

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE  
INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
ESCUELA DE POSGRADO

**EL APORTE DE LAS ZONAS RIBEREÑAS AL CONTROL DE LAS INUNDACIONES:  
ESTUDIO DE CASO DE LA CUENCA CAHOACÁN, CHIAPAS, MÉXICO**

Por

Diana Marcela Ulloa Jiménez

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado  
como requisito para optar por el grado de

*Magister Scientiae* en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Turrialba, Costa Rica, 2014

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

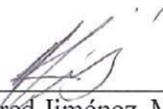
**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**



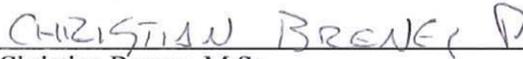
---

Alejandro Imbach, M.Sc.  
**Director de tesis**



---

Mildred Jiménez, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



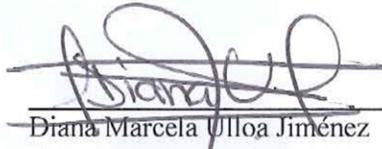
---

Christian Brenes, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Miley González, Ph.D. / Francisco Jiménez, Dr. Sc.  
**Decano / Vicedecano de la Escuela de Posgrado**



---

Diana Marcela Ulloa Jiménez  
**Candidata**

## **ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DE LA TESIS**

El estudio contiene un marco referencial de información detallada sobre el proceso de configuración del modelo SWAT con los datos ingresados por el autor. Se explica el proceso de calibración y la selección de parámetros más sensibles para corregir la sobreestimación de los caudales. Además, se detalla la importancia de las zonas ribereñas en el funcionamiento hidrológico de un cuerpo de agua y en una cuenca.

El segundo acápite del documento incluye un artículo científico que detalla los materiales y métodos usados y los resultados obtenidos de la modelación, el estudio de la variabilidad climática y las inundaciones, el proceso de calibración y la selección de escenarios de manejo con zonas ribereñas. Las discusiones y conclusiones del artículo incluyen un análisis de los resultados obtenidos y se compara con otros estudios similares.

Finalmente, se anexa información relacionada al proceso de modelación que puede ayudar a la interpretación gráfica de algunos aspectos mencionados en los resultados y conclusiones de este trabajo.

## DEDICATORIA

*A mi hija Valery y mi abuelita Ana,  
compañeras fieles y mujeres  
ejemplares que me han dado  
fortaleza.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por hacernos parte de esta hermosa naturaleza y por darme la oportunidad de engrandecer su nombre con este trabajo, por permitirme crecer y ser feliz con este proceso de aprendizaje.

A mi comité de tesis conformado por Alejandro Imbach, Christian Brenes y Mildred Jiménez por todo su apoyo y confianza. En especial al profesor Alejandro por creer en mis capacidades e inspirarme a culminar esta etapa.

A la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) de México, principalmente a todos los compañeros que nos acogieron y ayudaron en Cacahuatán. A la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador por la beca de estudios.

A mi hija Valery y Federico, por todo el amor y por enseñarme a construir esta hermosa familia que ahora incluye a mis amigos y amigas de toda Latinoamérica: Junior, Mercedes, Alma, Rebeca, Vanessa, Sandro, Michelle.

Por apoyarme a pesar de la distancia y por sus buenos consejos agradezco a mis amigas Estefanía Erazo Mera y Johanna Rosales.

A las mujeres que son madres y que luchan por hacer una sociedad más inclusiva y justa, que a pesar de todas las adversidades no se han dejado amedrentar por la vida, especialmente mis amigas Mercedes Camargo y Alma Liz Vargas.

A todas las personas que de alguna manera hicieron posible este sueño y me dieron la mano cuando necesitaba: mi padre Víctor Hugo, Freddy, Khaled, Santiago.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
2. OBJETIVOS .....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
3. MARCO REFERENCIAL.....	4
3.1. Consideraciones generales para la modelación de las inundaciones con SWAT.....	4
3.2. Calibración del modelo SWAT .....	6
3.3. Escenarios de manejo de las subcuencas .....	8
3.4. Recomendaciones y lecciones aprendidas .....	8
3.5. Resultados y conclusiones relevantes de la tesis.....	10
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	10
<b>ARTÍCULO 1: Modelación con SWAT de una cuenca inundable con diferentes escenarios de manejo enfocados en zonas ribereñas.....</b>	<b>14</b>
RESUMEN .....	14
ABSTRACT.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.1. Modelación de la cuenca con SWAT .....	16
2.2. Análisis del clima, resultados de la modelación e inundaciones.....	18
2.3. Calibración, análisis de variables.....	19
2.4. Escenarios con zonas ribereñas.....	20
3. RESULTADOS.....	21
3.1. Configuración del modelo inicial y descripción de la cuenca .....	21
3.2. Clima y variabilidad climática .....	24
3.3. Caudales e inundaciones en la cuenca .....	25
3.4. Calibración del modelo.....	28
3.5. Análisis de las variables de interés para el control de las inundaciones .....	31
3.6. Simulación de escenarios con zonas ribereñas .....	35
3.6.1. Funcionamiento de la escorrentía bajo distintos escenarios.....	39

3.6.2. Rendimiento de agua y otras variables a nivel de subcuenca .....	40
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	43
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
6. ANEXOS.....	51
Mapas detallados de la cuenca .....	52
Comparación de algunas variables del ciclo hidrológico.....	56
Comparación de caudales de salida a nivel de subcuencas entre modelo calibrado y sin calibrar.....	57
Aspectos biofísicos de la cuenca .....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de área de las subcuencas bajo distintos porcentajes de pendiente (0-5%, 5-10%, 10-20% y más de 20%) comparado con los caudales de salida de cada subcuenca .....	23
Figura 2. Precipitación mensual acumulada (mm) medida en las estaciones climáticas usadas para modelar la cuenca del río Cahoacán.....	25
Figura 3. Comparación de la precipitación mensual acumulada PCP ( $\text{mm mes}^{-1}$ ) con los caudales modelados $Q_{\text{mod}}$ ( $\text{m}^3 \text{seg}^{-1}$ ) y los caudales medidos $Q_{\text{med}}$ ( $\text{m}^3 \text{seg}^{-1}$ ). .....	26
Figura 4. Caudales mensuales medidos ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en la estación Cahuacán desde 1965 hasta 2005.....	27
Figura 5. Caudales mensuales desde 1965 hasta 2005 de la cuenca del río Cahoacán.....	28
Figura 6. Regresión lineal de los caudales medidos en la estación Cahoacán y los caudales modelados en SWAT antes de la calibración.....	29
Figura 7. Calibración de los caudales medidos y modelados desde 1965 a 1971.....	29
Figura 8. Validación de los caudales medidos y modelados desde 1973 a 1985. ....	30
Figura 9. Comparación de caudales medidos ( $Q_{\text{med}}$ ), caudales modelados sin calibración ( $Q_{\text{mod}}$ ) y caudales modelados después de la calibración ( $Q_{\text{calib}}$ ) ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) .....	30
Figura 10. Rendimientos de agua por subcuencas en los meses de septiembre de 1969, 1990 y 1998 y octubre de 2005 bajo modelación calibrada y sin calibrar.....	33
Figura 11. Caudales de salida promedio ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en septiembre de 1969 (a), septiembre de 1990 (b), septiembre 1998 (c) y octubre de 2005 (d). ....	35
Figura 12. Mapa de uso de suelo con zonas ribereñas de 5 metros de ancho (humedales boscosos- WETF y humedales no boscosos- WETN) .....	36
Figura 13. Mapa de uso de suelo con zonas ribereñas de 30 metros de ancho (Humedales boscosos-WETF y humedales no boscosos- WETN) .....	37
Figura 14. Comparación de caudales medidos ( $Q_{\text{med}}$ ), caudales calibrados ( $Q_{\text{calib}}$ ) y caudales modelados con zonas ribereñas con 5 metros de ancho (ZR5m). ....	39
Figura 15. Comparación de caudales medidos ( $Q_{\text{med}}$ ), caudales calibrados ( $Q_{\text{calib}}$ ) y caudales modelados con zonas ribereñas con 30 metros de ancho (ZR30m). ....	39
Figura 16. Comparación del rendimiento de agua (WYLD) entre el escenario con zonas ribereñas de 5 metros y zonas ribereñas de 30 metros de ancho.....	41
Figura 17. Análisis de rendimiento de agua (WYLD), cantidad de agua que escurre y llega al cauce (SURQ) y contribución del agua subterránea al caudal (GW_Q) .....	42
Figura 18. Mapa de división de las 51 subcuencas en la cuenca del río Cahoacán .....	52

Figura 19. Mapa de pendientes de la cuenca del río Cahoacán .....	53
Figura 20. Mapa de tipos de suelos para la cuenca del río Cahoacán.....	54
Figura 21. Mapa de usos de suelo de acuerdo a categorías de SWAT para la cuenca del río Cahoacán .....	55
Figura 22. Comparación de la cantidad de agua precipitada que aporta al rendimiento de agua, promedio mensual de lámina de agua evapotranspirada, flujo base y escorrentía superficial.....	56
Figura 23. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de septiembre de 1969. ...	57
Figura 24. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de septiembre de 1990. ...	57
Figura 25. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de septiembre de 1998.....	58
Figura 26. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de octubre de 2005.....	58
Figura 27. Variaciones de alturas máximas y mínimas (m.s.n.m.) en las subcuencas .....	59
Figura 28. Variación de la precipitación media mensual (mm) y los caudales de salida ( $m^3 s^{-1}$ ) a diferentes alturas promedio de las subcuencas.....	60
Figura 29. Rendimiento mensual de agua (mm) por subcuencas durante el huracán Javier en septiembre de 1998 (a), rendimiento mensual de agua (mm) por subcuencas durante el huracán Stan en octubre de 2005 (b), principales usos de suelo en las subcuencas con mayor rendimiento de agua (c) (modelo sin calibrar).....	61

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros utilizados para el proceso de calibración con SUFI-2 .....	7
Cuadro 2. Periodos de las inundaciones más importantes desde 1961 hasta 2055 en la cuenca del río Cahoacán.....	18
Cuadro 3. Escenarios de modelación para análisis de la influencia de las zonas ribereñas....	20
Cuadro 4. Reclasificación de usos de suelo con categorías de SWAT para la cuenca del río Cahoacán.....	22
Cuadro 5. Área y porcentaje que abarcan los usos de suelo modelados en la cuenca Cahoacán.....	22
Cuadro 6. Distribución espacial de los rangos de pendientes y tipos de suelo modelados en la cuenca Cahoacán.....	24
Cuadro 7. Modelo conceptual de las zonas ribereñas con 5 y 30 metros de ancho .....	38
Cuadro 8. Diferencia entre el modelo calibrado y los escenarios con zonas ribereñas .....	40

## **LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS**

DEM	Modelo Digital de Elevación
HRU	Unidad Hidrológica de Respuesta
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting versión 2
SWAT-CUP	SWAT Calibration Uncertainly Procedures
WETF	Humedales boscosos
WETN	Humedales no boscosos

## **RESUMEN**

Para medir el aporte de las zonas ribereñas al control de las inundaciones se requiere de un análisis general del contexto de una cuenca inundable. El funcionamiento de la cuenca se analizó usando el modelo SWAT que considera el clima, la hidrología, temperatura, características del suelo, pesticidas, nutrientes, crecimiento de las plantas y manejo del suelo.

Para examinar los diferentes componentes del ciclo hidrológico relacionados con las inundaciones, las características de la cuenca y los ecosistemas presentes se analizaron varios eventos de inundación registrados desde 1965.

El proceso de modelación permite definir subcuencas con altos rendimientos de agua y caudales durante los eventos de inundación. La calibración ayudó a corregir algunos parámetros que permitían obtener información más adecuada de los caudales altos y de esta manera mejorar el modelo inicial.

Después de obtener el modelo calibrado se cambiaron los usos de suelo presentes en la cuenca para incorporar las zonas ribereñas con diferentes anchos alrededor de los cauces, en sitios con pendientes menores a 20%. Los resultados de estas simulaciones permitieron definir los cambios generados en el caudal de la cuenca, las subcuencas y el rendimiento de agua. El resultado final indicó que los procesos de inundación permanecen porque no existieron grandes cambios en los caudales ni en el rendimiento de agua con los escenarios mencionados.

**Palabras claves:** SWAT, inundación, rendimiento de agua, zonas ribereñas, modelación, calibración

## **ABSTRACT**

To measure the contribution of riparian zones to floods control it is required an overall analysis of the context in a flood basin. To understand the functioning of the watershed we used a SWAT model that considers climate, hydrology, temperature, soil characteristics, pesticides, nutrients, plant growth and soil management practices.

To understand the different components of the hydrological cycle related to floods, the watershed characteristics and the present ecosystems, various flood events registered since 1965 had to be analyzed.

The modeling process allows us to define subbasins with high water yields and flows during the flood events. The calibration process helped to correct certain parameters to obtain more suitable information for high flow and thereby improve the initial model.

After obtaining the calibrated model the land uses in the watershed were changed to incorporate riparian zones with different widths around the channels, in sites with slopes less than 20%. The results of these simulations permitted defining the changes generated in the flow of the basin, sub-basins and water yield. The final results indicated that the flooding processes remain because there was not a big change in the flow out or the water yield with the scenarios mentioned.

**Key words:** SWAT, flood, water yield, riparian zones, modeling, calibration

## **1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

Las inundaciones afectan a 196 millones de personas en más de 90 países y se estima que entre 1980 y 2000, unas 170.010 personas murieron por este tipo de fenómeno natural (PNUD 2004). Considerando la importancia de este fenómeno se propone enfocar su estudio desde una visión eco hidrológica, saliendo de la visión convencional desde la perspectiva ingenieril que consideraba a estos eventos como una amenaza que debía ser controlada para evitar perjuicios a los humanos, la propiedad y la economía (Bandyopadhyay 2009). Las inundaciones se analizaban como un problema que se soluciona con la construcción de obras de ingeniería que impidan el desbordamiento de los ríos o esteros causantes del inconveniente (Villón 2007). Sin embargo, estas respuestas a las inundaciones tienen un enfoque reduccionista que debe ser complementado por los aspectos ecológicos, que consideren a las inundaciones como un elemento esencial para el ciclo hidrológico y que forman parte de los procesos que permiten la existencia de los servicios ecosistémicos relacionados con el agua (Bandyopadhyay 2009).

En los últimos años, los servicios ecosistémicos en general y aquellos relacionados al agua se han degradado sustancialmente o se usan de forma insostenible. Dentro de estos servicios están la regulación del agua (recarga de acuíferos y flujos hidrológicos), regulación de desastres naturales (control de inundaciones, protección contra las tormentas), regulación de la erosión (retención de suelos y sedimentos), y purificación del agua y tratamiento de residuos (retención, recuperación y eliminación de nutrientes en exceso y algunos contaminantes) (MEA 2005).

Los tipos de vegetación, la profundidad de las raíces en relación al nivel freático, y el tipo de cobertura del suelo, juegan un papel importante en las tasas de evapotranspiración y los niveles del flujo del cauce. Los niveles de evapotranspiración, infiltración y la cantidad de agua disponible en el cauce determinan la capacidad que tiene el bosque para controlar las inundaciones o las sequías (Tognetti et al. 2005, Tognetti y Jhonson 2008). Aprovechar estas características de los ecosistemas puede tener implicaciones en la adaptación cuando se combina con acciones de manejo sustentable, conservación y restauración como parte de una estrategia integral que considere aspectos económicos, sociales y culturales (Doswald y Osti, 2011)

En el caso de los ecosistemas a estudiar dentro de esta tesis se pone énfasis en los ecosistemas ribereños que se consideran como zonas de transición entre el ecosistema acuático y la superficie terrestre, y siendo un espacio de encuentro entre estos (Bennet 2004, Gregory et al. 1991). Al ser espacios intermediarios en el proceso de intercambio de agua, nutrientes, sedimentos y energía entre los ecosistemas terrestre y acuático, involucran un tipo de vegetación con una diversidad estructural y un volumen de vegetación mayor (Bennet 2004).

El desarrollo de esta tesis parte de un marco inicial del funcionamiento de una cuenca inundable, considerando las condiciones actuales de la cuenca en cuanto al uso del suelo, tipo de suelo, clima y pendientes. Se aplica de un modelo hidrológico que considera los aspectos biofísicos de la cuenca y se obtiene información respecto a los caudales generados

y el rendimiento de agua a nivel de subcuenca. Con los resultados del modelo se realizan simulaciones que presentan varios escenarios para definir el aporte de las zonas ribereñas y de algunas obras de conservación de agua y suelo, de tal manera que se evidencie su efecto en la rendimiento de agua y la escorrentía.

Los resultados de esta tesis pretenden definir las características biofísicas de la cuenca y los ecosistemas que pueden influir en la ocurrencia de inundaciones. También se busca conocer el comportamiento de los caudales en función de la variabilidad climática, principalmente de las precipitaciones. Esta información es la base para definir las características generales de la cuenca que propenden a los procesos de inundación.

Con la modelación de la cuenca y el proceso de calibración se realizan escenarios que den indicios sobre los aportes de los ecosistemas, principalmente los ribereños, en la reducción de los caudales que produjeron algunas inundaciones importantes y de esta manera hacer recomendaciones sobre el manejo y la distribución de los ecosistemas.

## **2. OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Aplicar y validar un modelo que considere a la adaptación basada en ecosistemas como un medio para reducir la vulnerabilidad a las inundaciones en la cuenca hidrográfica.

### **Objetivos específicos**

1. Analizar las características de los ecosistemas, la hidrología, el clima y la geomorfología de la cuenca que la hacen vulnerable a las inundaciones.
2. Describir las variables del ciclo hidrológico que se relacionan con los procesos de inundación.
3. Definir el aporte de las zonas ribereñas en la cuenca en estudio para disminuir la vulnerabilidad ante las inundaciones.
4. Integrar los elementos biofísicos de la cuenca y formular propuestas para reducir la vulnerabilidad a las inundaciones.

## **3. MARCO REFERENCIAL**

### **3.1. Consideraciones generales para la modelación de las inundaciones con SWAT**

SWAT es un modelo diseñado para diferentes funciones como predecir el impacto del uso del suelo y el manejo del agua, la producción de sedimentos y las prácticas agrícolas durante largos periodos de tiempo. Los principales componentes del modelo incluyen el clima, la hidrología, temperatura y propiedades del suelo, pesticidas, nutrientes, crecimiento de las plantas y manejo del suelo (Arnold et al. 1998, 2012, Wang et al. 2008).

Se utiliza el modelo SWAT para esta investigación porque permite conocer de forma detallada algunas variables del ciclo hidrológico que pueden explicar el funcionamiento de la cuenca durante eventos de inundación que se han registrado en el periodo de análisis. La información de las simulaciones se puede obtener de forma diaria, mensual o anual, lo que permite desagregar el nivel de análisis de las inundaciones. Dado que SWAT no está diseñado para modelar caudales diarios muy altos, se utiliza la información mensual que se obtiene del modelo.

Para este estudio se utilizaron usos de suelo, pendientes y tipos de suelo dominantes dentro de cada subcuenca, con la finalidad de obtener resultados a ese nivel de análisis. Sin embargo, una de las ventajas de SWAT es que se puede dividir las subcuencas en unidades hidrológicas de respuesta (HRUs) que consisten en combinaciones de uso de suelo, manejo, características topográficas y características de suelo únicas (Arnold et al. 2012, Omani et al. 2007)

La configuración inicial de SWAT utiliza información de precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas diarias, mapa de uso de suelo, mapa edafológico, modelo de elevación digital (DEM), mapa de ríos (Winchel et al. 2013)

La división de las subcuencas en SWAT se realiza a través de un procedimiento automático que utiliza los datos del modelo digital de elevación (DEM) y los parámetros que el usuario establece para delimitación el tamaño y número de subcuencas (Winchel et al. 2013). El DEM utilizado proviene del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), que representa las elevaciones del territorio en intervalos regulares de 30 metros en las coordenadas X y Y (INEGI 2013)

Los parámetros ingresados por el usuario para la delimitación de las 51 subcuencas incluyeron un área mínima de la cuenca que corresponde a 200 hectáreas, una delimitación del área de estudio realizada manualmente en la opción "mask" que se basa en la cuenca delimitada Plan de Gestión Integral de la cuenca del río Cahoacán (2010) y el shape de ríos escala 1:50.000 generado por el INEGI. La información de los ríos en la opción "burn in" mejoró la delimitación de las subcuencas al complementar la información del DEM (Winchel et al. 2013).

De acuerdo a la clasificación de suelos de la Carta Edafológica del INEGI en escala 1:250.000, se obtienen los datos de las cartas Tapachula y Huixtla. En la carta Tapachula se toman los datos del punto de control No. 9 que corresponde a los suelos acrisoles (Ah+Ao+Ap/3). El tipo de suelo andosol-litosol (Th+To+I/2) fue descrito a partir de los datos analíticos de la muestra correspondiente al punto No. 91 de la carta edafológica de Huixtla.

No se encontraron puntos de descripción en las Cartas Edafológicas de la zona para los tipos de suelo regosol (Re+Zg/1), solonchak (Zg+Re/3), andosol (Th+To/2). Sin embargo, para Re+Zg/1 se utilizó la información de sitios cercanos que se encontraron en la carta de Tapachula. Para el tipo de suelo Zg+Re/2 se usó la descripción del punto No.85 mencionado en el estudio de Baumman (2000). El tipo de suelo Th+To/2 se describió a partir del estudio edafológico realizado en la Finca La Argentina en el Municipio de Cacahoatán (Ramos Hernández 1979). Para el tipo de suelo que corresponde a las zonas urbanas se utilizó la

información disponible en la base de datos de SWAT con la categoría "urban land" tienen poca capacidad de infiltración y por lo tanto generan alta escorrentía.

La primera definición de las HRU (hydrologic response units o unidades hidrológicas de respuesta) se realizó utilizando la información de la HRU dominante dentro de la subcuenca. Esto porque el análisis inicial no requería un detalle específico a nivel de HRU y facilitaba el manejo de la información cuando solo se tomaban las 51 subcuencas y 51 HRU.

El periodo de modelación inicia en el año 1961, pero se utilizan cuatro años de "warming up" o calentamiento del programa para asegurar el establecimiento de las condiciones básicas de flujo en las simulaciones y llevar los procesos hidrológicos a una condición de equilibrio (Abraham et al. 2007). Los resultados obtenidos de la modelación se presentarán desde el año 1965 hasta el 2005 a nivel de subcuencas y con un periodo de análisis mensual.

Para cumplir con los objetivos de esta investigación, se asociarán los resultados de la modelación y los caudales medidos con un análisis general de la variabilidad climática, que se refiere a *"las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos del clima (...) en todas las escalas temporales y espaciales más allá de los fenómenos meteorológicos determinados"* (IPCC 2002). En este caso se verifica el comportamiento de los caudales en función de la variabilidad intermensual y la influencia en la distribución de las precipitaciones a diferentes alturas de la cuenca.

La influencia de los ecosistemas parte del análisis de la distribución de los diferentes usos de suelo dentro de la cuenca. Esta información es importante para conocer la respuesta hidrológica actual de la cuenca con los ecosistemas naturales y antrópicos. Se debe tomar en cuenta que previo al desarrollo de poblados en las tierras montañosas, estribaciones y secciones de la planicie costera, las cuencas costeras de Chiapas albergaban una variedad de tipos de bosque tropical; hasta 1980 el área cubierta por bosque primario correspondía al 45% de la planicie costera, llegando a casi cero en 1990 (Lisle *et ál.* 2010). Este cambio puede tener repercusiones en el funcionamiento hidrológico de la cuenca, ya que los sitios con bosques naturales presentan una menor escorrentía total y mayor flujo base que aquellos usos de suelo no boscosos (Locatelli y Vignola 2009)

### **3.2. Calibración del modelo SWAT**

Los análisis de sensibilidad, calibración e incertidumbre son muy importantes para la aplicación de SWAT y otros modelos (Grassman et al. 2007). De acuerdo a Neistch y colaboradores (2002) cuando existe una sobreestimación del caudal se debe iniciar con la calibración del número de curva (CN2) y se continúa con los valores de la capacidad de agua disponible en el suelo (SOL\_AWC) y el factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO). Para la baja evapotranspiración y alto flujo base, se debe aumentar el valor de la profundidad umbral del agua en el acuífero somero para que el flujo de retorno ocurra (GWQMN) y el coeficiente de "revap" del agua subterránea (GW\_REVAP) y disminuir los valores del parámetro que determina el umbral de profundidad de agua en el acuífero somero para que "revap" o la percolación hacia el acuífero profundo se produzca (REVAPMN) (Neistch et al. 2002). Estos últimos factores podrían ayudar a mejorar la modelación, considerando la influencia que puede tener el funcionamiento del acuífero Soconusco que es

drenado por los ríos Suchiate, Cahoacán, Coatán y Huixtla en época de estiaje, y lo recargan en la temporada de lluvia (CONAGUA 2002).

La calibración automática permite realizar miles de simulaciones para definir los valores óptimos de algunos datos de ingreso (*input*) (Grassman et al. 2007) y para realizar este tipo de calibración se utilizó el programa SWAT- CUP. El uso de la modelación inversa permite obtener parámetros que serían muy difíciles de medir directamente, por lo cual es mejor fortalecer las optimizaciones inversas con datos simples que permiten obtener datos de alto valor para el modelo (Abbaspour et al. 2004).

El primer paso dentro de la calibración y validación es determinar la sensibilidad de los parámetros a calibrar (Arnold et al. 2012). En este caso se eligieron los parámetros recomendados por Neistch y colegas (2002) y para definir los rangos iniciales de cambio de los parámetros a calibrar se revisaron estudios en México (ver Torres et al. 2005) y en otras referencias que reporten un proceso de calibración para modelos hidrológicos (ver Yang 2008, Abbaspour et al. 2004, 2007, Azimi 2012, Zang et al. 2008, 2009, Wang et al. 2008, Jayakrishnan et al. 2005, Tufford et al. 2013, Silva 2010, Abraham et al. 2007).

Con el grupo inicial de parámetros, se seleccionaron aquellos que presenten mayor sensibilidad de acuerdo al análisis realizado en SUFI-2. Para la calibración final se eligieron solo los parámetros con mayor sensibilidad y se definieron los siguientes umbrales de calibración (ver Cuadro 1):

**Cuadro 1. Parámetros utilizados para el proceso de calibración con SUFI-2**

Opr*	Parámetro	Valor inicial	Calibración	
			mín	máx
<i>r</i>	SOL_AWC		-0,2	0,2
<i>v</i>	ESCO	0,95	0	1
<i>r</i>	CN2	45 - 89	-0,2	0,2
<i>v</i>	ALPHA_BF	0,048	0	1
<i>v</i>	GW_DELAY	31	0	500
<i>v</i>	GWQMN	0	0	5000
<i>v</i>	GW_REVAP	0,02	0,02	0,2
<i>v</i>	CH_K2		0	500

\* Los dos tipos de operaciones consideradas para este proceso de calibración son: *r* cuando se requiere hacer un cambio porcentual o multiplicar los valores del parámetro modelado por un valor, y *v* cuando se requiere reemplazar el valor por un número dentro del rango especificado.

Las estadísticas más utilizadas para la calibración hidrológica y la validación son el coeficiente de correlación de regresión ( $R^2$ ) y el coeficiente de eficiencia del modelo Nash- Sutcliffe (NSE). El valor de  $R^2$  permite medir en una regresión lineal el ajuste entre los valores simulados y medidos, siendo 1 el valor que representa una dispersión igual entre lo simulado y lo medido (Grassman et al. 2007).

El coeficiente de correlación y la pendiente de la regresión lineal entre los caudales medidos y los calculados se utilizó en otros estudios similares (Torres et al. 2005, Mata 2008, Wang et al. 2008, Abraham et al. 2007). El valor de  $R^2$  se calcula como (Wang et al. 2008):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} (Q_{obsi}^j - Q_{simi}^j)^2}{\sum_{i=1}^{n_i} (Q_{obsi}^j - Q_{med}^j)^2}$$

El proceso de validación se realiza comparando los datos modelados de la escorrentía con los datos medidos en la estación hidrológica Cahoacán desde 1981 hasta 1992. La validación puede resultar en valores de ajuste menores a la calibración dependiendo de la calidad y cantidad de datos (Mata 2008) y del valor promedio de la escorrentía en el periodo de validación (Wang et al. 2008).

### **3.3. Escenarios de manejo de las subcuencas**

La cuenca presenta diferentes características cambiantes desde la cuenca alta hasta la cuenca baja (gradiente cabecera- desembocadura), además, existe una transición en la composición y distribución de las zonas ribereñas a lo largo de la cuenca como una representación natural de las características biofísicas de la unidad hidrológica (Angelier, 2002). Para cada cuenca hidrográfica, la vegetación ribereña se distribuye de acuerdo a patrones horizontales, verticales, longitudinales y temporales; las características de esta vegetación varían de acuerdo a su localización, tamaño, pendiente y la geomorfología del río con sus dinámicas de flujo (Wood et ál. 2007).

De acuerdo al análisis longitudinal de la vegetación, normalmente en la cuenca alta las áreas boscosas de las zonas ribereñas no han sido muy explotadas y las crecidas producen pocos daños, teniendo una realidad distinta en las partes bajas de una cuenca, donde se desarrollan mayor cantidad de actividades agrícolas, se presentan asentamientos humanos y las llanuras de inundación son más amplias (Lee 1980, Granados et al. 2006).

La simulación de escenarios hipotéticos de cambio de uso de suelo y algunas prácticas de conservación del suelo y el agua se pueden modelar con SWAT (Gassman et al. 2007). Las prácticas como las terrazas, "strip cropping", cultivo en contornos, "grassed waterways", "filter strips" y "conservation tillage" (Gassman et al. 2007).

Cerucci and Conrad (2003) y Storm et al. (2006) han utilizado SWAT para analizar los "buffer" de las zonas ribereñas en conjunto con el modelo REMM (Riparian Ecosystem Model), teniendo resultados sobre la configuración óptima de las zonas ribereñas (Grassman et al. 2007).

### **3.4. Recomendaciones y lecciones aprendidas**

El uso del modelo SWAT requiere un amplio conocimiento del funcionamiento hidrológico de las cuencas, por lo que se recomienda hacer una revisión previa de las bases que se utilizan para la definición de la escorrentía, evapotranspiración e infiltración. El manejo de las bases de datos de ingreso (clima, usos del suelo, tipos de suelo) se realiza mejor cuando se cuenta con asesoría directa de expertos en el modelo, ya que los manuales del mismo no especifican muchos aspectos importantes de este proceso.

Con los resultados de este estudio se pueden hacer simulaciones que determinen la influencia del cambio de uso de suelo, proyecciones a largo plazo del cambio climático y resultados de la implementación de obras de conservación de agua y suelo. Para todos los casos es necesario tener claro el enfoque del estudio y de ser necesario realizar un nuevo proceso de calibración y validación.

La información de las estaciones climáticas es fundamental para obtener una buena modelación, ya que la falta de esta información puede generar sobreestimación o subestimación de los caudales. En cuencas con grandes cambios de alturas, ecosistemas y precipitación, se requieren estaciones que representen lo mejor posible estas características.

El modelo calibrado para este estudio utiliza como información base un mapa de uso de suelo que fue publicado en el 2009. Esta información reciente nos puede dar una buena aproximación de la situación actual de la cuenca, sin embargo, puede existir un sesgo en los resultados del estudio para los años previos al periodo de drástico cambio del uso de suelo que inició en los años 80's. El cambio de usos de suelo de bosques a pastizales que ocurrió en esa época, puede tener influencia en el comportamiento del ciclo hidrológico, por lo que se recomienda hacer un estudio de varios periodos con simulaciones que consideren los usos de suelo para diferentes épocas.

Se requiere un conocimiento más profundo de las características de las zonas ribereñas para realizar una modelación más exacta. Otros estudios han utilizado información de las zonas ribereñas considerando este espacio como un humedal y de esta manera se puede usar el módulo "Pond" (.pnd) en el editor de las bases de datos de SWAT. También existe la posibilidad de usar el módulo APEX en el editor de las bases de datos de SWAT y hacer unidades hidrológicas de respuesta (HRU) que consideren las características de las zonas ribereñas, sin embargo, entre la información recopilada no se ha encontrado un manual que detalle el proceso de ingreso de la información para el módulo APEX.

El proceso de calibración está direccionado a la mejor simulación de los caudales pico, por lo que esta calibración solo serviría para simulaciones y estudios que estén direccionados al análisis de los caudales mensuales altos. En la ponderación de los caudales a calibrar, se dio una importancia de 0,7 a los caudales altos y de 0,3 a los caudales bajos, por lo que SUFI-2 calibrará de acuerdo a los requerimientos del programador.

El periodo de calibración es importante para obtener mejores resultados, en este caso se eligieron años con periodos de lluvia similares y no se tomaron en cuenta los años secos que podían influir en la eficiencia de la calibración. De acuerdo al registro de los caudales medidos, los años 1972, 1978, y 1987 registraron bajos promedios mensuales de los caudales medidos, por lo que se evitó usar dentro del periodo de calibración a estos años. El periodo de validación comienza en 1973 y termina en 1985, por lo que tiene un sesgo en el año seco de 1978, lo que pudo incidir en un menor valor del coeficiente de correlación ( $R^2$ ).

El modelo se limita al análisis biofísico de los elementos que componen las cuencas, por lo que se puede utilizar esta información como base para definir subcuencas prioritarias de intervención con diferentes obras que ayuden a controlar la escorrentía. Entre las obras que se pueden incorporar, se considera necesario mantener y recuperar la cobertura boscosa en aquellas subcuencas con grandes escurrimientos y altos rendimientos de agua.

### **3.5. Resultados y conclusiones relevantes de la tesis**

Todas las estaciones climatológicas indican que los meses más lluviosos en la cuenca del río Cahoacán son de julio a octubre, teniendo las mayores precipitaciones en el mes de septiembre. La precipitación tiene una variabilidad espacial que está determinada por la altura de la cuenca. La precipitación en la zona baja es menor que la precipitación en la parte alta de la cuenca, sin embargo, este cambio en la distribución de las precipitaciones no es directamente proporcional al cambio en altura.

Con la información adecuada de clima, usos de suelo, tipos de suelo, modelo de elevación digital, mapa de ríos y caudales medidos, se obtuvo una buena simulación del comportamiento de los caudales en la cuenca del río Cahoacán. A pesar de la sobreestimación que arroja el modelo, se puede asumir que el modelo es útil para predecir promedios mensuales de caudal.

Se evidencia que con eventos más intensos de lluvias, como los ocurridos en 1998 y 2005, las subcuencas de las partes alta y media de la cuenca aumentan su rendimiento de agua sin que esto represente un gran aumento en los caudales de salida. Esto denota la importancia de los ecosistemas naturales (bosque mesófilo) y los agro ecosistemas como el café y el pasto en el funcionamiento hidrológico de la cuenca para regular el rendimiento de agua y evitar que los caudales de salida aporten al proceso de inundación.

Los ecosistemas ribereños idealmente pueden abarcar zonas con pendientes menores a 20% y pueden simularse como humedales boscosos y no boscosos, sin embargo, a nivel de la cuenca se evidencia poco cambio en los caudales de salida y rendimiento de agua bajo los distintos escenarios planteados con zonas ribereñas.

### **4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abbaspour, KC; Johnson, CS; Van Genuchten, MT. 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal* 3: 1340-1352.
- Abbaspour, KC; Yang, J; Maximov, I; Siber, R; Bogner, K; Mieleitner, J; Zobrist, J; Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333: 413-430.
- Abbaspour, K. 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. 103 p.
- Abraham, LZ; Roehrig, J; Chekol, DA. 2007. Calibration and Validation of SWAT Hydrologic Model for Watershed, Ethiopia. Conference on International Agricultural Research for Development (en línea). Consultado 3 ene 2014. Disponible en: <http://www.tropentag.de/2007/abstracts/full/126.pdf>
- Angelier, E.2002. Ecología de las Aguas Corrientes. Editorial Acribia, S. A. Zaragoza, ESP. 217 p.

- Arnold, JG; Moriasi, DN; Gassman, PW; Abbaspour, KC; White, MJ; Srinivasan, R; Snthi, C; Harmel, RD; van Griensven, A; Van Liew, MW; Kannan, N; Jha, MK. 2012. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 55(4): 1491-1508.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
- Bandyopadhyay, J. 2009. *Water, ecosystems and society: a confluence of disciplines*. Indian Council of Social Science Research North Eastern Regional Centre. India. 191 p.
- Baumann, J. 2000. Plan de conservación de suelos y agua para la Costa de Chiapas. México, D. F. 148 p.
- Bennet, A. 2004. Enlazando el paisaje: el papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre. UICN. San José, C.R. 1278 p
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, MX). 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Soconusco, Estado de Chiapas. México, D. F. 16 p.
- Doswald, N.; Osti, M. 2011. Ecosystem- based approaches to adaptation and mitigation- good practice examples and lessons learned in Europe (en línea). BfN (Federal Agency for Nature Conservation), UNEP, WCMC. Consultado 1 nov 2012. Disponible en [http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/Skript\\_306.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/Skript_306.pdf)
- Gassman, PW; Reyes, MR; Green, CH; Arnold, JG. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(4): 1211-1250.
- Granados, D; Hernández, M. A; López, G. F. 2006. Ecología de las zonas ribereñas. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 12 (001):55-69.
- Gregory, S; Swanson, F; McKee, W; Cummins, K. 1991. *An Ecosystem Perspective of Riparian Zones*. University of California Press. *BioScience* 41(8): 540-551
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2002. Cambio climático y biodiversidad (en línea). Consultado 9 oct. 2013. Disponible en: [https://docs.google.com/file/d/0B1qFp6Ioo3akazFldDRpTXJ1OEE/edit?usp=drive\\_web&pli=1](https://docs.google.com/file/d/0B1qFp6Ioo3akazFldDRpTXJ1OEE/edit?usp=drive_web&pli=1)
- Lee, R. 1980. *Forest Hydrology*. Columbia University Press. New York, EU. 249 pg.
- Lisle, TE; De la Fuente, J; Suárez, C; Hernández, A. *Perspectiva general de asuntos relacionados con el manejo de las cuencas costeras de Chiapas*. The Nature Conservancy. 32 p.
- Locatelli, B; Vignola, R. 2009. Managing watershed services of tropical forest and plantations: Can meta-analyses help? *Forest Ecology and Management* 258(9): 1864-1870.

- Mata, H. 2008. El modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México. Tesis Mg. Sc. Montecillo, MX, Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. 157 p.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and Humans Well-being: Synthesis (en línea). Island Press, Washington, DC. Consultado 10 jun 2012. Disponible en: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR. 2002. Soil and Water Assessment Tool User's Manual: Version 2000. Texas Water Resources Institute. Texas, USA. 472p.
- Omani, N; Tajrishy, M; Abrishamchi, A. 2007. Modeling of a River Basin Using SWAT Model and SUFI-2. Fourth International Conference of SWAT Model. UNESCO-IHE (en línea). Consultado 5 ene 2014. Disponible en: [http://ewrc.sharif.edu/pdf\\_folder/paper%20holland.pdf](http://ewrc.sharif.edu/pdf_folder/paper%20holland.pdf)
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2004. La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo. EEUU. 146 p.
- Ramos Hernández, S. G. 1979. Estudios Edafológicos de una zona cafetalera del Soconusco, Estado de Chiapas. Tesis. 179 p.
- Rivera, P; Medina, R; Wruck, W; Paredes, A; Ortega, S; Arellano, J. 2012. Estudio de Erosión Hídrica en Apoyo para la Integración del Plan de Rehabilitación Hidrológico Ambiental de la Cuenca del río Huehuetan, Chiapas. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, MX.
- Silva, O. 2010. Evaluación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca media del río Pao en Venezuela. Rev. Fac. Agron. (UCV) 36(3): 134-145.
- Tognetti, SS y Jhonson, N. 2008. Ecosystem services from improved soil and water management: creating a return flow from their multiple benefits (en línea). Consultado 10 jun 2012. Disponible en: [http://gisweb.ciat.cgiar.org/wcp/download/PES\\_Workshop/Tognetti\\_Johnson\\_PES\\_SW\\_C.pdf](http://gisweb.ciat.cgiar.org/wcp/download/PES_Workshop/Tognetti_Johnson_PES_SW_C.pdf)
- Tognetti, SS; Aylward, B; Mendoza, G. 2005. Markets for Watershed Services (en línea). Consultado 13 jun 2012. Disponible en: [http://www.sylviatognetti.org/data/Tognetti\\_MWS.pdf](http://www.sylviatognetti.org/data/Tognetti_MWS.pdf)
- Torres, E; Mejía, E; Cortés, J; Palacios, E; Exebio, A. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. Agrociencia 39(5): 481-490.
- Tufford, D; Samadi, S; Carbone, G. 2013. Incorporating Sallow Aquifer Uncertainty to Streamflow Prediction in a Forested Wetland Coastal Plain Watershed. GSA Annual Meeting. Denver, USA (en línea). Consultado 5 ene 2014. Disponible en: [http://www.cisa.sc.edu/Pubs\\_Presentations\\_Posters/Presentations/2013\\_Tufford\\_%20](http://www.cisa.sc.edu/Pubs_Presentations_Posters/Presentations/2013_Tufford_%20)

[Incorporating%20Shallow%20Aquifer%20Uncertainty%20to%20Streamflow%20Prediction%20in%20a%20Forested%20Wetland%20Coastal%20Plain%20Watershed.pdf](#)

- Villón, M. 2007. Drenaje. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Primera ed. Cartago, CR. 544 p.
- Wang, X; Shang, S; Yang, W; Melesse, AM. 2008. Simulation of an Agricultural Watershed Using an Improved Curve Number Method in SWAT. American Society of an Agricultural and Biological Engineers 51(4): 1323-1339.
- Winchel, M; Srinivasan, R; Di Luzio, M; Arnold, J. 2013. ArcSWAT Interface for SWAT 2012: User's Guide. Texas AgriLife Research, USDA Agricultural Research Service. Texas, USA. 464
- Wood, P; Hannah, D; Sadler, J. (Ed). 2007. Hydroecology and ecohydrology: past, present and future. Jhon Wiley and Sons Ltda. England. 466 p.
- Yang, Q; Meng, FR; Zhao, Z; Chow, TL; Benoy, G; Rees, H; Bourque, CP. 2009. Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. Agriculture, Ecosystems and Environment 132: 23-31.

## **ARTÍCULO 1: Modelación con SWAT de una cuenca inundable con diferentes escenarios de manejo enfocados en zonas ribereñas**

---

### **RESUMEN**

El estudio de los aspectos hidrológicos y de los ecosistemas relacionados a las inundaciones en la cuenca del río Cahoacán se basa en el análisis del comportamiento de algunas variables del ciclo hidrológico a nivel de subcuencas en función del uso de suelo, el clima, la pendiente, el tipo de suelo y otras que incluye el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Se utilizaron siete estaciones climáticas con información desde 1961 hasta 2005, obteniendo simulaciones desde 1965 hasta 2005 de todas las variables disponibles en SWAT.

La variabilidad climática se analizó a nivel espacial y se encontró que las precipitaciones se distribuyen de diferente manera de acuerdo a la altura, teniendo patrones de distribución similares después de los 300 m.s.n.m. La variabilidad intermensual indica que la época lluviosa más intensa está entre julio y octubre, siendo septiembre el mes más lluvioso.

También se evidencia la forma de distribución de los escurrimientos por subcuenca durante los eventos de inundación de los años 1969, 1990, 1998, 2005 y se compara esta información con el rendimiento de agua por cada subcuenca para esos eventos. Se encontró que las subcuencas de la zona alta y media tienen mayor rendimiento agua y los caudales de salida en las subcuencas presentan un patrón distinto.

Se comparó los resultados obtenidos con SWAT y los caudales medidos, evidenciando una sobreestimación en los resultados del modelo que debe ser corregida con un proceso de calibración y validación. Los principales factores a considerar para la calibración se relacionan con el flujo base, el número de curva, la evapotranspiración y la recarga del acuífero Soconusco.

Con el modelo calibrado se pueden estudiar diferentes escenarios de manejo que incluyen zonas ribereñas de 5 y 30 metros de ancho, obteniendo poca influencia de estos ecosistemas en los procesos de inundación y en las variables del ciclo hidrológico que se analizaron.

Palabras claves: SWAT, inundaciones, variabilidad climática, rendimiento de agua, zonas ribereñas

## **ABSTRACT**

The study of the hydrological aspects and ecosystems related to the floods at the Cachoacan river basin is based on the analysis of the behavior of some variables of the hydrological cycle at a sub basin level in according to the soil use, the climate, the slope, type of soil, among others included in the swat model (Soil and Water Assessment Tool). Seven climatological stations were used with information from 1961 until 2005, obtaining simulations from 1965 until 2005 of all the variables available in swat.

The climate variability was analyzed at spatial level and the results show that precipitations are distributed varying according to the altitude, having similar distribution patterns when altitude was higher than 300 meters above sea level. The monthly variability indicates that the most intense rainy season goes between the months of July and October, September been having the most rainfall.

The runoff distribution at sub basin level is also evidenced during the flood events of the years 1969, 1990, 1998, 2005 and this information is compared with the water for those events. It was found that the high and middle sub basins have the highest water yield and the flow out at the sub basins present a different pattern than the water yield that may be related with the ecosystems presented.

The results obtained with swat model and flow measured were compared, giving evidence of an over prediction on the results from the model which must be adjusted threw calibration and validation. The main factors to be considered when calibrating are related to the base flow, curve number, evapotranspiration and the Soconusco aquifer recharge.

By using the calibrated model it is possible to study different management scenarios that include riparian zones 5 to 30 meters wide, obtaining little influence from these ecosystems to flooding processes and the hydrological cycle variables that were analyzed.

Key words: SWAT, flood, climate variability, water yield, riparian zones

## **1. INTRODUCCIÓN**

El estudio de las inundaciones inicia con el análisis del funcionamiento de la cuenca, para lo cual se realiza la modelación de los aspectos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). De los resultados obtenidos en SWAT se pueden analizar varios procesos que inciden en las inundaciones, incluyendo la escorrentía y la producción de agua (Gassman et al. 2007). El estudio en los cambios de los caudales en función de diferentes escenarios de usos de suelo sirve como insumo para el estudio de las amenazas de inundación (Müller y Reinstorf 2011).

Después de analizar los aspectos generales de la cuenca se modela un escenario con presencia de zonas ribereñas para definir la influencia de la vegetación ribereña en el rendimiento de agua y los caudales de salida de las subcuencas y la cuenca en general. Se desea comprobar el rol de los ecosistemas ribereños en diferentes escenarios que están relacionados a procesos de inundación, de tal manera que se mantienen constantes todos los aspectos de la cuenca y su modifica la distribución de la vegetación ribereña para medir los cambios en las variables de interés.

Para este estudio se eligió la cuenca del río Cahoacán que presenta características biofísicas naturales que la hacen propensa a las inundaciones. En un análisis integral de la vulnerabilidad a las inundaciones para una subcuenca baja se encontró que todas las comunidades estudiadas presentan una vulnerabilidad promedio de media a alta. La vulnerabilidad ecológica definida por las condiciones de la zona alcanza los valores máximos en todos los casos (Castillo 2010).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

La cuenca del río Cahoacán está ubicada al sur del estado de Chiapas, México en las coordenadas 14° 30' a los 16° 33' de latitud norte y desde los 92° 04' a los 94° 19' de longitud oeste (Santacruz 2006). Es una cuenca costera de la vertiente del Pacífico que nace en el volcán Tacaná y se localiza en la región administrativa Frontera Sur, región hidrológica Costa de Chiapas (Santacruz 2006, CONAGUA 2012). Abarca los municipios de Cacaohatán, Tuxtla Chico, Metapa, Frontera Hidalgo y Tapachula, siendo este último el que ocupa mayor área de la cuenca (Santacruz 2011).

### **2.1. Modelación de la cuenca con SWAT**

SWAT se originó de otros modelos relacionados a las prácticas agrícolas, la escorrentía, el agua subterránea y la erosión que fueron desarrollados por la USDA (Gassman et al. 2007) y sirve para simular procesos hidrológicos que incluyen la interceptación, escorrentía superficial, infiltración, evapotranspiración, flujo lateral, drenaje, redistribución del agua en el perfil del suelo, uso consuntivo, flujo de retorno y recarga por infiltración de los cuerpos de agua superficiales, reservorios y canales tributarios (Arnold et al. 1998, 2012a, Gassman et al. 2007).

La caracterización la cuenca en sus aspectos hidrológicos, geomorfológicos, climáticos y ecológicos se realizó con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Para la aplicación de SWAT se utilizó la extensión ArcSWAT disponible para ArcGIS, ya que se

pueden hacer análisis de datos gráficos utilizando la información de ArcGIS como tablas, mapas y gráficos (Uribe 2010, Winchel et al. 2013).

Para conocer el funcionamiento de la cuenca en relación a las inundaciones se requería usar un modelo ecohidrológico que considere los diferentes factores que pueden incidir en la escorrentía. SWAT simula el ciclo hidrológico basado en la ecuación de equilibrio del agua de acuerdo al siguiente detalle (Arnold et al. 1998, Uribe 2010):

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo medida en  $\text{mmH}_2\text{O}$ ;  $SW_0$  es el contenido inicial de agua en el suelo para el periodo de un día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $t$  es el tiempo en días;  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en un día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía en un día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $E_a$  es la cantidad de evapotranspiración en un día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $W_{seep}$  es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno en un día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) (Arnold et al. 1998).

La información obligatoria que se debe ingresar al programa son: el modelo de elevación digital (DEM), mapa de cobertura/ uso del suelo, mapa de tipos de suelo (Winchel et al. 2013). Dado que la cuenca a estudiar no está incluida en la base de datos de SWAT, se requiere información de las precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas diarias e información edafológica.

La división de las subcuencas en SWAT se realiza a través de un procedimiento automático que utiliza los datos del modelo digital de elevación (DEM) (Winchel et al. 2013). Esta información se obtuvo del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) (INEGI 2013). Los parámetros establecidos por el usuario fueron: delimitación manual del área de estudio (*mask*), mapa de ríos para complementar la información del DEM (*burn in*) y área mínima de las subcuencas igual a 200 hectáreas.

Se recopiló información de precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas diarias provenientes de siete estaciones climáticas administradas por CONAGUA: Puerto Madero ( $14^{\circ}42'5''\text{N}$ ,  $92^{\circ}23'11''\text{O}$ ), Finca Chicharras ( $15^{\circ}7'59''\text{N}$ ,  $92^{\circ}14'32''\text{O}$ ), Medio Monte ( $14^{\circ}54'55''\text{N}$ ,  $92^{\circ}11'26''\text{O}$ ), Malpaso I ( $14^{\circ}55'11''\text{N}$ ,  $92^{\circ}15'25''\text{O}$ ), San Jerónimo ( $15^{\circ}2'23''\text{N}$ ,  $92^{\circ}8'11''\text{O}$ ), Cacahoatán ( $14^{\circ}59'18''\text{N}$ ,  $92^{\circ}9'52''\text{O}$ ) y Cahoacán ( $14^{\circ}43'20''\text{N}$ ,  $92^{\circ}16'10''\text{O}$ ). Los periodos de registro obtenidos de estas estaciones varían entre 1944 hasta el 2012, eligiendo para la modelación los datos desde 1961 hasta 2005 por la cantidad de información disponible.

La información edafológica se obtuvo de los puntos de muestreo disponibles en las cartas edafológicas del INEGI en escala 1:250.000, sitios Tapachula y Huixtla. Los tipos de suelo sin información en esta fuente se describieron a partir de estudios puntuales (Ramos Hernández 1979) o se relacionaron con suelos similares (Baumman 2000).

Para reclasificar los usos de suelo a las categorías que requiere SWAT se revisaron los datos proporcionados en el documento de Arnold y colaboradores (2012b) y se elaboró un mapa

que usa como base la información del mapa de uso de suelo y vegetación INEGI (2009) con detalles obtenidos de Amoroso (2010), Castillo (2010) y Plan de Gestión Integral de la cuenca del río Cahucán (2010).

El periodo de simulación fue desde 1961 hasta 2005 pero los resultados de la modelación se reportan a partir de 1965, porque se usaron 4 años para estabilizar las condiciones básicas del flujo y equilibrar los procesos hidrológicos (*warming-up*) (Abraham et al. 2007)

## 2.2. Análisis del clima, resultados de la modelación e inundaciones

Las variaciones en el tiempo y espacio de las precipitaciones son tan naturales como el flujo en los ríos y las riberas que siguen este patrón (Bandyopadhyay 2009). Bajo este criterio se analizó el comportamiento del clima en la cuenca y su variabilidad como base de análisis del comportamiento de las precipitaciones que inciden significativamente en los caudales y el funcionamiento del ciclo hidrológico en general. Se realiza una gráfica de los valores promedios de precipitación a nivel mensual para todas las estaciones usadas en la modelación, con la finalidad de definir los patrones de distribución de la precipitación en función de la altura de la cuenca.

Se recopiló información secundaria de las inundaciones registradas en la cuenca del río Cahoacán o en otras cuencas cercanas que estén dentro de la Costa de Chiapas. Esta información secundaria se comparó con los caudales medidos y los caudales modelados para definir la presencia de inundaciones. Se seleccionó el mes en el que se registra el mayor caudal de aquellos años que reportan inundaciones, eligiendo los siguientes:

### Cuadro 2. Periodos de las inundaciones más importantes desde 1961 hasta 2005 en la cuenca del río Cahoacán

Periodos de inundaciones	Fuente
<b>Septiembre 1969</b>	Murcia y Macías 2009
<b>Septiembre 1990</b>	Murcia y Macías 2009
<b>Septiembre 1998- Huracán Javier</b>	Murcia y Macías 2009, Mundo 2007
<b>Octubre 2005- Huracán Stan</b>	Murcia y Macías 2009, Servicio Geológico Mexicano s. f., Vásquez et al. 2009

Los resultados de las modelaciones realizadas con SWAT se comparan con la información de caudales diarios que se obtuvo a partir de la base de datos BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales). Se seleccionó la estación Cahoacán, que se ubica a 200 metros de distancia de la estación climática con el mismo nombre a una altura de 50 m.s.n.m. (CONAGUA e IMTA 2008). Existe información de caudales en la estación Cahoacán desde los años 40 hasta el 2005, sin embargo se eligieron los datos desde 1965 hasta 2005 por el periodo modelado en SWAT. Cabe señalar que a partir del año 1993 la información de caudales medidos es escasa y no se registran los datos de las inundaciones ocurridas después de ese año.

### 2.3. Calibración, análisis de variables

Se utilizó el programa SWAT-CUP creado por Eawag en el 2009 porque facilita una calibración automatizada (Arnold et al. 2012a). Dentro de SWAT-CUP se utilizó SUFI-2 porque permite combinar las optimizaciones con un análisis de incertidumbre y se puede manejar varios parámetros a la vez (Abbaspour et al. 2004). Este programa de dominio público dispone de diferentes aplicaciones para el análisis de sensibilidad, calibración, validación y análisis de incertidumbre e incluye enlaces con SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol y MCMC (Abbaspour 2013).

Dentro de SWAT-CUP se usó SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting versión 2) que requiere el rango inicial de valores para los parámetros a calibrar en un umbral de incertidumbre. Después de hacer varias simulaciones con diferentes valores de los parámetros calibrados, se obtiene un nuevo rango de datos derivados de la mejor simulación (Abbaspour et al. 2004, 2007)

La selección de los parámetros y los rangos a calibrar se basó en estudios similares y en las recomendaciones del manual de SWAT (Neistch et al. 2002, Tufford et al. 2013), considerando que los parámetros más sensibles en las planicies costeras pueden ser variables por la pendiente poco pronunciada, los suelos arenosos, el ancho de las zonas ribereñas y la baja pendiente de los ríos (Feyereisen et al. 2007).

La variable observada que se eligió fue solo el caudal de salida medido en comparación con el modelado. La función objetivo fue  $R^2$ , el peso que se le dio a los valores pequeños fue de 0,3 y el peso de los valores grandes fue de 0,7, ya que nos interesan los caudales de las inundaciones y no los caudales bajos. Se utilizaron 84 meses de calibración que van desde 1965 hasta 1971, que es un periodo similar a otros estudios de calibración y validación (Grassman et al. 2007, Jayakrishnan et al. 2005). La estadística usada para reportar el ajuste de la calibración es  $R^2$ , que varía en un rango de 0 a 1, siendo 1 el valor que representa una correlación perfecta y valores cercanos a este denotan que las predicciones del modelo replican los valores de la varianza observada (Arnold et al. 2012).

Después de obtener una adecuada calibración del modelo se realizó una comparación de diferentes variables entre el modelo calibrado y sin calibrar, para medir la repercusión de los cambios en los parámetros usados para calibrar.

Se utilizaron dos variables de análisis que se relacionan con el comportamiento de la cuenca respecto a la generación de caudales y forma de distribución de la precipitación. La primera variable se denomina rendimiento o producción de agua (*water yield*) y para definir esta variable a nivel de subcuencas, la fórmula que utiliza SWAT es:

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - pond\ abstractions$$

Donde *WYLD* es el rendimiento de agua, *SURQ* es la cantidad de escorrentía superficial que llega al cauce, *LATQ* es el flujo lateral, *GWQ* contribución del agua subterránea al caudal (flujo base), *TLOSS* es el agua que se pierde por recarga al acuífero y *pond abstractions* es

el almacenamiento (Arnold et al. 2012b). Este componente se graficó en diferentes escalas de análisis para diferenciar el aporte de cada subcuenca (Wang et al. 2008a).

La segunda variable de análisis que se puede obtener de las modelaciones con SWAT es el caudal de salida de cada subcuenca (*flow out*), que se obtiene como resultado de la modelación del promedio diario de escurrentía que sale en un periodo de tiempo (Arnold et al. 2012b). Los caudales generados en las HRUs se suman a nivel de subcuenca y se "enrutan" al sistema de ríos (Gassman et al. 2007), por lo que las subcuencas de la zona baja acumulan el caudal generado en la zona media y alta y presentan mayores valores de caudal

Tanto el rendimiento de agua como los caudales de salida se analizaron para los años que reportan inundaciones importantes (1969, 1990, 1998, 2005) y se utilizaron los datos de las modelaciones a nivel mensual para conocer el comportamiento de la cuenca durante las inundaciones reportadas en septiembre u octubre.

#### **2.4. Escenarios con zonas ribereñas**

Para conocer el aporte de las zonas ribereñas al control de las inundaciones, se estudiaron tres escenarios de manejo de la cuenca que son:

**Cuadro 3. Escenarios de modelación para análisis de la influencia de las zonas ribereñas**

<b>Escenarios</b>	
<b>Escenario 1</b>	Funcionamiento de la cuenca con modelo calibrado y bajo condiciones actuales sin cambios
<b>Escenario 2</b>	Funcionamiento de la cuenca con zonas ribereñas de 5 metros de ancho en pendientes menores a 20% usando el modelo calibrado
<b>Escenario 3</b>	Funcionamiento de la cuenca con zonas ribereñas de 30 metros de ancho en pendientes menores a 20% usando el modelo calibrado

El primer escenario se obtiene como resultado del proceso de modelación y calibración de la cuenca bajo las condiciones actuales. Se comparó el escenario calibrado de la cuenca con otro escenario de manejo que se relaciona directamente con el tema de este estudio, definiendo la presencia de zonas ribereñas boscosas y no boscosas que se pueden distribuir en aquellos sitios con pendientes menores a 20%. Se eligió este rango de pendientes porque se constató con las visitas de campo que los sitios con pendientes muy pronunciadas en la zona alta de la cuenca presentan dificultad para diferenciar la zona ribereña del bosque, debido al grado de pendiente y la estructura del cauce.

El mapa de las zonas ribereñas se elaboró con dos anchos de zonas ribereñas, uno de 5 metros y otro de 30 metros, que luego se cruza con la información de las pendientes, seleccionando solo los pixeles ubicados en pendientes menores a 20%. Esta información se

incluyó en el mapa de usos de suelo y se reclasificó como humedal boscoso (WETF) aquellas zonas que estén en pendientes mayores a 5% y como humedales no boscosos (WETN) a los que se encuentran por debajo de 5% de pendiente. Con estos cambios se realizó una nueva simulación para ver la influencia de las zonas ribereñas en el rendimiento de agua y la escorrentía.

Las zonas ribereñas pueden influir en la velocidad del flujo en la corriente, reduciéndola conforme sus características de densidad de vegetación (matorrales o bosques) que permite aumentar la resistencia al flujo (rugosidad) (Wood et. ál. 2007). Se buscó comprobar que estas funciones se expresaría en una disminución del caudal de salida de las cuencas y/o en diferente rendimiento de agua.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Configuración del modelo inicial y descripción de la cuenca**

El primer producto obtenido en la modelación con SWAT fue la subdivisión de la cuenca en 51 subcuencas que se utilizan para el análisis del comportamiento de las inundaciones y aquellos factores que pueden incidir en este fenómeno. La división de las subcuencas en HRUs solo se realiza para el análisis de escenarios. Este nivel de detalle es mayor a otros estudios realizados en la zona (Santacruz 2006, 2011).

Los usos de suelo de la cuenca influyen directamente en el comportamiento de las variables hidrológicas que caracterizan las inundaciones. Por esta razón se puso énfasis en la correlación de tipos de vegetación y usos de suelo presentes, para que sean reclasificados a un nivel de detalle adecuado en SWAT. Se eligió la categoría de café como especie representativa de los sistemas agroforestales, ya que este cultivo es uno de los principales cambios usos de suelo en la cuenca (Santacruz 2006, Castillo 2010). Para bosque mesófilo de montaña se eligió el uso de suelo "bosque mixto" que usa valores del *Quercus* y es uno de los géneros más comunes en este tipo de bosque (CONAFOR 2009). Entre el bosque mesófilo y las praderas de alta montaña existe una transición que está dominada por los géneros *Pinus* y *Quercus* (Amoroso 2010), por lo que la pequeña sección del uso de suelo de praderas se reclasificó como "bosque siempre verde" que se basa en la información del *Pinus*. Parte del uso de suelo de agricultura de riego con cultivos anuales se denominó como banano, el mango se reclasificó como huerta que se basa en información del árbol de manzana (*Malus domestica*), los manglares como humedales boscosos con base en el roble (*Quercus*) y el popal como humedales no boscosos con base en *Panicum virgatum* L. Se definió a los pastizales cultivados como pastura con base en la especie *Cynodon dactylon*. Para los otros usos de suelo agrícolas que no se tiene información precisa se usó una reclasificación genérica.

**Cuadro 4. Reclasificación de usos de suelo con categorías de SWAT para la cuenca del río Cahoacán**

<b>Usos de suelo</b>	<b>Reclasificado SWAT</b>
Sistemas agroforestales	Cafe- COFF
Bosque mesófilo de montaña	Bosques mixtos- FRST
Pradera de alta montaña	Bosques siempre verdes-FRSE
Manglar	Humedal boscoso- WETF
Agricultura de temporal cultivos anuales	Agrícola genérico de cultivos en hileras- AGRR
Agricultura de riego cultivos anuales	Tierras agrícolas genéricas- AGRL
Banano	Banano- BANA
Pastizal cultivado	Pastura- PAST
Popal	Humedal no boscoso- WETN
Mango	Huerta- ORCD
Asentamiento humano	Residencial de baja densidad- URLD
Zona urbana	Residencial de media baja densidad- URML

Los usos de suelo dominantes son: café, pasturas y agrícola genérico de cultivos en hileras, como se indica en el siguiente cuadro:

**Cuadro 5. Área y porcentaje que abarcan los usos de suelo modelados en la cuenca Cahoacán**

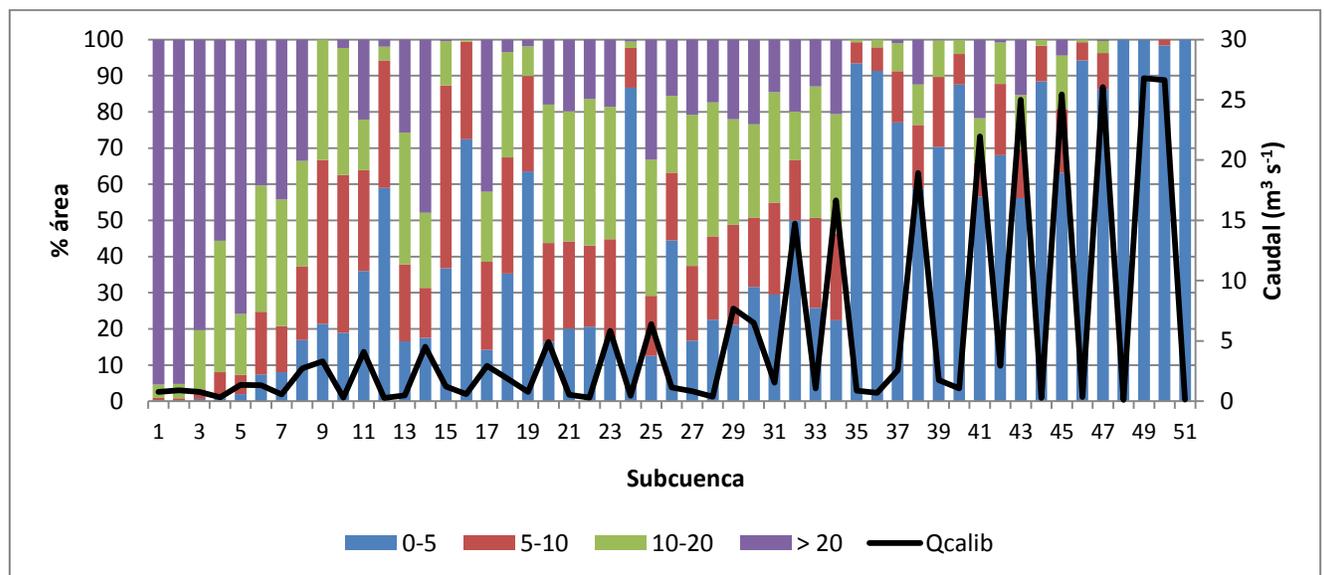
<b>Usos de suelo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Café- COFF	111,17	42,96
Bosques mixtos- FRST	10,76	4,16
Bosques siempre verdes-FRSE	0,25	0,10
Humedal boscoso- WETF	1,95	0,75
Agrícola genérico de cultivos en hileras- AGRR	39,57	15,29
Tierras agrícolas genéricas- AGRL	23,13	0,09
Banano- BANA	5,67	2,19
Pastura- PAST	69,48	26,85
Humedal no boscoso- WETN	0,13	0,05
Huerta- ORCD	0,72	0,28
Residencial de baja densidad- URLD	11,49	4,44
Residencial de media baja densidad- URML	7,31	2,83

Las variaciones de pendientes en la costa de Chiapas son importantes porque determinan la características topográficas que influyen en los patrones de precipitación, escurrimiento superficial, recarga de aguas subterráneas, dinámica de los sedimentos, presencia de los principales dominios ecológicos y usos de la tierra (De la Fuente et al. 2008). En la cuenca Cahoacán el 48,8% de su área tiene porcentajes de pendientes que varían entre 0 y 5% y se evidencian grandes cambios de pendiente superiores a 20% en un área de 52 km<sup>2</sup> (20% del área total de la cuenca).

En la figura 1 se grafica en barras el porcentaje del área de las subcuencas que se encuentra bajo distintos porcentajes de pendiente. La numeración de las subcuencas inicia en la zona alta de la cuenca y termina en la salida del cauce hacia el océano Pacífico. Se puede ver que las subcuencas altas que inician en el volcán Tacaná tienen alta pendiente y baja escorrentía hasta que llegan a las subcuencas 8 y 9, donde se juntan varios cauces que generan un caudal mayor.

Al llegar a la subcuenca 14 se han juntado varios cauces de la zona alta que suman caudales promedio de aproximadamente 5 m<sup>3</sup>/s en un sitio con grandes pendientes. Desde esta subcuenca que aún se encuentra en la zona alta y que tiene una gran área con pendientes mayores a 20%, se van acumulando caudales en el cauce principal que se presentan como picos en el gráfico de la figura 1.

En las subcuencas de la zona baja se puede evidenciar que se han acumulado grandes cantidades de agua en el cauce principal y se tienen pendientes que varían entre 0% y 5%, lo que significa un cambio drástico en una distancia lineal de aproximadamente 60 km. Al pasar de fuertes pendientes en las subcuencas altas, incluso en las subcuencas medias que tienen casi el 50% de su área en pendientes superiores al 10%, los caudales llegan con grandes velocidades a la zona costera que es casi plana.



**Figura 1. Porcentaje de área de las subcuencas bajo distintos porcentajes de pendiente (0-5%, 5-10%, 10-20% y más de 20%) comparado con los caudales de salida de cada subcuenca**

Otras características morfométricas que determinan la ocurrencia de inundaciones son: el valor de relación de elongación (0,70) que indica forma alargada y por este aspecto se generan intensas avenidas que ocasionan inundaciones en la cuenca baja; la pendiente y la longitud del cauce (84,32 km) producen un tiempo de concentración muy corto (48,3 minutos) (Castillo 2010).

La textura de los suelos permitió definir los grupos hidrológicos, obteniendo que la mayoría de los suelos de la cuenca son del grupo hidrológico A y solo los suelos de la parte alta son del grupo hidrológico D y por lo tanto generan alta escorrentía. El principal tipo de suelo corresponde a los acrisoles (61,2%), que son suelos con un grupo hidrológico tipo A y por lo tanto tienen alta capacidad de infiltración. Esto puede estar relacionado a la existencia del acuífero Soconusco que atraviesa varias cuencas de esta zona costera (CONAGUA 2002).

**Cuadro 6. Distribución espacial de los rangos de pendientes y tipos de suelo modelados en la cuenca Cahoacán**

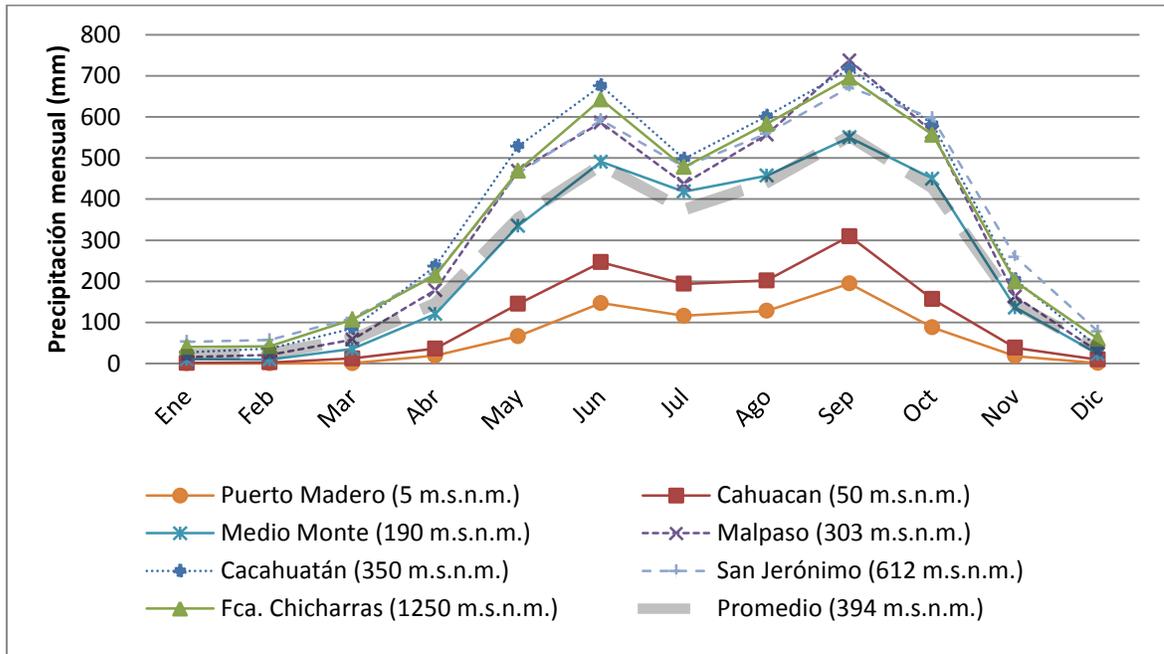
<b>Rango de pendientes (%)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>	<b>Tipos de suelo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
0-5	126,35	48,83	Acrisoles	158,45	61,24
5-10	39,81	15,39	Regosoles	19,19	7,42
10-20	40,57	15,68	Andosol- litosol	25,41	9,82
20 o más	52,01	20,10	Solonchak	0,48	0,19
			Andosol	51,53	19,91
			Suelo en zona urbana	3,67	1,42

### **3.2. Clima y variabilidad climática**

Aunque se conoce que existen grandes precipitaciones anuales promedio en la parte alta de la cuenca y la precipitación media anual disminuye en la zona costera (Santacruz 2011), se pudo evidenciar que esos cambios de la distribución de la precipitación no se presentan de forma gradual y que esta situación se cumple principalmente en la época lluviosa a partir de la estación Malpaso (Figura 2).

La figura 2 se realizó a partir del promedio desde 1961 hasta 2005 de la precipitación mensual acumulada de las siete estaciones utilizadas para la modelación en SWAT. Se evidenció que las precipitaciones en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre son muy similares en todas las estaciones, aunque se encuentren a diferentes alturas. Sin embargo, a partir de abril hasta noviembre se manifestaron diferencias en la cantidad de agua precipitada mensualmente.

Los meses con mayores precipitaciones son junio y septiembre, teniendo un periodo de disminución de precipitaciones entre julio y agosto. La precipitación promedio presentó una distribución similar a las precipitaciones mensuales medidas en la estación Medio Monte que se encuentra a 190 m.s.n.m. Durante los meses más lluviosos se puede observar que las estaciones Malpaso, Cacahuatán, San Jerónimo y Finca Chicharras presentan un comportamiento similar en la cantidad de agua precipitada.



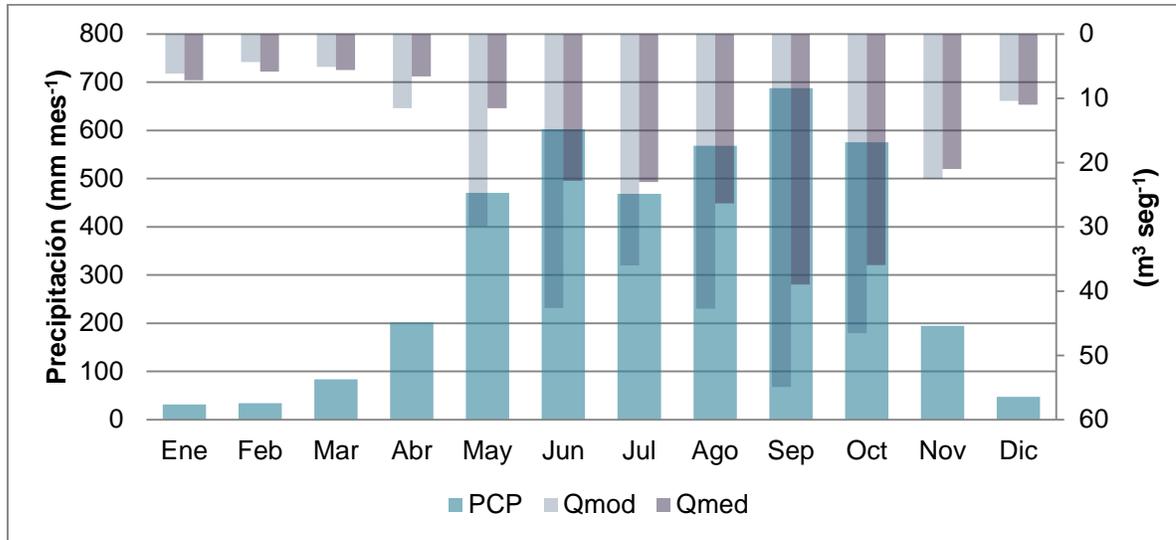
**Figura 2. Precipitación mensual acumulada (mm) medida en las estaciones climáticas usadas para modelar la cuenca del río Cahoacán.**

Las mínimas temperaturas se registraron en la estación Finca Chicharras, presentando valores de temperatura máxima promedio de 31,6°C en el mes de septiembre y temperatura mínima promedio de 15,8°C en el mes de enero. Las temperaturas más altas se registraron en la estación Cahoacán que se encuentra a 50 m.s.n.m., teniendo valores de temperatura máxima promedio de 36,5°C en el mes de abril y temperatura mínima promedio de 23,7°C en el mes de mayo.

### 3.3. Caudales e inundaciones en la cuenca

Los caudales de la cuenca tienen una distribución similar a las precipitaciones, presentando un periodo lluvioso con grandes caudales entre septiembre y octubre. Los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril tienen escasas precipitaciones y por lo tanto bajos caudales. Los caudales medidos y modelados se compararon con la cantidad de lluvia precipitada mensualmente (figura 3) y se pudo observar que el promedio mensual de los caudales medidos ( $Q_{med}$ ) es menor al promedio mensual de los caudales modelados sin calibración ( $Q_{mod}$ ). Esto puede estar relacionado a la falta de datos de los caudales medidos a partir del año 1993, como se evidencia en la figura 5. También se debe señalar que las

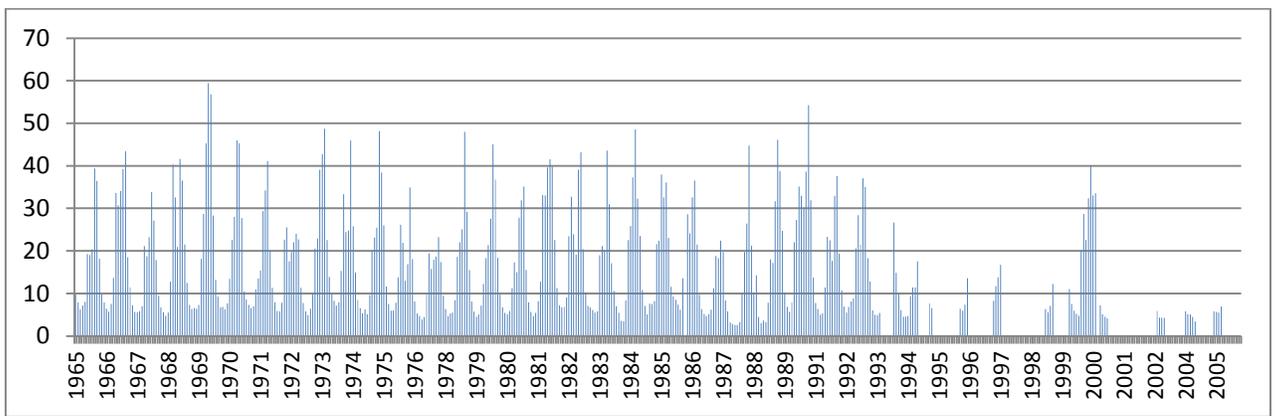
lluvias ocurridas durante el huracán Stan alcanzaron periodos de retorno de 100 años (Murcia y Macías 2009) y derivaron en un fenómeno hidrometeorológico atípico en este periodo de análisis que puede sesgar los promedios.



**Figura 3. Comparación de la precipitación mensual acumulada PCP (mm mes<sup>-1</sup>) con los caudales modelados Qmod (m<sup>3</sup> seg<sup>-1</sup>) y los caudales medidos Qmed (m<sup>3</sup> seg<sup>-1</sup>).**

La época lluviosa que inicia en mayo y termina en noviembre, presentó caudales proporcionales a la cantidad de lluvia en cada uno de los meses. Este patrón de caudales mensuales, los promedios mensuales y los periodos lluviosos- secos son consistentes con lo indicado por Baumann (2000).

En la figura 4 se evidenció que los caudales medidos reportan épocas de alto caudal por lo menos una vez al año, que coincide con los meses de septiembre. También se pudo ratificar que en los años 1969 y 1990 se registraron caudales con los valores altos. El caudal promedio de estos años con registro es de 16,73 m<sup>3</sup>/s. Los valores medidos después de 1993 correspondieron principalmente a los caudales para los meses con poca lluvia.



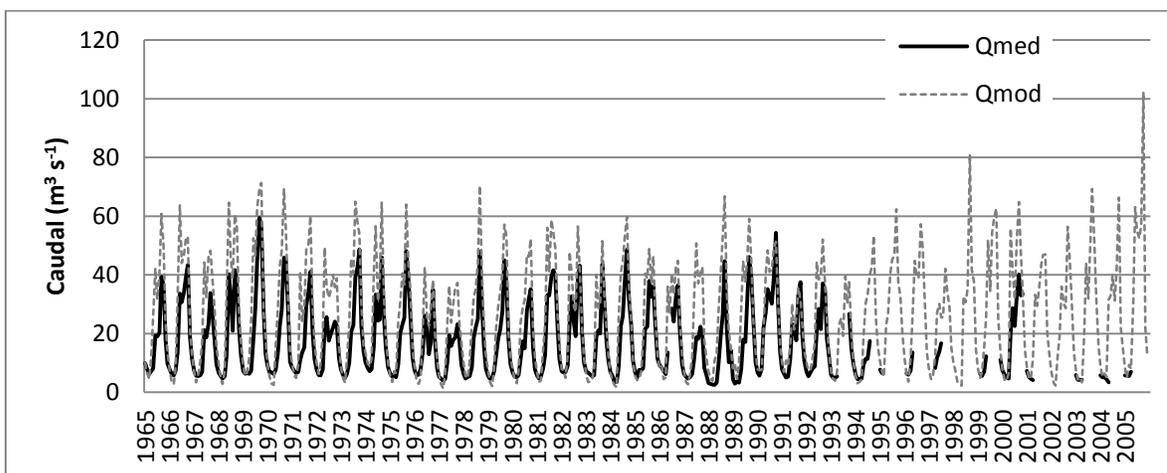
**Figura 4. Caudales mensuales medidos ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en la estación Cahuacán desde 1965 hasta 2005.**

Elaborado con información de CONAGUA e IMTA 2008

Las inundaciones en las cuencas costeras de Chiapas se pueden derivar de varios factores, entre ellos los eventos extremos como los huracanes y precipitaciones con alta intensidad. Los eventos extremos registrados en los últimos años se relacionaron principalmente a huracanes, entre los cuales se destacan los eventos de 1998 y 2005 (Murcia y Macías 2009, Mundo 2007).

Los caudales modelados (también llamados "*flow out*") por SWAT denotaron varios años con valores altos que están relacionados a las inundaciones registradas históricamente. La figura 5 presenta los caudales modelados mensualmente y el promedio mensual de los caudales medidos, con la finalidad de identificar los eventos que originaron inundaciones importantes y que se encuentran descritas en la bibliografía.

La inundación ocurrida en el año 1969 (Murcia y Macías 2009) se pudo evidenciar en los caudales mensuales modelados y medidos que alcanzan los  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  y aproximadamente  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. A finales de 1990 se produce un pico mensual de caudal medido que corresponde a  $54 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  el caudal modelado. Aunque no se contó con datos medidos de los caudales, se tiene registros bibliográficos de las inundaciones sucedidas en el año 1998 (Murcia y Macías 2009, Mundo 2007) y el modelo permitió evidenciar que el caudal alcanza los  $82 \text{ m}^3/\text{s}$  (modelado). Para las inundaciones sucedidas en el año 2005 por el impacto del huracán Stan no se contó con información de caudales medidos pero se conoce que sus efectos fueron mayores al evento del año 1998 (Murcia y Macías 2009, Servicio Geológico Mexicano s. f., Vásquez et al. 2009) y se obtuvo un gran caudal modelado que alcanza los  $102 \text{ m}^3/\text{s}$ .



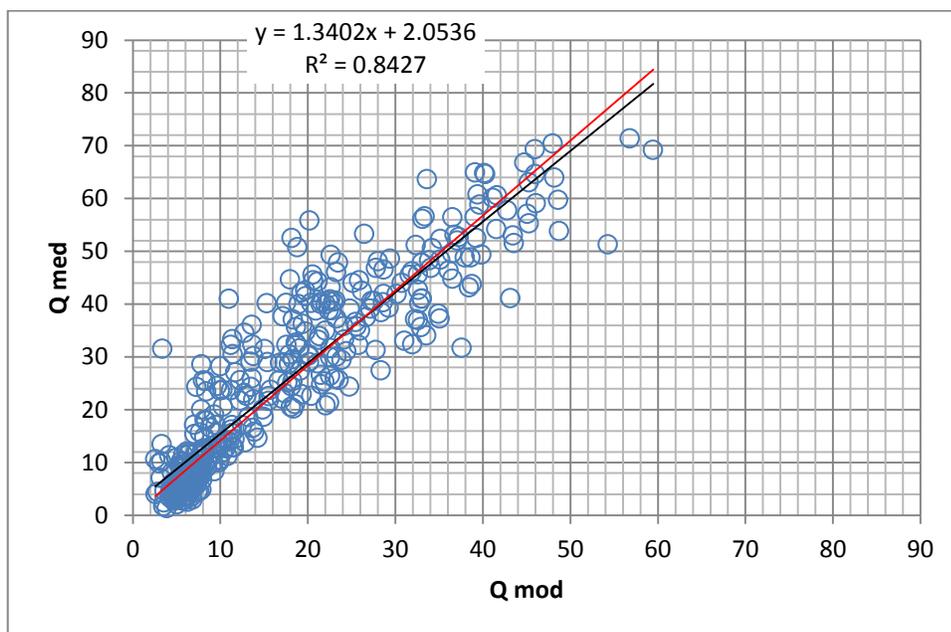
**Figura 5. Caudales mensuales desde 1965 hasta 2005 de la cuenca del río Cahoacán.**

***Qmod* respresenta los caudales modelados sin calibrar en SWAT y *Qmed* representa a los caudales medidos en la estación Cahoacán.**

Los caudales modelados sin calibrar (*Qmod*) y los caudales medidos (*Qmed*) representan el volumen de agua por segundo que fluye por el cauce principal de una de las subcuencas ubicadas en la zona baja de la cuenca del río Cahoacán. Sin embargo, los caudales de salida de cada subcuenca tienen comportamientos distintos que pueden derivar o no en inundaciones.

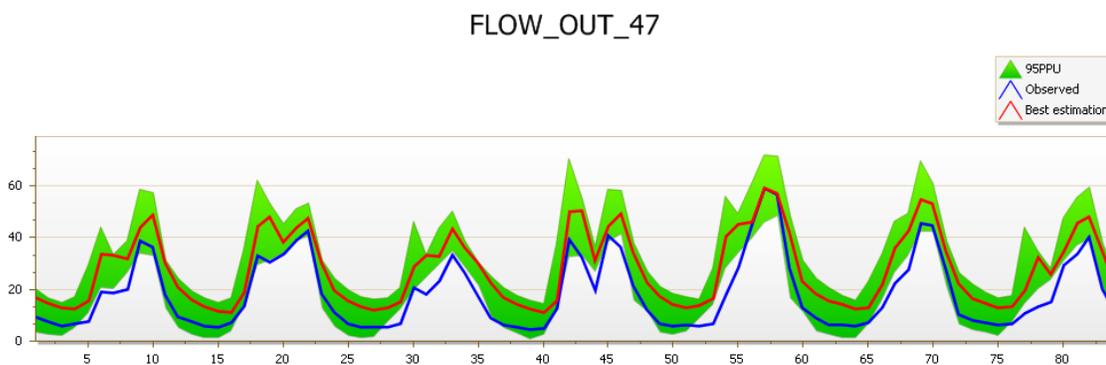
### **3.4. Calibración del modelo**

Los resultados de la primera modelación demostraron un buen ajuste inicial de los caudales medidos y los caudales modelados. Sin embargo, el mejor ajuste de las simulaciones se dio en los valores de caudal bajo. Como se muestra en la figura 6, el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) es de 0,84 antes de realizar la calibración.



**Figura 6. Regresión lineal de los caudales medidos en la estación Cahoacán y los caudales modelados en SWAT antes de la calibración.**

Los resultados del proceso de calibración del modelo demostraron un buen ajuste de los caudales modelados en función de los caudales medidos. En este caso se obtuvo un valor de  $R^2$  igual a 0,92 y se ajustan mejor los valores de los caudales altos.

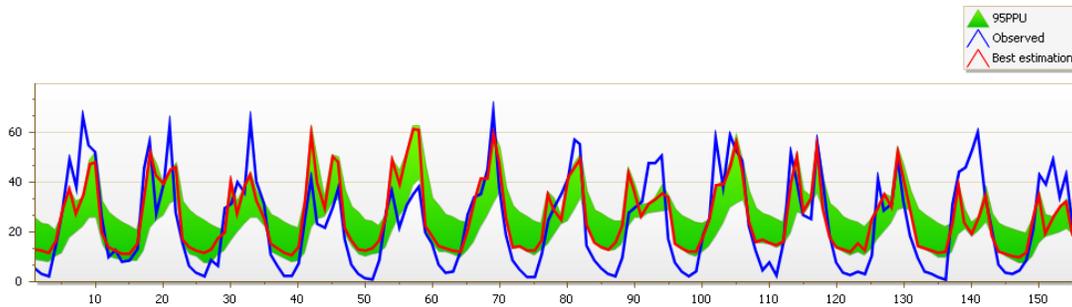


**Figura 7. Calibración de los caudales medidos y modelados desde 1965 a 1971.**

La figura 7 compara los caudales medidos con los caudales modelados en el periodo 1965-1971 como resultado de la calibración. Los parámetros que denotan mayor sensibilidad en este proceso de calibración fueron: CN2, ALPHA\_BF, GW\_DELAY, GWREVAP, REVAPMN, ESCO Y CH\_K2.

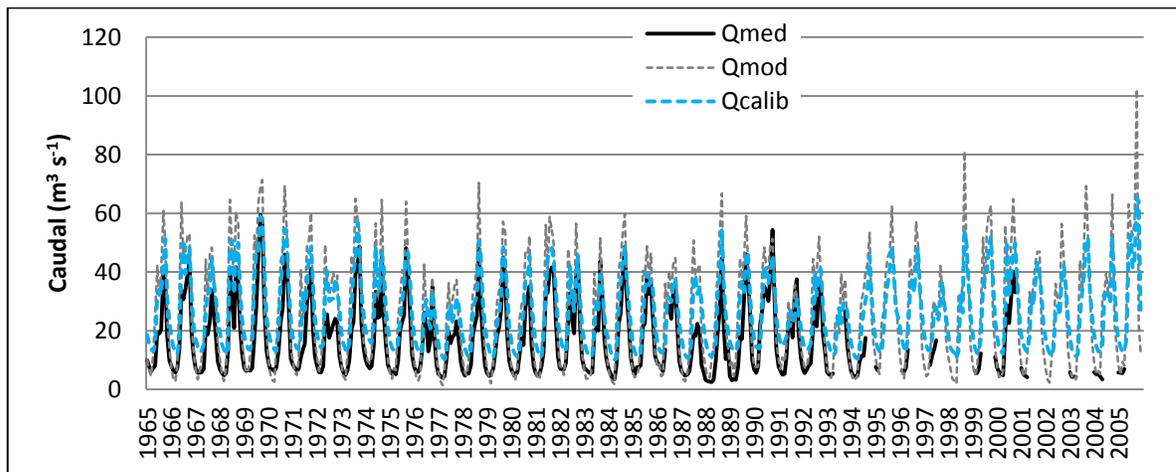
Con los nuevos rangos establecidos en el proceso de calibración se obtiene la figura 8 que expone los resultados del proceso de validación en el periodo de 1973-1985 y se obtiene un  $R^2$  igual a 0,66.

## FLOW\_OUT\_47



**Figura 8. Validación de los caudales medidos y modelados desde 1973 a 1985.**

La figura 9 compara los caudales medidos en la estación hidrométrica Cahoacán ( $Q_{med}$ ) ( $m^3 s^{-1}$ ), con los caudales modelados sin calibración ( $Q_{mod}$ ) ( $m^3 s^{-1}$ ) y los caudales resultantes de la simulación que incluye los parámetros calibrados de acuerdo a los mejores valores estimados con SUFI-2 ( $Q_{calib}$ ) ( $m^3 s^{-1}$ ). Se observa que existió una mejor simulación de los caudales generados en la época lluviosa y que los valores simulados con calibración disminuyen drásticamente. También se puede ver que este proceso de calibración alteró los caudales de las épocas secas, teniendo una sobreestimación de estos caudales en la mayoría de los años.



**Figura 9. Comparación de caudales medidos ( $Q_{med}$ ), caudales modelados sin calibración ( $Q_{mod}$ ) y caudales modelados después de la calibración ( $Q_{calib}$ ) ( $m^3 s^{-1}$ )**

Ambos gráficos indican un buen ajuste de la escorrentía modelada y se puede proceder al análisis de valores más ajustados de rendimiento de agua (*water yield*) y los caudales de salida en septiembre de 1969, 1990, 1998 y octubre de 2005.

### **3.5. Análisis de las variables de interés para el control de las inundaciones**

En las subcuencas donde predominan los ecosistemas agroforestales (43% del área de la cuenca) se presentaron grandes rendimientos de agua durante las inundaciones de 1998 y 2005. Las subcuencas que tienen sistemas agroforestales y bosque mesófilo de montaña presentan el mayor rendimiento de agua en el año 2005, alcanzando valores entre 800 y 1450 mm/mes. En estas subcuencas también se presentaron grandes precipitaciones en los eventos mencionados y predominan las pendientes superiores a 20%.

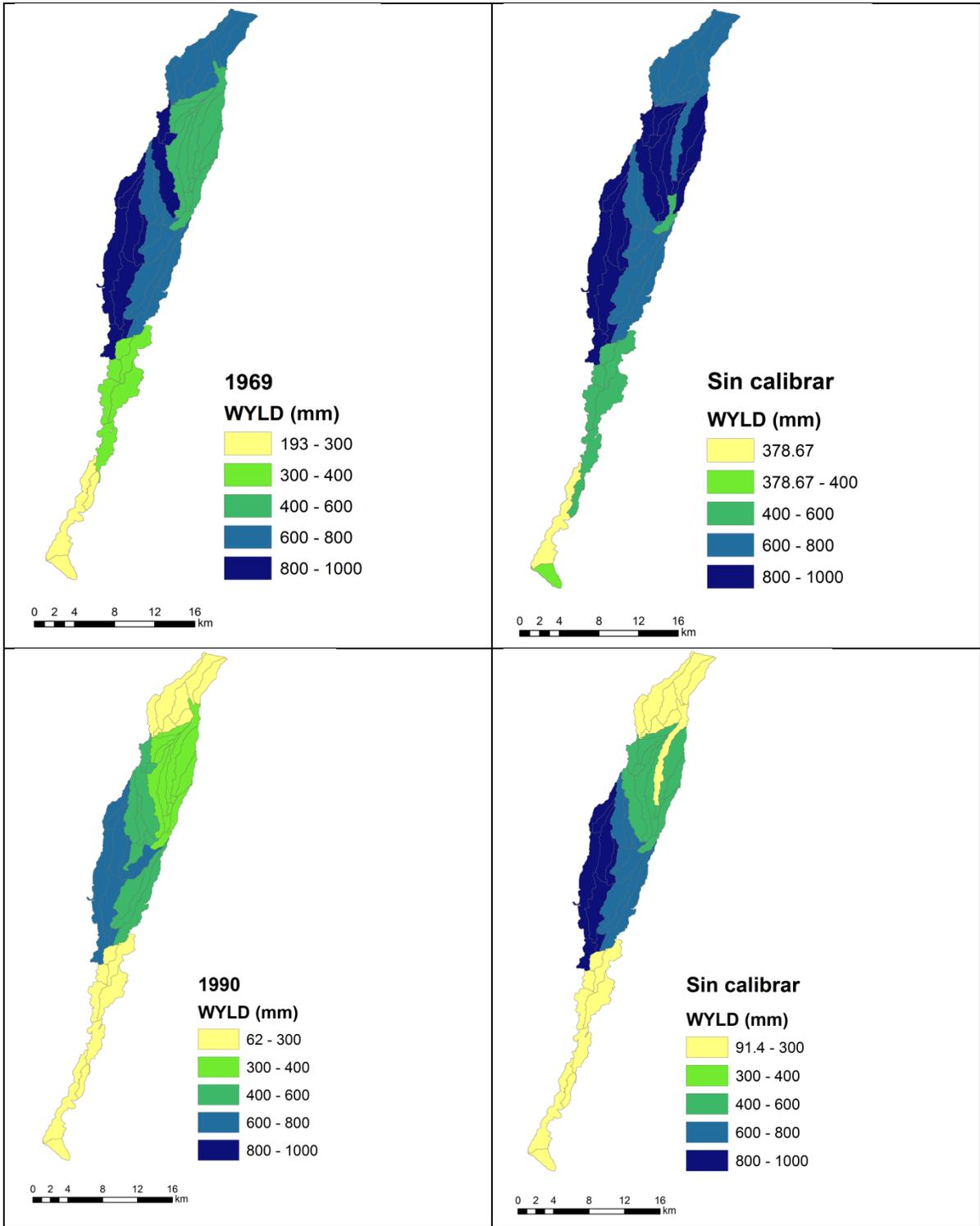
Las subcuencas que rodean a la ciudad de Tapachula y el poblado de Cacahuatán también presentan grandes rendimientos de agua. En el año 1998 las subcuencas cercanas a Tapachula mostraron rendimientos entre 800 y 1000 mm/mes y en el evento de octubre de 2005 este rendimiento aumento en el rango de 1000 a 1450 mm mensuales.

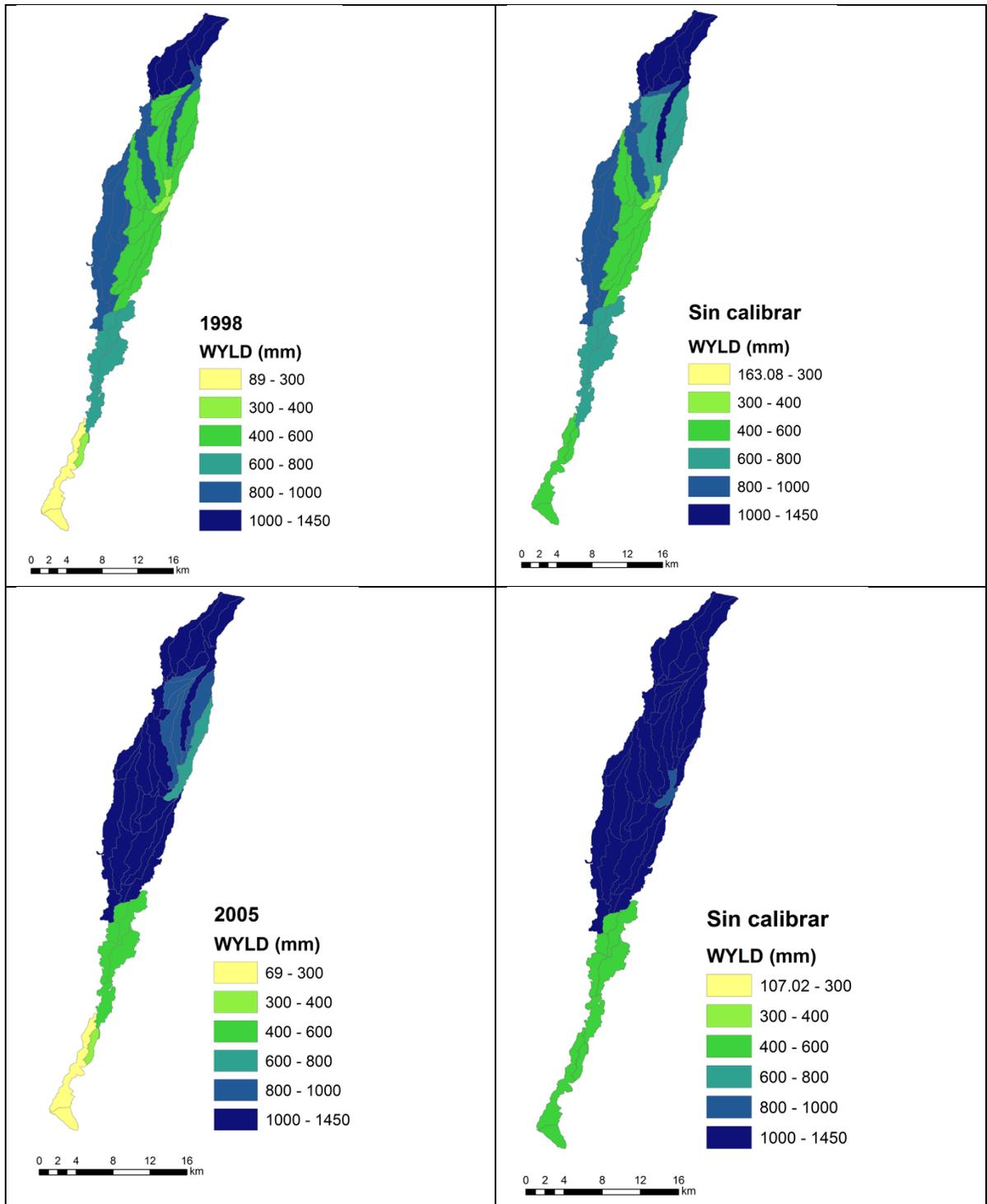
El rendimiento de agua modelado sin calibración y con calibración cambia drásticamente, ya que se puede evidenciar que hay una sobreestimación en el primer caso. En la figura 10 se puede ver la comparación de rendimientos de agua para los meses de septiembre de 1969, 1990 y 1998 y el mes de octubre de 2005. Estos resultados confirman la importancia del proceso de calibración de los modelos.

En el año 1969 se evidenciaron grandes rendimientos en la cuenca media, principalmente en las subcuencas donde se ubica la ciudad de Tapachula. Las subcuencas cercanas al volcán Tacaná tuvieron alta producción de agua, por lo que existe un aporte general de la cuenca media-alta al proceso de inundación generado ese año.

En el año 1990 se evidenció que las subcuencas cercanas a Tapachula fueron las que más contribuyeron con el rendimiento de agua. En este caso las subcuencas de la zona alta no tuvieron mayor incidencia en el rendimiento de agua, por lo que el fenómeno de inundación de ese año estuvo relacionado con la dinámica de la cuenca media.

Para el periodo de inundación del año 1998 se pudo ver que las subcuencas de la parte alta tienen el mayor rendimiento de agua que puede alcanzar hasta los 1450 mm. Estos altos valores de rendimiento no se habían evidenciado en procesos de inundación antes de 1998. En la comparación de estos mapas (calibrado y sin calibrar) se puede ver que el modelo sobreestimó el aporte de las cuencas medias al rendimiento de agua y que bajo el proceso de calibración, la mayoría de esta cuencas tiene un rendimiento entre 400 y 600 mm de agua durante el mes de septiembre de 1998. De igual manera se evidencia que las subcuencas bajas tienen un menor aporte al que se había planteado inicialmente por el modelo.





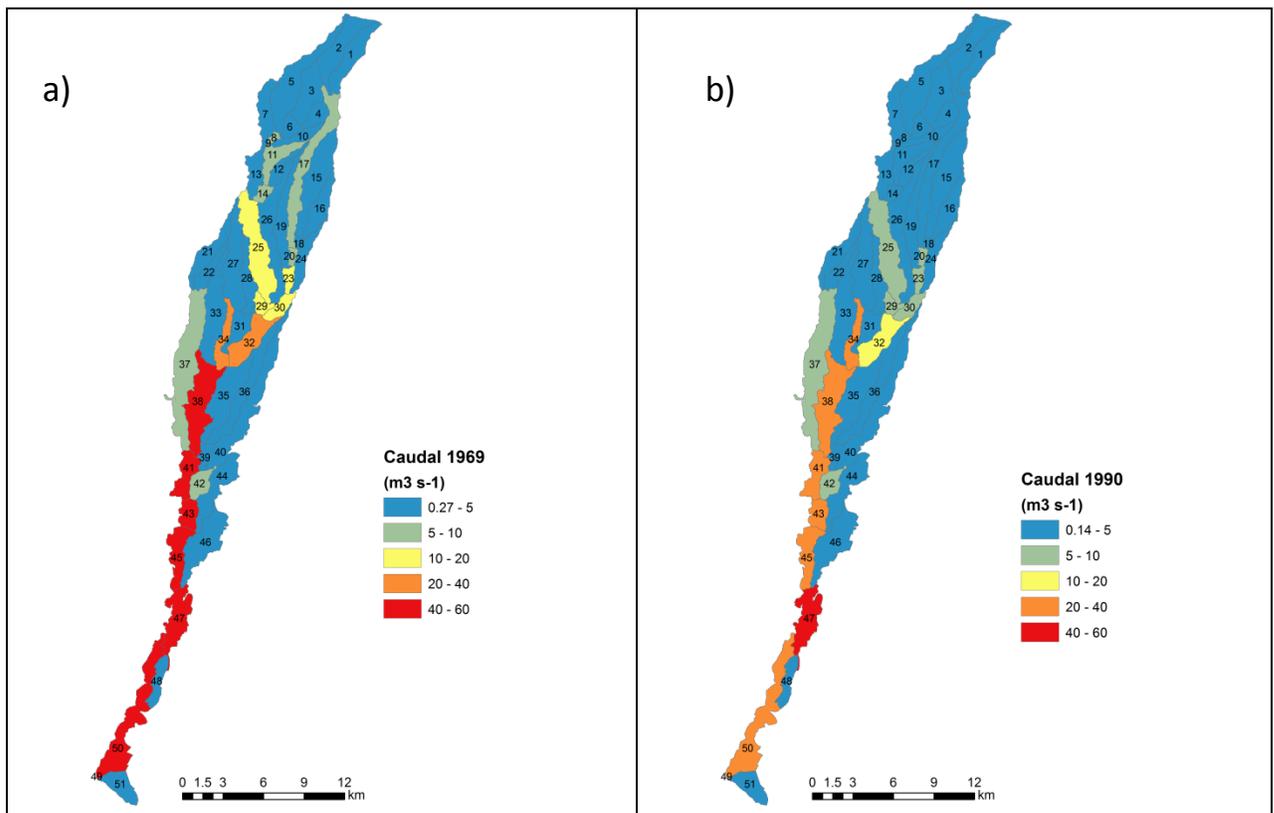
**Figura 10. Rendimientos de agua por subcuencas en los meses de septiembre de 1969, 1990 y 1998 y octubre de 2005 bajo modelación calibrada y sin calibrar.**

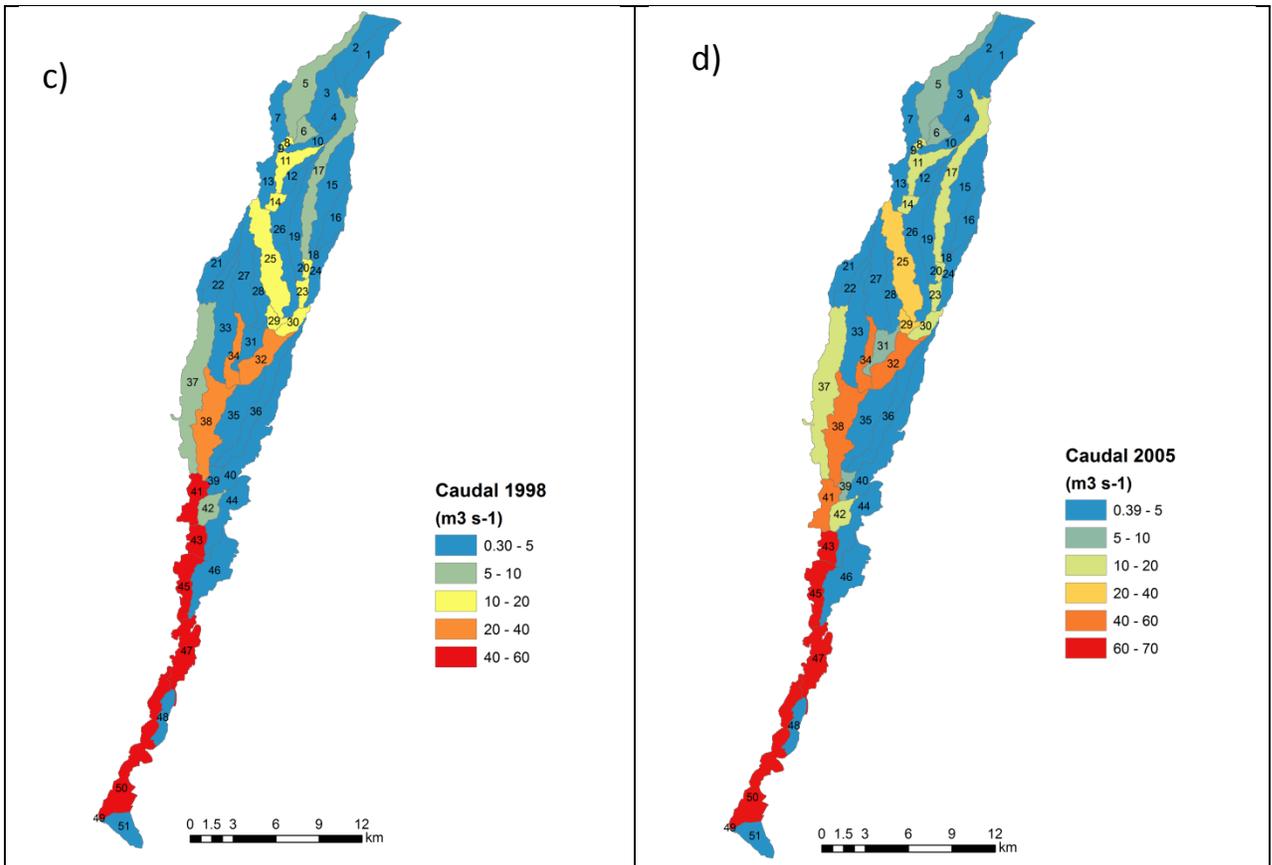
Los caudales de salida de las subcuencas se analizan para cada año que presenta inundaciones (figura 11). Algunas intercuenas que son el espacio de encuentro de varias subcuencas, acumulan gran cantidad de caudal aunque tengan un área pequeña (subcuencas 8 y 9). Otras cuencas grandes presentan caudales importantes que aportan al proceso de inundación (subcuencas 17, 25, 37).

Se evidencia que el comportamiento de las subcuencas en los años 1998 y 2005 es diferente a las inundaciones registradas anteriormente. Es notorio el cambio de caudales de salida de las subcuencas 5 y 6 que se encuentran en la parte alta de la cuenca y que tienen un gasto entre 5 y 10 m<sup>3</sup>/s, a diferencia de los eventos anteriores que presentaban valores menores a 5m<sup>3</sup>/s. Estos caudales se obtienen de un promedio mensual de la modelación con SWAT, por lo que los caudales diarios registrados en estas subcuencas pueden ser mayores.

En las subcuencas 17, 25 y 37 se registra un aumento de los caudales de salida para el evento de octubre de 2005, alcanzando caudales promedio que sobrepasan los 10 m<sup>3</sup>/s. En los eventos anteriores no se alcanzó estos caudales en dichas subcuencas.

Se evidencia que las subcuencas de la parte baja de la cuenca acumulan gran cantidad de agua que proviene de las subcuencas de la zona media y alta, teniendo que la suma de todos los aportes menores a 5 m<sup>3</sup>/s son los que generan grandes caudales en la parte baja. A partir de la subcuenca 38, se tiene una gran acumulación de caudales promedio que sobrepasan los 40 m<sup>3</sup>/s.





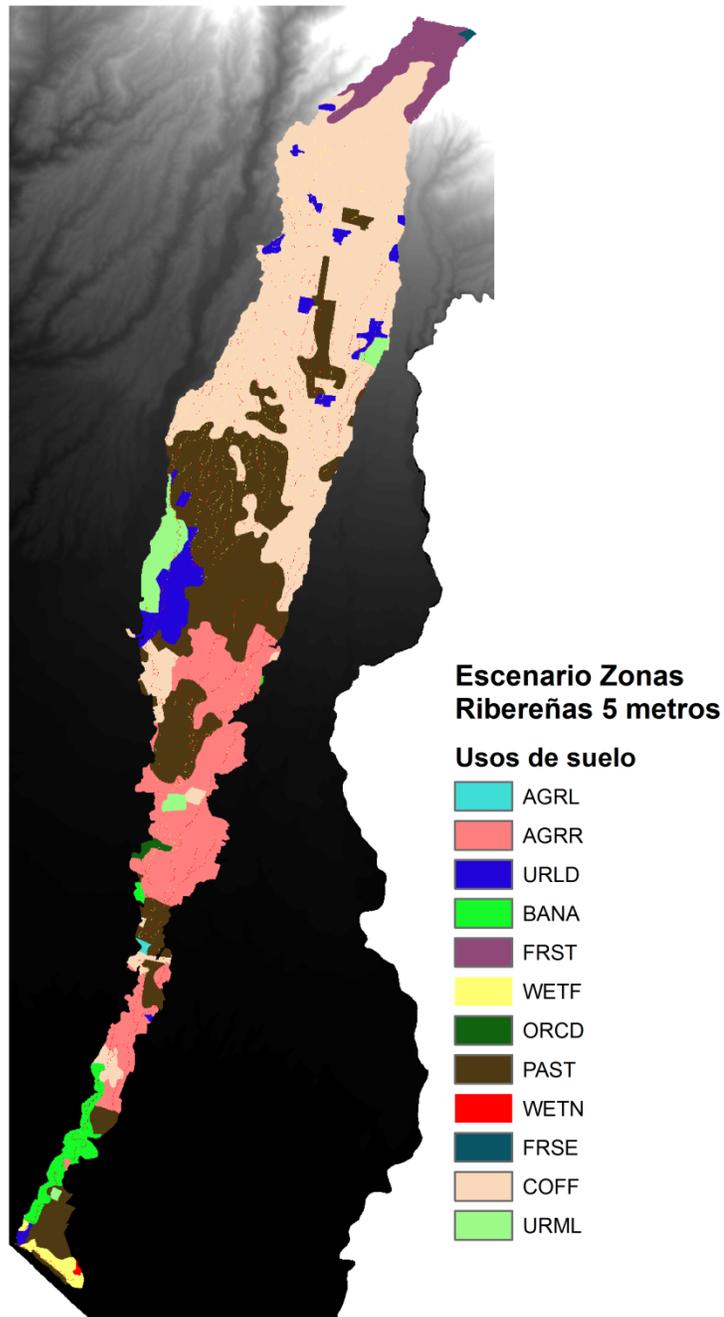
**Figura 11. Caudales de salida promedio ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en septiembre de 1969 (a), septiembre de 1990 (b), septiembre 1998 (c) y octubre de 2005 (d).**

### 3.6. Simulación de escenarios con zonas ribereñas

El primer resultado de los escenarios es la distribución de los usos de suelo cuando las zonas ribereñas presentan un ancho de 5 metros y otro mapa de usos de suelo con zonas ribereñas de 30 metros de ancho.

Cuando se establece un ancho constante de 5 metros para pendientes menores a 20%, el área ocupada por las zonas ribereñas es de  $1,78 \text{ km}^2$  con humedales boscosos y  $1,86 \text{ km}^2$  con humedales no boscosos. El resto de humedales corresponde a la zona de manglar y al popal, teniendo que en este escenario los humedales ocupan el 2,21% del área total de la cuenca.

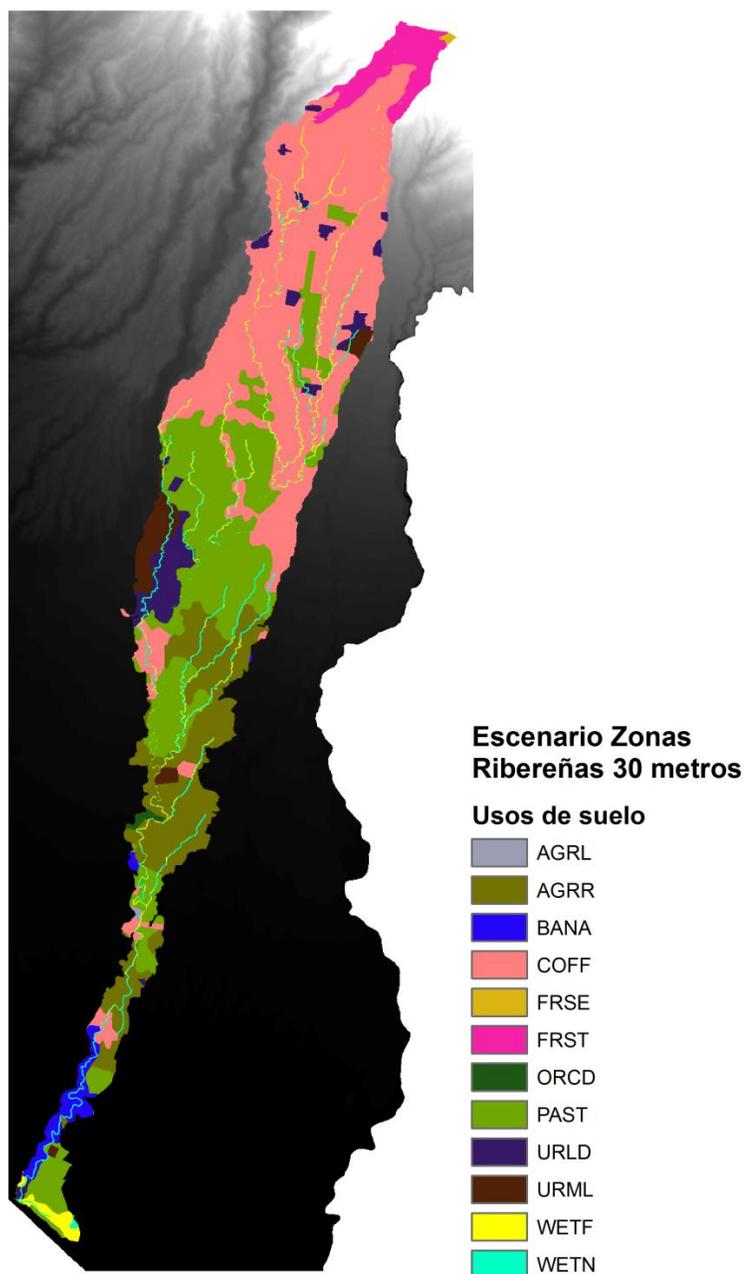
Como se puede ver en la figura 12, el ancho de la zona ribereña es difícil distinguir dentro del paisaje, ya que los usos de suelo predominantes entorno a las zonas ribereñas son café, pasturas y agrícola genérico. La estructura de la zona ribereña denota que no existe continuidad longitudinal (a lo largo de la cuenca) bajo el escenario de 5 metros y que se pueden alternar entre humedales no forestales y forestales.



**Figura 12. Mapa de uso de suelo con zonas ribereñas de 5 metros de ancho (humedales boscosos- WETF y humedales no boscosos- WETN)**

En la figura 13 se presenta el escenario de zonas ribereñas con 30 metros de ancho que varían de acuerdo al porcentaje de pendiente. Se evidencia que los humedales boscosos ocupan un área de 4,71 km<sup>2</sup> y 6,36 km<sup>2</sup> están cubiertos con humedales no boscosos. El área ocupada por los humedales de la cuenca, que incluye manglares, popal y las zonas ribereñas de 30 metros de ancho, representa el 5,08%. Bajo este escenario los humedales ocupan 2, 87% más área que el escenario anterior.

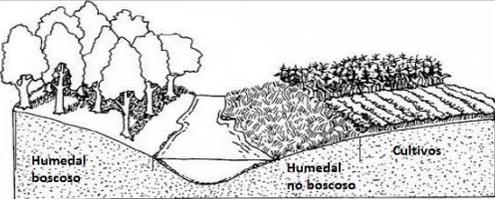
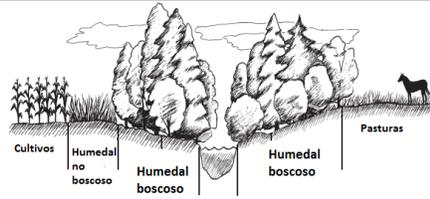
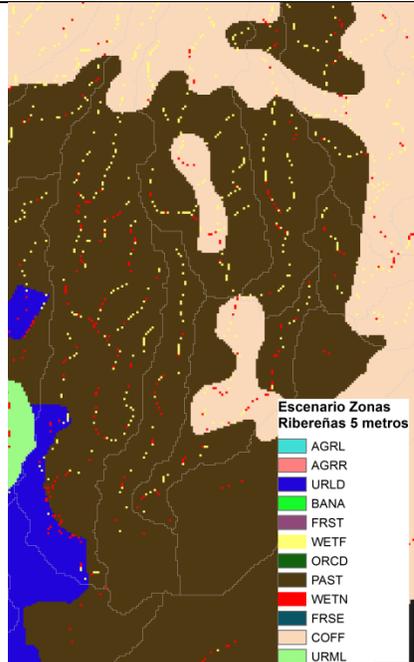
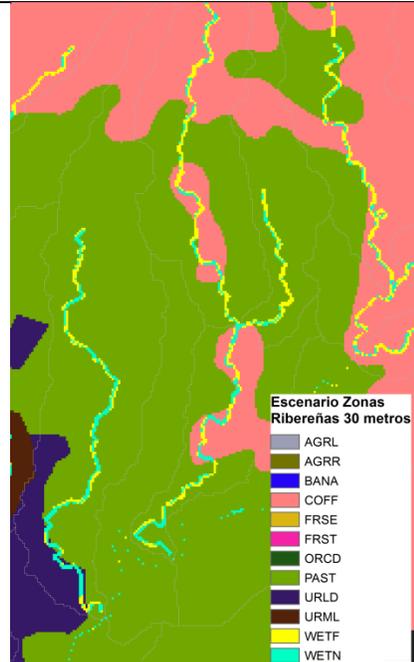
Las zonas ribereñas de 30 metros de ancho tienen mayor continuidad longitudinal que el escenario anterior. Se puede ver que se alternan zonas con riberas boscosas y no boscosas, sin embargo, tienen más continuidad en el paisaje de la cuenca media- alta las zonas ribereñas boscosas y en la cuenca baja hay más zonas ribereñas no boscosas. Esto se debe a las bajas pendientes entorno al río en la cuenca baja, lo que significa que a los 30 metros de distancia del cauce principal hay una gran posibilidad de crecidas e inundaciones, por lo que sus zonas ribereñas tienen una dinámica diferente a las riberas de la zona media y alta de la cuenca y su vegetación debe estar asociada a los procesos de inundación más recurrentes.



**Figura 13. Mapa de uso de suelo con zonas ribereñas de 30 metros de ancho (Humedales boscosos-WETF y humedales no boscosos- WETN)**

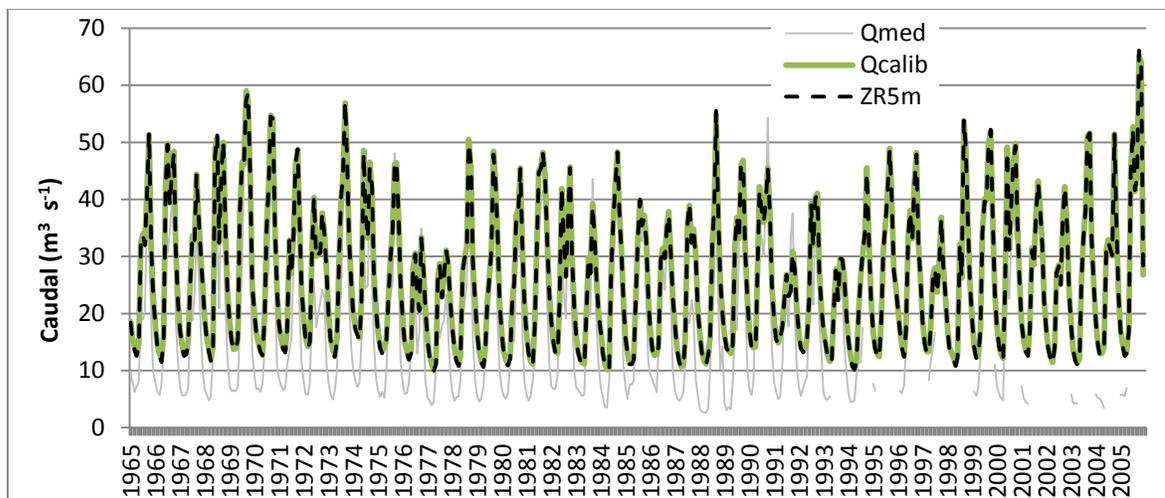
Con los resultados anteriores se puede obtener un modelo conceptual de las zonas ribereñas bajo distintos escenarios con anchos de 5 y 30 metros que varían según el grado de pendiente. En el cuadro 7 se presenta el modelo conceptual que se propone de los resultados de esta investigación:

**Cuadro 7. Modelo conceptual de las zonas ribereñas con 5 y 30 metros de ancho**

	<b>Escenario 5m</b>	<b>Escenario 30m</b>
<b>Composición horizontal de la zona ribereña</b>	 <p>Las riberas pueden tener humedales boscosos en pendientes mayores a 5% o humedales no boscosos en pendientes menores a 5%. El ancho de esta franja solo permite un tipo de humedal alrededor del cauce.</p>	 <p>Al cubrir un área mayor alrededor del cauce se pueden presentar humedales boscosos y no boscosos dependiendo de la pendiente. En la cuenca baja normalmente hay humedales no boscosos por las bajas pendientes y las dinámicas del río que ocupan las riberas.</p>
<b>Continuidad longitudinal y conectividad</b>	 <p>Fraccionamiento de las zonas ribereñas y se alternan los humedales boscosos y no boscosos. Gran cantidad de parches de zonas ribereñas con poca continuidad.</p>	 <p>Buena continuidad longitudinal de los humedales boscosos y no boscosos. Pocos parches distribuidos a lo largo de la cuenca.</p>

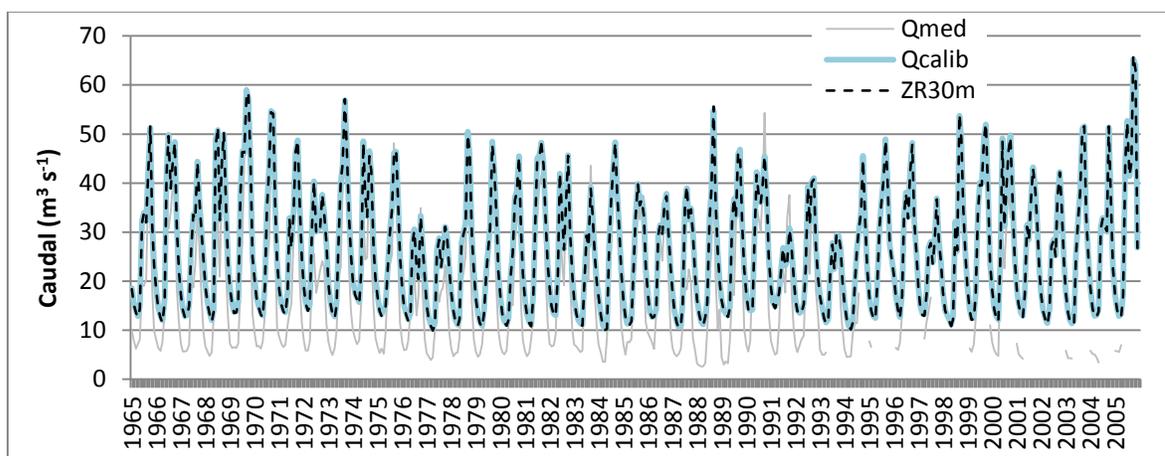
### 3.6.1. Funcionamiento de la escorrentía bajo distintos escenarios

En la primera simulación del escenario con zonas ribereñas de 5 metros de ancho, no se obtienen cambios importantes en los caudales de salida de la cuenca en general. Esto significa que la presencia de las zonas ribereñas de 5 metros a lo largo de la cuenca, no genera cambios en los caudales totales de la cuenca como se evidencia en la figura 14:



**Figura 14. Comparación de caudales medidos (Qmed), caudales calibrados (Qcalib) y caudales modelados con zonas ribereñas con 5 metros de ancho (ZR5m).**

En la figura 15 se observan los resultados de la modelación bajo el escenario con zonas ribereñas de 30 metros a cada lado del cauce (ZR30m). Se comparan los caudales de este escenario con los caudales medidos (Qmed) y los caudales calibrados (Qcalib). El resultado de esta simulación indica que el caudal de salida de la cuenca no cambia por la presencia de las zonas ribereñas con ancho de 30 metros.



**Figura 15. Comparación de caudales medidos (Qmed), caudales calibrados (Qcalib) y caudales modelados con zonas ribereñas con 30 metros de ancho (ZR30m).**

Para verificar que los caudales de salida a nivel de subcuencas tampoco sufrieron alteraciones con la presencia de las zonas ribereñas, se comparó el caudal con zonas ribereñas de 5 metros y 30 metros, obteniendo diferencias mínimas entre ambos escenarios. El promedio de la diferencia fue de 0,000019 m<sup>3</sup>/s más cuando las zonas ribereñas tienen 5 metros de ancho.

### 3.6.2. Rendimiento de agua y otras variables a nivel de subcuenca

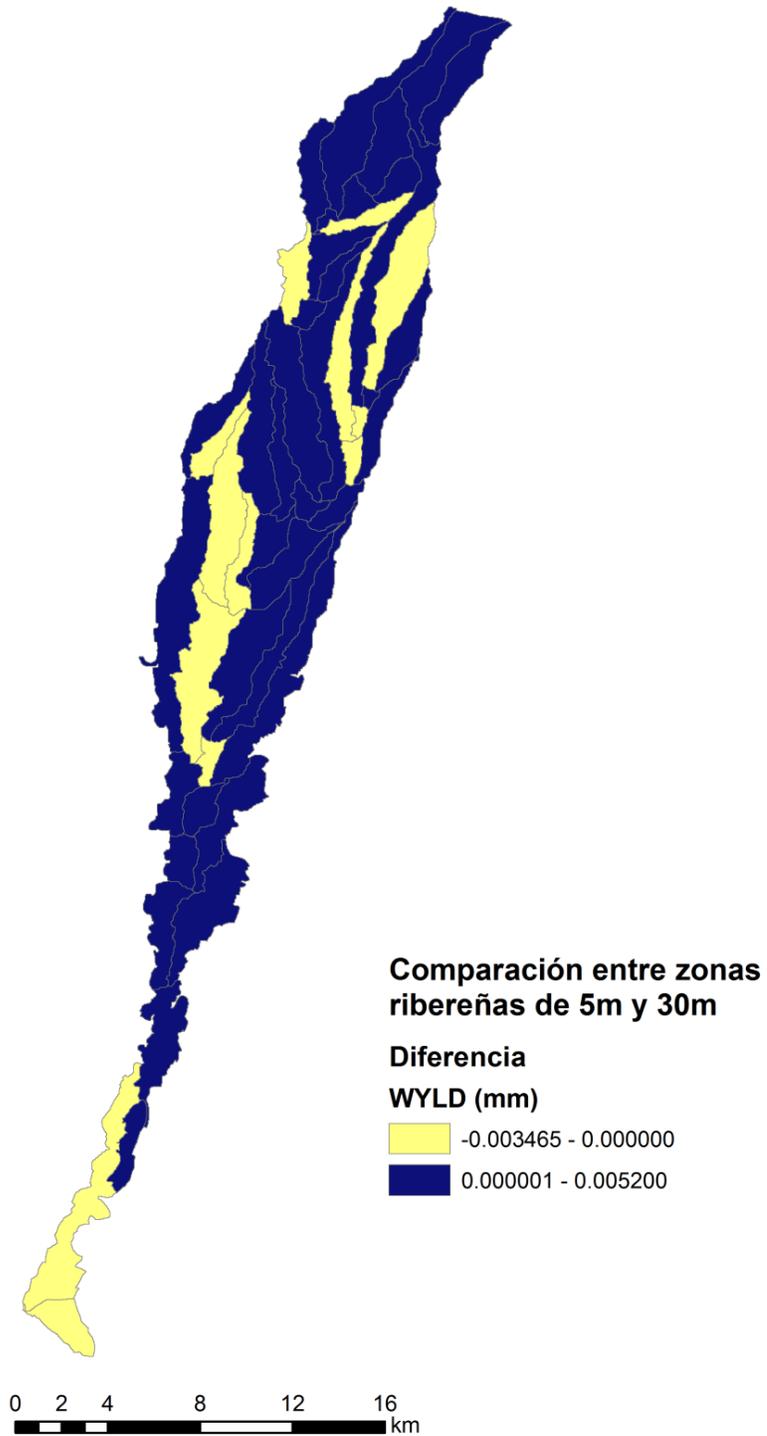
Aunque no se generan cambios importantes en los caudales de salida de la cuenca, se comparan los promedios de rendimiento de agua por subcuenca estudiada para ver el efecto de las zonas ribereñas con diferentes anchos. Como se muestra en la figura 16, existe un pequeño cambio en el rendimiento de agua cuando las zonas ribereñas tienen anchos distintos. Cuando se compara el escenario de zonas ribereñas con 5 metros de ancho con las zonas ribereñas de 30 metros, se obtiene que hay un mayor rendimiento de agua en casi todas las subcuencas bajo el primer escenario, sin embargo, la mayor diferencia es de 0,005 mm de lámina de agua que es insignificante frente a la cantidad de agua producida por las subcuencas.

Para comparar los cambios entre el modelo calibrado y los escenarios con zonas ribereñas, se calcula la diferencia entre las variables de interés obteniendo que en todos los casos aumenta WYLD, SURQ Y GW\_Q. El aumento en estas variables es muy bajo en comparación con los valores totales que se obtuvieron en el modelo anterior.

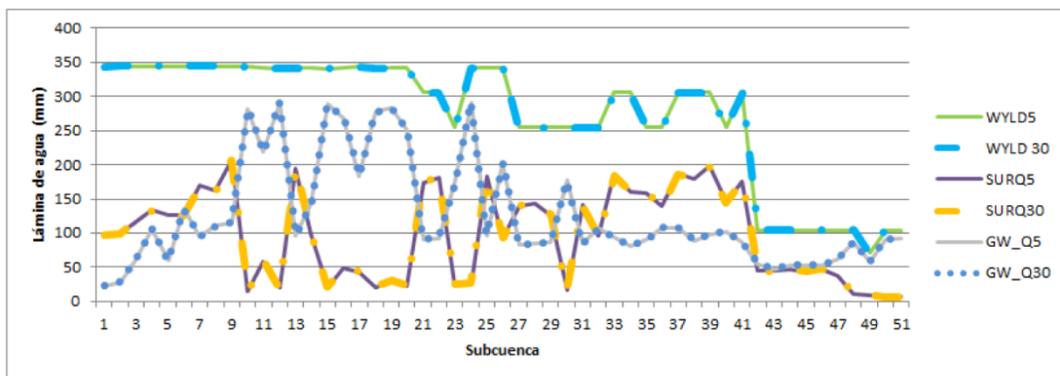
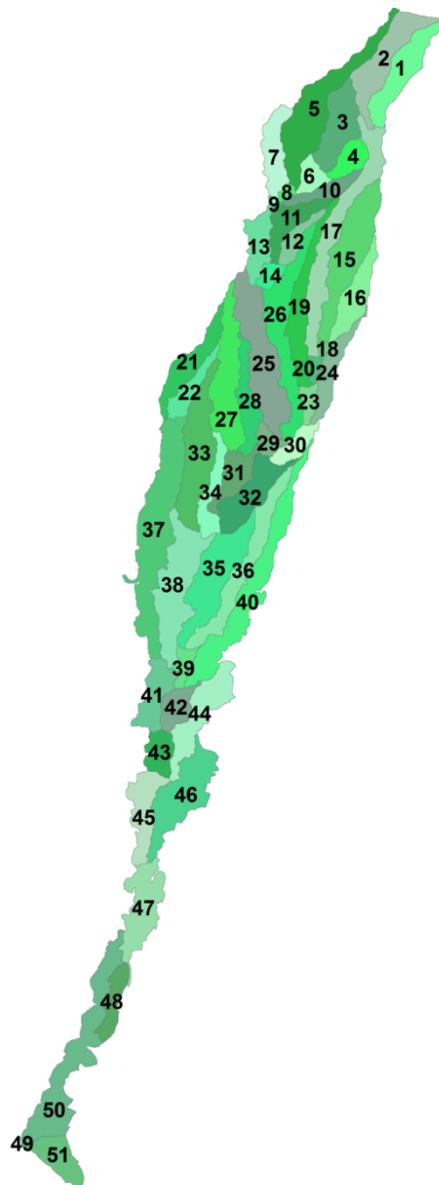
#### Cuadro 8. Diferencia entre el modelo calibrado y los escenarios con zonas ribereñas

Variable	Diferencia escenario 5m	Diferencia escenario 30m
WYLD	2.155701777	2.156851945
SURQ	0.519439821	0.559690499
GW_Q	2.131364778	2.103055476

Como se puede ver en la figura 17, la cantidad de agua que diferencia a los dos escenarios es imperceptible en cualquiera de los componentes del rendimiento de agua.



**Figura 16. Comparación del rendimiento de agua (WYLD) entre el escenario con zonas ribereñas de 5 metros y zonas ribereñas de 30 metros de ancho.**



**Figura 17. Análisis de rendimiento de agua (WYLD), cantidad de agua que escurre y llega al cauce (SURQ) y contribución del agua subterránea al caudal (GW\_Q)**

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Configuración del modelo inicial y descripción de la cuenca

El mapa de uso de suelo que se eligió para realizar la modelación se publicó en el año 2005, por lo que la información anterior a estos usos no se consideró en el proceso. Como se mencionó anteriormente, los cambios de uso de suelo en la zona de estudio han sido tan drásticos que casi ha desaparecido la vegetación natural y esto puede influir en el comportamiento de los caudales después de los años 80, cuando ocurrieron los cambios de uso más importantes.

Al comparar las pendientes con los caudales de salida de la cuenca se evidencia que existen varias subcuencas de la zona alta que aportan pequeños caudales al cauce principal a pesar de su alto porcentaje de pendiente. En la zona media que tiene pendientes dominantes mayores al 10%, estos cauces ya representan un gran aporte de caudal. Los cambios drásticos de pendiente hacen que una gran cantidad de agua se acumule en la zona baja en un solo cauce principal que tiene pendientes menores a 5%, lo que significa que todas las subcuencas ubicadas en esta zona sean susceptibles a inundaciones. Esta situación determina que la configuración de la red de drenaje y las altas pendientes propendan naturalmente a la acumulación de agua en la zona baja, situación que es independiente de la presencia de ciertos ecosistemas.

Los principales usos de suelo en las subcuencas con alto rendimiento de agua de la zona media y baja son agroecosistemas (café y pastizal cultivado). Las subcuencas de las zonas medias que transportan grandes caudales pasan por alguno de estos agroecosistemas, por lo que es importante manejar este tipo de usos de suelo para permitir la infiltración del agua hacia el acuífero y evitar que aumenten su aporte a la escorrentía.

Los tipos de suelos presentes en la cuenca influyen en el proceso de infiltración y en las dinámicas del acuífero con los cauces. La mayoría de los tipos de suelos presentes, tienen buena capacidad de infiltración según su grupo hidrológico, pero se puede mantener y mejorar esta capacidad con el manejo de la vegetación.

Con la experiencia de los eventos de 1998 y 2005 se puede ver que las subcuencas 5 y 6 aumentan su caudal de salida. Estas cuencas tienen más del 70% de su área en pendientes superiores a 20%, predomina el uso de suelo con café y los suelos tienen alto potencial de infiltración. En ambos eventos se encontró que el promedio mensual de lluvia en las subcuencas 5 y 6 eran similares, con una precipitación de 1476 mm en septiembre de 1998 y 1370 mm en octubre de 2005. Con esta cantidad de lluvia y bajo las características de las subcuencas descritas, el rol de los ecosistemas en el control de las inundaciones tiene que ser potenciado con obras de conservación y otro tipo de infraestructura.

- Variabilidad climática

Los cambios de altura en la cuenca determinan la distribución de las precipitaciones. Se presenta mayor cantidad de agua en las precipitaciones registradas a partir de los 300 m.s.n.m. Aunque el aumento de la precipitación no es proporcional al aumento de altura después de los 300 m.s.n.m., la cantidad de agua que precipita en las zonas altas es mucho mayor que la precipitación de las zonas bajas. Esto hace suponer que las subcuencas ubicadas a partir de esta altura tienen mayor influencia en el aporte de agua al caudal del río.

La estacionalidad de las precipitaciones tiene relación directa con las inundaciones reportadas, ya que los meses con mayor precipitación (especialmente septiembre) generan altos caudales a la salida de la cuenca. Aunque la época lluviosa inicia en mayo, la producción de caudales se da en los últimos meses (septiembre y octubre) de esta época.

El comportamiento de los caudales de la cuenca y las precipitaciones en función de la altura, permite concluir que existe un comportamiento diferente manera a lo largo del gradiente cabecera-desembocadura (ver anexo figura 28). En las subcuencas de la zona alta y media existen grandes precipitaciones, sin embargo, los mayores caudales se evidencian en las subcuencas de la zona baja.

- Caudales e inundaciones de la cuenca

Las inundaciones reportadas en el periodo de análisis tienen una importante influencia en los caudales promedio mensuales. Aunque el caudal promedio mensual ayuda a conocer una tendencia media, las inundaciones registradas en los meses de septiembre de 1969, 1990 y 1998 y octubre de 2005 se pueden evidenciar en los datos medidos y modelados a nivel mensual, ya que en estos años se presenta un caudal medio mensual superior a otros.

Los eventos reportados en los años 1998 por el huracán Javier y en el 2005 por el huracán Stan presentaron caudales muy superiores a los registrados ante otras inundaciones reportadas. El aporte de caudal en las subcuencas de la parte media y alta de la cuenca se incrementa en esos dos últimos eventos.

- Ajuste del modelo

La sobreestimación de caudales puede estar relacionado a una sobredimensión del flujo base y una baja evapotranspiración. Este patrón de desviación que se presenta los resultados requiere un proceso de calibración y validación de acuerdo a las recomendaciones de Neitsch y colegas (2004). Otros estudios presentan valores sobreestimados en la modelación de la escorrentía que pueden estar relacionados con la variabilidad de las lluvias (Grassman et al. 2007), la presencia de acuíferos (Tufford et al. 2013), azolvamiento de la sección transversal donde se ubica la estación hidrométrica (Torres et al. 2005). La sobreestimación y la

subestimación se presenta en varios estudios de escorrentía (Torres et al. 2005, Mata 2008, Wang et al. 2006) y en modelos a escalas regional en Mesoamérica denotan una subestimación de los caudales de aproximadamente 20% que puede estar asociada a la intercepción horizontal en las áreas montañosas tropicales (Imbach et al. 2010).

SWAT utiliza de forma predeterminada el método Penman- Monteith para modelar la evapotranspiración, sin embargo, Arnold y colegas (1998) recomiendan usar los métodos de Hargreaves o Priestley- Taylor cuando no se tiene datos de la radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Aunque se intentó corregir la baja evapotranspiración usando los métodos para estimar esta variable, no se obtuvieron resultados diferentes en el caudal de salida. También se realizaron cambios en los parámetros ESCO y CN2, que son muy sensibles a las predicciones que SWAT hace de la evapotranspiración (Wang et al. 2006), pero este proceso tampoco arrojó resultados adecuados.

Otros de procesos de calibración en cuencas que contienen un acuífero son muy sensibles a cambios en los parámetros que se asocian a la hidrogeología del sitio y normalmente presentan un buen ajuste con esos cambios (ver Silva 2010, Tufford et al. 2013). En este estudio se realizaron cambios en los parámetros ALPHA\_DF, GW\_DELAY, GWREVP, REVAPMN, CH\_K2 y GWQMN.

El valor de  $R^2$  obtenido en el proceso de calibración indica que el modelo puede explicar más del 92% de la variabilidad de los datos medidos mensualmente, con valores similares a otros estudios que utilizaron SWAT para modelación de la escorrentía (ver Wang et al. 2008a). Cabe señalar que este ajuste generó cambio en la aproximación de los caudales de recesión en los meses secos, mismos que alteraron su patrón de distribución con los nuevos valores de los parámetros calibrados.

- Variables de interés para el control de las inundaciones

En el evento de 2005 se evidencia un gran rendimiento de agua en las subcuencas de la zona alta y media, alcanzando valores superiores de rendimiento en comparación con los eventos de inundación de los otros años analizados. Estos resultados pueden estar relacionados con la variabilidad climática presentada en los últimos años de análisis o por la influencia del cambio de uso de suelo. Estudios que relacionan la influencia del cambio de uso de suelo (restauración) y la variabilidad climática, definen que la combinación de ambos aspectos puede explicar de mejor manera los cambios en el rendimiento de agua (Feng et al. 2012).

El rendimiento de agua es variable en los diferentes años analizados y el comportamiento de las subcuencas fue distinto en cada caso. Sin embargo, las subcuencas cercanas a la ciudad de Tapachula siempre presentaron altos rendimientos de agua, por lo que estas subcuencas son primordiales para el control de las inundaciones. El caudal de salida de las subcuencas cercanas a la ciudad de Tapachula indica que es un sitio muy vulnerable a las inundaciones, situación que se ratifica con otros informes (Vásquez et al. 2009, Mundo 2007). Los resultados de esta modelación pueden dar un indicio de la importancia del manejo de las subcuencas que atraviesan las zonas periurbanas y de la necesidad de una planificación

adecuada del crecimiento de la ciudad, ya que no se recomienda ocupar esta parte del territorio sin un análisis adecuado de los sitios propensos a inundación.

Aunque el rendimiento de agua se relaciona con la vegetación de la cuenca, con la capacidad del bosque para actuar como "esponja" reguladora del caudal (Bruijnzeel 1990, 2004) y a pesar de que se conoce que la remoción de biomasa forestal puede reflejar incrementos en la producción hídrica (Bruijnzeel 2004), el rol de la vegetación en el río Cahocán es limitado para aquellos años que se presentan inundaciones. El rendimiento de agua (*water yield*) por subcuencas es distinto para cada año con inundaciones, sin embargo, la intensidad de la inundación se relaciona más con la cantidad de agua precipitada en la parte alta de la cuenca que con la presencia de los ecosistemas.

Se requiere plantear escenarios de cambio de uso de suelo para verificar el rol de los agroecosistemas presentes en la cuenca con usos de suelo de sistemas agroforestales y pastizales. Aunque las inundaciones ocurridas en 1998 y 2005 se relacionan a grandes precipitaciones, estos usos de suelo aumentaron su área de cobertura desde 1980 y pueden contribuir al aumento del escurrimiento y del rendimiento de agua.

Las subcuencas de la parte alta presentan características que contribuyen al proceso de inundación, como altas pendientes y presencia de tipos de suelo con baja capacidad de infiltración y alta producción de escorrentía. Sin embargo, estas variables son más estáticas que los usos de suelo y la precipitación, por lo que ambos factores pueden incidir en el proceso de inundación. De acuerdo a los resultados encontrados en la modelación, las altas precipitaciones que se registraron en los años de inundación son la principal razón para la generación de altos caudales y no tanto los usos de suelo presentes, ya que se usó el mismo mapa base para todos los años de estudio.

Aunque las subcuencas de la parte alta no presenten caudales superiores a los 5 m<sup>3</sup>/s, la suma de todos los aportes de caudal generados en esa zona hace que se acumule gran cantidad de agua en el cauce principal. Esto se evidencia en la acumulación de caudal que se reportan en las pequeñas intercuencas (8 y 9) que pueden alcanzar valores entre 10 y 20 m<sup>3</sup>/s para meses con eventos extremos como los reportados en los años 1998 y 2005.

- Escenarios con zonas ribereñas y ecosistemas

Aunque los humedales de las zonas ribereñas ocupan un área mayor que el escenario actual, su presencia como un uso de suelo adicional no genera cambios importantes en la escorrentía ni en el rendimiento de agua. El nivel de detalle y los cambios temporales pequeños de los usos de suelo no son determinantes en los cambios en la escorrentía, más influyen en otros factores como los nutrientes (Huang et al. 2013).

La presencia de las zonas ribereñas como uso de suelo denominado "humedal" puede subestimar el rol de estos ecosistemas a nivel de HRUs y subcuencas, ya que esta categoría de uso de suelo en SWAT se basa en información general de una sola especie. Para mejorar la modelación de los humedales dentro de la cuenca, se requiere recolectar más información que permita manipular el archivo "Pond" (.pnd) que contiene parámetros para este tipo de

ecosistemas. La información usada en otro estudio similar (Wang et al. 2008b) incluye datos previos de la altura que alcanza el agua y calibra en función de estaciones hidrométricas algunos otros parámetros del archivo "Pond".

La aplicación del concepto de adaptación basada en ecosistemas tiene sus limitantes para cuencas que presentan características geomorfológicas que las hacen propensas a grandes acumulaciones de caudal en un solo cauce principal. En el caso de la cuenca del río Cahoacán, los ecosistemas pueden cumplir varios roles importantes en la hidrología de la cuenca, sin embargo, la implementación de zonas ribereñas como se plantearon en este estudio no generará disminuciones importantes de caudal ni evitará que los caudales que generan inundaciones sean controlados.

Se requiere un análisis más detallado de la función de los ecosistemas para cuantificar sus limitantes respecto al control de las inundaciones, sin embargo, se recomienda mantener y mejorar la cobertura arbórea en las subcuencas de la zona alta que tienen altos rendimientos de agua. Los usos de suelo y los ecosistemas que se definen por estos usos, son la principal variable a manejar ante las características geomorfológicas y climáticas de la cuenca.

## **5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abbaspour, KC; Johnson, CS; Van Genuchten, MT. 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal* 3: 1340-1352.
- Abbaspour, KC. 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual. Eawag Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. 103 p.
- Abraham, LZ; Roehrig, J; Chekol, DA. 2007. Calibration and Validation of SWAT Hydrologic Model for Watershed, Ethiopia. Conference on International Agricultural Research for Development (en línea). Consultado 3 ene 2014. Disponible en: <http://www.tropentag.de/2007/abstracts/full/126.pdf>
- Amoroso, A. 2010. Desarrollo y validación de una metodología para la planificación participativa de una microcuenca en el Estado de Chiapas, México. Tesis Mg. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 186 p.
- Arnold, JG; Moriasi, DN; Gassman, PW; Abbaspour, KC; White, MJ; Srinivasan, R; Snti, C; Harmel, RD; van Griensven, A; Van Liew, MW; Kannan, N; Jha, MK. 2012a. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 55(4): 1491-1508.
- Arnold, JG.; Kiniry, JR.; Srinivasan, R.; Williams, JR.; Haney, EB.; Neitsch, S. L. 2012b. Input/Output documentation, version 2012. Texas Water Resources Institute. Consultado 5

jun 2013. Disponible en: <http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>

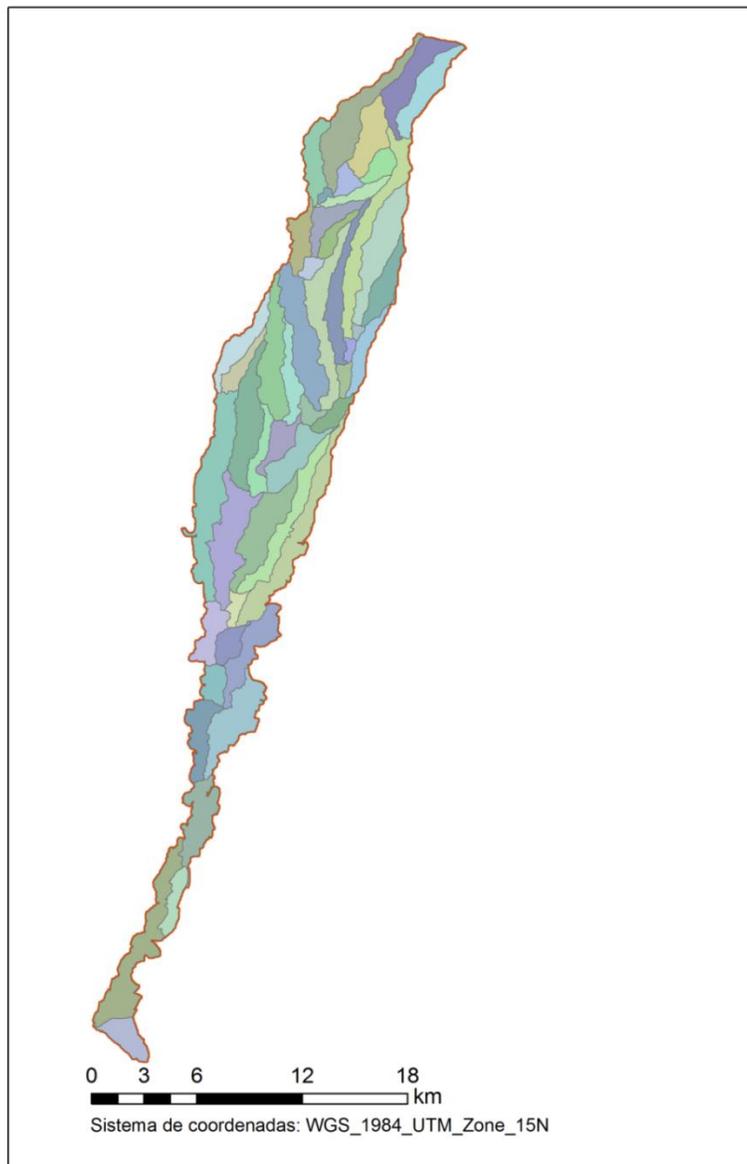
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
- Baumann, J. 2000. Plan de conservación de suelos y agua para la Costa de Chiapas. México, D. F. 148 p.
- Bruijnzeel, L. A. 1990. Hydrology of Moist Tropical Forest and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. UNESCO, Paris y Vrije University, The Netherlands. 226p.
- Bruijnzeel, L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forest: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 185-228.
- Castillo, B. 2010. Análisis integral del riesgo a deslizamientos e inundaciones en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México. Tesis Mg. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 149 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, MX). 2009. Restauración de ecosistemas forestales: Guía básica para comunicadores. Jalisco, MX. 69 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, MX) e IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2008. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales- BANDAS. Consultado 15 may 2013. Disponible en: [http://www.imta.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=145](http://www.imta.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=145)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, MX). 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Soconusco, Estado de Chiapas. México, D. F. 16 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, MX). 2012. Atlas digital del agua México 2012: Regiones hidrológico-administrativas. Consultado 2 enero 2014. Disponible en: [http://www.conagua.gob.mx/atlas/mapa/07/index\\_svg.html](http://www.conagua.gob.mx/atlas/mapa/07/index_svg.html)
- De la Fuente, J; Lisle, T; McKean, J. 2008. Deslizamientos de tierra, erosión de canales y sedimentación en la vertiente del Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas, México, durante el Huracán Stan en 2005: Reseña de campo con recomendaciones Informe Final. The Nature Conservancy. Chiapas, MX. 53 p.
- Feng, XM; Sun, G; Fu, BJ; Su, CH; Lui, Y; Lamparski, H. 2012. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss* 9: 4161-4191.
- Feyereisen, GW; Strickland, TC; Bosch, DD; Sullivan, DG. 2007. Evaluation of SWAT Manual Calibration and Input Parameter Sensitivity in the Little River Watershed. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3): 843-855.
- Gassman, PW; Reyes, MR; Green, CH; Arnold, JG. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(4): 1211-1250.

- Huang, J; Zhou, P; Zhou, Z; Huang, Y. 2013. Assessing the influence of land use and land cover datasets with different points in time and levels of detail on watershed modeling in the North River watershed, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10: 144-157
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B; Poupsard, O; Ciais, P; Corrales, L; Mahe, G. 2010. Climatology- based regional modeling of potential vegetation and average annual long-term runoff for Mesoamerica. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 1-17.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). 2009. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación Serie IV (conjunto Nacional). Edición 1a. Aguascalientes, MX. Escala 1:250 000.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). 2013. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0). Consultado 30 may 2013. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>
- Jayakrishnan, R; Srinivasan, R; Santhi, C; Arnold, JG. 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological processes* 19: 749-762.
- Mata, H. 2008. El modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México. Tesis Mg. Sc. Montecillo, MX, Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. 157 p.
- Müller, A; Reinstorf, F. 2011. Exploration of land-use scenarios for flood hazard modelling- the case of Santiago de Chile. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8: 3993-4024.
- Mundo, M. D. 2007. Tercer simposio regional sobre hidráulica de ríos. Mapa de riesgo y protección de cauces para evitar inundaciones en el río Coatán en Tapachula, Chiapas. [http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2007/index\\_archivos/C/4.pdf](http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2007/index_archivos/C/4.pdf)
- Murcia, H. F; Macías, J. L. 2009. Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(1): 1-17.
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR. 2002. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual: Version 2000*. Texas Water Resources Institute. Texas, USA. 472p.
- Plan de Gestión Integral de la Cuenca del Río Cahoacán. 2010. Descripción de la cuenca. Gobierno del Estado de Chiapas, Comité de Cuenca Río Cahoacán, CONAGUA, Sociedad de Historia Natural del Soconusco, Municipio de Tuxtla Chico. 122 p.
- Quintero, M, ed. 2010. *Servicios ambientales hidrológicos en la región andina: Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales*. Lima, PE. 277 p.
- Ramos Hernández, S. G. 1979. *Estudios Edafológicos de una zona cafetalera del Soconusco, Estado de Chiapas*. Tesis. 179 p.

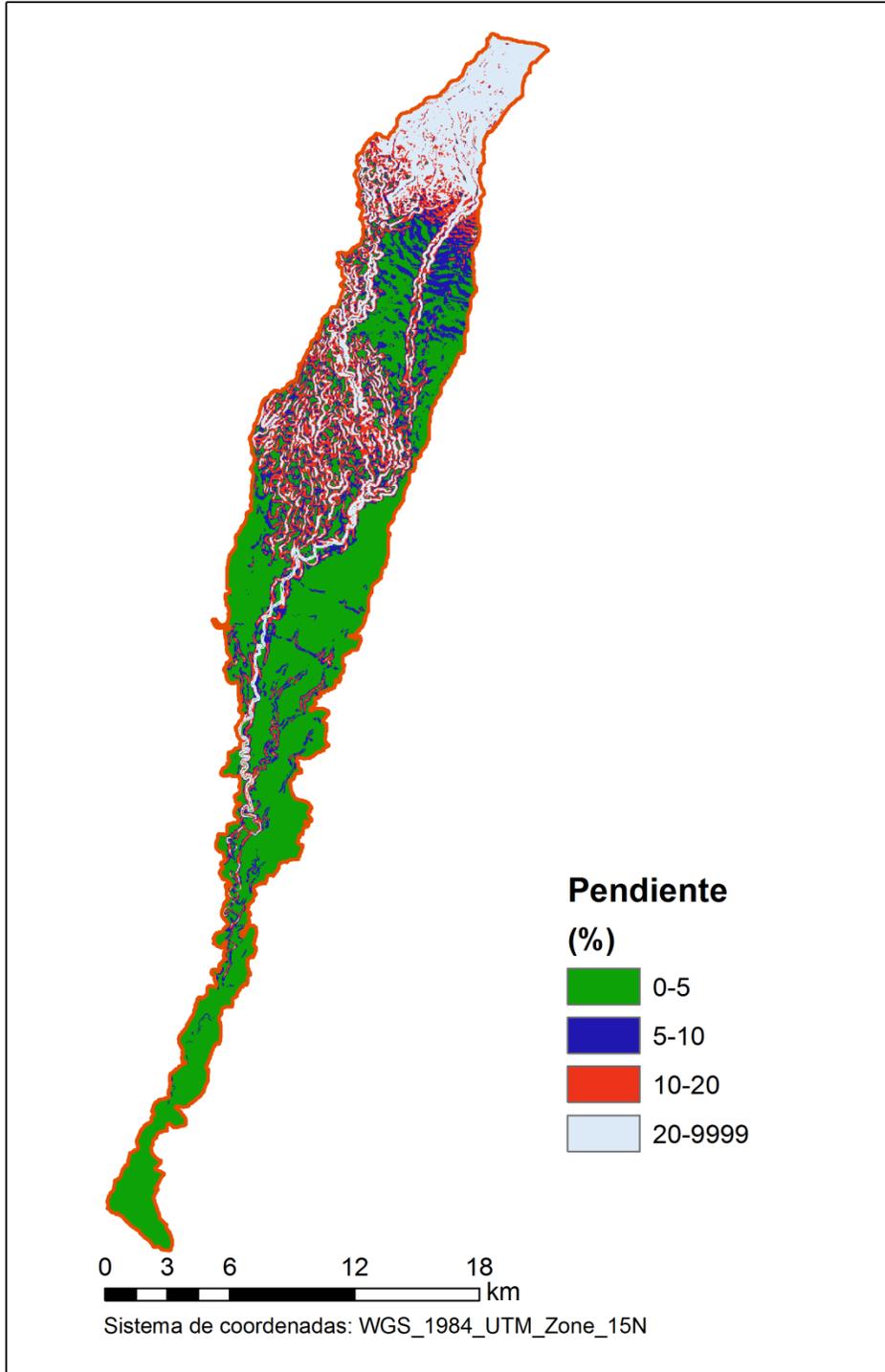
- Santacruz, G. 2006. Análisis de la explotación, manejo e impacto sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Cahoacán (Chiapas). Tesis Mg. Sc. Mexico D. F. Universidad Nacional Autónoma de México. 97 p.
- Santacruz, G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México. *Aqua-LAC* 3(1): 45-54.
- Torres, E; Mejía, E; Cortés, J; Palacios, E; Exebio, A. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* 39(5): 481-490.
- Tufford , D; Samadi, S; Carbone, G. 2013. Incorporating Sallow Aquifer Uncertainty to Streamflow Prediction in a Forested Wetland Coastal Plain Watershed. GSA Annual Meeting. Denver, USA (en línea). Consultado 5 ene 2014. Disponible en: [http://www.cisa.sc.edu/Pubs/Presentations/Posters/Presentations/2013\\_Tufford\\_%20Incorporating%20Shallow%20Aquifer%20Uncertainty%20to%20Streamflow%20Prediction%20in%20a%20Forested%20Wetland%20Coastal%20Plain%20Watershed.pdf](http://www.cisa.sc.edu/Pubs/Presentations/Posters/Presentations/2013_Tufford_%20Incorporating%20Shallow%20Aquifer%20Uncertainty%20to%20Streamflow%20Prediction%20in%20a%20Forested%20Wetland%20Coastal%20Plain%20Watershed.pdf)
- Uribe, N. 2010. Soil and Water Assessment Tool: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) y CGIAR Challenge Program on wáter and food. Consultado 3 abr 2013. Disponible en <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Vásquez, M. A; Espíritu, G; Morales, H; Montoya, G; Navarrete, D. 2009. Riesgo por inundaciones en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México: Investigación para su ordenamiento ecológico y desarrollo urbano (en línea). Consultado 12 dic 2013. Disponible en: [http://www.unisdr.org/files/11118\\_eird.pdf](http://www.unisdr.org/files/11118_eird.pdf)
- Wang, X; Melesse, AM; Yang, W. 2006. Influences of Potential Evapotranspiration Estimation Methods on SWAT's Hydrologic Simulation in a Northwestern Minnesota Watershed. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 49(6): 1755-1771.
- Wang, X; Shang, S; Yang, W; Melesse, AM. 2008a. Simulation of an Agricultural Watershed Using an Improved Curve Number Method in SWAT. *American Society of an Agricultural and Biological Engineers* 51(4): 1323-1339.
- Wang, X; Yang, W; Melesse, AM. 2008b. Using Hidrologic Equivalent Wetland Concept within SWAT to Estimate Streamflow in Watersheds with Numerous Wetlands. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 51(1): 55-72
- Winchel, M; Srinivasan, R; Di Luzio, M; Arnold, J. 2013. ArcSWAT Interface for SWAT 2012: User's Guide. Texas AgriLife Research, USDA Agricultural Research Service. Texas, USA. 464
- Wood, P; Hannah, D; Sadler, J. (Ed). 2007. Hydroecology and ecohydrology: past, present and future. Jhon Wiley and Sons Ltda. England. 466 p.

## **6. ANEXOS**

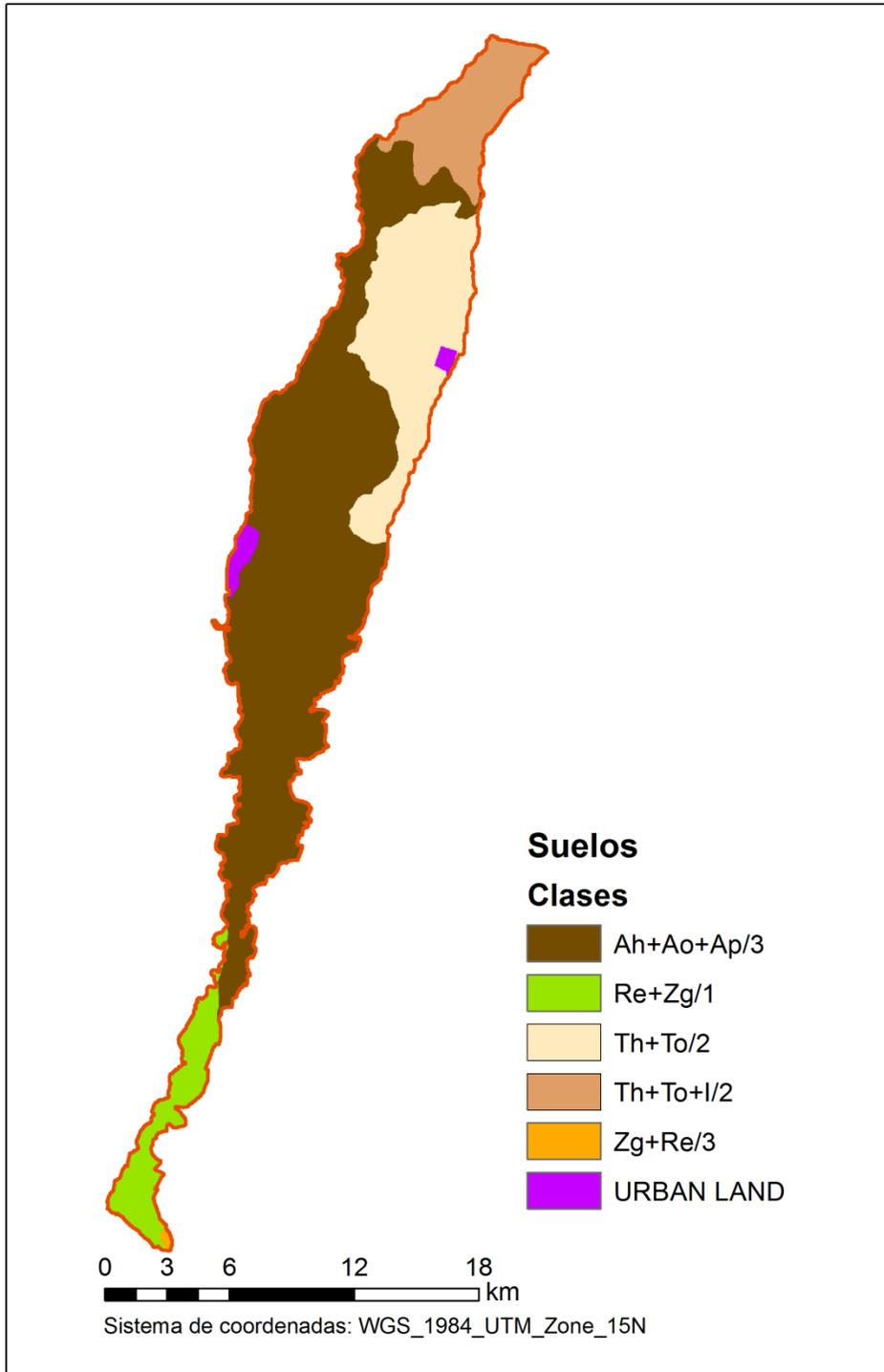
## Mapas detallados de la cuenca



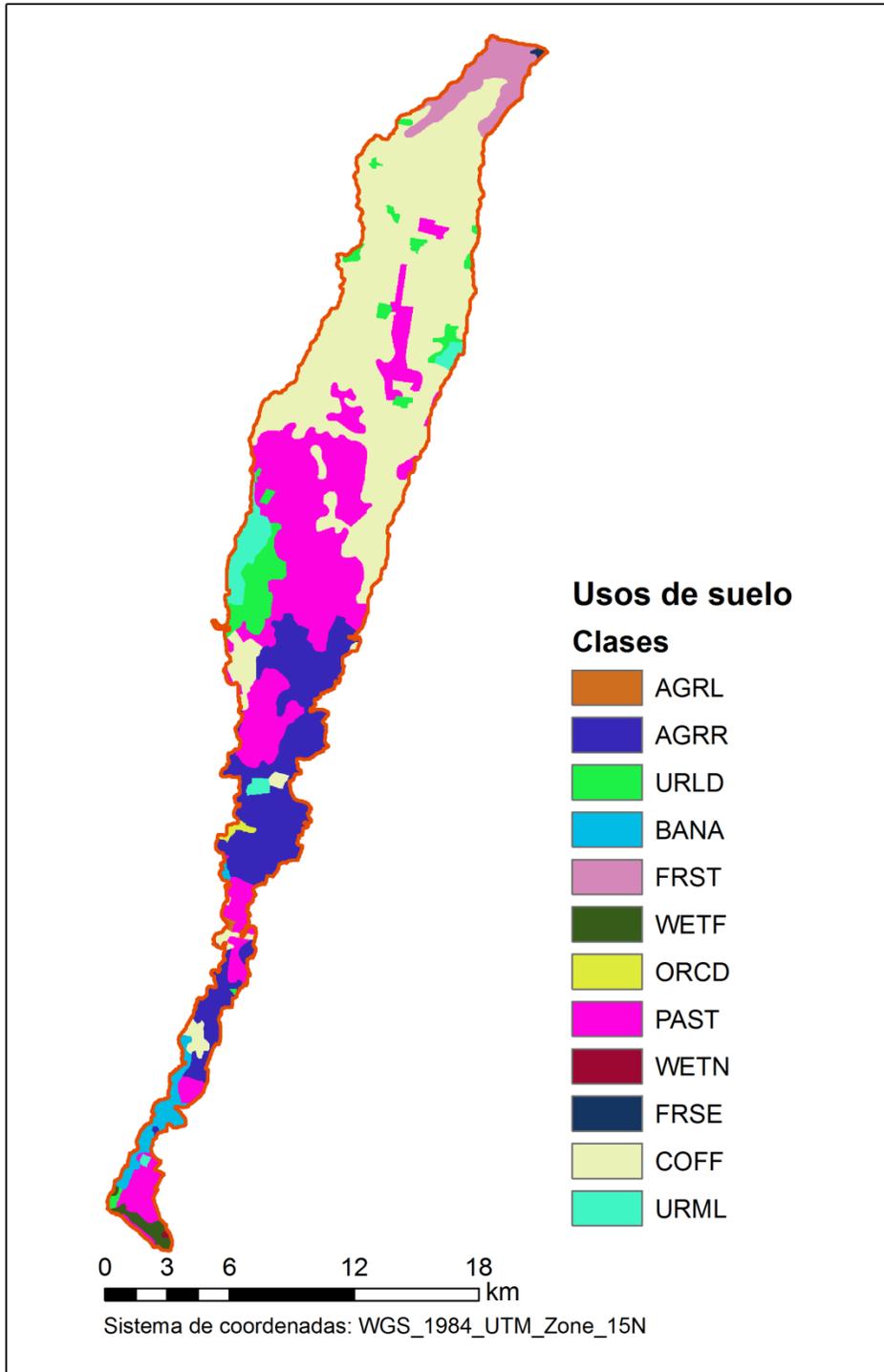
**Figura 18. Mapa de división de las 51 subcuencas en la cuenca del río Cahoacán**



**Figura 19. Mapa de pendientes de la cuenca del río Cahoacán**

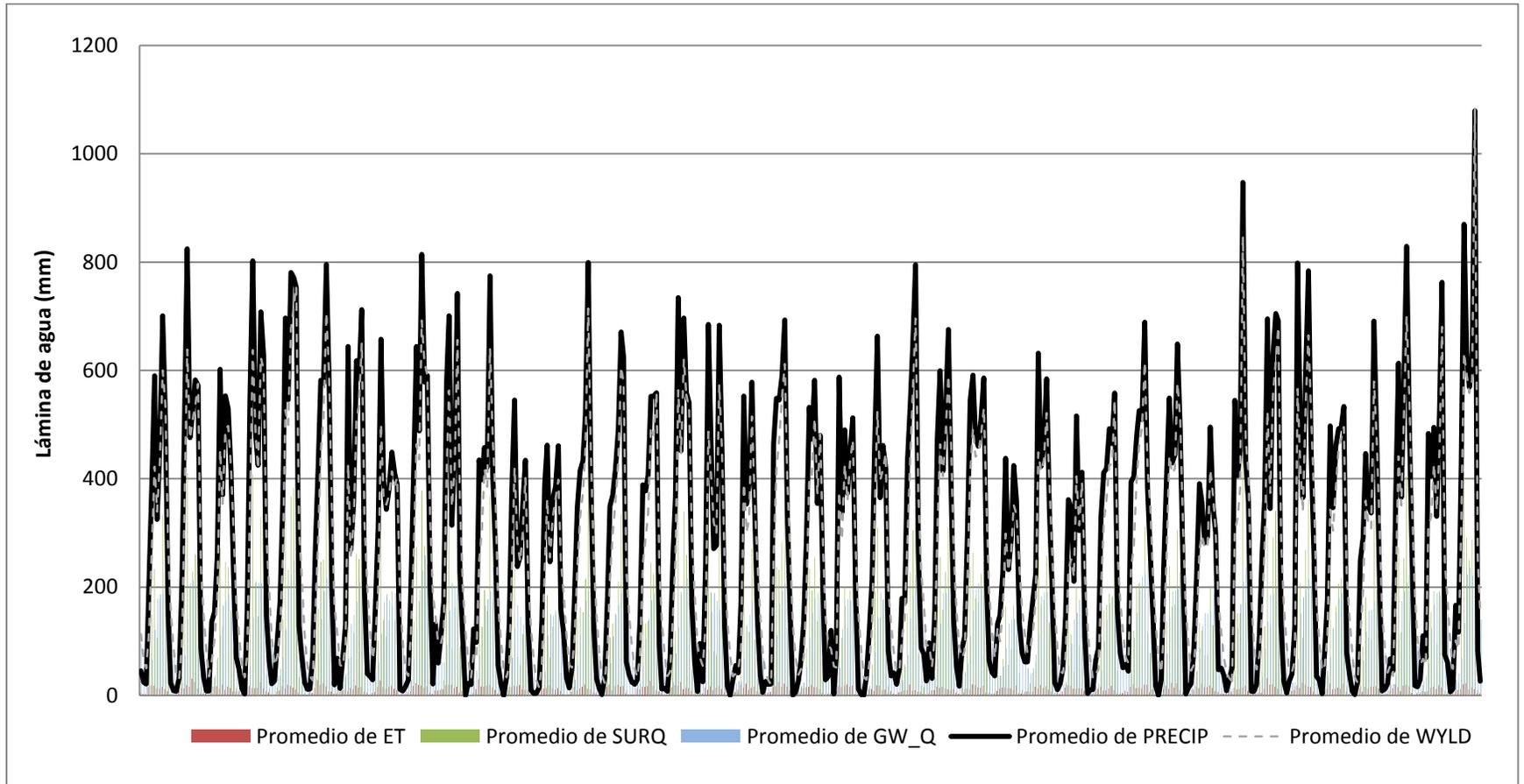


**Figura 20. Mapa de tipos de suelos para la cuenca del río Cahoacán**



**Figura 21. Mapa de usos de suelo de acuerdo a categorías de SWAT para la cuenca del río Cahocán**

## Comparación de algunas variables del ciclo hidrológico



**Figura 22. Comparación de la cantidad de agua precipitada que aporta al rendimiento de agua, promedio mensual de lámina de agua evapotranspirada, flujo base y escorrentía superficial.**

### Comparación de caudales de salida a nivel de subcuencas entre modelo calibrado y sin calibrar

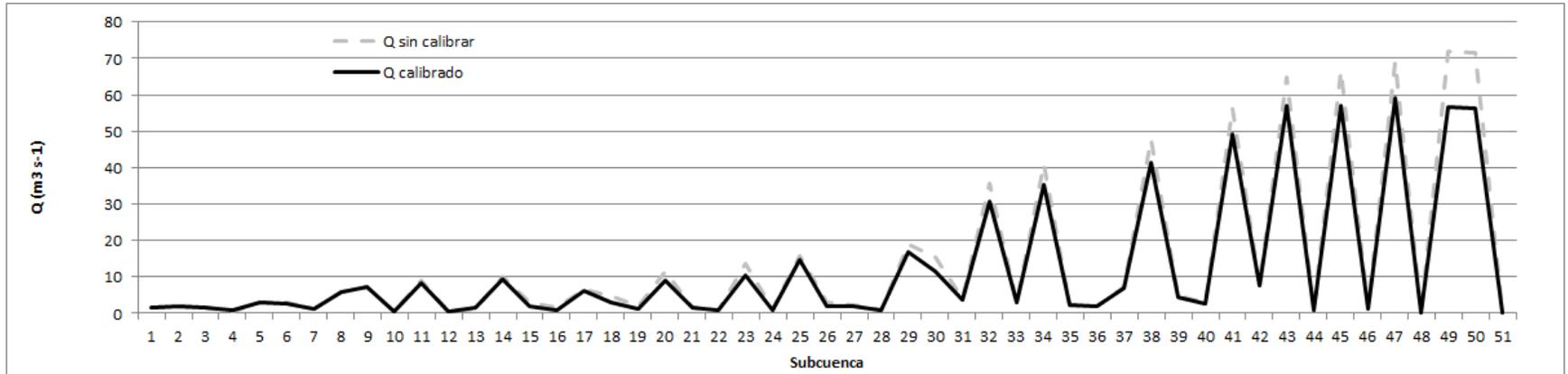


Figura 23. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de septiembre de 1969.

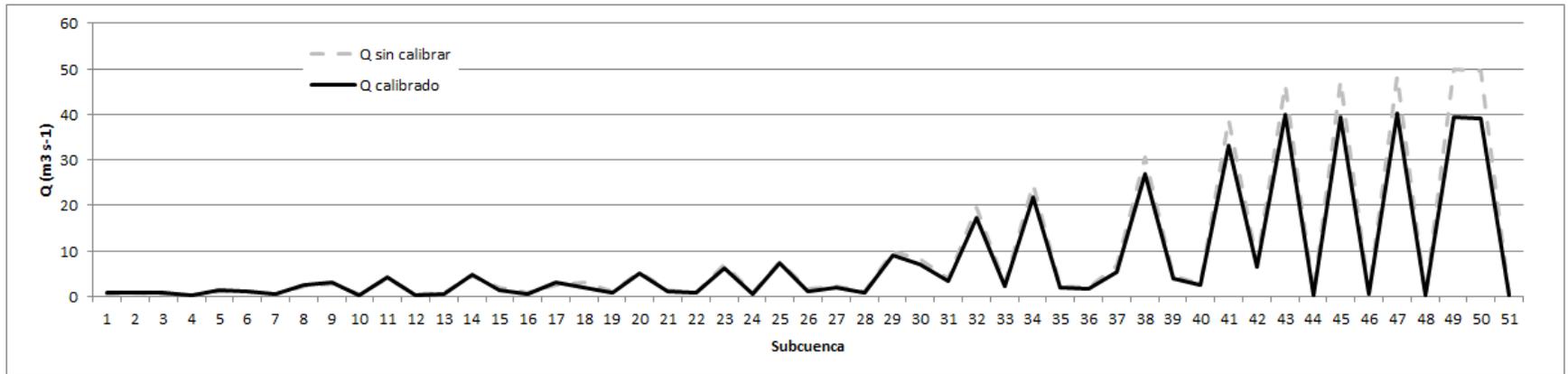
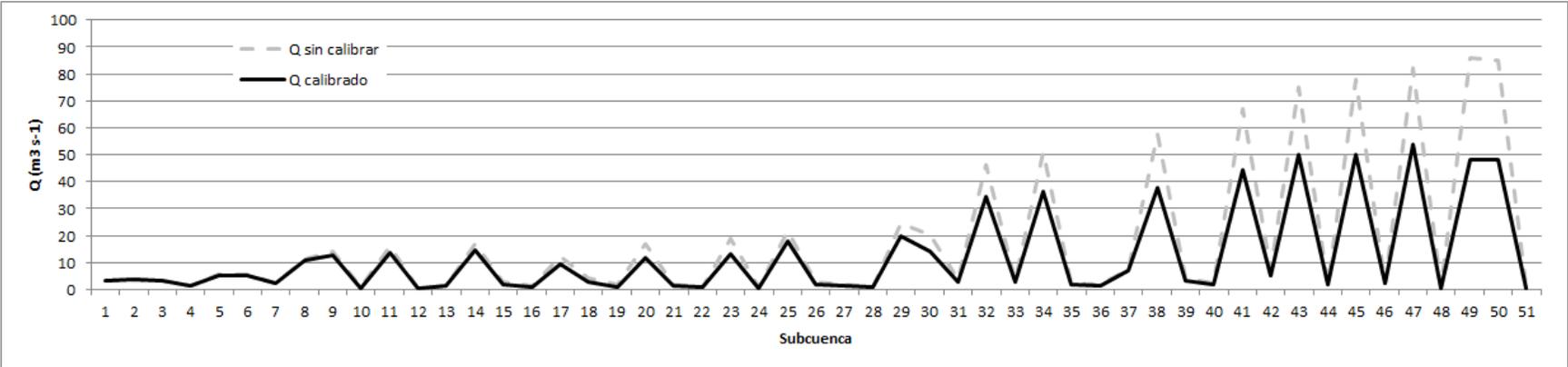
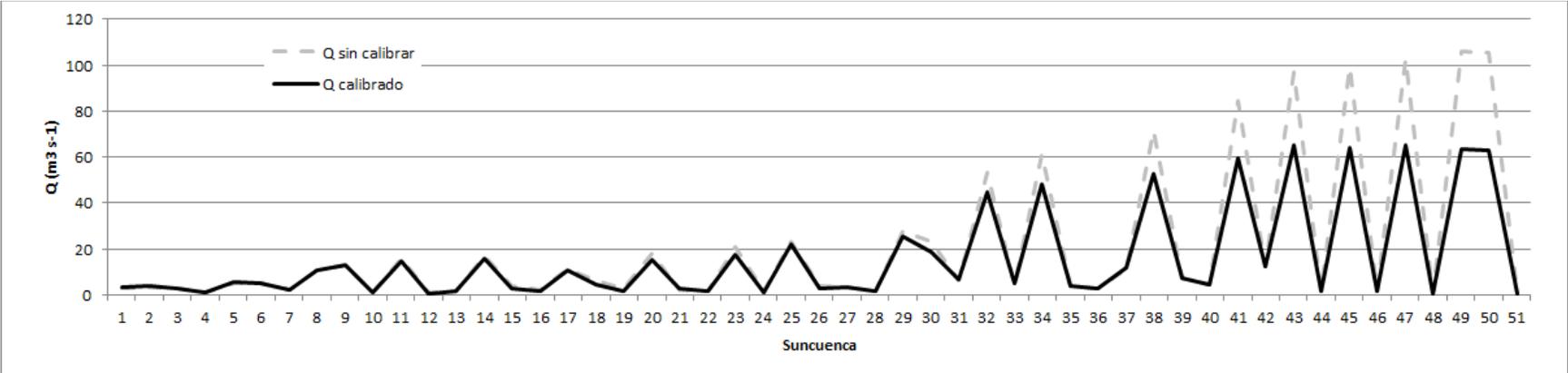


Figura 24. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de septiembre de 1990.

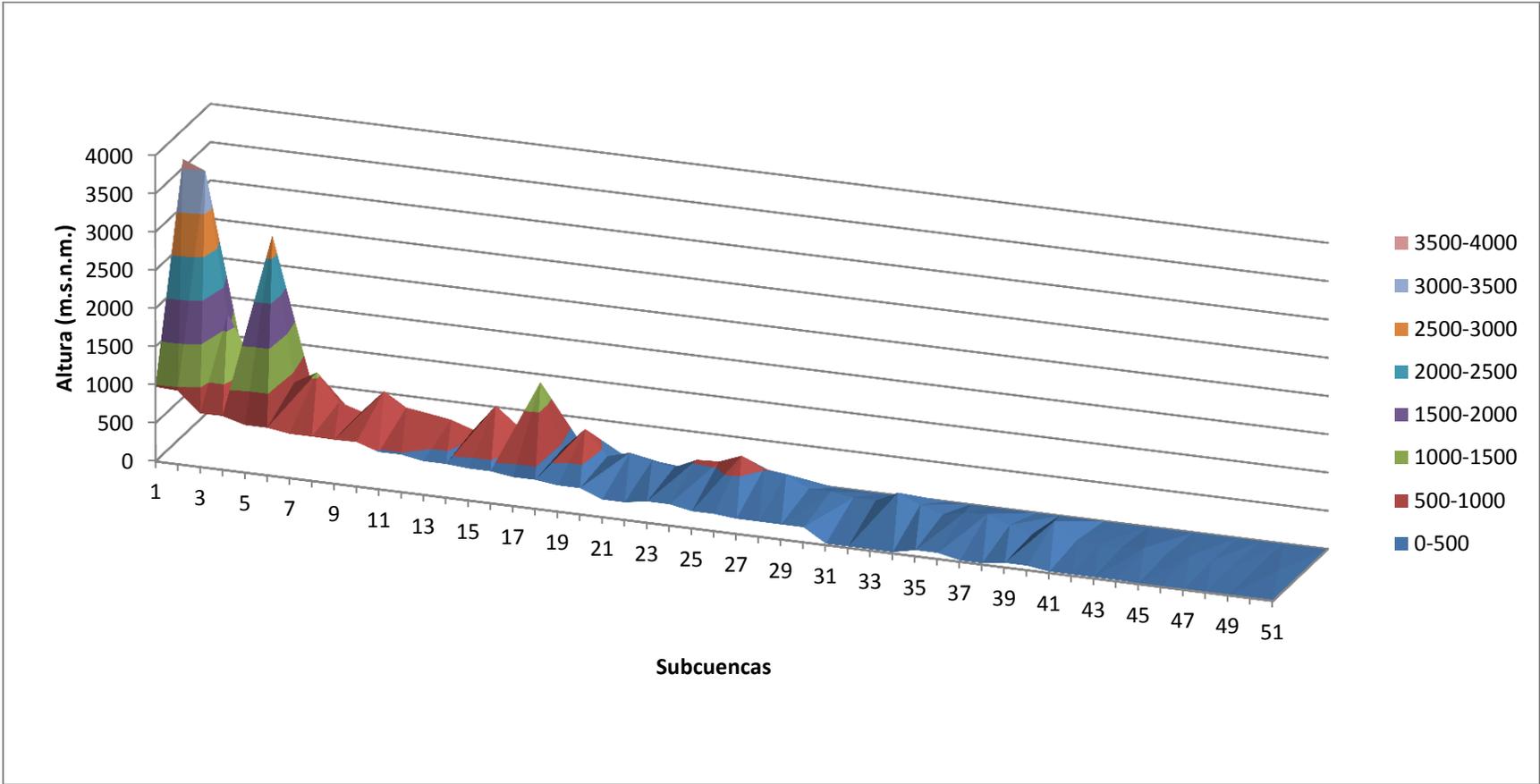


**Figura 25. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de septiembre de 1998**

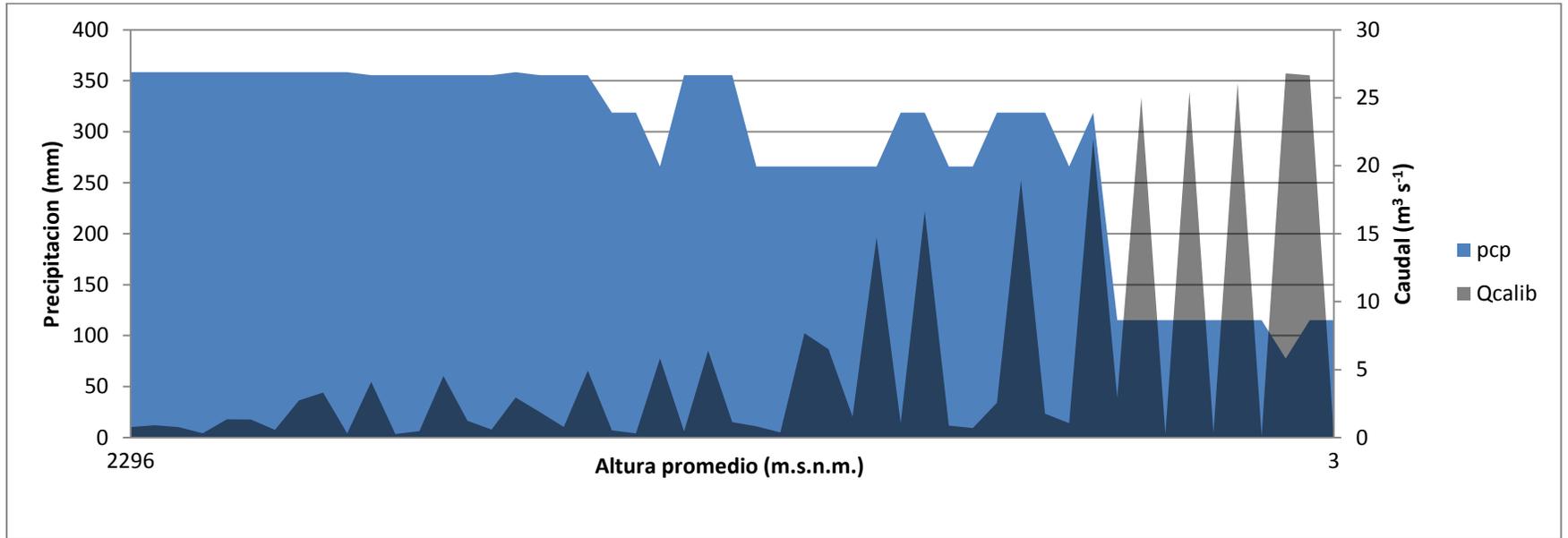


**Figura 26. Caudales de salida a nivel de subcuencas para el mes de octubre de 2005**

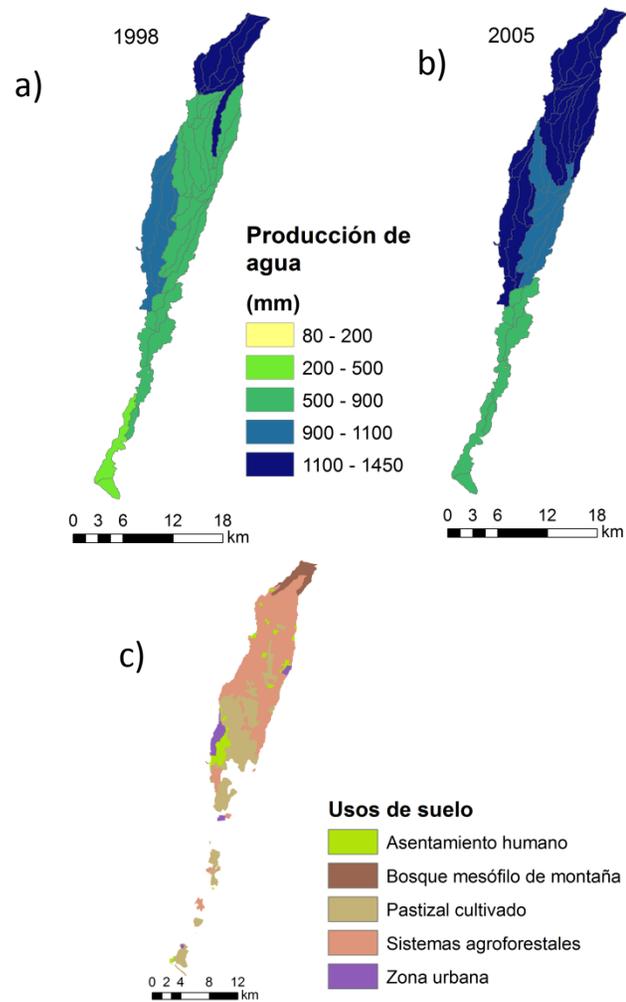
**Aspectos biofísicos de la cuenca**



**Figura 27. Variaciones de alturas máximas y mínimas (m.s.n.m.) en las subcuencas**



**Figura 28. Variación de la precipitación media mensual (mm) y los caudales de salida ( $m^3 s^{-1}$ ) a diferentes alturas promedio de las subcuencas.**



**Figura 29. Rendimiento mensual de agua (mm) por subcuencas durante el huracán Javier en septiembre de 1998 (a), rendimiento mensual de agua (mm) por subcuencas durante el huracán Stan en octubre de 2005 (b), principales usos de suelo en las subcuencas con mayor rendimiento de agua (c) (modelo sin calibrar)**