro de WEAP. Tanto las funciones de Excel para realizar este procesamiento de datos, como el uso de las *key assumptions* se presenta en detalle en la siguiente sección de Incorporación de Información en el Modelo.

### **Temperatura:**

El procesamiento de datos de temperatura de estaciones es similar al procedimiento para precipitaciones. Generalmente, el número de estaciones que tienen datos de temperatura es menor que las estaciones de precipitación, lo cual implica que el procesamiento de datos es menos dispendioso. Con un grupo de estaciones con datos completos localizadas en diferentes altitudes se puede lograr obtener un gradiente de temperatura como se indicó en los aspectos metodológicos explicados anteriormente. Posteriormente se pueden utilizar dos estaciones base completas y aplicar el gradiente de temperatura para estimar la temperatura a nivel de *catchment*.

### **5.2.2 Incorporación de Información en el Modelo**

Una vez que se tenga la delimitación de los *catchments* que serán representados en el modelo, la caracterización de cobertura vegetal, y los datos climatológicos de precipitación y temperatura se encuentren analizados, se puede proceder a incorporar la información dentro del modelo. Las próximas secciones están diseñadas para orientar al usuario en este proceso. Para esto se presenta a continuación: primero, la generación del esquema base en WEAP, y a partir de este, el uso de herramientas básicas incluyendo funciones de Excel para procesamiento de datos y el uso de *key assumptions*.

#### ***Generación de Esquema Base en WEAP***

Los pasos para crear el esquema base incluyen:

- 1º: Crear área nueva
- 2º: Incorporar shapefiles (coberturas SIG)
- 3º: Centrar cuenca

4º: Incorporar ríos en el esquema basándose en las coberturas SIG

5º: Incorporar *catchments* en el esquema basándose en la delimitación de las subcuencas

Siguiendo estos pasos 1 a 5, al final se logra el esquema de la cuenca, el cual además ya incluye la estructura de datos dentro de cada *catchment*. Sobre este esquema y estructura se continúa la construcción del modelo. Estos pasos están ampliamente explicados en el Tutorial de WEAP (<http://www.weap21.org/index.asp?doc=13>). Los pasos siguientes de creación de estructura de datos de *catchments* y uso de *key assumptions* están explicados en detalle en las siguientes secciones.

### ***Crear estructura de datos en el interior de los catchments***

Una vez creado el esquema base en WEAP se puede proceder a crear la estructura de datos dentro de la vista de datos (*Data view*). En las siguientes figuras se indica paso a paso la creación de cada uno de los tipos de cobertura vegetal en cada *catchment* y como se puede replicar esta estructura en todos los *catchments* del modelo.

Figura 11. Creación de estructura a interior de *catchments*.

Las siguientes cuatro imágenes corresponden a la secuencia que se sigue para lograr crear la estructura de datos dentro de cada *catchment*

Estructura de datos dentro de cada *catchment* con respecto a uso de suelo. Para crear cada categoría, se hace *click* derecho y se adiciona una mas.

The screenshot shows the WEAP software interface. The left sidebar contains a tree view of the data structure. The 'Machangara Alto 4' node is highlighted with a red box, and a red arrow points to it. The main window displays a table for 'Demand Sites and Catchment' with columns for Area, Kc, Soil Water Capacity, Deep Water Capacity, and Runoff Resistance Factor. The table lists various land use categories and their corresponding values.

Demand Sites and Catchment	1975	Scale	Unit
Machangara Alto 4			N/A
AreasUrbanas_Degradadas	0	Percent	share
Bosque	0	Percent	share
Cultivos	0	Percent	share
Lagunas_Lechuguin	0	Percent	share
Paramo	0	Percent	share
Paramo_Intervenido	0	Percent	share
Pasto	0	Percent	share
Rocas	0	Percent	share
Tierras_Infertiles	0	Percent	share

Figura 11. Continuación

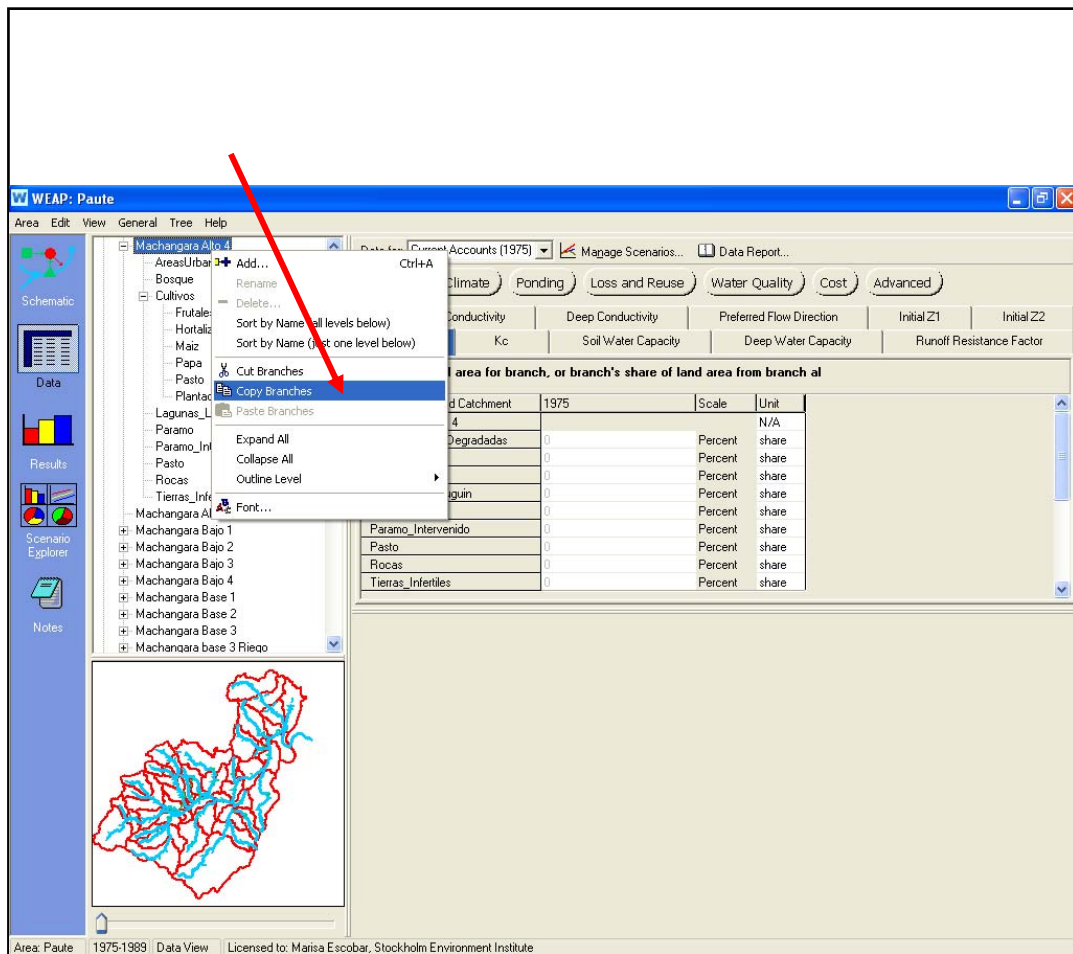


Figura 11. Continuación

Luego se pega la estructura de datos en el *catchment* destino usando la función *paste*

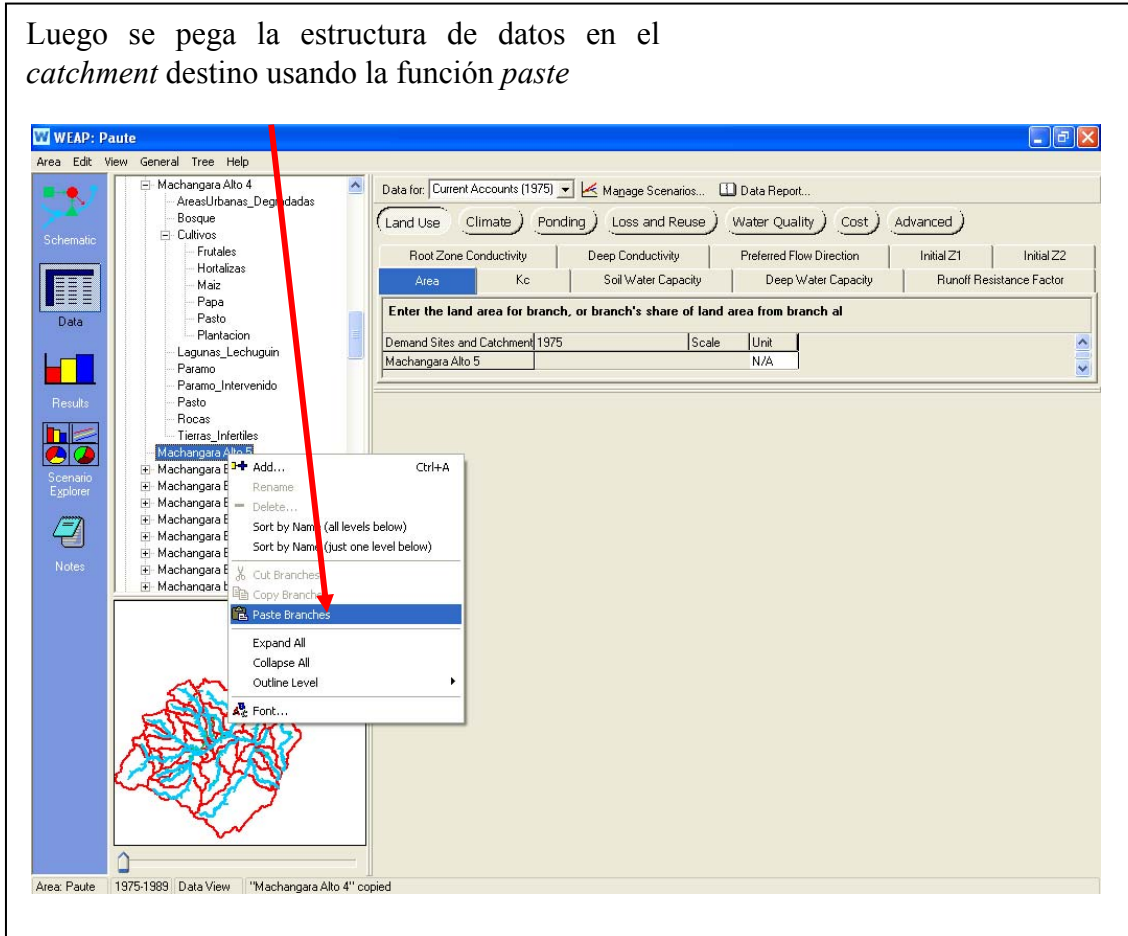
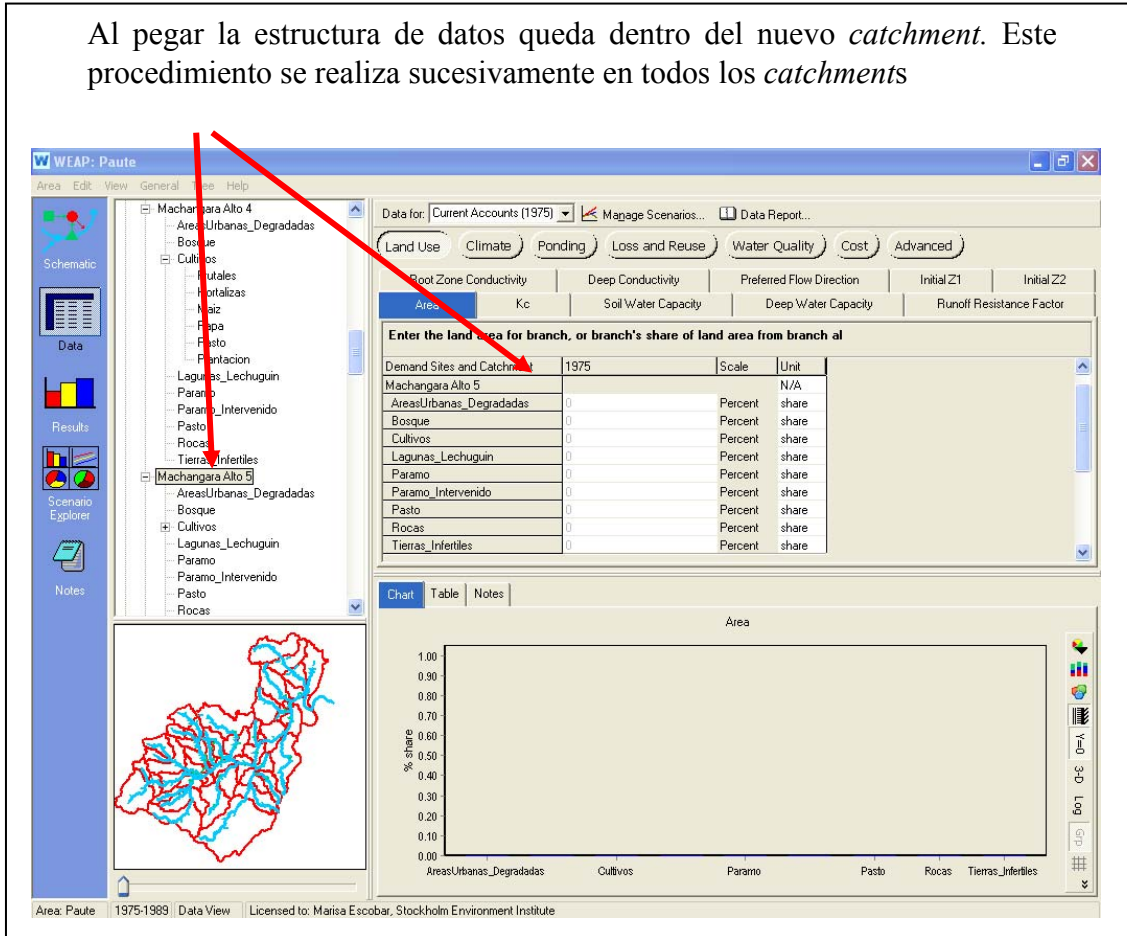


Figura 11. Continuación

Al pegar la estructura de datos queda dentro del nuevo *catchment*. Este procedimiento se realiza sucesivamente en todos los *catchments*



### **Key assumptions**

Las *key assumptions* constituyen una de las herramientas básicas en WEAP. Estas pueden ser usadas con diferentes propósitos dentro de la construcción del modelo. Por ejemplo, en las *key assumptions* se pueden incorporar los parámetros de uso de suelo usados en la calibración del modelo. Los *key assumptions* también pueden ser usadas para la creación de funciones para obtener series de tiempo de precipitación y temperatura en todos los *catchments* del modelo a partir de las estaciones base.

### **Parámetros de uso de suelo en *key assumptions***

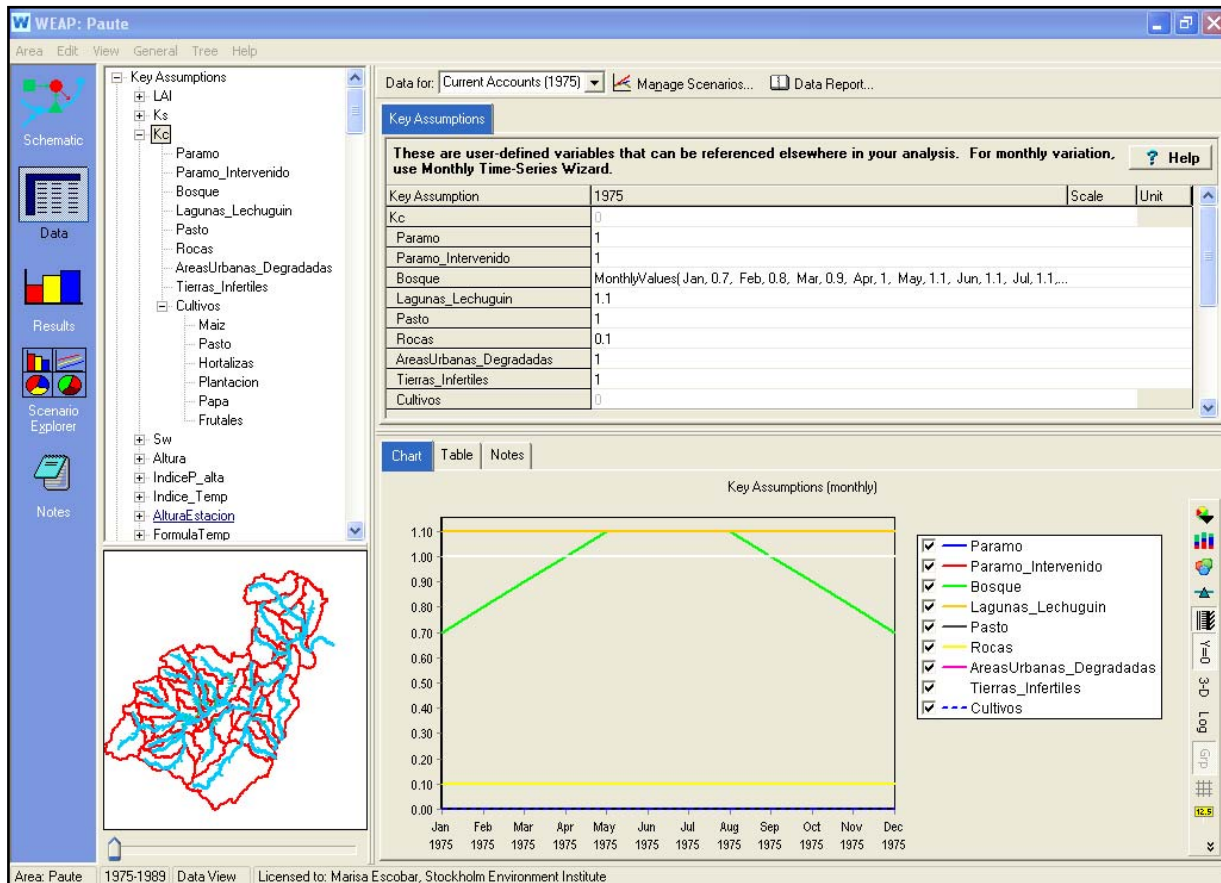
Los parámetros de uso de suelo dentro de WEAP son aquellos presentados en la Figura 4 en la página 12:

- Kc: coeficiente de cultivo
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, Sw
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF
- Conductividad de zona de raíces, Ks
- Conductividad de zona profunda, Kd
- Dirección preferencial de flujo, f
- Nivel de humedad en la zona de raíces (Z1) inicial
- Nivel de humedad en la zona profunda (Z2) inicial

Todos estos factores pueden incluirse dentro de *key assumptions* y luego asociarlos con su respectivo parámetro de uso de suelo. Algunos de los factores son dependientes del tipo de cobertura vegetal, por lo cual deben crearse categorías para representar esta dependencia. Por ejemplo, Kc es diferente para cobertura y cultivo, y en algunos caso incluso puede presentar variabilidad temporal. En la Figura 12 se notan valores variables de Kc en *key assumptions* y la variabilidad temporal para la cobertura de bosque.



Figura 12. Parámetros de Uso de Suelo en *key assumptions*



En el momento de poblar los parámetros en relación con las *key assumptions* es necesario entonces llamar la *key assumptions* respectiva. Para esto es útil usar la función de concatenar que se presenta en la siguiente sección de funciones de Excel.

### Funciones de precipitación en *key assumptions*

Una vez los datos de precipitación de las estaciones base están en bases de datos de Excel, estos pueden ser usados para obtener series continuas para todos los *catchments*. En el caso de la precipitación, dependiendo de las fuentes de datos indicadas anteriormente, así como de la existencia de isoyetas, de relaciones de altura-precipitación u otras opciones, las *key assumptions* pueden usarse de diferente forma. En el Recuadro 2 se presenta el uso de *key assumptions* para el caso en que se tienen isoyetas.

## Recuadro 2. Incorporación de Datos de Precipitación dentro de WEAP cuando existen Isoyetas

A continuación se presenta una forma de usar los datos de precipitación cuando estos han sido extraídos de isoyetas. En este ejemplo se muestra la manera en que se ha distribuido esta variable en el modelo WEAP de al Cuenca del Río Paute. La precipitación de cada *catchment* de este modelo esta dada por la ecuación:

$$\text{ReadFromFile}(\text{datos}\backslash\text{precipitaciones\_paute.csv},6)*\text{Key}\backslash\text{IndexPrecCuencas}\backslash\text{MAA\_1}$$

Donde,

ReadFromFile es la función en WEAP para leer datos de archivos (ver Figura 13)

Datos\precipitaciones\_paute.csv,6 corresponde al archivo donde se encuentran los datos de precipitación de la estación base y el 6 se refiere a la columna donde estos datos se encuentran dentro del archivo.

Key\IndexPrecCuencas\MAA\_1 corresponde a un índice calculado para el *catchment* MMA\_1.

El Key\IndexPrecCuencas\MAA\_1 se ha calculado previamente dentro de los *key assumptions*, con la siguiente ecuación:

$$\text{Key}\backslash\text{PrecipSubcuenca}\backslash\text{MAA\_1}/\text{Key}\backslash\text{PrecipEstaciones}\backslash\text{BM2}\backslash\text{Labrado}$$

Donde,

Key\PrecipSubcuenca\MAA\_1 es el valor de la isoyeta en el *catchment* específico

Key\PrecipEstaciones\BM2\Labrado es el valor de la isoyeta en la estación base

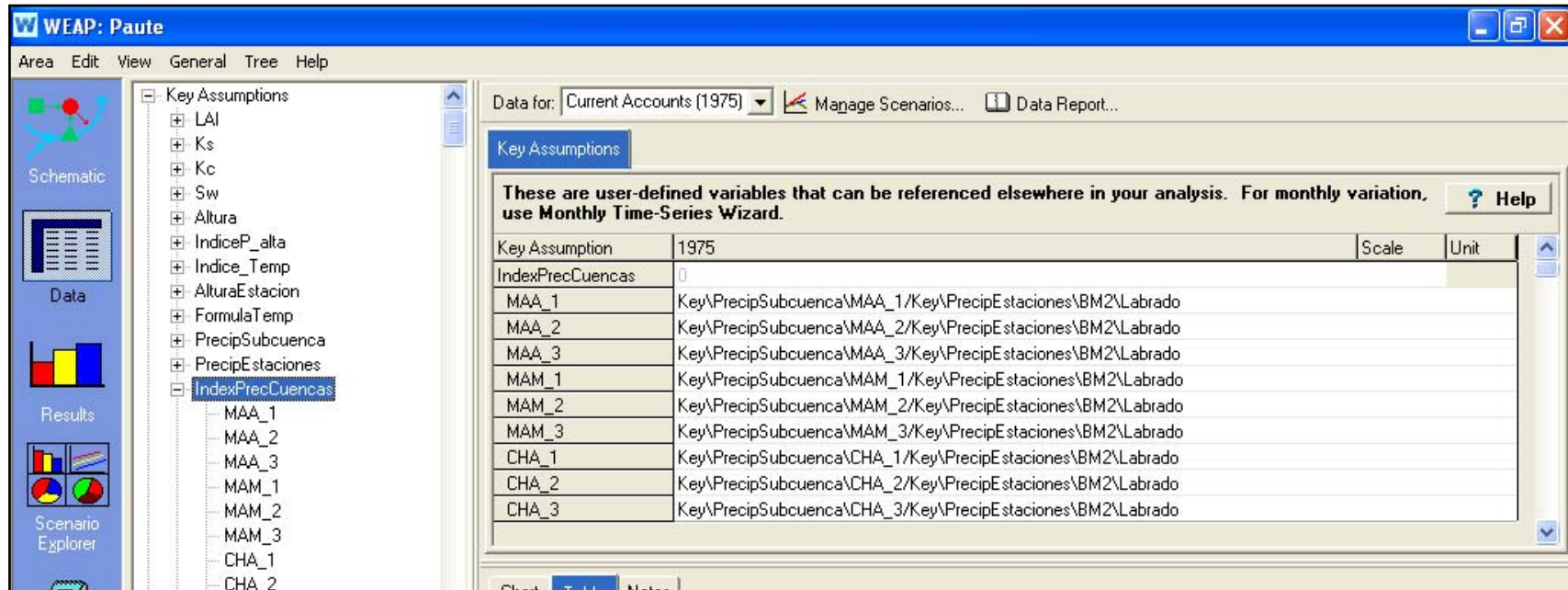
Figura 13. Vista de WEAP con ecuaciones ReadFromFile para precipitación.

The screenshot shows the WEAP software interface with the 'Climate' tab selected. The left sidebar contains icons for Schematic, Data, Results, Scenario Explorer, and Notes. The main window displays a tree view of 'Demand Sites and Catchments' with 'Machangara Alto 1' selected. The right pane shows the 'Climate' configuration for 'Precipitation' data for the year 1975. The 'Monthly total' table lists various catchments and their corresponding 'ReadFromFile' equations for precipitation data.

Demand Sites and Catchment	1975
Machangara Alto 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\MAA_1
Machangara alto 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\MAA_2
Machangara Alto 3	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\MAA_3
Machangara Medio 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\MAM_1
Machangara Medio 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\MAM_2
Machangara Medio 3	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\MAM_3
Chulco Alto 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\CHA_1
Chulco Alto 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\CHA_2
Chulco Alto 3	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\CHA_3

At the bottom of the interface, there are tabs for 'Chart', 'Table', and 'Notes', and a label 'Precipitation (monthly) (mm/month)'.

Figura 13. Continuación



Para crear estas formulas para cada uno de los *catchments* evitándose tener que escribirla de cero cada vez puede ser útil usar la función de concatenar que se explica en el texto principal de esta guía en la Sección 5.2.

## Funciones de temperatura en *key assumptions*

En lo que se refiere a la temperatura, a continuación se presenta el caso que se produce con más frecuencia. En este supuesto se utilizan estaciones base para proyectar temperatura usando un gradiente con elevación determinado como se indico en secciones anteriores (Sección 5.1.1. Temperatura en Aspectos Metodológicos).

Para cada uno de los *catchments* se utiliza la ecuación:

$$\text{Key}\backslash\text{FactorTemp} * (\text{Key}\backslash\text{Altura}\backslash\text{Catchment} - \text{Key}\backslash\text{AlturaEstacion}\backslash\text{Estacion Base})$$

Donde,

$\text{Key}\backslash\text{FactorTemp}$  = pendiente de la línea de elevación vs temperatura

$\text{Key}\backslash\text{Altura}\backslash\text{Catchment}$  = elevación del *catchment*

$\text{Key}\backslash\text{AlturaEstacion}\backslash\text{Cuenca}$  = elevación de la estacion base

Tal y como se observa, el  $\text{Key}\backslash\text{FactorTemp}$  es un único número mientras que los otros son relaciones entre variables incluidas en las *key assumptions* tal como se nota en la Figura 14 (compuesta por dos figuras).

Figura 14. Funciones de temperatura en *key assumptions*.

Los dos esquemas siguientes ilustran el procedimiento para incorporar algunas funciones de temperatura en *key assumptions*

Altura de cada *catchment* dentro de *key assumptions*

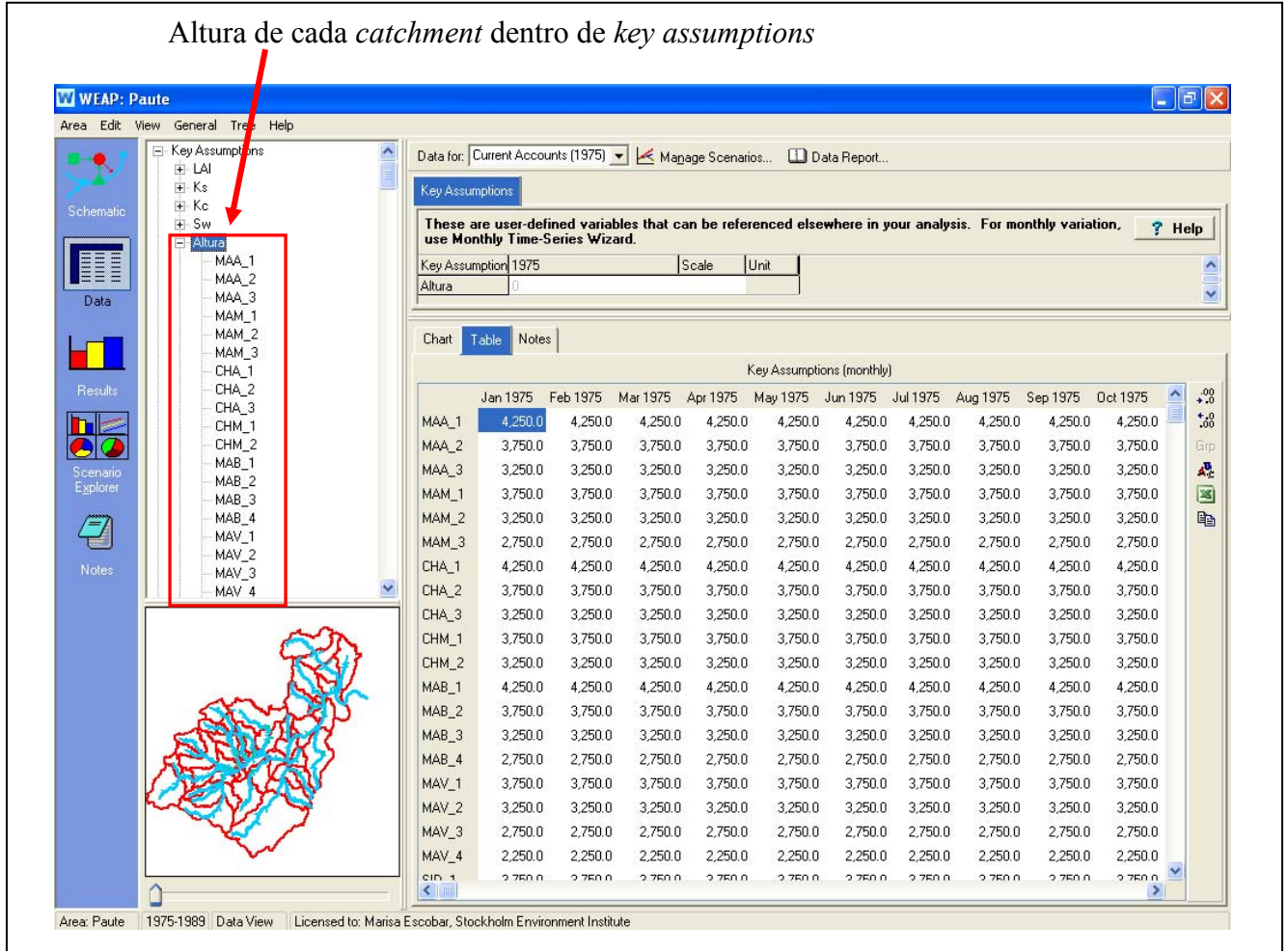
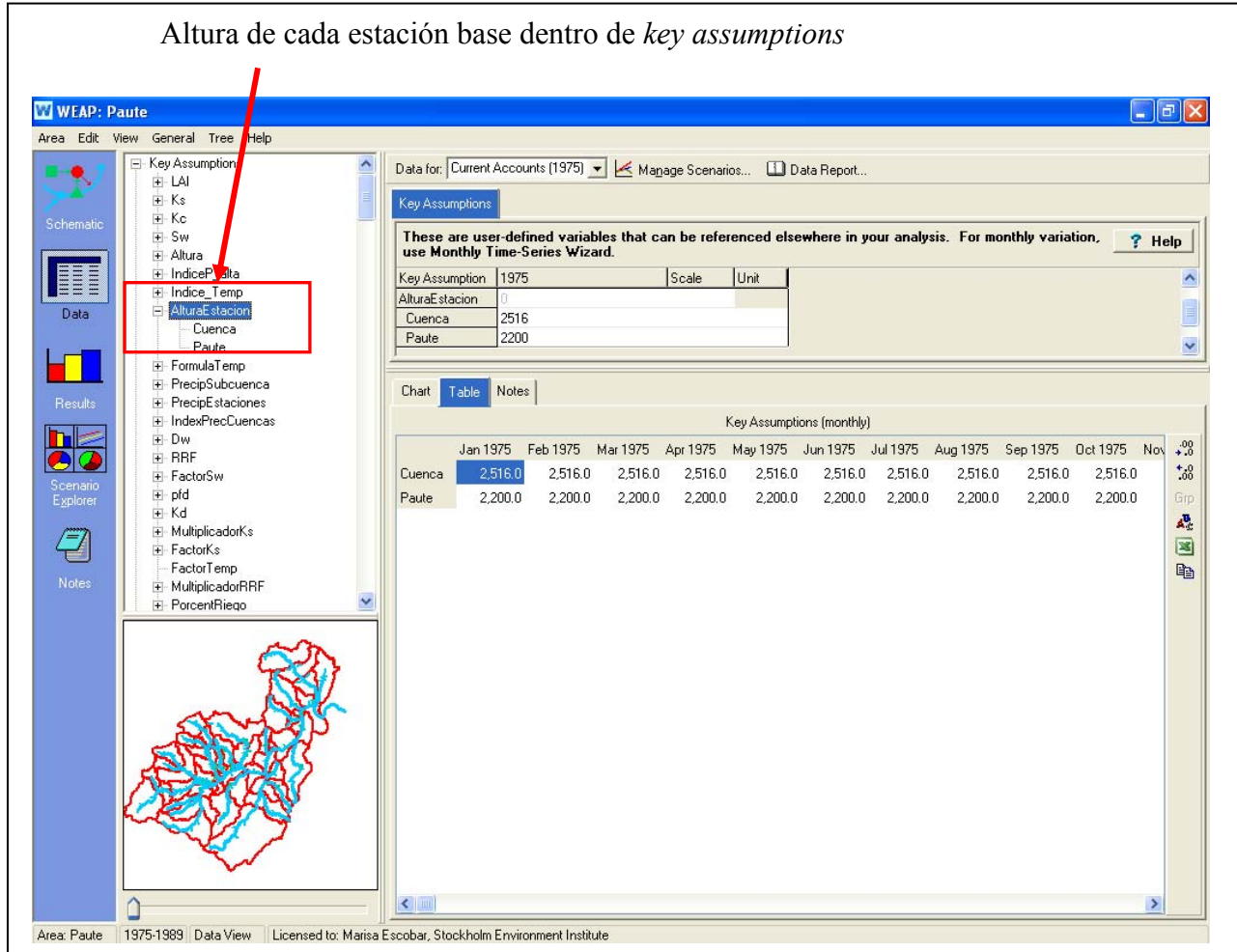


Figura 14. Continuación.



Ya que la fórmula de temperatura debe estar asociada directamente a cada *catchment*, la función de concatenar en Excel que se presenta en la sección siguiente también puede ser útil en la creación de la fórmula para todos los *catchments*.

## Herramientas en Excel

### Función BUSCARV:

Dentro del contexto de la población de datos de áreas y porcentaje de cobertura vegetal que continúa después del paso anterior de creación de la estructura de datos, es conveniente presentar la utilidad de la función BUSCARV de Excel (o VLOOKUP en inglés). Esta función

permite ordenar datos en el formato requerido para entrarlos directamente en WEAP. Por ejemplo, en el caso de datos de cobertura vegetal organizados en forma de tabla, estos pueden ser transformados a formato de columna siguiendo la misma estructura de datos de WEAP.

Los argumentos de la función BUSCARV incluyen:

- Valor que se desea buscar en la matriz
- Matriz de datos donde buscar los datos
- Columna en la que se desea ordenar el dato

En el caso del ejemplo (ver Figura 15), se están ordenando datos de área de *catchment* y proporción de cultivos que están organizados en forma de matriz para ubicarlos de forma vertical siguiendo la estructura de los *catchments* y distribución de cultivos en WEAP. Como se observa la información que existe es áreas de *catchments* y porcentaje de cada cultivo. Para este caso, los argumentos que se usan para aplicar la función BUSCARV son:

- Valor que se desea buscar en la matriz: valor en la celda S3, el cual corresponde al número del *catchment*
- Matriz de datos donde buscar datos: matriz \$A\$3:\$Q\$136 que es donde se encuentran los datos de área de *catchment* y proporción de cada tipo de cultivo

Columna que se desea ordenar dato: ya que los datos comienzan desde la columna B, la columna a la que corresponde el dato buscado está dada por la formula T3+1, lo cual indica que el valor buscado está en la columna equivalente al numero de cultivo en la columna T.



Figura 15. Función BUSCARV de Excel

Numeración de Catchments

Clasificación de cobertura vegetal y numeración. En este caso se observan 16 tipos de clases de cobertura vegetal

Función BUSCARV (VLOOKUP en inglés) para asignar valores de matriz en forma vertical siguiendo estructura de datos en WEAP

Columnas para procesamiento de datos:

- columna izquierda: numeración de *catchments* (en este caso, el numero incrementa cada 16 filas),
- columna media: numeración de cobertura vegetal,
- Columna derecha: dato de matriz asignado a celda usando la función vlookup

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data structure:

Area	% Paramo	% Inter	% Bosquinas	% Lee	% Pasto	% Rocas	% banas	% Drras	% Infe	% Cultivo	% Maiz	% Pasto	Hortaliz	Plantacii	% Papa	% Frutales
1	3127.52	76.72	0.06	6.92	0.19	10.00	5.40	0.69	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
2	588.93	88.79	0.19	7.80	1.19	1.33	0.56	0.10	0.03	0.01	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
3	102.81	82.62	0.44	5.68	0.00	10.79	0.21	0.26	0.00	0.00	12.24	25.51	25.51	12.24	12.24	12.24
4	2721.63	84.90	0.12	13.82	0.05	0.94	0.13	0.04	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
5	1681.94	18.63	0.63	62.13	0.01	16.27	0.68	0.65	0.28	0.73	12.24	25.51	25.51	12.24	12.24	12.24
6	15.02	0.00	0.00	35.93	0.00	59.18	0.00	0.00	0.08	4.81	12.24	25.51	25.51	12.24	12.24	12.24
7	282.82	73.65	0.02	9.34	1.24	9.77	5.82	0.16	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
8	953.85	79.70	0.01	16.90	2.60	0.18	0.57	0.03	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
9	196.64	56.54	0.00	14.76	25.67	0.50	2.10	0.44	0.00	0.00	12.24	25.51	25.51	12.24	12.24	12.24
10	396.24	81.29	0.01	17.53	0.58	0.23	0.24	0.13	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
11	793.40	21.61	0.55	47.28	1.15	26.11	0.85	2.04	0.17	0.24	12.24	25.51	25.51	12.24	12.24	12.24
12	47.58	96.64	0.00	2.16	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
13	2451.11	80.62	0.03	17.83	0.35	0.90	0.24	0.04	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00	0.00	20.00	20.00
14	462.94	16.64	1.33	51.27	0.03	29.00	0.14	0.50	0.24	0.87	12.24	25.51	25.51	12.24	12.24	12.24

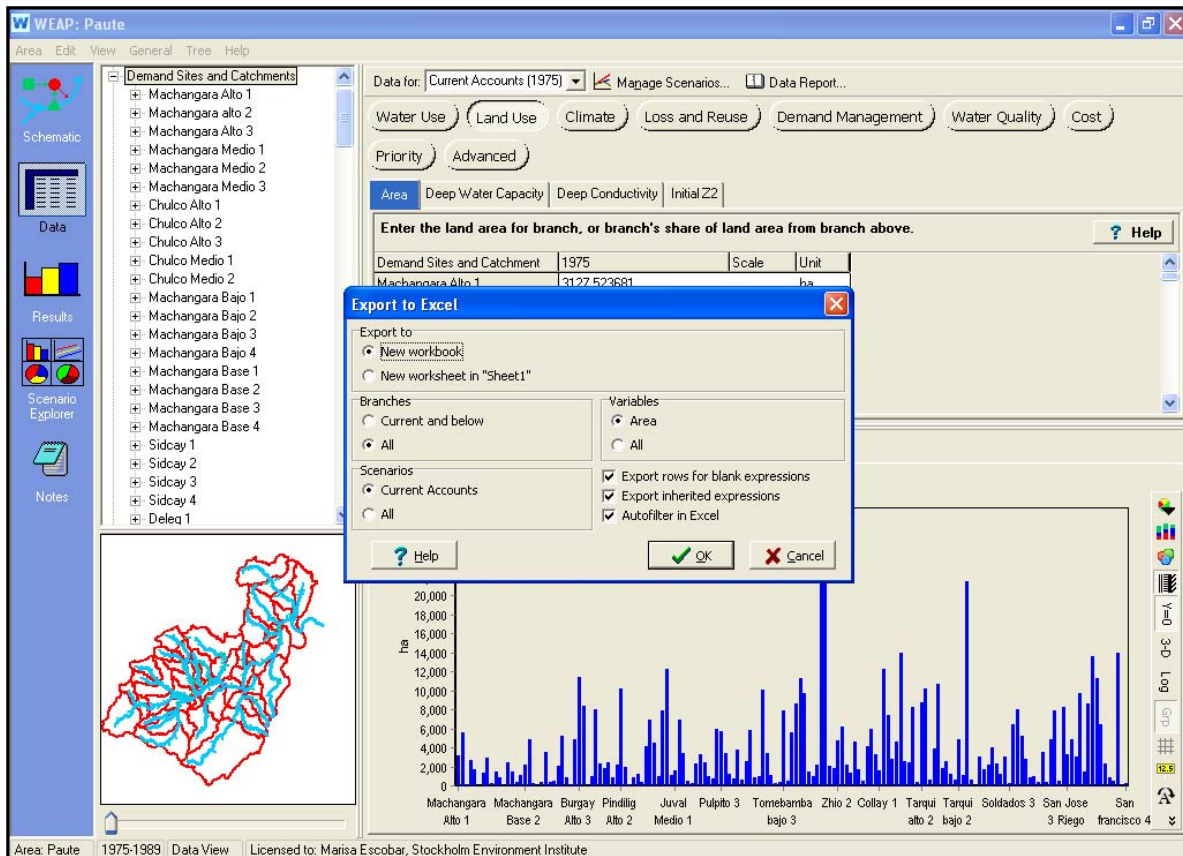
De esta manera, una vez los datos están en forma vertical en la hoja de Excel pueden ser entrados de forma rápida en WEAP utilizando la función *Edit/Export expressions to Excel* del menú general que se explica a continuación.

### **Edit/Export expressions to Excel del Menú General:**

Una vez se tiene creada la estructura de datos en WEAP y una vez se han procesado los datos en Excel para convertir de matriz a columna, se puede proceder a importar los datos de Excel a WEAP usando la función *Edit/Export expressions to Excel* del menú general. Desde el nivel más alto de *Demand Sites and Catchments* en WEAP se puede utilizar la función según se observa en la Figura 16.

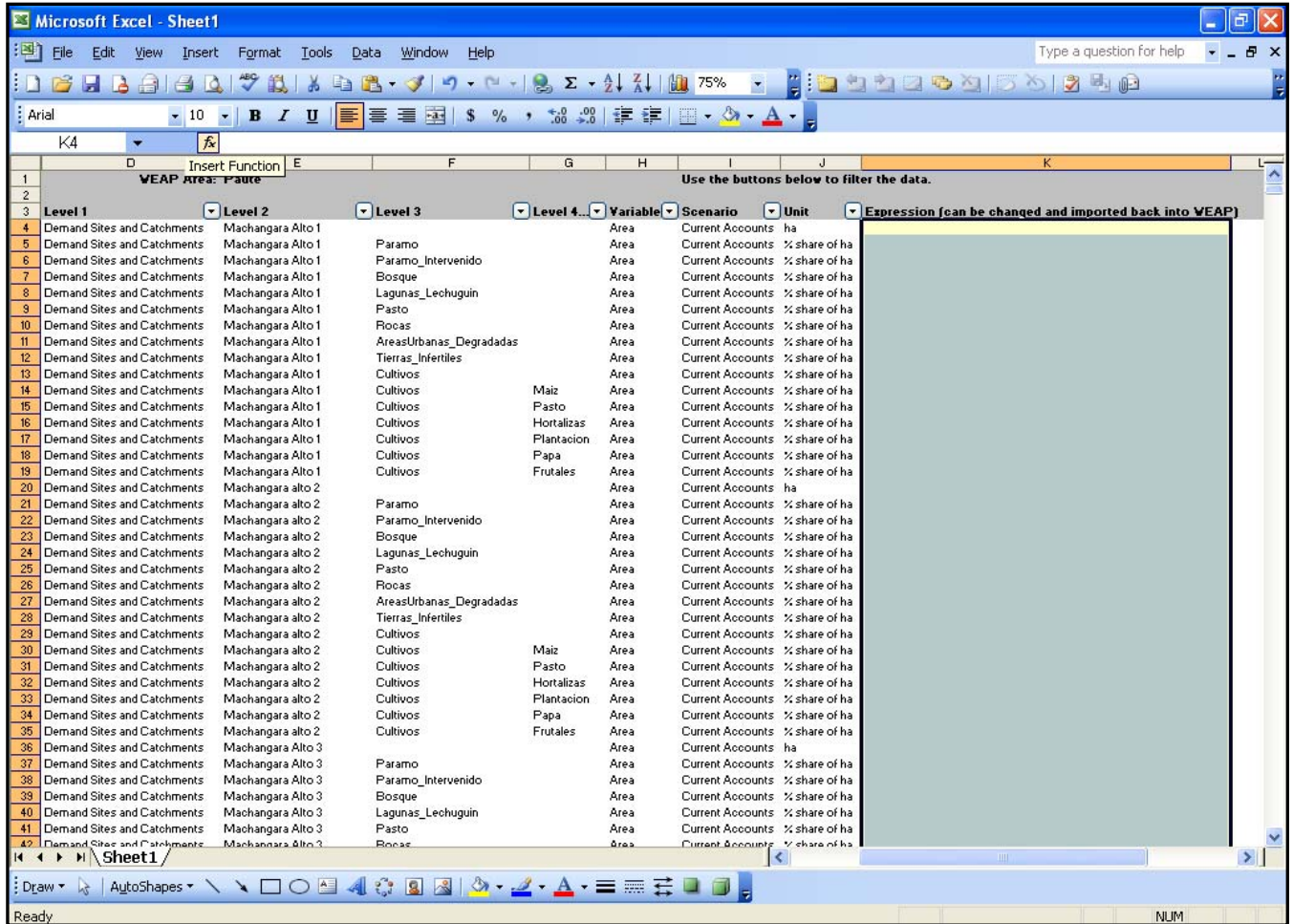
Figura 16. *Edit/Export expressions to Excel* del Menú General de WEAP

Los tres esquemas siguientes ilustran el procedimiento para exportar e importar expresiones hacia y desde Excel



La función exporta la estructura de datos a Excel, la cual en un principio debe estar sin datos como se muestra en la figura (ver columna K):

Figura 16. Continuación

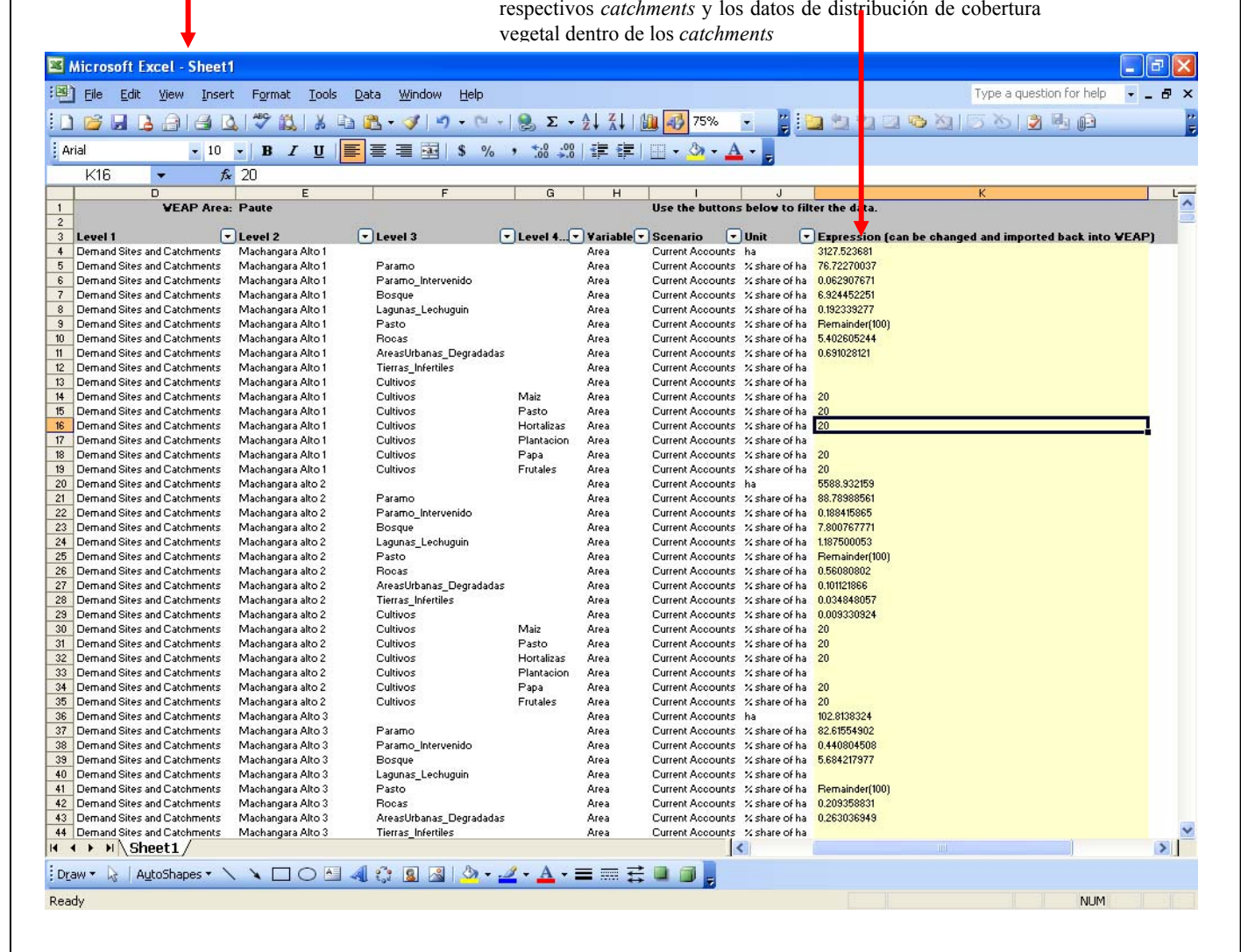


Sobre esta hoja de Excel creada por WEAP se pueden copiar y pegar los datos de la hoja de Excel según se nota en la siguiente figura.

Figura 16. Continuación

Hoja de Excel después de exportarla desde WEAP. Notar estructura de datos

Columna que viene originalmente vacía desde WEAP, y se llena copiando y pegando datos de hoja de Excel donde se procesan datos para ponerlos en estructura vertical. Una vez la columna esta llena, se puede volver a importar a WEAP donde quedan asignados los datos de área a los respectivos *catchments* y los datos de distribución de cobertura vegetal dentro de los *catchments*



Una vez se importan los datos a WEAP desde la función del menú principal *Edit/Import expressions from Excel*, la estructura de datos queda poblada y lista para ser usada dentro de WEAP.

## **Función CONCATENAR**

Como se indicó anteriormente, la función concatenar es útil en el uso de *key assumptions* para asociar los parámetros de uso de suelo y condiciones climáticas. Los parámetros de la función concatenar corresponden a la secuencia de texto que se quiere unir.

Concatenar (Texto1, Texto2, etc)
----------------------------------

Por ejemplo, en el caso de Kc, uno de los parámetros de uso de suelo, cada tipo de cobertura vegetal debe ser asociado a su respectivo *key assumptions*. Para esto, se puede crear una secuencia de texto inicial que puede después ser concatenada con la cobertura vegetal. En Figura 17 (7 figuras que se presentan a continuación) se observa la secuencia de pasos para utilizar la función concatenar en este caso:

1° Se exporta la estructura de datos desde el parámetro Kc. Notar la estructura de datos vacía al iniciar el procedimiento.

Figura 17. Uso de la Función Concatenar en Excel poblar el parámetro de suelo Kc

Los siguientes 7 esquemas representan el procedimiento para usar la función para crear *key assumptions* del parámetro de suelo Kc

The screenshot shows the WEAP software interface with the 'Kc' parameter configuration window open. The window title is 'WEAP: Paute'. The menu bar includes 'Area', 'Edit', 'View', 'General', 'Tree', and 'Help'. The 'Edit' menu is open, showing options like 'Undo', 'Cut', 'Copy', 'Paste', 'Automatic Calculation', and 'Export Expressions to Excel...'. The 'Export Expressions to Excel...' option is highlighted.

The 'Kc' configuration window has a 'Data for:' dropdown set to 'Current Accounts [1975]'. Below the dropdown are buttons for 'Land Use', 'Climate', 'Ponding', 'Loss and Reuse', 'Water Quality', 'Cost', and 'Advanced'. The 'Advanced' button is selected. The window displays various parameters for different areas, including 'Root Zone Conductivity', 'Deep Conductivity', 'Preferred Flow Direction', 'Initial Z1', 'Initial Z2', 'Area', 'Kc', 'Soil Water Capacity', 'Deep Water Capacity', and 'Runoff Resistance Factor'. The 'Kc' parameter is highlighted in blue.

The 'Kc' parameter is defined as: 'Crop coefficient, relative to the reference crop. For FAO method, Kc = 0 means this area is double cropped with another area. If merely fallow, set greater than 0. For monthly variation, use Monthly Time-Series Wizard. Default: 1'. A 'Help' button is visible next to the definition.

The 'Kc' parameter is set to 1 for the following areas: Machangara Alto 1, Paramo, Paramo\_Intervenido, Bosque, Lagunas\_Lechuguin, Pasto, Rocas, AreasUrbanas\_Degradadas, and Tierras\_Infertiles.

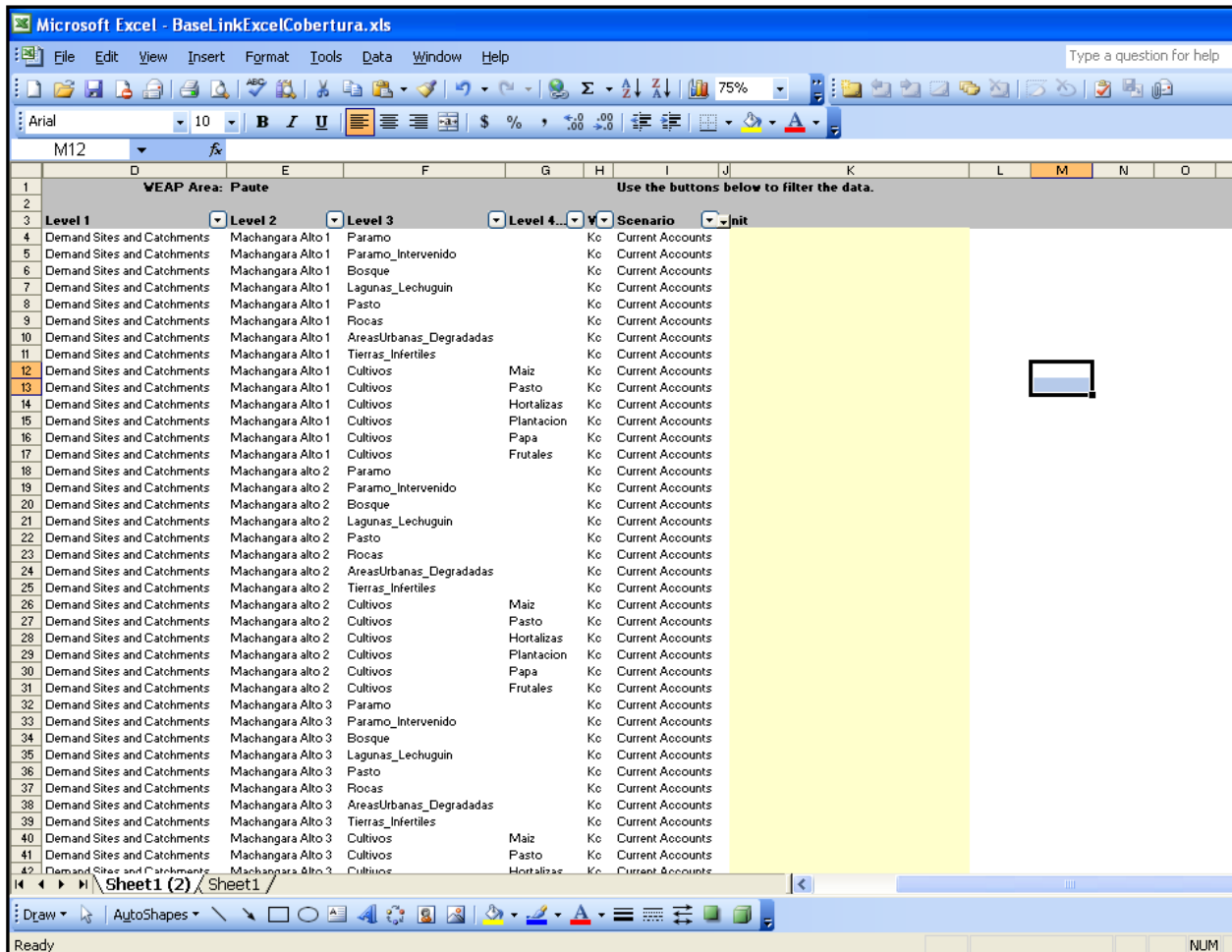
The 'Kc (monthly)' table shows the following values:

	Jan 1975	Feb 1975	Mar 1975	Apr 1975	May 1975	Jun 1975	Jul 1975	Aug 1975	Sep 1975
Paramo	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Paramo_Intervenido	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Bosque	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Lagunas_Lechuguin	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Pasto	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Rocas	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
AreasUrbanas_Degradadas	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tierras_Infertiles	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

The status bar at the bottom shows 'Area: Paute', '1975-1989', 'Data View', and 'Licensed to: Marisa Escobar, Stockholm Environment Institute'.

2° Se obtiene la estructura de datos vacía en Excel

Figura 17. Continuación



3° Como paso intermedio se crea una secuencia inicial para llamar las *key assumptions*, en este caso se hace en la columna L, la cual no es importada a WEAP.

Figura 17. Continuación

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data table:

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4...	Scenario	Unit	
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Bosque		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Pasto		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Rocas		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts	KeyKc1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts	KeyKc1Cultivos1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts	KeyKc1Cultivos1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts	KeyKc1Cultivos1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Plantacion	Kc	Current Accounts	KeyKc1Cultivos1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Papa	Kc	Current Accounts	KeyKc1Cultivos1
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Frutales	Kc	Current Accounts	KeyKc1Cultivos1
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo		Kc	Current Accounts	
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts	



4° Se replica esta secuencia inicial para todos los *catchments*

Figura 17. Continuación

WEAP Area: Paute		Use the buttons below to filter the data.				
Level 1	Level 2	Level 3	Level 4...	Scenario	Unit	
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Bosque		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Pasto		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Rocas		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Plantacion	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Papa	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Frutales	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Bosque		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Pasto		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Rocas		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts	KeytKot
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Plantacion	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Papa	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Frutales	Kc	Current Accounts	KeytKotCultivos
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Paramo		Kc	Current Accounts	KeytKot

5° Se utiliza la secuencia que se acaba de crear y se concatena con el tipo de cultivo, de forma que se crea la secuencia de texto correspondiente al *key assumption* que se creó dentro de WEAP.

Figura 17. Continuación

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data structure:

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Val	Scenario	Unit	Expression (can be changed and imported back into WEAP)
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo		Kc	Current Accounts		KeyKotParamo
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts		KeyKotParamo_Intervenido
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Bosque		Kc	Current Accounts		KeyKotBosque
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts		KeyKotLagunas_Lechuguin
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Pasto		Kc	Current Accounts		KeyKotPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Rooas		Kc	Current Accounts		KeyKotRooas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts		KeyKotAreasUrbanas_Degradadas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts		KeyKotTierras_Infertiles
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosMaiz
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosHortalizas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Plantacion	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosPlantacion
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Papa	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosPapa
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Frutales	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosFrutales
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo		Kc	Current Accounts		KeyKotParamo
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts		KeyKotParamo_Intervenido
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Bosque		Kc	Current Accounts		KeyKotBosque
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts		KeyKotLagunas_Lechuguin
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Pasto		Kc	Current Accounts		KeyKotPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Rooas		Kc	Current Accounts		KeyKotRooas
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts		KeyKotAreasUrbanas_Degradadas
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts		KeyKotTierras_Infertiles
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosMaiz
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosHortalizas
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Plantacion	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosPlantacion
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Papa	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosPapa
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Frutales	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosFrutales
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Paramo		Kc	Current Accounts		KeyKotParamo
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts		KeyKotParamo_Intervenido
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Bosque		Kc	Current Accounts		KeyKotBosque
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts		KeyKotLagunas_Lechuguin
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Pasto		Kc	Current Accounts		KeyKotPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Rooas		Kc	Current Accounts		KeyKotRooas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts		KeyKotAreasUrbanas_Degradadas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts		KeyKotTierras_Infertiles
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosMaiz
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts		KeyKotCultivosHortalizas

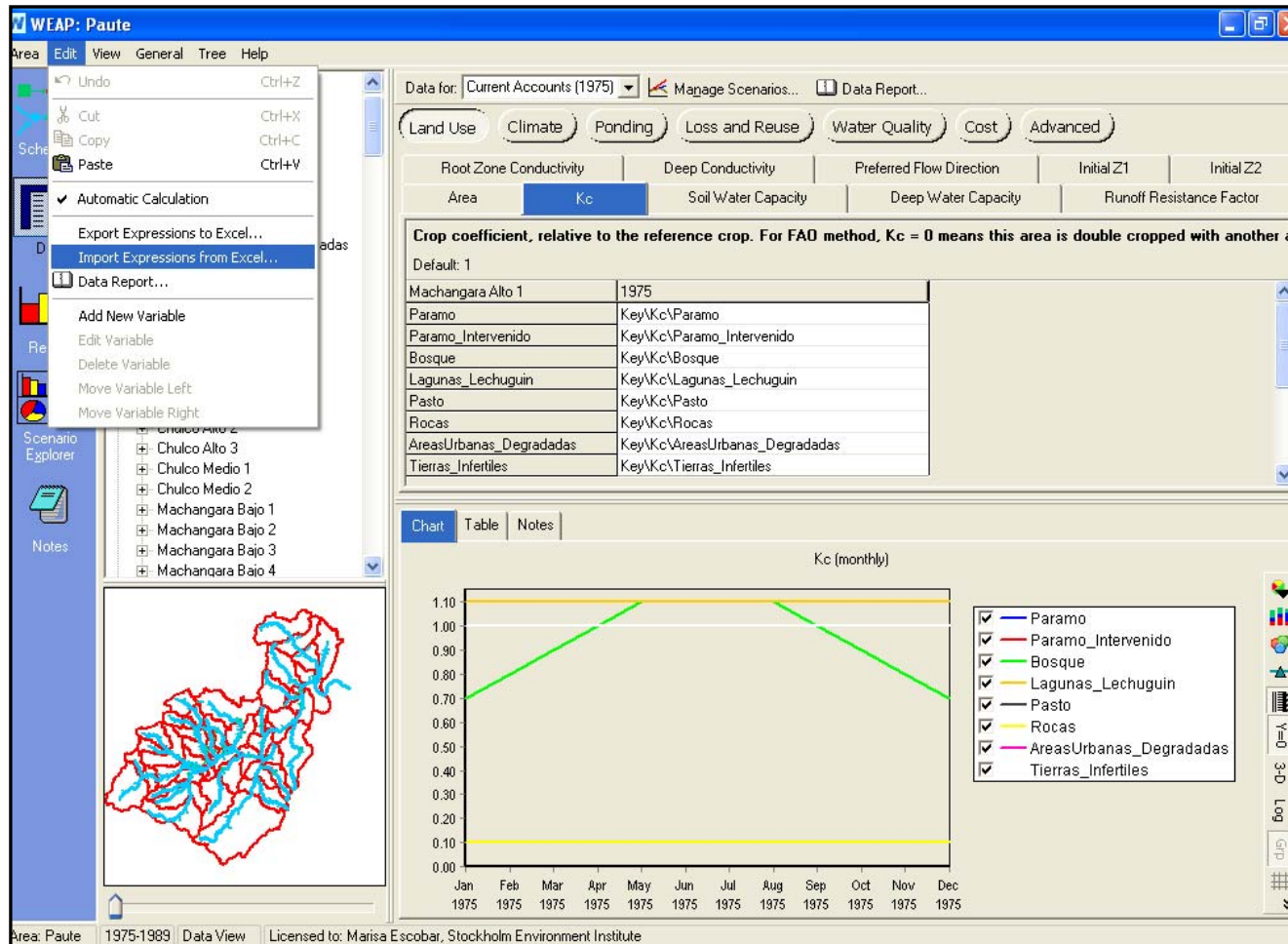
6° Una vez la función ha sido creada en la primera celda, esta puede ser copiada a todos los *catchments*. Una vez se ha copiado a todos los *catchments*, la hoja de Excel se puede importar de nuevo a WEAP de forma que se puebla la estructura de datos.

Figura 17. Continuación

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4...	Val	Scenario	Unit	Expression (can be changed and imported back into WEAP)
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo		Kc	Current Accounts		KeyKcParamo
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts		KeyKcParamo_Intervenido
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Bosque		Kc	Current Accounts		KeyKcBosque
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts		KeyKcLagunas_Lechuguin
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Pasto		Kc	Current Accounts		KeyKcPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Rocas		Kc	Current Accounts		KeyKcRocas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts		KeyKcAreasUrbanas_Degradadas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts		KeyKcTierras_Infertiles
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosMaiz
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosHortalizas
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Plantacion	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosPlantacion
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Papa	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosPapa
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 1	Cultivos	Frutales	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosFrutales
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo		Kc	Current Accounts		KeyKcParamo
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Paramo_Intervenido		Kc	Current Accounts		KeyKcParamo_Intervenido
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Bosque		Kc	Current Accounts		KeyKcBosque
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Lagunas_Lechuguin		Kc	Current Accounts		KeyKcLagunas_Lechuguin
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Pasto		Kc	Current Accounts		KeyKcPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Rocas		Kc	Current Accounts		KeyKcRocas
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	AreasUrbanas_Degradadas		Kc	Current Accounts		KeyKcAreasUrbanas_Degradadas
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Tierras_Infertiles		Kc	Current Accounts		KeyKcTierras_Infertiles
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Maiz	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosMaiz
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Pasto	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosPasto
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Hortalizas	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosHortalizas
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Plantacion	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosPlantacion
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Papa	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosPapa
Demand Sites and Catchments	Machangara alto 2	Cultivos	Frutales	Kc	Current Accounts		KeyKcCultivosFrutales
Demand Sites and Catchments	Machangara Alto 3	Paramo		Kc	Current Accounts		KeyKcParamo

7° Una vez se ha copiado a todos los *catchments*, la hoja de Excel se puede importar de nuevo a WEAP, de forma que el parámetro Kc queda poblado con texto que lo asocia con key assumptions. .

Figura 17. Continuación



De forma similar, esta función puede ser usada para poblar otros aspectos del modelo, incluyendo otros parámetros de uso de suelo o ecuaciones para representar la precipitación, tal y como se muestra en la Figura 18:

Figura 18. Uso de Función Concatenar para poblar el parámetro Precipitación

The screenshot shows the WEAP: Paute software interface. The left sidebar contains navigation icons for Schematic, Data, Results, Scenario Explorer, and Notes. The main window is titled 'WEAP: Paute' and has a menu bar (Area, Edit, View, General, Tree, Help). The 'Data for:' dropdown is set to 'Current Accounts (1975)'. Below this are several category buttons: Water Use, Land Use, Climate, Loss and Reuse, Demand Management, Water Quality, and Cost. Under 'Climate', 'Priority' and 'Advanced' are also visible. A grid of parameter categories is shown, with 'Precipitation' selected. The 'Monthly total' table is displayed below, showing data for 1975. The table has columns for Demand Sites and Catchment, a formula, Scale, and Unit.

Demand Sites and Catchment	1975	Scale	Unit
Machangara Alto 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Machangara alto 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Machangara Alto 3	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Machangara Medio 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Machangara Medio 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Machangara Medio 3	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Chulco Alto 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Chulco Alto 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Chulco Alto 3	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Chulco Medio 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Chulco Medio 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Chulco Medio 3	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Machangara Bajo 1	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month
Machangara Bajo 2	ReadFromFile(datos\precipitaciones_paute.csv,6)*Key\IndexPrecCuencas\...		mm /month

## **6 Calibración**

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

Es importante anotar que desde el punto de vista de programación, WEAP no corre el modelo sino hasta que todos los datos necesarios están debidamente entrados en el modelo. Por ejemplo, si en un elemento específico falta un parámetro (i.e. nivel de actividad anual en sitios de demanda, o capacidad de agua del suelo en *catchments*), WEAP suspende la corrida del modelo y emite un aviso de error indicando cual es el parámetro faltante. Desde el punto de vista metodológico y práctico, es necesario realizar un chequeo visual de comparación entre datos simulados y datos observados para identificar otro tipo de errores que tengan que ver con la selección los valores de parámetros. Por ejemplo, los caudales simulados se pueden comparar a caudales observados en el río en un sitio de medición específica. De esta manera se puede observar la correspondencia entre ambos, y determinar que ajustes serán necesarios para una mejor calibración según se explica en las secciones 6.1 y 6.2.

### **6.1 Aspectos Metodológicos de la Calibración del Modelo**

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

#### **6.1.1 Calibración de cuencas aportantes o en zonas de régimen natural**

Una primera etapa consiste en una calibración hidrológica de las subcuencas aportantes. Se espera que la influencia humana en estas subcuencas sea baja y por lo tanto los caudales no son afectados por el uso o manejo del recurso. De suma importancia en esta etapa del proceso de

calibración es el análisis de las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca en estudio. En el caso de la cuenca del Río Paute por ejemplo resultaba relevante el análisis de las condiciones de ecosistemas de alta montaña (ej. paramos). Igualmente importante es la revisión de la literatura existente. En la Figura 19 se presenta un ejemplo de estaciones localizadas en cuencas aportantes en la cuenca del Río Paute donde existen observaciones de caudales.

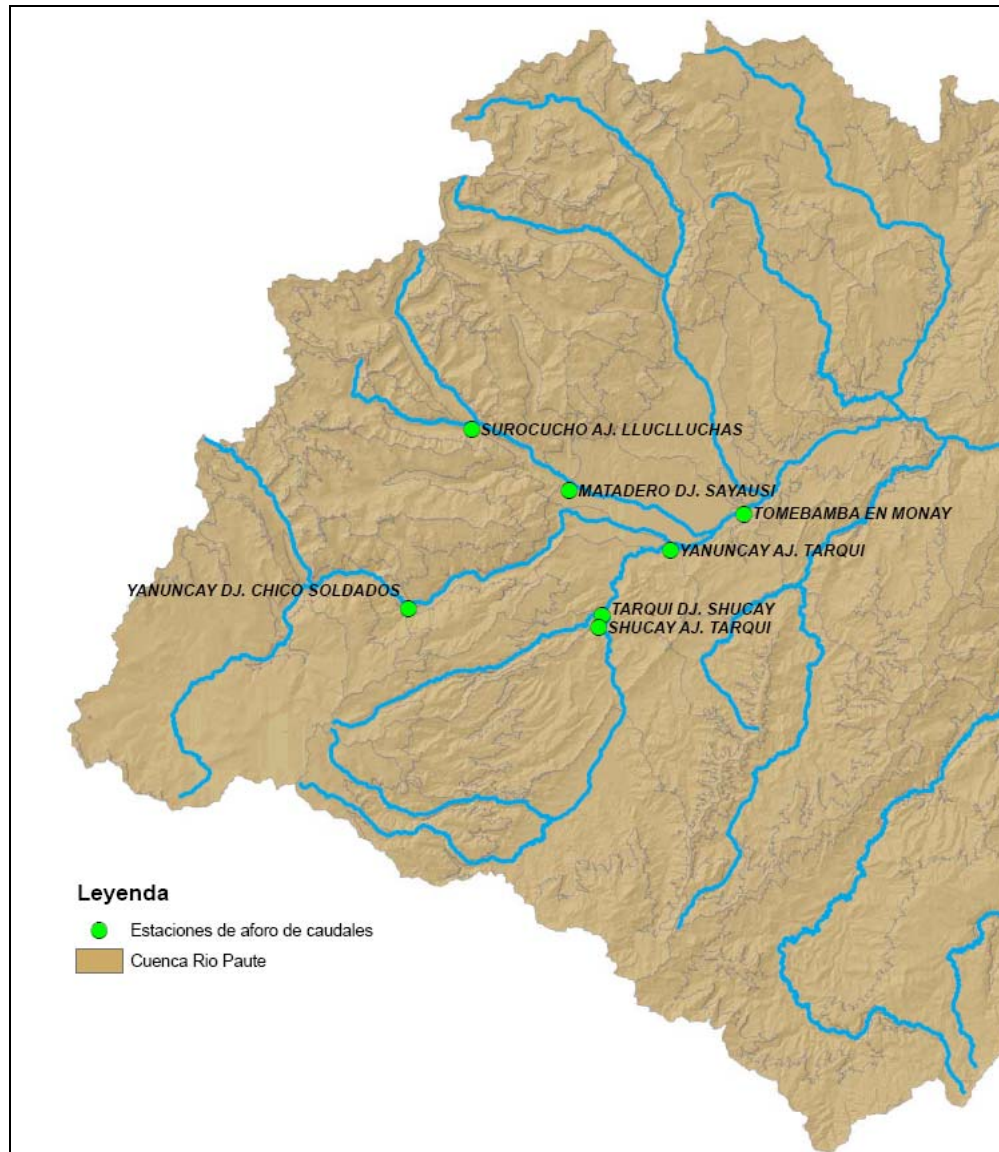


Figura 19. Estaciones de Aforo para Calibración - Zona Alta cuenca del Río Paute

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

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

Observando la ecuación del balance de masa del modelo hidrológico ilustrado en la Figura 4, para el balde superior y en el balde inferior del modulo hidrológico se observa como cada término de la ecuación que corresponde a un elemento del balance hidrológico es afectado de forma diferente por los parámetros indicados:

Balde superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$$

Donde:

1er término: Cambio en humedad del suelo

2do factor: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves)

3er término: Evapotranspiración

4to factor: Escorrentía superficial

5to término: Flujo intermedio

6to factor: Percolación



Balde inferior:

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

Donde:

1er término: Flujo base

2do término: Percolación

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

De esta forma, dependiendo del elemento del caudal que se requiera mejorar, se debe ajustar el o los parámetros correspondientes. Una vez se han ajustado los factores de calibración necesarios, se realiza la comparación de los caudales modelados con los registros históricos de estaciones de aforo de caudales de la zona. Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se pueden utilizar dos índices/métricas utilizadas normalmente en la calibración de modelos hidrológicos: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (o Bias o desviación relativa de los caudales) (Weglarczyk 1988).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, \text{ y}$$

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o]$$

Donde  $Q_{s,i}$  y  $Q_{o,i}$  corresponden a caudales simulados y observados para cada paso tiempo  $i$ , y  $n$  corresponde al número total de pasos de tiempo.

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

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

- Nash-Sutcliffe: entre más cerca de 1 mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados.
- Bias: entre menor el porcentaje de *Bias*, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un *Bias* positivo indica sobre estimación y un *Bias* negativo indica sub-estimación de caudales.

Una vez concluida la calibración de esta sección de subcuencas aportantes se procede a “cerrar” estas subcuencas reemplazando la modelación hidrológica por el caudal observado la estación de estas subcuencas. Para aquellos meses con datos faltantes se utiliza el valor del caudal simulado. Al hacer este reemplazo o cierre de las subcuencas se evita arrastrar errores o desviaciones del proceso de calibración que desvirtúen el proceso de calibración de las subcuencas que se encuentran aguas abajo. Se procede entonces a continuación el proceso de calibración de las subcuencas intermedias.

### **6.1.2 Calibración de cuencas intermedias**

La metodología de calibración considerada tanto en la zona media y baja de la cuenca corresponde a una calibración subcuenca por subcuenca, similar al procedimiento de calibración de cuencas aportantes. En la Figura 20 se presenta un ejemplo de estaciones localizadas en cuencas intermedias donde existen datos observados en la cuenca del Río Paute. Al igual que en la zona alta, se obtiene la distribución mensual calibrada para todas las estaciones, así como también la relación entre los caudales modelados y observados utilizando las estadísticas para cada una de las estaciones consideradas y para todo el periodo de modelación. Una vez finalizada la calibración de la cuenca intermedia se procede a “cerrar” el modelo en las estaciones intermedias pretendiendo así, no arrastrar las desviaciones aceptadas en la sección media hacia la calibración de la parte baja proceso que se inicio a continuación.

En el proceso de calibración de las cuencas intermedias y bajas se deben considerar la demanda de agua de los diferentes usuarios en estas secciones de la cuenca. Por ejemplo si se tiene información con respecto a la descarga de agua de fuentes superficiales para ciudades y

para riego se debe comparar con los valores simulados por el modelo. Si estos no son comparables se deben ajustar los parámetros que condicionan estas acciones. En el caso de la demanda de riego hay que modificar los umbrales de riego (*upper* y *lower thresholds*) que determinan las necesidades de riego en un *catchment* y cultivo determinado. En el caso de la demanda de ciudades se deben contemplar los parámetros que corresponden a las tasas de demanda per capita y factores de pérdidas y reutilización del agua al interior de las ciudades.



Figura 20. Estaciones de aforo para calibración - Zona Media Cuenca del Río Paute

### 6.1.3 Calibración de operación recursos hídricos

Una vez completada la etapa de calibración hidrológica se procede a calibrar la operación de los embalses y otras obras de infraestructura que se encuentren en la cuenca. En algunos casos los embalses se encuentran ubicados en la zona de cierre de las cuencas lo que permite que se realice la calibración hidrológica y operacional de manera independiente. Si es que la ubicación

de un embalse u obra de infraestructura relevante se encontrara en un punto superior al punto de cierre de la cuenca se debe realizar la calibración operacional de manera asociada a la calibración hidrológica. En estos casos, una forma de aproximar la calibración es aplicando los parámetros encontrados en las cuencas altas a toda la cuenca, y realizar la calibración del embalse asumiendo que la hidrología de cuencas medias y bajas esta bien representada con el uso de los parámetros encontrados.

Para el caso de la calibración de la operación de embalses se debe tener en cuenta, si es que fuera un elemento importante, la producción hidroeléctrica. En la calibración de la operación de los embalses 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 asociada al mantenimiento de niveles de agua embalsados para operar 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.

La representación de embalses en WEAP esta dividida en cuatro zonas (Figura 21). Estas incluyen desde arriba hasta abajo, la zona de control de inundación, la zona de conservación, la zona de amortiguamiento y la zona inactiva. Las zonas de conservación y amortiguamiento constituyen el agua disponible para manejo. WEAP se asegura de que siempre la zona de control de inundación siempre esta vacante y permite la liberación de agua de la zona de conservación para cumplir con requerimientos aguas abajo, ya sea para generación hidroeléctrica o demandas. Una vez el nivel de almacenamiento baja hasta la zona de amortiguamiento, la liberación de agua esta controlada de acuerdo con el coeficiente de amortiguamiento. El agua de la zona inactiva no esta disponible. De esta manera, 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.

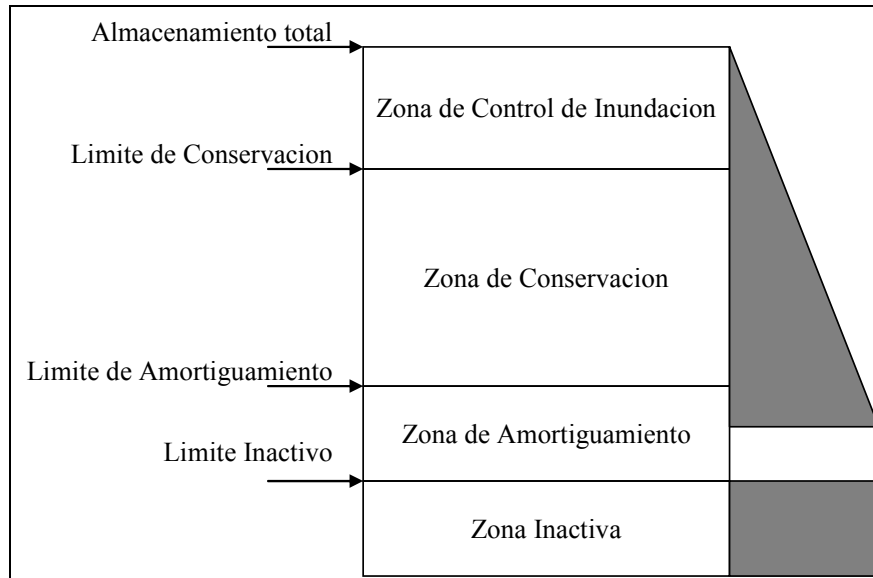


Figura 21. Zonas de modelación de embalses en WEAP

La calibración de la operación del embalse se realiza para el periodo en que se cuenta con los niveles de agua embalsada, generación hidroeléctrica y entrada y salida de agua hacia y desde el embalse. Se consideran dos variables principales en el proceso de calibración: el volumen almacenado y el total de energía generada.

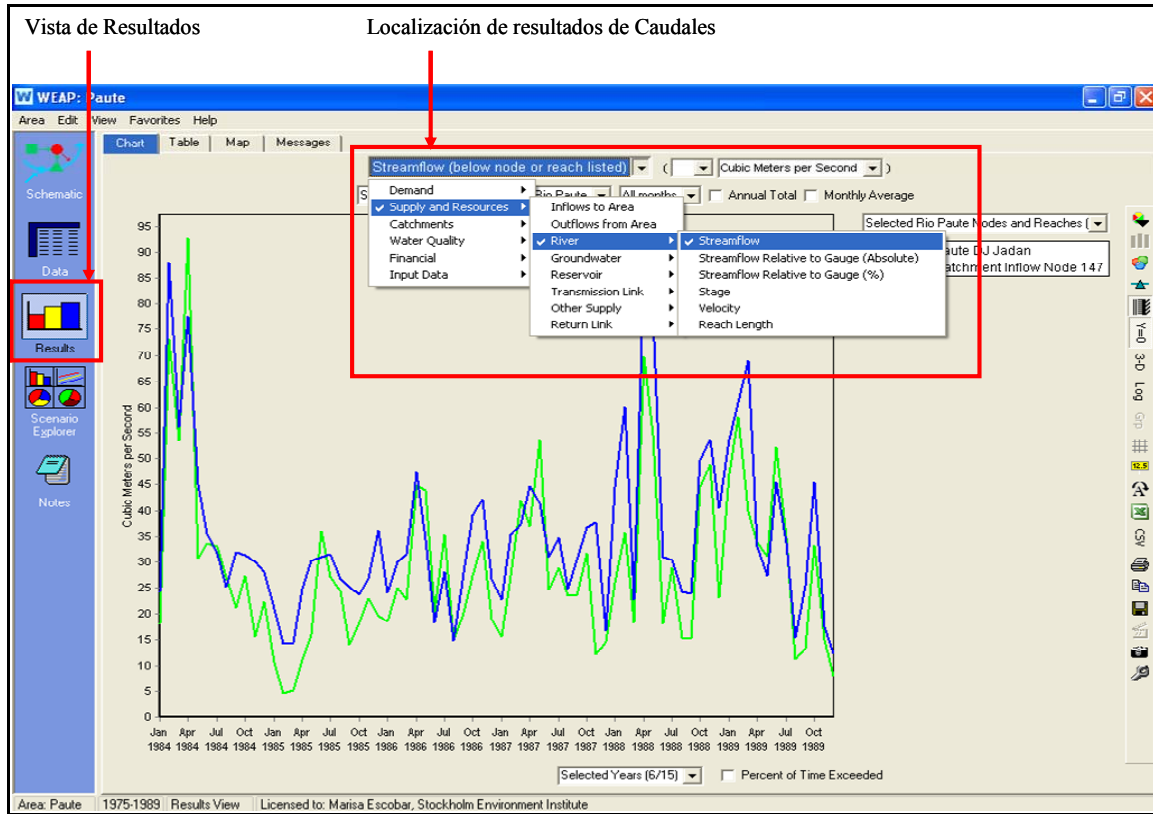
## 6.2 Aspectos Prácticos de la Calibración del Modelo

Hay dos aspectos prácticos esenciales para tomar en cuenta en el proceso de calibración. El primero está relacionado con el uso de los *key assumptions* y la creación de escenarios de calibración. El segundo con respecto al uso de planillas Excel para hacer el seguimiento durante el proceso de calibración en las etapas mencionadas anteriormente. A continuación se explican cada uno de estos aspectos.

Antes de esto, es importante revisar como se obtienen los resultados en WEAP. Todos los resultados producidos por el modelo se encuentran en la vista de Resultados. Específicamente, aquellos resultados que tienen que ver con la calibración incluyen los datos de caudales simulados y observados. Los caudales simulados y todos los caudales observados que han sido entrados como puntos de medición (i.e. *gauges*) en el río se obtienen en la vista de *Supply and Resources/River/Streamflow* como se indica en la Figura 22 (set de 3 figuras siguientes).

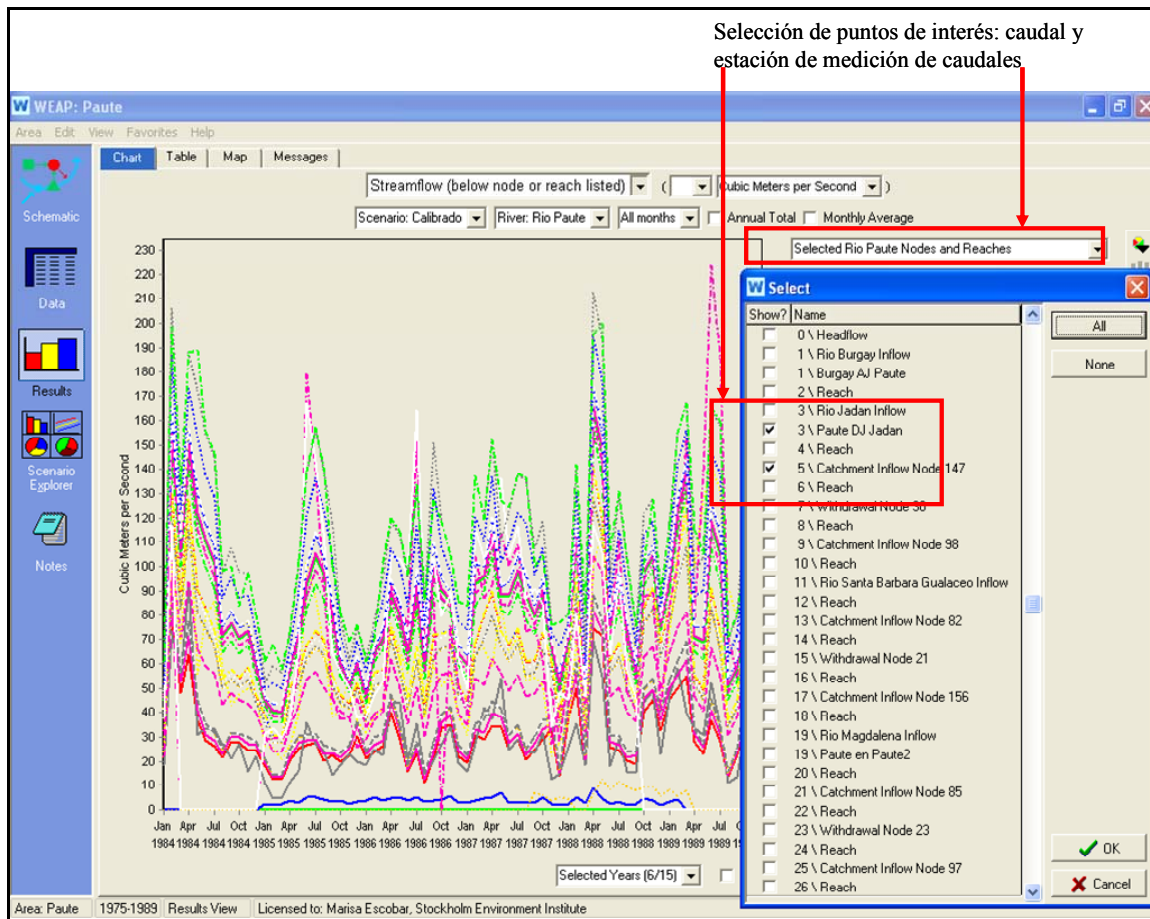
Figura 22. Obtención de Resultados de Caudales

Los siguientes 3 esquemas representan el procedimiento para obtener resultados de caudales en WEAP



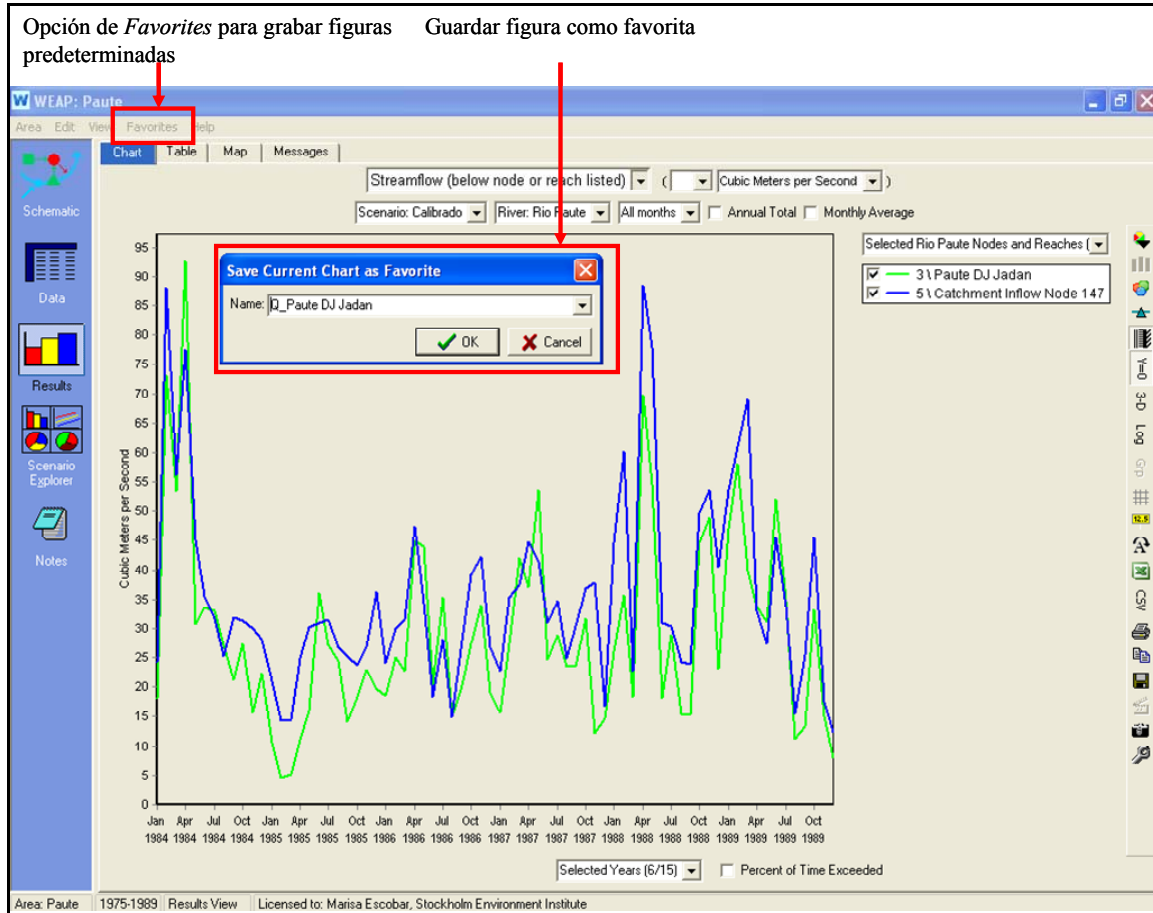
Dentro de cada río, se pueden mirar los datos de todos los nodos en el río. Además, se pueden seleccionar los nodos de interés como aquellas secciones del río que coinciden con los puntos de medición para poder realizar comparaciones entre caudales observados y simulados durante la calibración.

Figura 22. Continuación



La figura resultante se puede grabar como figura favorita.

Figura 22. Continuación



### 6.2.1 Uso de *key assumptions*

Según se indicó en los aspectos metodológicos, los parámetros pueden controlarse usando *key assumptions*, de forma que al modificar los valores en *key assumptions*, implícitamente se afectan los valores de los parámetros correspondiente en cada *catchment*. Así, al aumentar o disminuir el valor de un parámetro específico, este va a ser cambiado también en los *catchments* que tengan ese *key assumptions* asociado. En la Figura 23 se observan los valores del parámetro  $K_s$ .

Otra manera de usar las *key assumptions* durante la calibración es creando un nuevo escenario en el cual se asignan nuevos valores a los parámetros de forma que al correr el modelo se pueda observar la diferencia entre los resultados ambos valor de parámetros. En la Figura 24 se presenta un nuevo escenario con diferentes valores del parámetro  $K_s$ .



Figura 23. Uso de *key assumptions* durante calibración del modelo

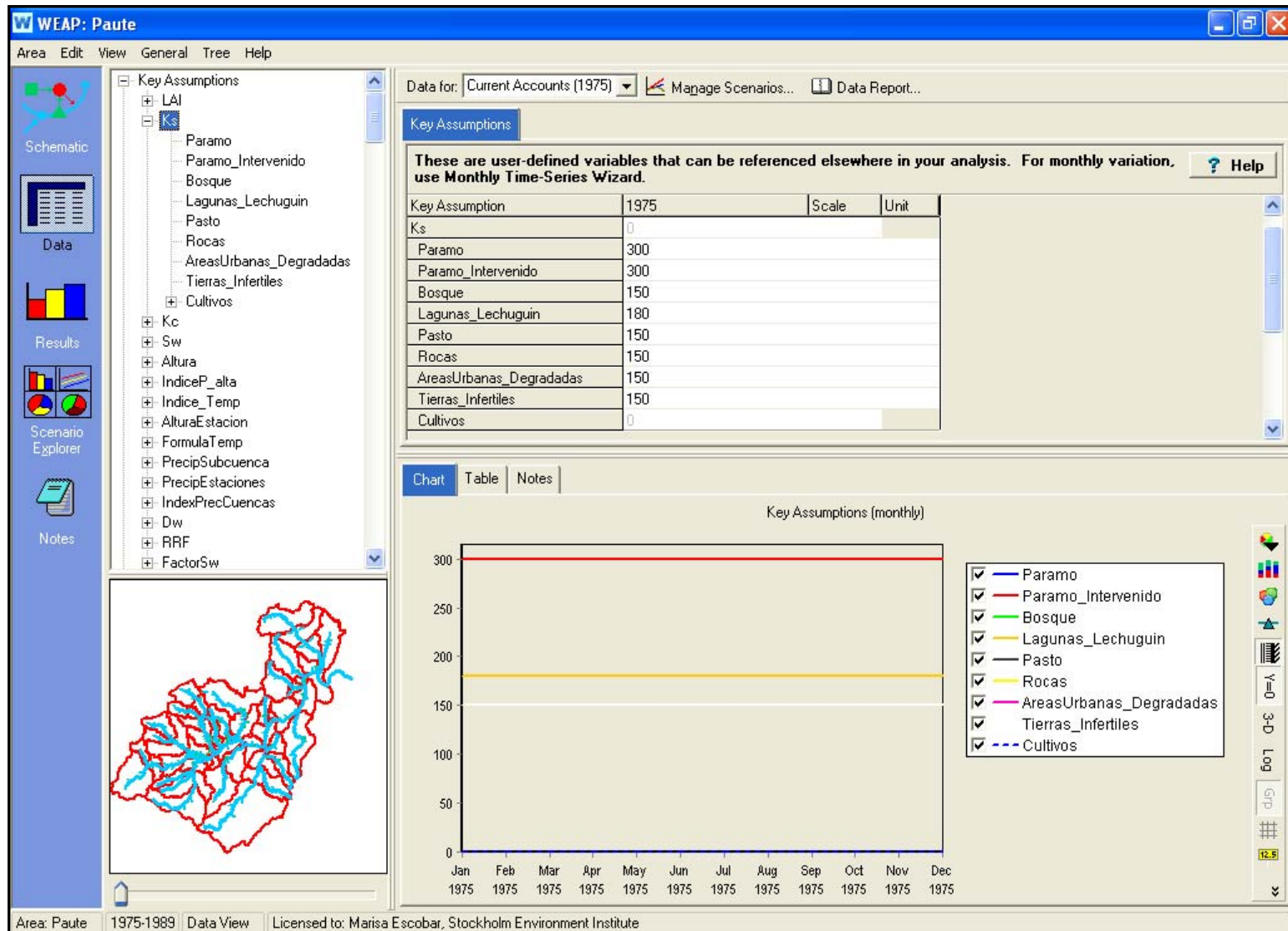
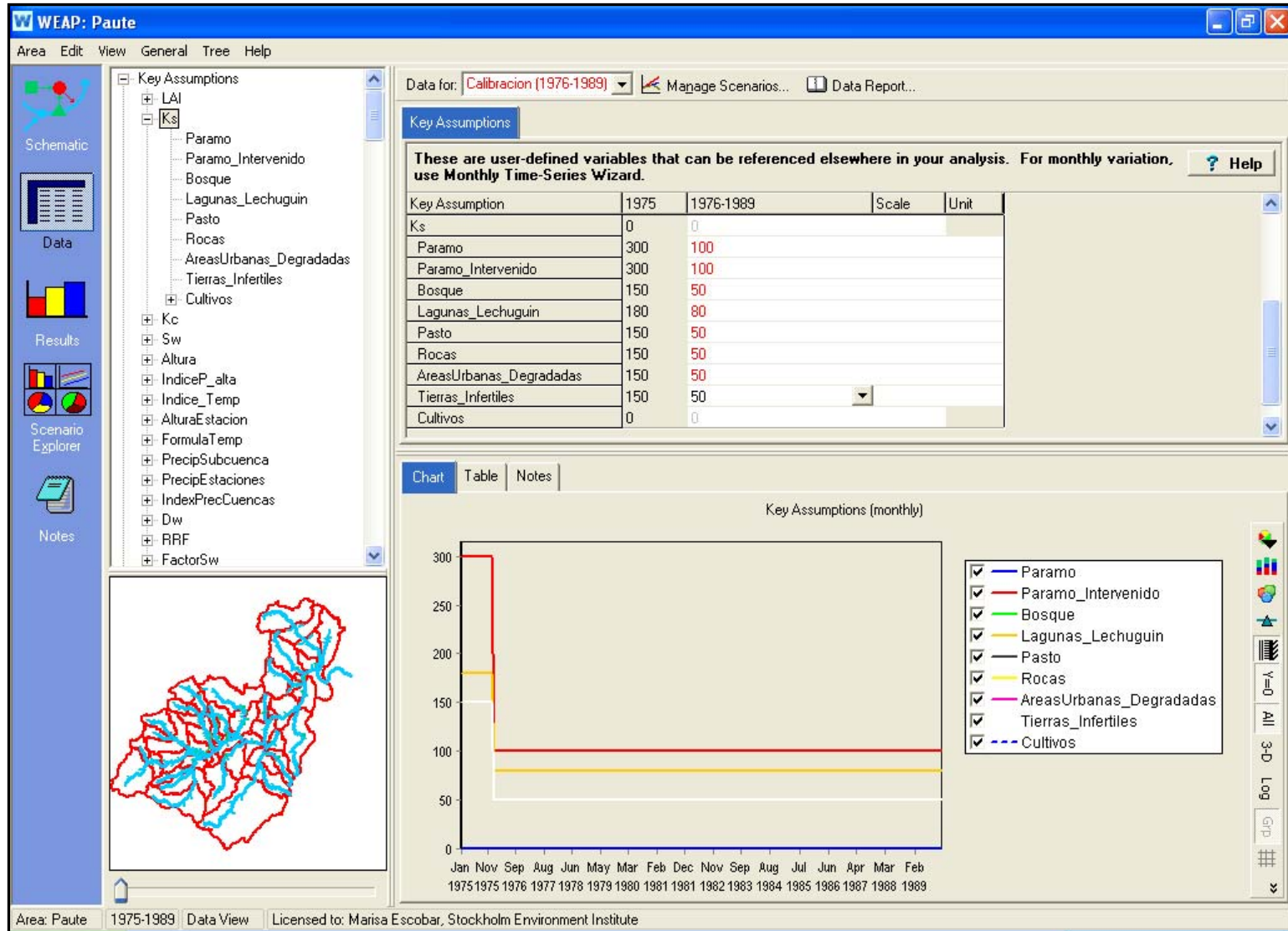


Figura 24. Uso de escenarios durante la calibración del modelo



## 6.2.2 Uso de hoja de Excel para estimar estadísticas

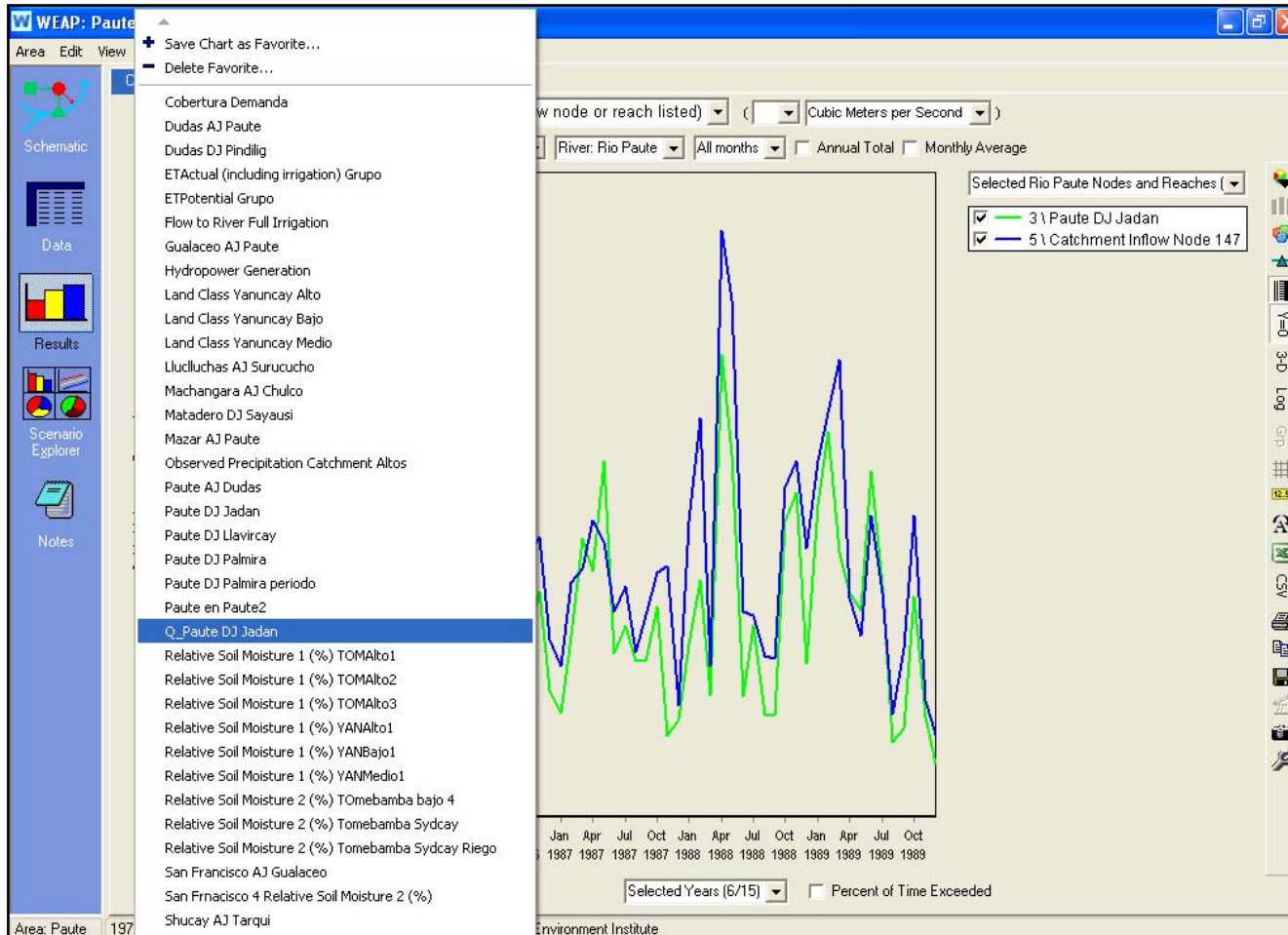
En este caso, una hoja de Excel prediseñada permite estimar las estadísticas en todas las subcuencas en que se tienen datos de caudales observados. Para esto, se pueden seguir los siguientes pasos:

1°. Creación de graficas favoritas: Para crear una grafica favorita se selecciona un río sobre el cual existe un medidor de caudal y se visualiza el caudal del medidor de caudal y de la sección del río inmediatamente superior a la localización del sitio de medición como se indico al inicio de este capitulo. La creación de gráficos favoritos también se encuentra explicada en forma detallada en el Tutorial de WEAP en español, iniciando en la pagina 69.

2°. Exportar datos de WEAP: Para exportar datos de WEAP se han preparado graficas favoritas, las cuales incluyen el los caudales simulados y los caudales observados como se observa en la Figura 25 (set de 3 figuras siguientes). Note que en la figura la línea azul representa el caudal simulado y la línea verde indica el caudal observado.

Figura 25. Uso de gráficos favoritos para estimar estadísticas Nash y BIAS en Excel

Los siguientes 3 esquemas representan el procedimiento usar graficas favoritas y usar Excel para calcular las estadísticas



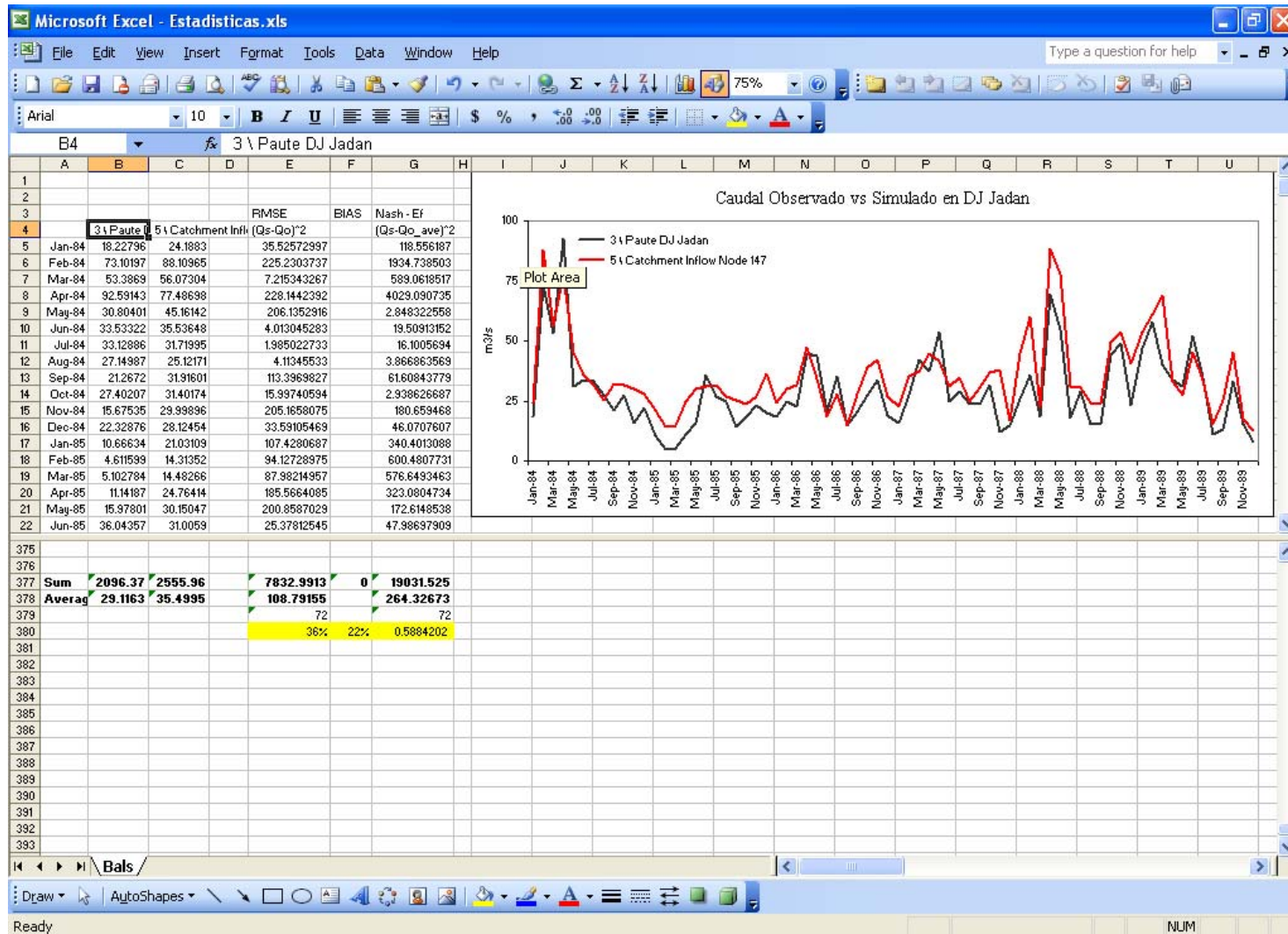
Los datos de la grafica favorita se pueden exportar simplemente haciendo click en el icono de Excel.

Figura 25. Continuación

	Jan-84	Feb-84	Mar-84	Apr-84	May-84	Jun-84	Jul-84	Aug-84	Sep-84	
3 \ Paute DJ Jadan	18.22795699	73.10197044	53.38690441	92.59142699	30.80400538	33.53322222	33.12885945	27.14987374	21.2672037	27.4
5 \ Catchment Inflow Node 147	24.18830345	88.1096476	56.07304351	77.48698264	45.16141781	35.53648089	31.7199511	25.12170823	31.91600564	31.4

Estos datos pueden ser entonces copiados y pegados en una hoja de Excel preparada para estimar las estadísticas. Las formulas de las estadísticas se programan de forma que se ignora el paso de tiempo si no existen datos observados. Esto se logra usando el condicional “si”, el cual es escrito para que no calcule la estadística para el punto en que no hay datos como se muestra en la figura:

Figura 25. Continuación



En el ejemplo presentado se están calculando el Bias y el Nash. Para el estimado de Bias se calculan los promedios de caudales observados (columna B) y simulados (Columna C), y el valor del Bias se estima en la celda F344 (la celda central en amarillo) aplicando la formula  $(C342-B342)/B342$ .

Para estimar el Nash se diseñan dos columnas, una que estima el numerador (columna E) con la ecuación  $\text{IF}(B5=0, "", (C5-B5)^2)$  y otra que estima el denominador (Columna G) con la ecuación  $\text{IF}(B5=0, "", (B5-B342)^2)$ . Al final de cada columna se realiza la suma de cada columna, para finalmente aplicar la formula para estimar el índice de Nash la cual en este caso es  $1-(E341/G341)$ .

Es buena práctica también crear una grafica para poder observar los datos, como se observa en la figura anterior.

## **7 Uso del modelo, Creación de Escenarios**

Una vez que se cuenta 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. Los escenarios futuros pueden ser de diferentes tipos:

- Escenarios de crecimiento o cambio en la población
- Escenarios de uso de suelo
- Escenarios de clima

En el tutorial de WEAP se presentan ejemplos e indicaciones de cómo crear estos escenarios. En general, los escenarios de crecimiento o cambio de población pueden diseñarse considerando las tasas de crecimiento de población proyectadas hacia futuro así como el cambio en la proporción de población rural y urbana, o el aumento de población dada por un evento específico dentro del modelo como la construcción de una represa.

Los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en tipos de cultivos por tendencias económicas. Todas estas consideraciones deben estudiarse de forma que al implementar el escenario se sepa con claridad que variables y funciones se van a tener en cuenta al definir el escenario.

Los escenarios de clima constituyen uno de los aspectos de mayor uso en un modelo agregado como WEAP. Existen diferentes maneras de implementar proyecciones climáticas dentro de un modelo, incluyendo:

- Incorporación de deltas de temperatura y/o precipitación con base en proyecciones de modelos climáticos: en este caso, se ha realizado un estudio preliminar para determinar el valor de los deltas a aplicar. Este estudio puede realizarse a partir de la literatura disponible sobre posibles cambios climáticos en la región, o a partir de un procedimiento de análisis de los datos disponibles en bases de datos. Al final de este análisis, se utilizan los deltas para afectar los valores climáticos y se corre el modelo para observar los efectos en la hidrología.
- Uso de datos escalados a la región: si se tiene capacidad técnica, se pueden utilizar los modelos de circulación global para realizar un cambio de escala de forma que se obtengan datos de clima futuro a la escala de la cuenca y con resolución suficiente de forma que se pueda obtener datos climáticos de entrada de precipitación y temperatura al nivel de cada *catchment*.



A continuación se presentan algunos aspectos prácticos de la definición de escenarios climatológicos.

## 7.1 Aspectos prácticos de la construcción de escenarios climatológicos

Se explica en esta sección una metodología propuesta para el desarrollo de escenarios climatológicos futuros. Esta metodología asume como punto de partida la existencia de proyecciones de escenarios de cambio climático bajadas a una escala regional. Para el caso del Ecuador dichos escenarios han sido generados por el proyecto PACC usando el modelo de clima regional PRECIS. Estos escenarios se encuentran disponibles en la página web del proyecto en el siguiente link ([http://www.pacc-ecuador.org/index.php?option=com\\_wrapper&Itemid=58](http://www.pacc-ecuador.org/index.php?option=com_wrapper&Itemid=58)). Escenarios equivalentes también existen para otros países en Latinoamérica. Los pasos sugeridos en esta metodología se describen a continuación:

1. Una primera etapa consiste en relocalizar las proyecciones climatológicas históricas (de control) provenientes del modelo de cambio climático regional (ej. PRECIS) a la ubicación de las estaciones índice tanto de temperatura como de precipitación. En esta relocalización se deben interpolar linealmente los valores de las proyecciones climáticas regionales ubicadas en los esquinas de la grilla de modelación considerando la ubicación geográfica de las diferentes estaciones meteorológicas índices usadas en el modelo.
2. Una vez relocalizadas estas proyecciones se debe realizar 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. Esto deber ser realizado para cada una de las estaciones meteorológicas. A continuación se describen matemáticamente estos algoritmos:

$$\delta P_m^{ip} = \frac{\bar{P}_{PRECISBL,m}^{ip}}{\bar{P}_{Obs,m}^{ip}}, \quad \delta T_m^{it} = \bar{T}_{PRECISBL,m}^{it} - \bar{T}_{Obs,m}^{it}$$

Donde  $\delta P_m^{ip}$  y  $\delta T_m^{it}$  son los factores mensuales de ajuste de precipitación y temperatura,  $ip$  y  $it$  son los índices de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura respectivamente que son usadas en el modelo y  $Obs$  y  $PRECISBL$  se refieren las

condiciones climatológicas históricas observadas y simuladas en el escenario base de las proyecciones PRECIS.

3. Posteriormente es necesario relocalizar las proyecciones climatológicas futuras a la ubicación de las estaciones índice siguiendo la misma metodología descrita en el paso 1.
4. Finalmente estas proyecciones son modificadas tomando en cuenta el factor de ajuste mensual obtenido para cada estación.

$$\begin{aligned} PS_{PRECIS(A2),m}^{ip} &= PS_{PRECIS\_RAW(A2),m}^{ip} / \delta P_m^{ip} \\ TS_{PRECIS(A2),m}^{it} &= TS_{PRECIS\_RAW(A2),m}^{it} + \delta T_m^{it} \end{aligned}$$

Donde  $PS_{PRECIS\_RAW(A2),m}^{ip}$  y  $PS_{PRECIS(A2),m}^{ip}$  corresponden a las proyecciones directas de PRECIS y escaladas usando el factor de ajuste respectivamente. Estas corresponden a las proyecciones de precipitación del escenario A2. Algo similar debe hacerse para proyecciones de temperatura y para los otros escenarios climatológicos existentes.

Siguiendo este procedimiento se obtienen series de tiempo de condiciones futuras bajo diferentes escenarios de cambio global. Utilizando estas nuevas series de tiempo de variables climatológicas se pueden realizar nuevas simulaciones con el modelo WEAP desarrollado que ya se encuentra calibrado desde el punto de vista hidrológico y operacional. En estas corridas se pueden comparar una serie de variables con respecto al escenario histórico base. Algunas de las variables que pueden ser consideradas corresponden a:

- Caudal promedio anual y máximo mensual en los puntos de control
- Con respecto al uso del agua en la cuenca se puede considerar la cobertura de la satisfacción de demanda de agua para riego o la generación de energía en centrales hidroeléctricas.

## **Referencias**

- Buytaert, B., 2004. 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., 2003. Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOPMODEL, III Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas, 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*.

## **Anexo. Procesamiento de datos de SIG para aplicaciones de WEAP**

### **DEM processing to obtain subwatersheds and *catchments***

- Identify pour points
  - Obtain coordinates of key sites.
    - Gauging stations: important for calibration purposes
    - Dams and diversions
    - Project limits
  - Present pour points to the map
    - Remember to define coordinate system (check at the source what coordinate system the coordinates are given, i.e. USGS is NAD27)
    - Remember to project in the right coordinate system for spatial analysis
- Hydrology functions in Spatial Analyst Tools
  - Process DEM to eliminate imperfections. Use the Fill function
  - Calculate Flow Direction raster
  - Use Snap Pour Point to make sure pour points are located at the maximum flow direction path.
    - This function creates a raster that links the pour point to the max flow direction point.
    - It requires the Flow Accumulation raster as input, which is created from the Flow Direction raster.
    - Typical snap distances are on the order of 10-500 m
  - Use Watershed function to create subwatersheds.
    - Requires the Flow Direction raster and the pour points
    - Make sure the extent of the output raster is not limited by the extent of the pour points layer (check Environments/GeneralSettings/Extent: select the extent of a layer that covers the whole modeling domain i.e. the DEM layer)\
  - Convert subwatershed raster into polygons using Conversion Tools/From Raster/Raster to polygon
    - Tip: create a new field to name each subwatershed so the attribute table of the polygon carries on name of the subwatershed to the next analysis steps
- DEM reclassification
  - Using Spatial Analyst/Reclass, reclassify DEM grid into elevation bands. Typical elevation bands are 0-500m, 500-750m, 750-1000m, and so on every 250 m
  - Define intervals by selecting equal interval to define number of classes (i.e. 11 classes for 0-3000m) and typing break values on the correspondent window
    - Tip: create a new field to name each elevation band so the attribute table of the reclassified DEM carries on this information to the next analysis steps
    - Tip: color each elevation band differently to visualize results
  - Convert reclassified raster into polygons using Conversion Tools/From Raster/Raster to polygon.
    - Tip: better to leave the “simplify polygons” option unchecked so the polygon follows the raster shape

- Intersect DEM polygons and Subwatershed polygons
  - o Use Analysis Tools/Overlay/Intersect
- After the intersection, is useful to create field for *Catchment*, that has a number to identify the subwatershed and the elevations bands (i.e. 1-1500-1750 is the *catchment* that corresponds to subwatershed 1 and elevation band 1500-1750m).
  - o Tip: also useful to dissolve (Data Management/Generalization/dissolve) using the *Catchment* field so all the elevation bands within a watershed are grouped into unique *catchments*. For instance, for Butte Creek I ended up with 115 *catchments* before dissolving and 34 after dissolving.